

Ueber die Möglichkeit zerstörungsfreier Werkstoffprüfung mittels Ultraschall- Abbildungen

Autor(en): **Pohlmann, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **67 (1949)**

Heft 6

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-84004>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Um jede weitere Durchnässung des bergseitigen Geländes zu verhindern, wurde der flache Teil desselben mit Notdächern vollständig überdeckt, die rutschenden Böschungen mit einer Blachen-Abdeckung versehen und ausserdem das anfallende bergseitige Niederschlagswasser durch einen Sickerrohr-Strang seitlich abgeleitet. Den Böschungsfuss selbst spriessete man in durchgehender Tag- und Nacharbeit kräftig ab. Sofort anschliessend wurde in zahlreichen, kurzen Etappen das aus Bild 1 ersichtliche, armierte Beton-Massiv in Kellermauerhöhe ausgeführt.

Die feste Lagerung der tieferen, noch trockenen Grundmoräne verhinderte einen Grundbruch, sodass das bergseitige Beton-Massiv bis Ende Januar 1948 fertig betoniert werden konnte. Spriess-Wände und -Hölzer waren dabei starkem Druck und grossen Deformationen ausgesetzt und zeigten

ständig die Tendenz, sich zu heben, weshalb sie bestmöglich nach unten verankert werden mussten. Durch sofort anschliessendes Betonieren von Fundament-Querriegeln und Keller-Querwänden sowie der massiven Kellerdecke wurde die bergseitige Mauer raschmöglichst gesichert. Nachher konnte der Neubau normal hochgeführt werden, in der aus Bild 1 ersichtlichen Ausbildung der Bergseite. Die ständig durchgeführten Präzisionsnivelements des oberliegenden Wohnhauses haben innert zehn Monaten eine maximale Setzung von 1 mm ergeben.

Bemerkenswert ist, dass die allerdings nur 7 m hohe bergseitige Wand 2,5:1 einer nahen Baugrube in ähnlichem Moränenmaterial, etwa zu gleicher Zeit ausgehoben, dank einer 10 cm starken, armierten Betonverkleidung keine Bewegung aufwies.
Ad. Zuppinger, Ing.

Ueber die Möglichkeit zerstörungsfreier Werkstoffprüfung mittels Ultraschall-Abbildungen

Von Dr. R. POHLMAN, Zürich-Wollishofen

DK 620.179.16

1. Einleitung

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung nimmt in der modernen Technik einen immer breiter werdenden Raum ein. Diese Tatsache ergibt sich aus den stets wachsenden Anforderungen, die bei grösstmöglicher Material- und Gewichtsersparnis — z. B. in der Flugzeugindustrie — an die Werkstoffe gestellt werden. Eine Pauschalprüfung der Werkstücke oder gar nur des Werkstoffes vor seiner Verarbeitung genügt nicht, da durch die Verarbeitung selbst noch zahlreiche Materialfehler entstehen können. Deshalb muss das fertige Werkstück vor seinem Einbau gründlich geprüft werden, besonders wenn es sich um lebenswichtige Teile handelt.

Die magnetischen Verfahren haben den Vorzug der Einfachheit, aber den Nachteil, dass sie nur auf Ferromagnetika anwendbar und nur für Fehler in Nähe der Oberfläche geeignet sind. Die Röntgendurchleuchtung kann in vielen Fällen mit gutem Erfolg eingesetzt werden, versagt aber oft, besonders wenn es sich um den Nachweis dünner Materialtrennungen ($< 1,5\%$ der durchstrahlten Metalldicke) und komplizierte Formgebung des Prüflings handelt. Ausserdem ist der Aufwand für eine Röntgendurchleuchtung dickerer Stücke verhältnismässig gross, weil die Metalle für die Röntgenstrahlung starke Absorber darstellen.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei der Untersuchung mit *ultraakustischen Wellen* [1]*. Für sie sind feste Körper, insbesondere die technisch wichtigen Metalle, besonders gute Leiter, und es werden nur geringe Energien benötigt, um selbst grosse Schichtdicken zu durchdringen. Dünne Spalten verhindern bereits die Ausbreitung der Druck- und Bewegungsgrössen und machen sich somit stark bemerkbar. Trockene Spalten, wie sie als «Dopplungen» (ausgewalzte Lunker, die zu einer inneren, der Plattenfläche parallelen Aufspaltung führen) in Walzblechen auftreten, können durch Ultraschallwellen noch bis zu extrem geringen Dicken von 10^{-6} mm mit Sicherheit nachgewiesen werden. An die Oberfläche tretende Risse von Werkstücken, die bereits in Betrieb gewesen sind (Achsen usw.) und meist kapillar Oel eingesogen haben, sind dagegen erst in Dicken von 10^{-2} mm feststellbar.

Die prinzipiellen Möglichkeiten der Materialuntersuchung mit Ultraschall sind schon frühzeitig von Sokoloff [2] erkannt worden. Sokoloff leitet von der einen Seite in das zu untersuchende Stück Ultraschall ein und tastet es von der anderen Seite mit einem entsprechenden Empfänger ab. Befindet sich eine Störung zwischen beiden, so entsteht hinter dem Fehler ein «Schallschatten» (vgl. Bild 5 in [1]). Der Rückgang der Schallintensität ist dann umso merklicher, je grösser die Störung, je geringer ihre Tiefenlage (Abstand Störung-Empfänger) und je kleiner die benutzte Wellenlänge ist. Aus Bild 1, das derartige Fehlererkennbarkeitskurven nach Kruse [3] für einen Empfängerdurchmesser «0» wiedergibt, erkennt man, dass z. B. bei einem Empfänger von 10 mm Durchmesser und 3 MHz eine Störung in 20 mm Tiefe mindestens 19 mm gross sein oder wenigstens aus entsprechend zahlreichen kleinen Fehlstellen bestehen muss. Gerade der besondere Vorzug, mit Ultraschall grosse Schichtdicken durchstrahlen zu können, wird durch die stark abfallende Fehlererkennbarkeit in grösseren Tiefen illusorisch gemacht!

*) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

An diesem Punkt setzt das in den angelsächsischen Ländern entwickelte Echowverfahren ein (vgl. hierzu die Bilder 11 und 14 bis 17 in [1]). Seine Fehlererkennbarkeit ist zwar wesentlich besser, es unterliegt dafür aber anderen Einschränkungen (Abhängigkeit vom Reflexionswinkel der gesuchten Spaltebene, schlechte Anwendbarkeit auf kleine Werkstücke und in der Nähe der Oberfläche liegende Störungen infolge der zu kurzen Laufzeiten usw.).

Im folgenden soll nun ein Verfahren beschrieben werden, über das kürzlich berichtet wurde [4]. Es beruht auf der Möglichkeit, schalleitende Medien mit Hilfe eines schalloptischen Abbildungsvorganges zu durchleuchten [5]. Das Wort «Durchleuchtung» möge darauf hindeuten, dass es sich um einen Vorgang handelt, der der üblichen Licht- oder Röntgendurchleuchtung sehr ähnlich ist, wobei in unserem Falle jedoch Schallwellen, insbesondere hochfrequente Ultraschallwellen, die Funktion der elektromagnetischen Wellen übernehmen und ein auf einem Schirm sichtbares Bild erzeugen.

2. Das Entstehen der schalloptischen Abbildung

Der Vorgang einer schalloptischen Abbildung ist so zu denken, dass man in das zu untersuchende Medium Ultraschallwellen einstrahlt. Diese werden von einer Schalllinse gesammelt und auf einen Bildwandler fokussiert. Befinden sich im Untersuchungsmedium Störungen (Lunker, Seigerungen, Risse, Doppelungen u. a. m.), so werden sie mit Hilfe der Schalllinse auf dem Bildwandler abgebildet. Der Bildwandler (s. unten) setzt das zunächst unsichtbare und unhörbare Schallbild in ein sichtbares Bild um, und die gesuchten Störungen und Materialfehler werden sichtbar. Prinzipiell ist auch eine Abbildung ohne Linse nach Art eines Schattensbildes möglich, jedoch wäre man für diesen Fall wieder auf die Existenz des Schallschattens angewiesen und erhielte die

gleiche schlechte Fehlererkennbarkeit, die das oben beschriebene Sokoloffverfahren besitzt. Ausserdem hinge die Bildschärfe stark von der Winkelverteilung des einfallenden Strahlenbündels ab, und die Abbildungsgüte stände weit hinter der einer Linsenabbildung zurück.

Bild 2 zeigt den Vorgang einer schalloptischen Abbildung in Analogie zur lichtoptischen, links im Aufsichtverfahren, bei dem sich Schallstrahler und -empfänger auf der gleichen Seite des Objektes befinden, rechts im Durchsichtverfahren mit Strahler und Empfänger auf einander gegenüberliegenden Seiten.

Im auffallenden Strahlengang ist die Grösse des Bildfeldes im wesentlichen

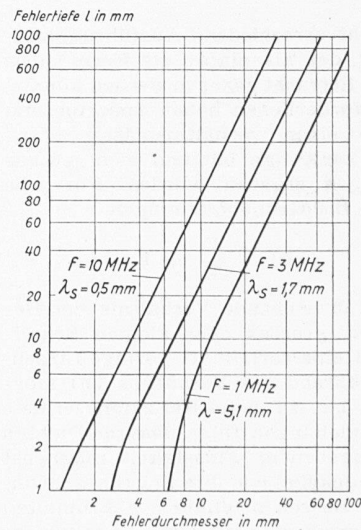


Bild 1. Fehlererkennbarkeit im Sokoloffverfahren nach Kruse. Die Kurven geben den Mindestfehlerdurchmesser für eine bestimmte Fehlertiefe bei den entsprechenden Frequenzen an

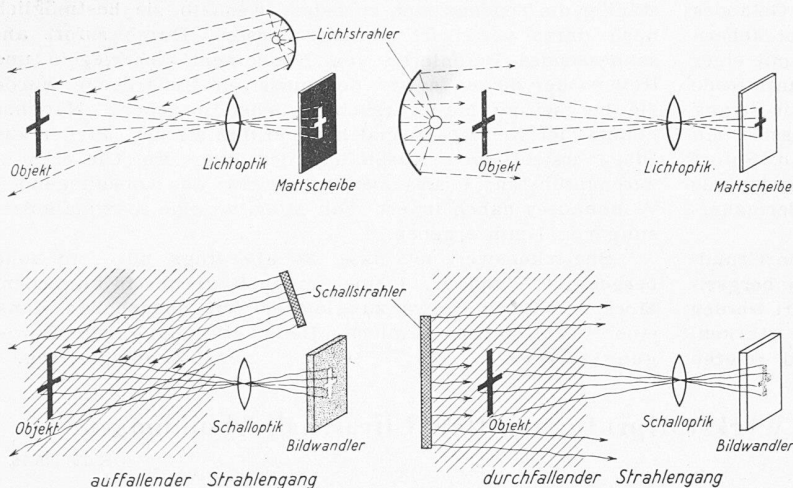


Bild 2. Schalloptische Abbildung in Analogie zur Lichtoptischen; links im Aufsichtverfahren, rechts im Durchsichtverfahren

von der Divergenz des Strahlenbündels abhängig, zumal, wenn es sich um grössere Entfernungen zwischen Schallstrahler und Abbildungsobjekt handelt. Ist das abzubildende Objekt verhältnismässig plan, so werden im allgemeinen die Unebenheiten klein gegenüber der Schallwellenlänge sein, die Streuung ist gering und es wird im reflektierten Strahlengang blank und spiegelnd erscheinen. Die Beziehung Einfallswinkel = Reflexionswinkel muss daher verhältnismässig gut gewahrt sein, andernfalls findet keine Abbildung statt. Da ausserdem die Begrenzungsflächen des umgebenden Mediums, bei Werkstücken also ihre Umrandung, ebenfalls infolge ihrer oft planen oder doch regelmässigen Gestalt und ihres hohen Reflexionsvermögens spiegelnd erscheinen, eignet sich das Aufsichtverfahren meist schlecht.

Anders liegen die Verhältnisse bei dem Durchsichtverfahren. Hier spielen die Wandungen keine Rolle, und der Winkel, unter dem die Strahlung auf die abzubildenden Fehler, Spaltebenen, Dopplungen usw. fällt, ist belanglos. Es findet also in jeder Lage eine Abbildung statt. Das Bild erscheint hierbei komplementär. Bild 2 veranschaulicht diese Verhältnisse. Ebenfalls erkennen wir, dass bei Untersuchung im durchfallenden Strahlengang der Bildfelddurchmesser in erster Linie vom Durchmesser des schallabstrahlenden Quarzes bestimmt wird. Entsprechend den sehr verschiedenen Anforderungen der Technik müssen demnach sowohl sehr kleine Strahlungsquellen (für Untersuchung schwer zugänglicher Schweisspunkte), als auch sehr grosse Strahler (Untersuchung grosser Platten) angestrebt werden.

Die Schalllinse

Die Schalllinse kann recht verschiedene Ausführungsformen haben. Ein Hohlspiegel, der als einfachste Form eines schallabbildenden Systems in Betracht gezogen werden könnte, scheidet aus, da er bei der erforderlichen hohen Apertur und gewünschten Bildfeldgrösse einen verhältnismässig stark ausseraxialen Strahlengang zur Folge hat und sich hieraus unerträgliche Bildverzerrungen ergeben würden. Für jede Schallinsenanordnung gelten die Grundbeziehungen

$$(1a) \quad n = \frac{V_0}{V_1} > 1 \qquad (1b) \quad \frac{\rho_1 V_1}{\rho_0 V_0} \approx 1$$

wobei das möglichst von 1 abweichende Verhältnis der Beziehung 1a) einen möglichst grossen oder kleinen Schallbrechungskoeffizienten n und eine vorteilhaft geringe Linsenkrümmung gewährleistet, während das Verhältnis 1b) möglichst nahe an 1 liegen soll, um zu hohe Reflexionsverluste zu vermeiden. Aus beiden Beziehungen folgt, dass die Dichten von Linsensubstanz und umgebender Flüssigkeit möglichst verschieden sein und sich umgekehrt wie ihre Schallgeschwindigkeiten verhalten sollen. Zwischen dünnen gekrümmten Folien eingeschlossenes Chloroform oder Tetrachlorkohlenstoff erfüllen diese Bedingungen hinreichend und haben sich als Linsensubstanzen gut bewährt, wenn das umgebende Medium Wasser oder eine Flüssigkeit von ähnlichem Wellenwiderstand ist. Das Reflexionsvermögen beträgt nur wenige Prozent und die Schallgeschwindigkeit dieser Substanzen ist

so gering, dass sich ein schalloptischer Brechungsindex von 1,3 bis 1,5 ergibt, wie er in der Lichtoptik üblich ist. Die Folien sollen allerdings recht dünn sein.

Eine weitere Möglichkeit für derartige Linsen besteht in der Verwendung von Kunststoffen, die in ihrer reichhaltigen Auswahl sehr gute Anpassungsmöglichkeiten bieten. Derartige Linsen nehmen als Sammellinsen konkave Form an, da die Schallgeschwindigkeit in diesen Medien im allgemeinen grösser als in der umgebenden Flüssigkeit ist. Dieser Umstand ist recht günstig, da er zu einer Bevorzugung der axennahen Strahlen führt, während die Randstrahlen durch die natürliche Absorption der Linsensubstanz nach aussen hin mehr und mehr abgeblendet werden. Man kann auch Metallinsen benutzen. Will man zu hohe Reflexionsverluste vermeiden, so muss man sie mit Quecksilber direkt an das Werkstück ankoppeln. Derartige Linsen besitzen im allgemeinen zwei Brennweiten, entsprechend der Longitudinal- und Transversalgeschwindigkeit im Linsenmaterial. Durch geeignete Konstruktion

kann man die störenden Transversalwellen stark unterdrücken, jedoch auf Kosten der sich aus der Rechnung ergebenden optimalen Brechungsbedingungen. Durch die in der Schalloptik zur Verfügung stehenden hohen Brechungsindices (5 bis 6 statt 1,3 bis 1,9, wie in der Lichtoptik) lassen sich Aperturen erzielen und Trennschärfen erreichen, die - bezogen auf die Wellenlänge - die lichtoptischen Verhältnisse übertreffen. Hierüber ist an anderem Orte berichtet worden [6].

Auch Interferenzzonen, die den Vorteil mehrerer und frequenzabhängiger Brennweiten besitzen, können zur Abbildung benutzt werden. Bei ihnen kann die Scharfstellung des Bildes auf elektrischem Wege statt dem üblichen der Abstandsänderung zwischen Linse und Abbildungsebene erfolgen. Die Bildschärfe ist hierbei allerdings nicht so gut wie bei den andern Systemen. In der bereits oben zitierten Arbeit [5] findet sich die Wiedergabe einer derartigen Schallabbildung und des hierfür benutzten Interferenzzonensystems.

4. Der Bildwandler

Der Bildwandler besteht aus einer flachen Zelle von 1 bis 2 mm Dicke, deren eine dem Schalleintritt zugekehrte Wand aus einer dünnen Folie besteht. Die gegenüberliegende Wand wird von einer stabilen Glasscheibe gebildet. Zwischen diesen beiden Wänden befindet sich eine Flüssigkeit, in der feine Metallfitter (etwa 10 μ Durchmesser und 1 bis 2 μ Dicke) suspendiert sind. Sie stellen sich, wenn ihre Dichte von derjenigen der umgebenden Flüssigkeit verschieden und ihr Durchmesser klein gegen die Wellenlänge ist, den einfallenden Schallwellenfronten parallel [7]. Die flachen, blanken Metallfitterchen wirken also an Stellen der Schallerregung wie ausgerichtete Spiegelchen, während sie an den nicht erregten Stellen der statistischen Unordnung unterliegen. Beleuchtet man eine derartige Suspension durch das Glasfenster hindurch mit parallelem Licht, so reflektieren alle schallerregten und somit ausgerichteten Teilchen das Licht selektiv in eine Richtung, etwa diejenige des betrachtenden Auges, und erscheinen hell, während die ungerichteten Teilchen nach allen Richtungen reflektieren und eine mittlere Grautönung ergeben. Bild 3 zeigt die Verhältnisse anschaulich. Aus der Theorie [7] folgt die Sättigungsfunktion (die relative Ausrichtung als Funktion der einfallenden Strahlung), das optimale Dichteverhältnis der Teilchen zum umgebenden Medium, die günstigste Fitterzahl pro cm^3 u.a.m. Es zeigt sich, dass die Empfindlichkeit einer derartigen Anordnung ausserordent-

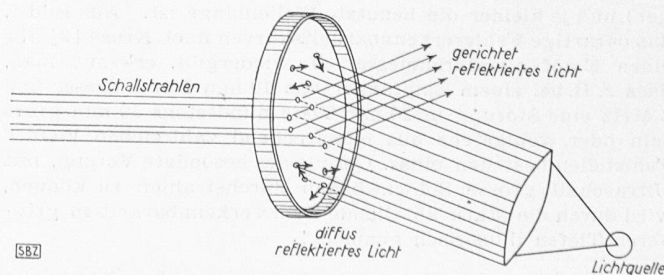


Bild 3. Wirkungsweise der Bildwandlerzelle

lich hoch ist, weil die auffallende Schallenergie lediglich mit den Energiebeiträgen der molekularen Unordnung in Konkurrenz zu treten braucht. Das unten beschriebene technische Gerät vermag daher mit einer sehr kleinen Röhre (LS 50) auszukommen und trotzdem Metalldecken bis zu 500 mm mühelos zu durchstrahlen.

5. Das Schallsichtgerät

Weil das Verfahren als solches ausserordentlich universelle Möglichkeiten in sich birgt, besteht der Wunsch, ein für die Materialprüfungen der Technik möglichst universell anwendbares Schallsichtgerät zu schaffen. Hieraus ergibt sich eine reiche Mannigfaltigkeit von Problemen. Einerseits tritt die Forderung auf, möglichst kleine Störungen zu erfassen, also z. B. Trennschichten in der Grössenordnung von 1 mm² Flächenausdehnung und 10⁻⁴ mm Dicke und darunter festzustellen. Solche Trennschichten kommen z. B. bei Leichtmetallschweisspunkten und fehlerhafter Plattierung elektrischer Kontakte vor. Das gesamte Prüfobjekt weist dabei oft nur einen Durchmesser von etwa 5 mm auf und befindet sich obendrein häufig an schwer zugänglichen Stellen. Andererseits besteht die Forderung, grosse Eisenplatten von einigen m² Fläche und erheblicher Stärke zu durchleuchten, um in ihrem Inneren Doppelungen, Lunken, Seigerungen u. a. m. festzustellen, wobei es nur auf eine Durchdringung möglichst grosser Schichtdicken, weniger auf ein gutes Auflösungsvermögen ankommt. Neben Flachmaterial sind auch Formstücke von runder oder kantiger Gestalt zu durchleuchten (Ventilschäfte, Turbinenflügel u. a. m.). Allen diesen Anforderungen sollte möglichst ein einziges, sehr anpassungsfähiges Gerät gerecht werden.

Bild 4 zeigt die technische Ausführung. Das Gerät besteht aus zwei Säulen, die auf einer fahrbaren Lafette angeordnet sind. Die hintere Säule, in der sich der Hochfrequenzgenerator zum Betrieb des Ultraschallquarzes, die Steuerungsorgane und Anschlusssteile für 220 Volt Wechselspannung befinden, ist auf der Lafette verschiebbar angeordnet, sodass Stücke von 0 bis 500 mm Dicke zwischen die beiden Säulen eingebracht werden können. Die Frequenz lässt sich wahlweise auf 3 und 7 MHz schalten, je nachdem, ob ein geringes Auflösungsvermögen und hohe Durchdringungsfähigkeit für grobe und dicke Stücke oder die umgekehrten Bedingungen für feinere Teile gefordert werden.

Links erblickt man den Sichtempfänger, der auf einem

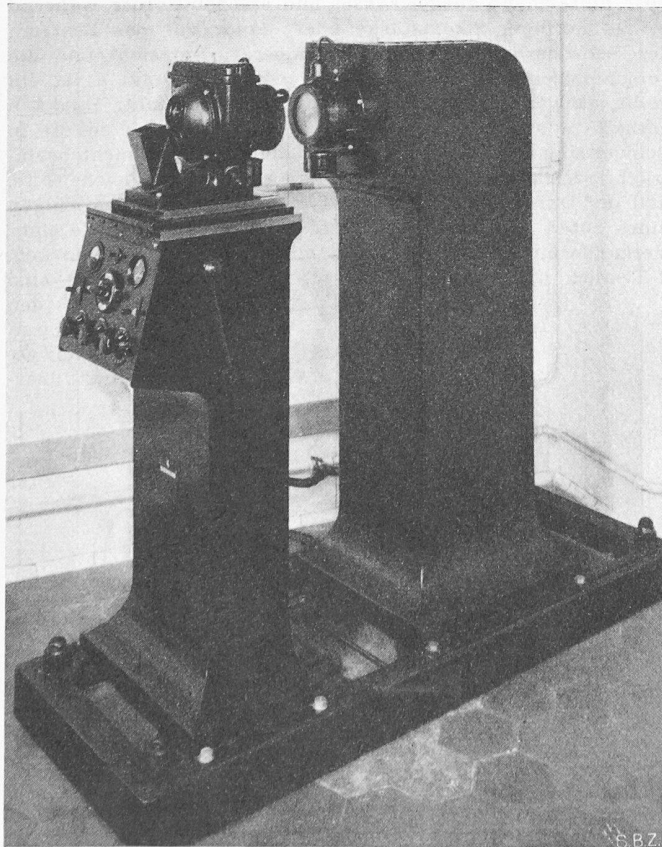


Bild 4. Schallsichtgerät nach Dr. Pohlman

Schaltpult in Schlittenführung angeordnet ist. In seinem unteren Teil befindet sich eine Druckluftanlage, die alle im Gerät sich abspielenden Vorgänge automatisch steuert. Bild 5 zeigt das Schalt- und Bedienungspult. In der Mitte erblicken wir den Hauptschalter zur Inbetriebsetzung des Gerätes, unten die Regulierung der Zellenbeleuchtung, die Fernabstimmung des in der hinteren Säule befindlichen Senders und die Regelung der Ultraschall-Intensität. Die Steuerung der Abstimmung vom Schaltpult aus ermöglicht die bequeme Prüfung sehr grosser Platten, die den Beobachter vom Sender trennen. Oben befinden sich ein Hochfrequenzvoltmeter und Manometer zur Kontrolle der Anlage. Der Knopf über dem Hauptschalter gestattet eine Kontraststeigerung des Bildes (s. unten), während einer der kleinen rechts oder links befindlichen Hebelschalter das aufnahmebereite Gerät in Gang setzt.

6. Betrieb

Bei Einschalten des Hauptschalters wird die Flüssigkeit in der Flitterzelle umgerührt, wodurch die während der Ruhezeit auf dem Boden abgesetzten Flitter aufgewirbelt werden. Nach etwa einer halben Minute beginnt ein Homogenisierungsvorgang, der die Flitter vollkommen gleichmässig über die Zelle verteilt und das Gerät aufnahmebereit macht. Das nunmehr in der Zelle einsetzende langsame Absinken der Flitterteilchen wird im Gerät automatisch kompensiert, sodass die Flitterzelle über beliebige Zeiten eine gleichbleibende Empfindlichkeit und Teilchendichte behält.

Nachdem das Untersuchungsstück zwischen Sender und Empfänger gebracht ist, wird mit dem rechts am Pult befindlichen Kugelhebel der Sichtempfänger an das Werkstück angefahren und einer der beiden Kippschalter am Bedienungspult betätigt, worauf der Empfänger in seiner Schlittenführung durch Pressluft an das Werkstück heranfährt und dieses an den Sender drückt. Hierbei bleibt auf beiden Seiten des Werkstückes je ein schmaler Raum von wenigen mm Dicke bestehen, der ringsum über eine Gummidichtung am Werkstück anliegt. In diese beiden Räume hinein, die «Kopplungskammern», tritt aus einer feinen Düse ein geringer Luftstrom. Ist die Anlage am Werkstück zuverlässig dicht, so bildet sich ein geringer Ueberdruck aus, der über ein hochempfindliches Ventil Quecksilber in den Kopplungskammern hochtreibt. Oben angekommen schliesst dieses Kontakte, die

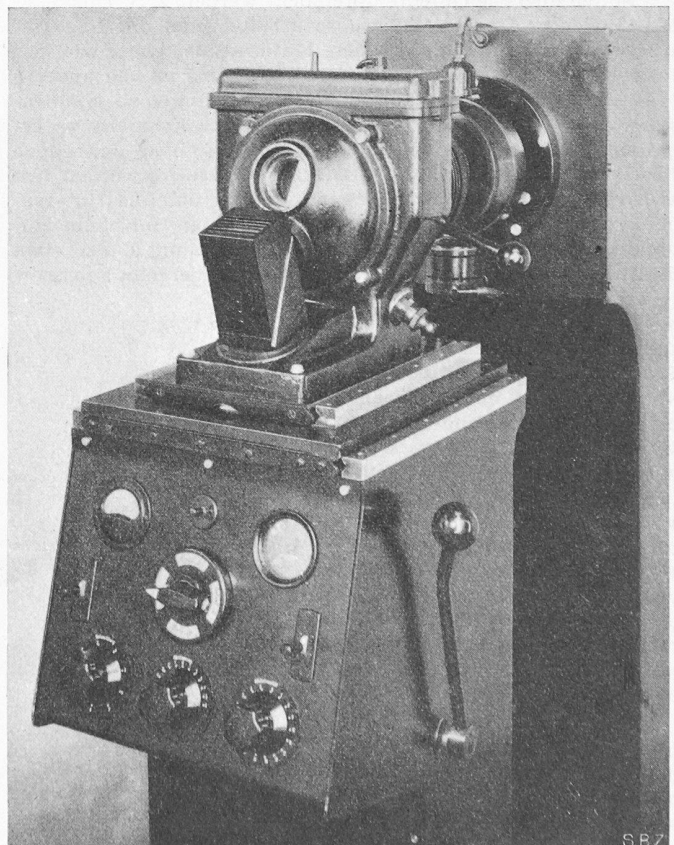


Bild 5. Empfängerpult mit Bedienungstafel

nunmehr den Hochfrequenzsender in Betrieb setzen. Hierdurch wird einerseits eine sichere akustische Koppelung hergestellt, andererseits gewährleistet, dass der Quarz nur unter Belastung schwingt, da eine Erregung ohne Strahlungsdämpfung unmittelbar zu seiner Zerstörung führen würde.

Bei der Durchleuchtung wird zunächst die Tiefenebene abgebildet, auf die die Schalllinse eingestellt war. Während der Durchleuchtung ist es jedoch möglich, auf andere Tiefen einzustellen und somit dicke Stücke in verschiedenen Tiefen zu durchmustern. Die Linseneinstellung erfolgt an dem in Bild 5 rechts oben sichtbaren Kugelhebel, der mit einer Skala versehen ist, die bei Scharfeinstellung die Tiefenlage der gesuchten Störung unter der Oberfläche direkt in mm abzulesen gestattet. Handelt es sich um nicht zu dicke Stücke (etwa bis 15 mm), kann auch bei falscher Einstellung die Störung nicht übersehen werden, weil sie trotz ihrer Unschärfe immerhin noch deutlich genug in die Erscheinung tritt.

Um den verschiedenartigen Anforderungen Rechnung zu tragen, sind die Kopplungskammern zwischen 20 und 100 mm Durchmesser auswechselbar, so dass auch schmale Streifen untersucht werden können. Ebenfalls können verschiedene Schalloptiken benutzt werden. Bei grossen Materialstärken z. B. würden tief im Werkstück liegende Fehler infolge des grossen Brechungsindexunterschiedes zwischen Metall und koppelnder Flüssigkeit sehr klein erscheinen; deshalb kann die übliche Schalllinse gegen eine «Telelinse» ausgetauscht werden. Die Normallinse erfasst die Tiefen von 0 bis 40 mm, während die Telelinse von 30 bis 250 mm geeignet ist. Für noch grössere Tiefen liegen bisher keine Erfahrungen vor, aber selbst diese Tiefe dürfte genügen, um ein 500 mm starkes Stück zu untersuchen, da gegebenenfalls von beiden Seiten aus untersucht werden könnte.

Sollen schwer zugängliche Schweisspunkte, die sich z. B. in Winkelprofilen befinden, und ähnliche Objekte untersucht werden, so können Rüssel gemäss Bild 6 verwendet werden. Die Schalllinse ist so berechnet, dass gemäss der Kleinheit des Untersuchungsobjektes das Schallbild etwa im Verhältnis 2:1 vergrössert erscheint. Das Bildfeld beträgt hierbei nur 10 mm. Um eine schnelle und leichte Zentrierung des eingebrachten kleinen Objektes zu ermöglichen, sind rechts und links am Empfängerrüssel kleine konvergent strahlende Lämpchen vorgesehen, in deren Lichtstrahl-Schnittpunkt man den Schweisspunkt bringt.

Sollen unebene Objekte untersucht werden, z. B. Turbinenflügel oder profilierte Objekte, so arbeitet man mit Negativstücken, die aus dem gleichen Material bestehen, wie der Prüfling (Bild 7). Der Sinn dieses Vorgehens ist, die andernfalls an den Rundungen auftretenden Brechungen zu kompensieren und wieder einen unverfälschten Strahlengang zu erhalten, ohne den eine zuverlässige Prüfung über das ganze Profil hin nicht möglich ist. Die Negativstücke werden fest zwischen Sender und Empfänger montiert und die Untersuchungsstücke in den mit Flüssigkeit gefüllten Hohlraum eingetaucht. Die Schalllinse wird auf die Entfernung a , also etwa die Mitte des Turbinenflügels eingestellt, wobei man gewissermassen das ganze Aggregat als «Untersuchungsobjekt» betrachten kann. Nicht zu grosse Stücke (kleiner als 100 mm) können hierbei mit einer einzigen Durchleuchtung geprüft werden, ohne dass eine sorgsame «Abtastung» des Prüflings nötig wäre, was zu sehr vorteilhaft kurzen Prüfdauern führt. Für die Serienprüfung eignet sich somit diese Methode vorzüglich. Bei Einzelstücken wird sich die Anfertigung von Negativen nur für verhältnismässig wertvolle Prüflinge lohnen.

Alle Ergebnisse lassen sich mühelos photographieren. Vor die Einblicköffnung wird hierbei ein Spiegelreflex-Photovorsatz geschraubt und an diesen eine Leica oder eine ähnliche Kleinbildkamera. Das Schall-

bild kann über den Spiegelvorsatz während der Photoaufnahme betrachtet werden.

7. Ergebnisse

Aus der grossen Zahl der bisher untersuchten Objekte sei eine kleine Anzahl von Schallabbildungen als Beispiel wiedergegeben. Die Fehlererkennbarkeit ist recht hoch und unterliegt nicht der von Kruse angegebenen Gesetzmässigkeit, dass eine nachzuweisende Störung um so grösser sein müsse, je tiefer sie im Werkstück liegt. Diese Bedingung ergibt sich bei Kruse aus der Notwendigkeit, dass der von der inneren Störung erzeugte Schallschatten auf der Werkstückoberfläche noch nachweisbar sein muss. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei uns, indem es auf das Vorhandensein eines Schallschattens auf der Werkstückoberfläche gar nicht ankommt, da ja, gemäss den Linsengesetzen, lediglich die Objektebene, in der sich die Störung selbst befindet, auf die Abbildungsebene (Bildempfänger) projiziert und ihr phasen- und amplitudenmässig zugeordnet wird. So ist es bisher gelungen, die von Kruse angegebene Beziehung über die Grenze der Fehlererkennbarkeit in bezug auf die Fehlergrösse etwa um den Faktor 16 zu unterbieten, in Bezug auf die Tiefenlage um mehr als den Faktor 80 zu überschreiten. Als Faustregel möge für die folgenden Abbildungen gelten, dass ein Störungsscheibchen von etwa 0,4 mm Durchmesser und 10^{-4} mm Dicke, unabhängig von seiner Tiefe im Werkstück, in jeder Lage, auch wenn seine Ebene parallel zur Durchleuchtungsrichtung liegt (s. unten), noch nachweisbar ist.

Bild 8 zeigt als Beispiel die Untersuchung kleiner Objekte. Die Aufnahmen stellen Schallabbildungen dar, die bei der Durchleuchtung von Leichtmetallschweisspunkten an etwa 1 mm starken Aluminiumblechen gewonnen wurden. Die Punkte hatten einen Durchmesser von etwa 5 mm. An etwa tausend Proben, die unter den verschiedensten Schweissbedingungen hergestellt und nach der Schalldurchleuchtung zerrissen wurden, konnte geklärt werden, wie sich die einzelnen Schweissfehler im Schallbild bemerkbar machen. Bei der späteren Untersuchung fertiger Bauteile konnten rückwärts auf diese Weise die betreffenden in der Schweisserei vorkommenden Fehler nachgewiesen und abgestellt werden.

Sämtliche Punkte der oberen Reihe stellen gute Schweisspunkte, die der unteren schlechte dar. Man erkennt, dass sie sich im Schallbild hauptsächlich durch ihre Grösse unterscheiden. Bei einer guten Punktsschweissung ist die Schweisslinse hinreichend ausgewachsen und erscheint gross, während bei zu geringer Stromstärke oder -dauer nur das Zentrum der Schweisslinse die Schmelztemperatur erreicht und die verschmolzene Zone somit klein erscheint. Punkt a ist ein völlig einwandfreier, vorzüglicher Schweisspunkt. Punkt b enthält in seiner Mitte einen «Schrumpfriss», wie sie oft in Schweisspunkten auftreten, jedoch die Festigkeit nicht beeinträchtigen. Die Zerreihsprobe ergab angenähert gleiche Güte, und der Durchmesser entspricht in der Tat auch demjenigen eines guten Punktes. Die Punkte c, d stellen Beispiele einer Verzunderung dar. Sie wurden mit zu hohen Stromstärken, z. T. auch mit unsauberen Elektroden geschweisst. Da eine starke Verzunderung den Ultraschall nicht durchlässt, bildet sie sich dunkel ab. Wird ein solcher Punkt über-

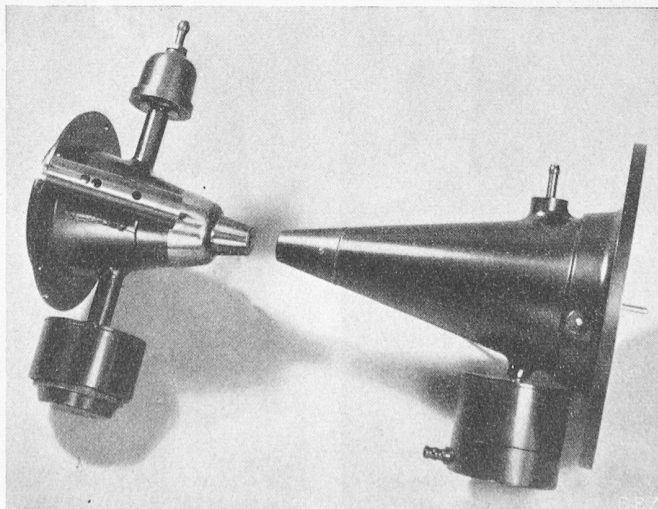


Bild 6. Rüsselvorsätze zur Untersuchung schwer zugänglicher Schweisspunkte

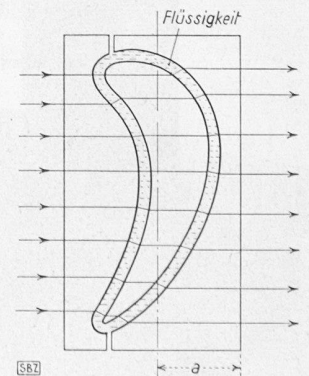


Bild 7. Negativstücke zur Durchleuchtung gekrümmter Objekte (z. B. Turbinenflügel usw.)

schliffen, so bildet er sich wie a oder b ab. Aus der Grösse der Punkte erkennt man trotz der Verzunderung, dass sie zur Kategorie der guten Punkte gehören. Punkt e stellt ein typisches Beispiel einer schiefen Elektrode dar, bzw. einer Elektrode, die nicht zentral angedrückt hat. Die Verschweißung ist nicht symmetrisch erfolgt. Da die Schweisslinie trotzdem gross ist, ist zwar keine besonders gute, jedoch noch eine hinreichende Festigkeit zu erwarten.

Anders die Punkte der unteren Reihe: Punkt f ist mit zu geringer Stromstärke oder -dauer geschweisst. Das gleiche Bild ergibt sich, wenn die Elektrode zu ballig geformt ist und der Stromdurchgang nur in einer zu kleinen Mittelzone erfolgt. Die Festigkeit ist sehr gering. Punkt g ist mit ebenfalls zu balliger Elektrode, aber höherer Stromstärke oder -dauer geschweisst: Zu starke Ueberhitzung in zu kleiner Zone mit nachfolgendem Schrumpfriss. Die Punkte h und i sind unter den gleichen schlechten Bedingungen mit schiefen Elektroden, bzw. unsymmetrischem Andruck gewonnen. Sämtliche Durchmesser lassen erkennen, dass es sich um schlechte Punkte handelt.

Dieses Beispiel, das eine ausserordentlich hohe Fehlererkennbarkeit erfordert, die bisher von keinem Ultraschallverfahren erreicht worden ist, soll zeigen, wie ungemein zahlreiche und fruchtbare Erkenntnisse aus einem solchen Bild gewonnen werden können. So liegt der wesentlichste Fortschritt der vorliegenden Methode neben ihrem weiten Anwendungsbereich hauptsächlich in der Tatsache, dass man ein unmittelbares Bild der gesuchten Störung erhält, aus dem man zahlreiche Schlüsse über Ursache, Lage, Verlauf und Art, ja sogar über die Anwesenheit weiterer Störungen in der Nachbarschaft ziehen kann.

Ein zusätzlicher Parameter zur Beurteilung des Prüfstückes, der in den vorgezeigten Bildern gar nicht zum Ausdruck kommt, ist die *Entstehung des Bildes*. Infolge der Trägheit der Bildwandlerzelle baut sich das Schallbild bei mittlerer Intensität etwa in $\frac{1}{2}$ bis 1 Sekunde auf. Die Stellen maximaler Schalldurchlässigkeit leuchten zuerst auf, während die übrigen langsam nachfolgen und die wirklichen Trennungen dauernd dunkel bleiben. Unmittelbar nach dem Einschalten ergibt sich also ein kontrastreiches Bild der inneren Inhomogenität, in dem die Absorptionsunterschiede des Werkstoffes selbst zur Abbildung gelangen. Für diesen Zweck ist der in Bild 5 über dem Hauptschalter sichtbare Knopf vorgesehen, mit dessen Hilfe man kurzzeitig die Hochfrequenzspannung abschalten kann, um beim Loslassen die Bildentstehung erneut verfolgen zu können. Aus der Entstehungsdauer des Gesamtbildes (bei konstanter Hochfrequenzspannung) gewinnt man bereits unmittelbar ein Mass der Ultraschallabsorption des Materials, woraus man wiederum auf die Porosität, bzw. Anwesenheit von Mikrolunkern, die zu klein sind, um im Schallbild zu erscheinen, schliessen kann.

Als weiteres Beispiel sei die Schalldurchleuchtung einer Lokomotiv-Feuerbüchse wiedergegeben. Eine derartige Untersuchung lässt sich prinzipiell auch mit dem Sokoloff-Verfahren durchführen, jedoch mit der oben beschriebenen schlechten Fehlererkennbarkeit, einer Durchführung von Einzelmessungen

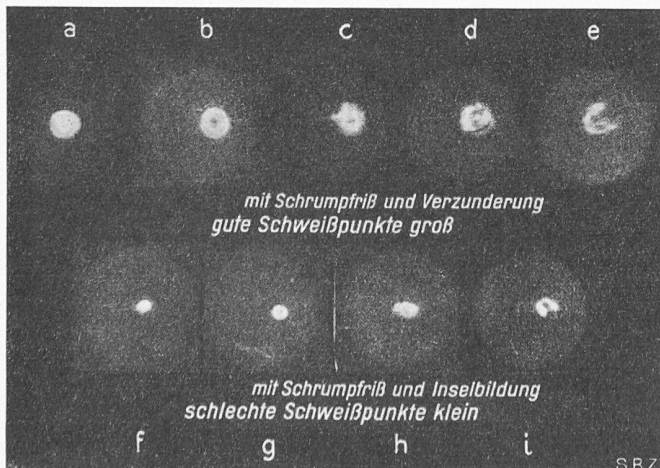


Bild 8. Schallabbildungen von Leichtmetallschweißpunkten. Punkt b zeigt in der Mitte einen Schrumpfriss, die Punkte c, d, e zeigen Verzunderung

von Punkt zu Punkt und nachfolgendem Auswerten der Messresultate. Das Echolotverfahren scheidet aus, da die Platte hierfür zu dünn ist.

Bild 9 zeigt die bildmässige Erfassung mit dem Schallsichtverfahren. Das Bild ist aus mehreren Durchleuchtungen panoramaähnlich zusammengesetzt, wodurch sich die schwach angedeutete bienenwabenhähnliche Struktur erklärt. Alle dunklen Stellen sind schalldurchlässig, stellen also Dopplungen dar, die hellen homogenes Material. Man erkennt deutlich die grosse Zahl kleiner und grosser Dopplungen, die durch Auswalzen von Lunkern entstanden sind, und deren Längsausdehnung sich von links nach rechts über das Bild erstreckt. Die längliche Gestalt dürfte mit dem Auswalzvorgang zusammenhängen, und die genannte Richtung mit der Walzrichtung identisch sein.

Da für die Untersuchung grosser Platten die Durchleuchtung mit einem Bildfeld von 100 mm Durchmesser zu zeitraubend wäre (sofern man sich nicht nur auf Stichproben beschränken will), wurde eine «Grossbildfeldanlage» geschaffen, deren Durchleuchtungsfeld 500 mm Durchmesser besitzt. Der grosse Strahler und der Bildempfänger sind voneinander getrennte Aggregate und auf einander gegenüberliegenden Seiten in einer Wassergrube eingebaut. Die zu untersuchende Platte wird zwischen beiden, dicht vor dem Strahler, in die Grube eingesenkt. Diese Anordnung sowie ein Zwillingsautomat für sehr schnelle Serienprüfungen bis zu 1500 Durchleuchtungen pro Stunde ist an anderem Orte beschrieben worden [8].

Bild 10 gibt Schallbilder einer bleiplattierten Kesselwand eines chemischen Reaktionsgefässes wieder, bei dem es auf einwandfreie wärmeleitende Verbindung zwischen Stahlwand und Bleiplattierung ankam. Wie man sieht, ist die Bindung nicht einwandfrei, links zufriedenstellend, rechts ragt jedoch eine Störung, die grösser als das ganze Gesichtsfeld ist, in die Abbildung hinein. Selbst in den «gebundenen» Partien oben, ist die Bindung so «flockig», dass nicht von einem hinreichenden Verbund die Rede sein kann.

Bild 11 stellt einen interessanten Versuch zur Abbildung von Spaltebenen dar, deren Fläche parallel zur Durchstrahlungsrichtung liegt. Zwei Metallklötze waren an ihrer Stirnseite sehr plan geschliffen und mit einer Schraube stumpf aufeinander geschraubt, wie die Modellskizze zeigt. Die Schalldurchleuchtung senkrecht zur Papierebene ergab das rechts oben befindliche Bild. Man erkennt deutlich die Abbildung

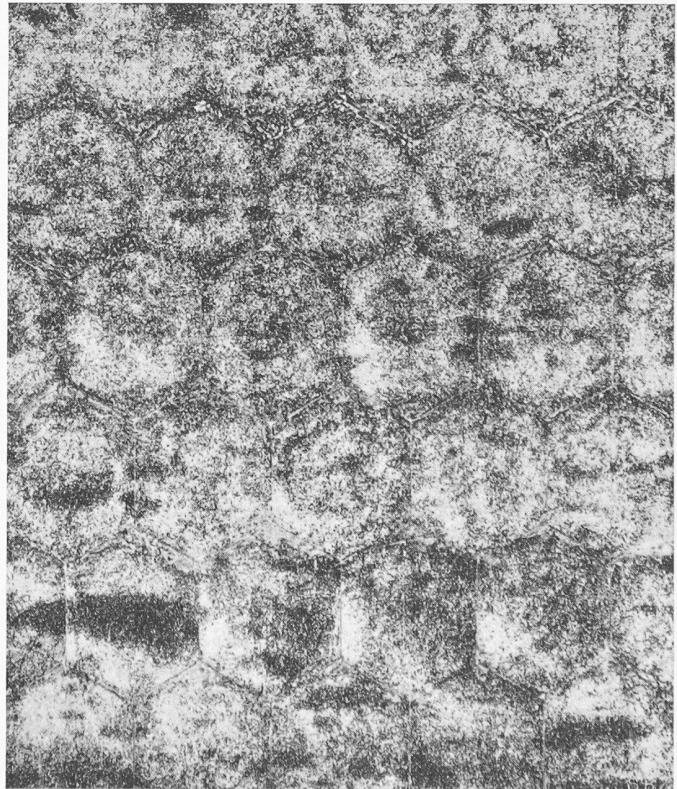


Bild 9. Dopplungen (schwarz) in einer Lokomotivfeuerbüchse (die Abbildung ist aus zahlreichen Einzelbildern zusammengesetzt)

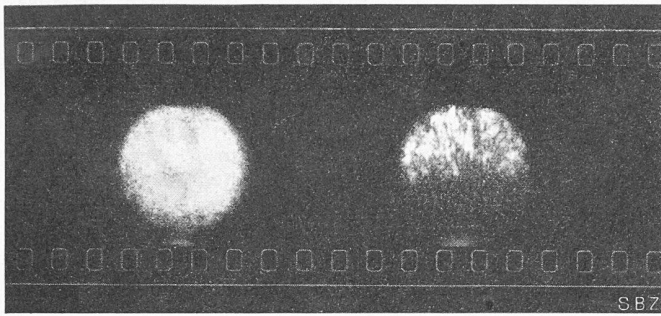


Bild 10. Schallbilder fehlerhafter Bindungen in einer bleiplattierten Stahlplatte: links befriedigende Bindung, rechts flockige, fehlerhafte Bindung mit grosser Störung, die das halbe Gesichtsfeld überdeckt

des Spaltes, der, obgleich er nur eine Dicke von etwa 10^{-3} mm aufweist, im Schallbild etwa auf die Grössenordnung der Schallwellenlänge verbreitert erscheint. Für diese Erscheinung, die nicht unmittelbar zu erwarten ist, gibt es in der Lichtoptik keine Analogie. Bemerkenswert sei noch, dass sich die im Hohlraum befindliche Schraube, im Gegensatz zum Röntgenverfahren, nicht abbildet, sondern das Schraubloch im Schallbild leer erscheint, da die Reflexion ja bereits an dem dünnen, die Schraube umgebenden Luftmantel stattfindet. Der Versuch ist deshalb von Wichtigkeit, weil parallel zur Durchstrahlung liegende Rissflächen häufig bei Stumpfschweißungen auftreten und im Röntgenbild ebenfalls schwer nachweisbar sind.

Auf Bild 11 unten sind Schallabbildungen echter Fehler dargestellt, die bei Stumpfschweißungen an Flügelholmgurten (etwa 12×70 mm Querschnitt) auftraten. Im Bild rechts unten zeigt sich eine Doppelstruktur des Risses. Derartige Doppelschlacken-, bzw. Rissebenen treten mitunter durch den Rüttelvorgang beim Stumpfschweißen auf. Eingehende Versuche ergaben, dass der Riss nur einen geringen Prozentsatz des Querschnittes zu durchziehen braucht (im vorliegenden Falle etwa nur 1 bis 2 mm), um noch mit Sicherheit erfasst werden zu können. Interessant ist, dass eine innere Materialtrennung in jeder Lage, wenn ihre Ebene parallel oder senkrecht zur Durchleuchtungsrichtung liegt, zur Abbildung kommt. Dies ist ein grosser Vorteil gegenüber der Röntgendurchleuchtung, bei der eine Spaltfläche im allgemeinen überhaupt nicht abgebildet wird, es sei denn in einem sehr kleinen, günstigen Winkelbereich.

Die vorliegende Darstellung soll lediglich die Möglichkeiten aufzeigen, die für das Schallsichtverfahren in technischer Hinsicht bestehen und die Probleme wiedergeben, die sich bisher mit seiner Hilfe haben lösen lassen. Es ist verständlich, dass noch in mancher Hinsicht die Technik der Ultraschallmaterialuntersuchung verfeinert und vervollkommen werden muss; wesentlich ist jedoch, dass die Fehlererkennbarkeit bereits so weit vorgetrieben werden konnte, dass sie für die meisten industriell vorliegenden Probleme ausreicht. Weitere Möglichkeiten scheinen sich zu bieten. Gewisse Ein-

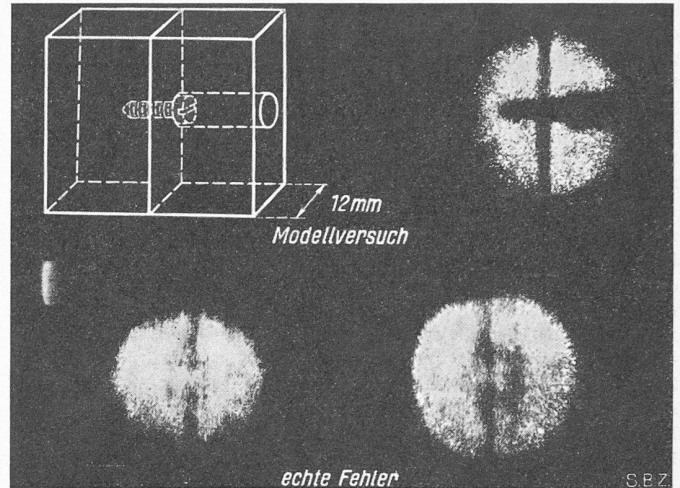


Bild 11. Schallabbildung einer Spaltebene parallel zur Durchstrahlungsrichtung. Oben: Modellversuch; unten fehlerhafte Stumpfschweißungen

flüsse der Metallstruktur machen sich, insbesondere bei Durchleuchtung sehr dicker Metallschichten bemerkbar, so dass die Möglichkeit gegeben erscheint, Gefügeuntersuchungen durchzuführen. Auf diese Erscheinung kann hier nicht näher eingegangen werden. Ferner ist ein Vordringen zu noch höherem Auflösungsvermögen bis zu einer Art «Schallmikroskopie» möglich. Dieser Weg wurde bisher noch nicht weiter verfolgt, da die Untersuchung makroskopischer Störungen (jedenfalls bezüglich der Flächenausdehnung der Risse) im Vordergrund zu stehen schien. Auch ist das Verfahren keineswegs auf Metalle und evtl. Keramik beschränkt, sondern gestattet eine Durchleuchtung jeglicher schalleitender Medien, wie z. B. auch Gewebepartien des menschlichen Körpers, deren Absorptionsverhältnisse [9] ein derartiges Vorgehen als gegeben erscheinen lassen. Ob sich hierdurch evtl. neue diagnostische Möglichkeiten eröffnen, kann nur durch eingehende Versuche geklärt werden.

Literaturverzeichnis

[1] Eine zusammenfassende Darstellung der Zusammenhänge findet sich in R. V. Baud: SBZ 1948 Nr. 14 und 16; Angaben über Ultraschallgeschwindigkeiten und elastische Daten in R. Bär: *Helv. Phys. Acta* 13. S. 193 (1940) und R. Bär und W. Walti: *Helv. Phys. Acta* 7. S. 658 (1934), sowie R. Pohlman: «Handbuch der technischen Betriebskontrolle» Bd. IV. Akad. Verl. Ges. — Leipzig z. Zt. in Druck.
 [2] S. Sokoloff: *Elektr. Nachr. Technik* 6 S. 454 (1929).
 [3] F. Kruse: *Akust. ZS.* 4 S. 153 (1939).
 [4] Vortrag vom 24. 1. 48, s. SBZ 1948, Nr. 15.
 [5] R. Pohlman: *ZS f. Phys.* 113, S. 697 (1939).
 [6] R. Pohlman: *ZS f. Angew. Phys.* 1 S. 181 (1948).
 [7] R. Pohlman: *ZS, f. Phys.* 107 S. 497 (1937).
 [8] R. Pohlman: *Die Technik* 3 S. 465 (1948).
 [9] R. Pohlman: *Phys. ZS.* 40 S. 159 (1939) und R. Pohlman, E. Parow-Souchon, H. Schlungbaum: *Klinische Wochenschrift*, 26, S. 277 (1948).

Holzfestigkeit schräg zur Faser

DK 539.4: 674

Ich habe vor einiger Zeit in der Schweiz. Bauzeitung die Grundzüge einer Festigkeitstheorie für Holz bei Beanspruchung schräg zur Faser¹⁾ skizziert, davon ausgehend, dass für den Bruch die «natürlichen», auf die Hauptrichtungen des Holzes orientierten Festigkeitswerte massgebend seien. Für eine in einer Ebene parallel zur Stammaxe unter dem Winkel φ zur Faserrichtung x wirkende Beanspruchung σ_u ergaben sich daraus die Festigkeitswerte

$$\sigma_{uB} = \frac{\sigma_{xB}}{\cos^2 \varphi} \quad \tau_{uB} = \frac{\tau_{xyB}}{\sin \varphi \cos \varphi} \quad \sigma_{uB} = \frac{\sigma_{yB}}{\sin^2 \varphi}$$

Der kleinste dieser Werte ist für den Bruch massgebend. Da diese Formeln in der mir damals bekannten Literatur über Holzbau und Holztechnologie nicht existierten, habe ich geglaubt, eine neue Festigkeitstheorie für Holz gefunden zu haben.

¹⁾ F. Stüssi: Holzfestigkeit bei Beanspruchung schräg zur Faser. SBZ Bd. 128, S. 251* (16. Nov. 1946).

F. Stüssi: Ueber Grundlagen des Ingenieurholzbaues. SBZ 1947, Nr. 24, S. 313*.

Kürzlich wurde ich nun darauf aufmerksam gemacht, dass diese Formeln doch schon früher existierten und zwar in dem vom «Aeronautical Research Committee» herausgegebenen «Report on Materials of Construction used in Aircraft and Aircraft Engines», London 1920, von Prof. C. F. Jenkin, Oxford. Der Abschnitt über Holz beruht zur Hauptsache auf den Untersuchungen von Major A. Robertson und enthält eine ganze Reihe wertvoller Versuchsergebnisse und Auswertungen. Es scheint mir erstaunlich und bedauerlich, dass diese wichtige und grundlegende Arbeit so wenig bekannt geworden ist.

Die Frage der Priorität der angegebenen Formeln ist damit abgeklärt. Mir bleibt die Genugtuung, dass ich mich mit meiner Darstellung auf dem richtigen Weg und in guter Gesellschaft befinde. Es ist zu hoffen, dass diese Zusammenhänge nun umso eher auch Eingang in die Konstruktionspraxis des Ingenieurholzbaues finden werden.

F. Stüssi