

Zerstörungsfreie Materialprüfung mit Hilfe der optischen Holographie

Von F. Mayinger und W. May*

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein neues Meßverfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung vorgestellt, bei dem sich Materialfehler mit Hilfe der holographischen Interferometrie nachweisen lassen. Dieses in der Entwicklung befindliche Verfahren macht sich die Störung von Oberflächenwellen an Rissen und anderen oberflächennahen Fehlern zunutze. Diese Methode soll für Wiederholungsprüfungen und Vergleichsmessungen an druckführenden Bauteilen herangezogen werden.

GRUNDLAGEN DER HOLOGRAPHISCHEN RISSERKENNUNG

Zur zerstörungsfreien Materialprüfung ist eine Reihe von Verfahren bekannt, die sich in der Praxis bewährt haben. So ist die Röntgenprüfung bei der Qualitätskontrolle durchaus zur Routine geworden und dank intensiver Entwicklung in den letzten Jahren wird die Ultraschallmeßtechnik erfolgreich zur Wiederholungsprüfung an Druckbehältern und primärkühlmittelführenden Teilen von Kernreaktoren eingesetzt. Wie in der gesamten Physik und Technik, so hat auch in der Qualitätskontrolle jedes Meßverfahren seine spezifischen Vorteile, aber auch Grenzen seiner Anwendungsmöglichkeiten. Die Röntgendiagnose läßt sich zur Wiederholungsprüfung an in Betrieb befindlichen großen und schwer zugänglichen Anlagen kaum einsetzen und auch die Ultraschallmeßtechnik, die ein aufwendiges und präzises Verfahren- und Justiersystem benötigt, kann enge und schwer zugängliche Stellen an Konstruktionsteilen nicht erreichen.

Vermutlich ebenso alt wie die übrigen Meßverfahren ist auch der Vorschlag, aus Oberflächenverformungen eines Werkstückes oder eines Behälterteiles auf Fehlstellen im Material zu schließen. Solche Verformungen lassen sich durch beliebige Beanspruchung des Testobjektes hervorrufen, z.B. durch statische Druck- und Zugbelastung, punktförmiges Erwärmen oder durch Eigenschwingungen. Jede Art der Belastung führt zu Spannungen im Innern und an der Oberfläche des Objektes. Ist das Material fehlerfrei, verlaufen die Spannungen stetig, was wiederum zu einer gleichmäßigen Verformung der Objektoberfläche führt. Ein Riß oder ein anderer Materialfehler bewirken eine Unstetigkeit des Spannungsverlaufes und haben eine anomale Verformung an der Oberfläche zur Folge.

Eine sehr genaue großflächige Messung der Oberflächenverformung gewährt ein neues optisches Meßverfahren, die Holographie, oder exakter ausgedrückt, die holographische Interferometrie. Die von Gabor [1] begründete Holographie ist ein Zweistufenverfahren zur Aufnahme und Wiedergabe kohärenter Wellenfelder. Verwendet man dazu sichtbares Licht, so lassen sich beispielsweise die von einem Gegenstand ausgehenden Wellenfronten so speichern und wieder rekonstruieren, daß ein echt dreidimensionales

Bild des Objektes entsteht. Es würde hier zu weit führen, die Technik der Holographie und die ihr zugrunde liegende Theorie darzulegen. Beides ist in der Literatur [2 bis 5] ausführlich beschrieben. Hier sei nur kurz das Prinzip soweit es zum Verständnis des Meßverfahrens notwendig ist, in einer anschaulichen Darstellung erklärt. In Bild 1 ist der Aufnahme- und Wiedergabeprozess der Holographie dargestellt. Der aufzunehmende oder zu untersuchende Gegenstand wird mit monochromatischem und kohärentem Laserlicht beleuchtet und das von ihm ausgehende reflektierte und gestreute Licht fällt, wie im oberen Teil von Bild 1 dargestellt, direkt auf eine fotografische Platte. Das vom Objekt ausgehende Licht hat eine äußerst komplizierte Wellenfront; nach dem Huygenschen Prinzip kann man sich jedoch diese Lichtfront aus elementaren Kugelwellen zusammengesetzt denken. Zur Vereinfachung der Darstellung wurde im oberen Teil von Bild 1 nur eine Welle eingezeichnet. Dieser vom Objekt ausgehenden Welle bzw. Wellenfront wird nun eine zweite — genannt Bezugswelle — überlagert. Beide Wellen bilden ein stabiles mikroskopisches Interferenzmuster, das in der Emulsion der Fotoplate gezeichnet werden kann.

Bringt man die Fotoplate nach ihrer Entwicklung — die dann Hologramm genannt wird — in ihre ursprüngliche Lage zurück und beleuchtet sie, wie im unteren Teil von Bild 1 dargestellt ist, mit der Bezugswelle, die jetzt die Funktion einer Wiedergabewelle übernimmt, so sind hinter dem Hologramm drei Wellen zu beobachten, von denen uns aber hier nur eine interessiert, nämlich die, die die exakte Rekonstruktion der aufgenommenen ursprünglichen Objektwelle darstellt. Sie erzeugt ein virtuelles Bild des vorher vorhandenen Objektes.

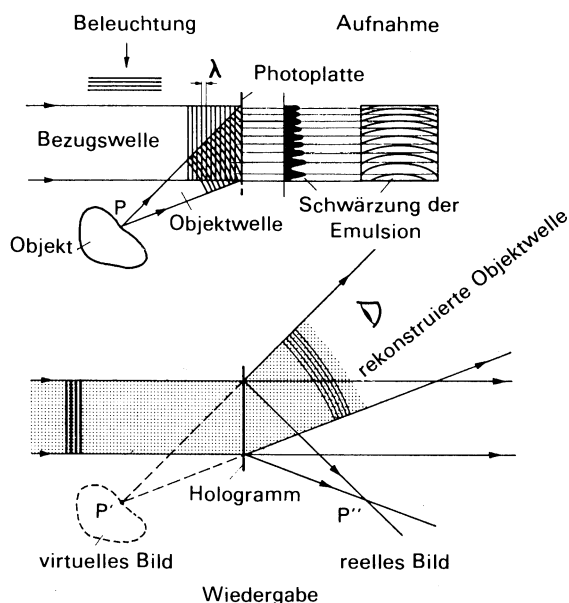


Bild 1. Prinzip der holographischen Aufnahme und Wiedergabe einer Wellenfront.

* Professor Dr.-Ing. F. Mayinger, Mitglied des Wissenschaftlichen VGB-Beirates, und Dipl.-Phys. W. May, beide Technische Universität Hannover, Lehrstuhl und Institut für Verfahrenstechnik.

Man kann sich nun leicht vorstellen, daß man auf dem Hologramm nicht nur eine Kugelwelle und nicht nur eine Aufnahme speichern und rekonstruieren kann, sondern daß sich hier auch verschiedene Objektwellen überlagern lassen. Macht man nun von dem Objekt, nachdem man es vorher in seiner Position oder in seiner Oberflächengestalt ganz geringfügig geändert hat, eine zweite holographische Aufnahme auf dieselbe Fotoplate und rekonstruiert man dann beide Aufnahmen durch Beleuchtung mit der Bezugswelle, so interferieren die von beiden Aufnahmen ausgehenden Bildwellen miteinander, und man kann auf dem virtuellen Bild des Objektes nun ein makroskopisches Muster der bekannten Interferenzstreifen beobachten, die Linien konstanter Verschiebung oder Verformung darstellen.

Ein holographischer Versuchsaufbau ist in Bild 2 wiedergegeben. Der kohärente monochromatische Laserstrahl wird mit Hilfe des Strahlteilers T in zwei Anteile zerlegt. Ein Strahl wird über ein Spiegel- und Linsensystem direkt auf die Hologrammplatte gelenkt und der zweite Strahl wird so aufgeweitet und abgelenkt, daß er das zu untersuchende Objekt beleuchtet.

Um bereits das erste mikroskopisch feine Interferenzmuster aus Objekt- und Referenzwelle einwandfrei aufzeichnen zu können, muß der gesamte Versuchsaufbau während der Belichtung der Fotoplate völlig stationär sein. Aber auch bis zur zweiten für die makroskopische Interferenz notwendigen Belichtung darf sich das Objekt nur dem gewünschten Meßeffect entsprechend verändern, d.h. es müssen Erschütterungen und geringste Bewegungen vermieden werden. Wird nun der Meßeffect am Testobjekt — z.B. bei Druckbehältern durch Aufbringen eines inneren Überdruckes oder bei anderen Gegenständen durch mechanische Verformung — mittels einer äußeren statischen Kraft erzeugt, so ist es in der Praxis nicht möglich, zwischen der ersten und der zweiten Aufnahme Erschütterungen oder geringste Lageveränderungen mit Sicherheit auszuschließen.

Diese Schwierigkeiten lassen sich dadurch umgehen, daß man die Oberflächenverschiebung nicht durch Aufbringen einer statischen Belastung, sondern dynamisch durch Anregung einer Oberflächenwelle mittels einer leichten, kurzzeitigen Stoßbeanspruchung auf das Bauteil bewirkt [6, 7]. Diese Belastung hat verschiedene Vorteile, insbesondere kann der zeitliche Abstand zwischen den beiden holographischen Aufnahmen, d.h. vor und nach bzw. während der Verformung so kurz gewählt werden, daß eine Lage- oder Formänderung durch Erschütterungen der Unterlage, auf der das Testobjekt ruht, schon aus Gründen der Massenträgheit nicht möglich sind. Der Zeitabstand zwischen beiden Aufnahmen kann auf wenige Mikrosekunden reduziert werden. Weiterhin kann die Hauptspannungsrichtung zur Erkennung beliebig orientierter Risse in weiten Grenzen geändert werden. Für die Aufnahme ist jedoch ein Impulslaser notwendig, der in der Lage ist, zwei aufeinanderfolgende Laserblitze in kürzestem Zeitabstand abzugeben.

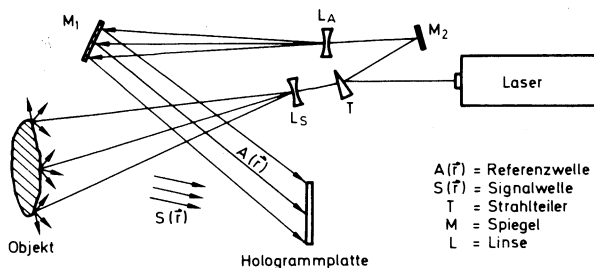


Bild 2. Holographischer Aufbau.

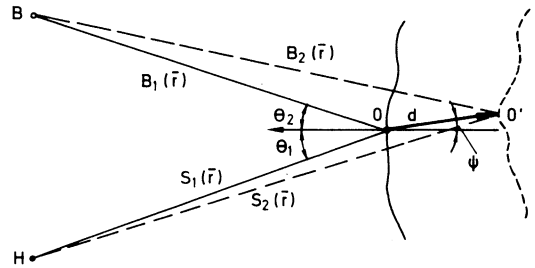


Bild 3. Berechnung der Weglängendifferenz infolge der Verschiebung eines Objektpunktes O nach O'.

BERECHNUNG DER OBERFLÄCHENVERSCHIEBUNG AUS DEM IM HOLOGRAMM GESPEICHERTEN INTERFERENZMUSTER

Die Gesamtauslenkung d der Objektoberfläche läßt sich aus der Anzahl der in der Hologrammplatte gespeicherten Interferenzstreifen berechnen. Die Zahl der Interferenzstreifen ist abhängig von der Wellenlänge λ des verwendeten Laserlichtes und von der geometrischen Anordnung des Versuchsaufbaus. Ausgehend von der Weglängendifferenz Δa infolge einer Veränderung des Objektpunktes O nach O' läßt sich die Oberflächenverschiebung d für d $\ll B_1, S_1$ berechnen (Bild 3).

Wie aus Bild 3 zu ersehen ist, beträgt der Gangunterschied zwischen den vom Beleuchtungsquellepunkt B zum Objektpunkt O bzw. O' zur Hologrammplatte H gehenden Strahlen

$$\Delta a = (S_2 + B_2) - (S_1 + B_1) = d \cos \psi (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (1)$$

Im Fall der Auslöschung entspricht der Schrittdifferenz Δa zwischen den beiden Strahlen ein ganzzahlig Vielfaches der halben Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes.

$$\Delta a = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} = d \cos \psi (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (2)$$

$$d = \frac{(2n + 1) \frac{\lambda}{2}}{\cos \psi (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

d.h. die Oberflächenverschiebung d ist direkt proportional der Streifenzahl n. Die anderen Parameter λ , θ_1 und θ_2 ändern sich während einer Versuchsdurchführung nicht, sie sind konstant. Aus der Anzahl der Interferenzlinien läßt sich mit dieser Anordnung nur die Komponente der Verschiebung der durch die Winkel θ_1 und θ_2 bestimmten Richtung angeben. Bei gleich großen Winkeln θ_1 und θ_2 ist dies die Richtung der Winkelhalbierenden zwischen Beobachtungs- (S(r)) und Beleuchtungsstrahl (B(r)). Die vollständige dreidimensionale Bestimmung des Verschiebungsvektors d ist mit genügender Genauigkeit nur dann möglich, wenn drei Hologramme aus verschiedenen Richtungen gleichzeitig aufgenommen werden. Dazu sind die Daten der optischen Anordnung notwendig; z.B. die aus den Vektoren vom Objektpunkt O zum Beobachtungspunkt H gebildeten Winkelhalbierenden

$$k_i = \frac{\vec{H}_i - \vec{O}}{|\vec{H}_i - \vec{O}|} \cdot \frac{\vec{S}_i - \vec{O}}{|\vec{S}_i - \vec{O}|} \quad (4)$$

Weiter läßt sich aus den drei holographischen gespeicherten Interferenzlinien die absolute Ordnung (Anzahl der Interferenzstreifen) bestimmen.

$$n_i = \vec{k}_i \cdot \vec{d} \quad (5)$$

Durch Bildung der reziproken Vektoren

$$\vec{k}^i = \frac{\vec{k}_m \cdot \vec{k}_n}{\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3} \tag{6}$$

mit $l, m, n = 1, 2, 3$
und zyklisch vertauscht

läßt sich das Gleichungssystem

$$\vec{d} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^3 n_i \vec{k}^i \tag{7}$$

aufstellen und damit die dreidimensionale Verschiebung $\vec{d}$ berechnen.

EXPERIMENTELLE DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

Die Stoßerregung zum Erzeugen der Oberflächenbewegung läßt sich mit Hilfe verschiedener Stoßapparate aufbringen. Als einfachste Stoßapparatur bietet sich ein Pendel aus einer Stahlkugel an. Wie die später noch zu beschreibenden Untersuchungen gezeigt haben, ist die Nachweisbarkeit von kleineren Materialfehlern mit Hilfe eines Pendels relativ schlecht, so daß als weitere Möglichkeit der Stoßerregung Kugeln aus einem Druckluftgewehr verwendet wurden. In Bild 4 ist der Versuchsaufbau mit dem beschriebenen Druckluftgewehr als Stoßapparat dargestellt.

Die Elektronik zum Steuern der beiden Riesenimpulse wird während des Durchtritts der Kugel durch die Lichtschranke angeschaltet. Wenn die Kugel die Lichtschranke passiert, wird über eine variable Verzögerungsleitung (5) einmal das Lasernetzgerät (8) zum Zünden der Blitzlampen angesteuert, zum anderen eine zweite Verzögerungsleitung (5), die den Generator (6) zur Erzeugung der Doppelimpulse einschaltet. Das Hochspannungsgerät (7) verstärkt diese Impulse auf die zur Aussteuerung einer Pockelzelle notwendige Spannung von etwa 5 kV. Mit Hilfe dieser Elektronik lassen sich die beiden Riesenimpulse so schalten, daß die bereits genannten Bedingungen für das Beleuchten des Objektes vor und nach dem Stoß erfüllt werden können.

Untersuchung einer 4mm dicken Platte

Zur Entwicklung dieses neuen Meßverfahrens wurden Objekte einfacher Geometrie (Platten) herangezogen, bei denen sich Störungen des Interferenzmusters an Fehlerstellen besonders gut erkennen lassen. Zunächst wurde eine $300 \times 220 \times 4$ mm³ einseitig eingespannte Aluminiumplatte mit einem auf der Rückseite eingebrachten nicht durchge-

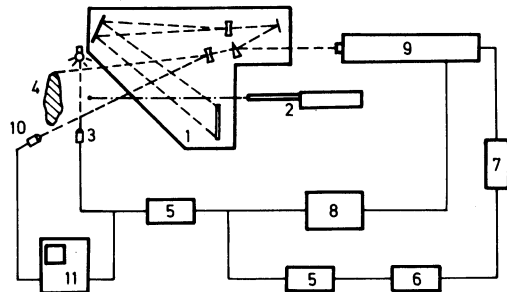


Bild 4. Versuchsaufbau.
1 = holographischer Aufbau
2 = Luftgewehr
3 = Lichtschranke
4 = Testobjekt
5 = Verzögerungsleitung
6 = Doppel-Puls-Generator
7 = Pockels-Zellen-Treiber
8 = Laser-Netzgerät
9 = Rubin-Laser
10 = Photo-Diode
11 = Oszillograph

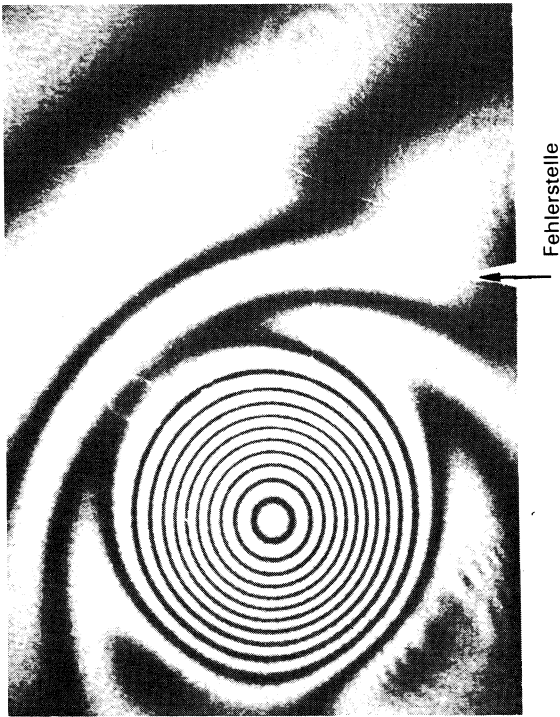


Bild 5. Interferenzstruktur der durch den Pendelstoß verformten 4 mm dicken Platte etwa 6 µs nach dem Stoß.

henden Fehler von 40 mm Länge, 1 mm Breite und 1 mm Tiefe untersucht. Wie bereits erwähnt, erfolgte die Stoßbeanspruchung wegen der einfacheren Technik mit einem Pendel.

Die Ergebnisse sind in den Bildern 5, 6 und 7 zu sehen. Hier wurde mit einem Pendel aus einer Stahlkugel von 10 mm Ø und einer Fallhöhe von 80 mm angestoßen. Die Stelle des Risses ist durch eine Marke am rechten oberen Bildrand ge-

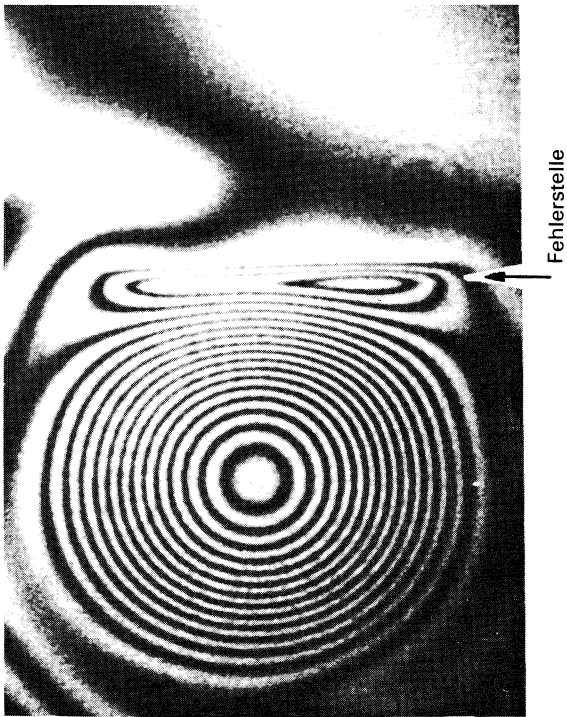


Bild 6. Interferenzstruktur der durch den Pendelstoß verformten 4 mm dicken Platte etwa 11 µs nach dem Stoß.

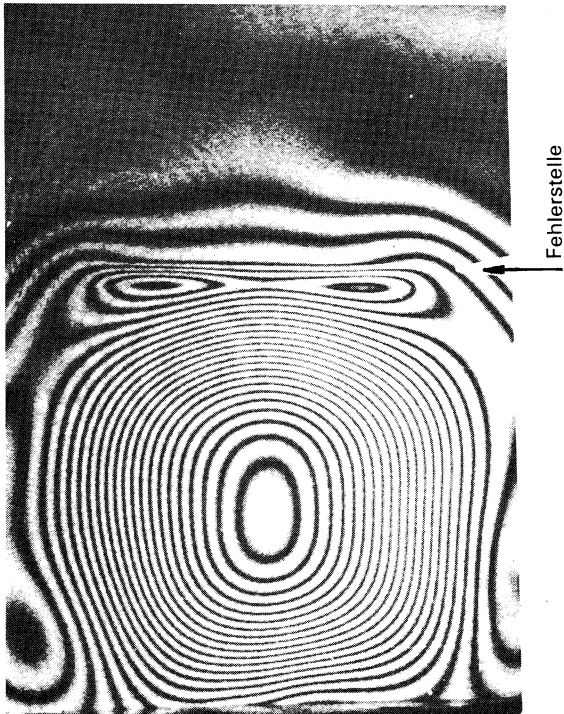


Bild 7. Interferenzstruktur der durch den Pendelstoß verformten 4 mm dicken Platte etwa 15 μ s nach dem Stoß.

kennzeichnet. In Bild 5 ist das Interferenzmuster etwa 6 μ s nach dem Stoß dargestellt. Die wellenartige Verformung äußert sich in kreisförmigen Interferenzlinien mit dem Zentrum im Stoßpunkt. Bild 6 zeigt das Interferenzmuster etwa 11 μ s nach dem Stoß. Jetzt wird der sich in Höhe der Marke befindliche Fehler von der wellenartigen Verformung überlaufen. Die Störung der Wellenausbreitung macht sich deutlich in einer starken Anomalie der Interferenzstruktur an der Fehlerstelle bemerkbar.

Aber auch wenn der zweite Riesenimpuls des Lasers zu einem noch späteren Zeitpunkt nach dem Stoß erscheint, ist die Fehlerstelle aufgrund der Anomalie der Interferenzstruktur deutlich erkennbar, wie in Bild 7 dargestellt. Die Aufnahme entstand rund 15 μ s nach dem Stoß.

Die Störungen der Interferenzstruktur an den Seiten und der unteren Hälfte der Platte ergeben sich einmal durch den

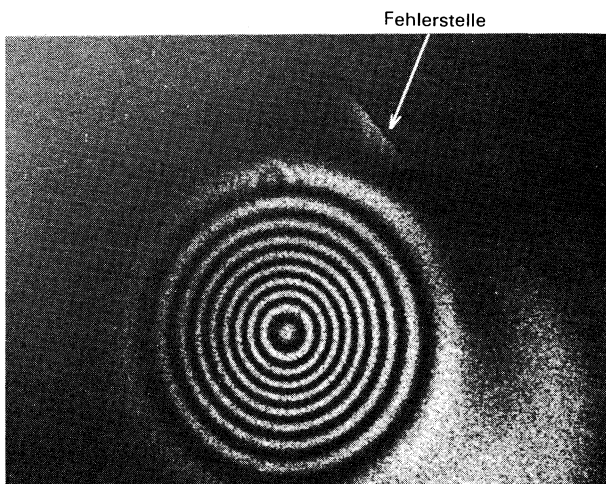


Bild 8. Interferenzlinien der durch den Pendelstoß verformten 20 mm dicken Platte etwa 5 μ s nach dem Stoß.

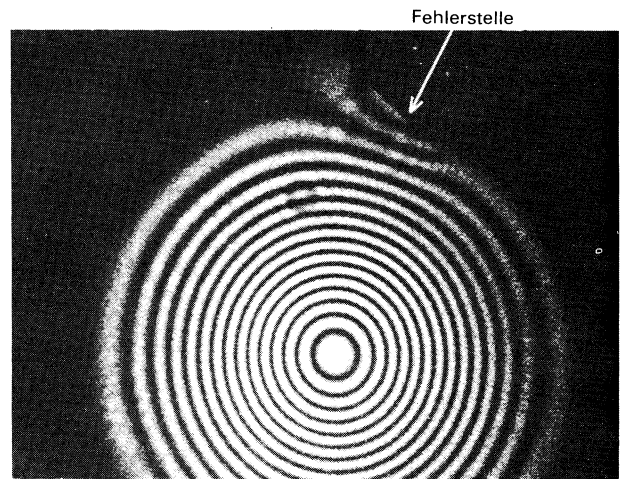


Bild 9. Interferenzlinien der durch den Pendelstoß verformten 20 mm dicken Platte etwa 11 μ s nach dem Stoß.

Randeinfluß und zum anderen durch die Einspannung in einem Maschinenschraubstock.

Untersuchung einer 20 mm dicken Platte

Der Einfluß der Wanddicke auf die Auslenkung nach einem Pendelstoß wurde in einer folgenden Versuchsreihe ermittelt. Dabei kam eine 20 mm dicke Aluminiumplatte zur Anwendung. Der eingebrachte Fehler bestand aus einer Bohrrreihe von zwanzig 1 mm $\varnothing$ durchgehenden Löchern. Der Lochabstand wurde mit 1,5 mm gewählt, so daß sich eine Gesamtfehlerlänge von 30 mm ergab. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Bildern 8, 9 und 10 zu sehen. Bild 8 zeigt wieder die durch den Stoß erfolgte symmetrische Verformung, während in den Bildern 9 und 10 die Fehlerstelle durch eine starke Anomalie der Interferenzstruktur deutlich hervortritt.

Untersuchung einer 15 mm dicken Platte mit verschiedenen Stoßapparaturen

Die anomale Oberflächenverschiebung und damit die Nachweisbarkeit eines Materialfehlers mit Hilfe der holographischen Interferometrie nimmt zu mit kleinerer Wellenlänge (kurze Stoßzeit) der Oberflächenwelle, sie nimmt jedoch ab für kleinere Fehlergrößen und größerer Übertragbarkeit der Spannungen durch die Fehlerstelle an die Nachbarmoleküle.

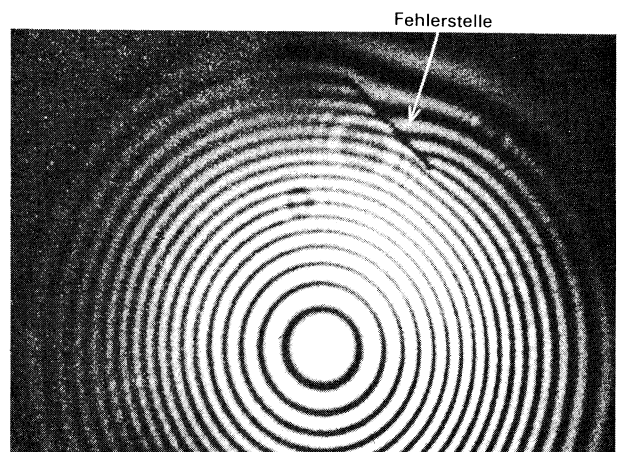


Bild 10. Interferenzlinien der durch den Pendelstoß verformten 20 mm dicken Platte etwa 16 μ s nach dem Stoß.

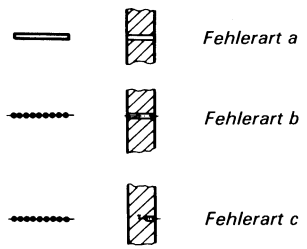


Bild 11a. Untersuchte Fehlerarten.

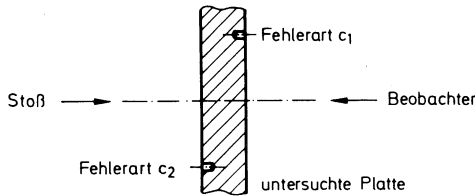


Bild 11b. Anordnung der Bohrreihen in der mit Hilfe der Druckluftge- wehrkugel angestoßenen Platte.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurden verschie- dene Möglichkeiten der Stoßanregung untersucht, um die Stoßzeit und damit die Wellenlänge der so erzeugten Ober- flächenwelle zu verkleinern. Neben den beschriebenen Un- tersuchungen mit Hilfe eines Pendels wurde jetzt auch der in Bild 4 gezeigte Druckluftapparat verwendet. Damit ließen sich Stoßzeiten von etwa 5 bis 10 μ s gegenüber 20 bis 30 μ s beim Pendel erzielen. Noch kürzere Stoßzeiten ließen sich mit einem elektromagnetischen Apparat erzielen, wo- bei infolge eines kurzzeitigen sehr hohen Kondensatorstor- mes zwei gegenseitig durchflossene Leiter abgestoßen wer- den, und so den Stoß einleiten [8]. Diese Möglichkeit der Stoßerregung bestand jedoch während dieser Versuchs- durchführungen noch nicht.

Die in den folgenden Versuchsreihen untersuchten Mate- rialfehler sollten Haarrisse möglichst gut nachbilden, die durch teilweise Trennung, Berührung und Verbindung des

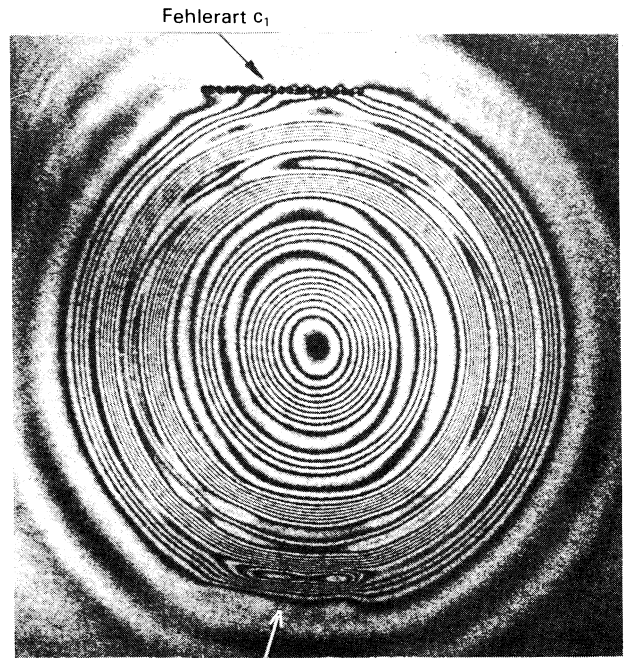


Bild 13.

Materials gekennzeichnet sind. Diese Art Fehler lassen sich relativ gut durch Bohrreihen unterschiedlicher Länge, Tiefe und Abstand der Bohrungen nachbilden. Damit verbunden ist eine unterschiedliche Übertragbarkeit der durch die Welle erzeugten Spannungen an der Fehlerstelle (Bild 11 a).

- a) durchgehender Riß
- b) durchgehende Boh- rungen

Übertragbarkeit der Spannungen
je nach Länge etwa 10 bis 20%
etwa 50%, abhängig vom Abstand

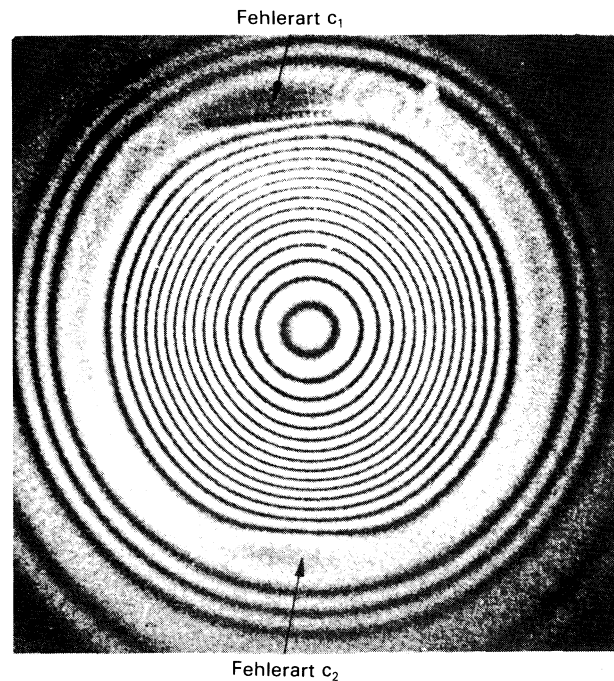


Bild 12.

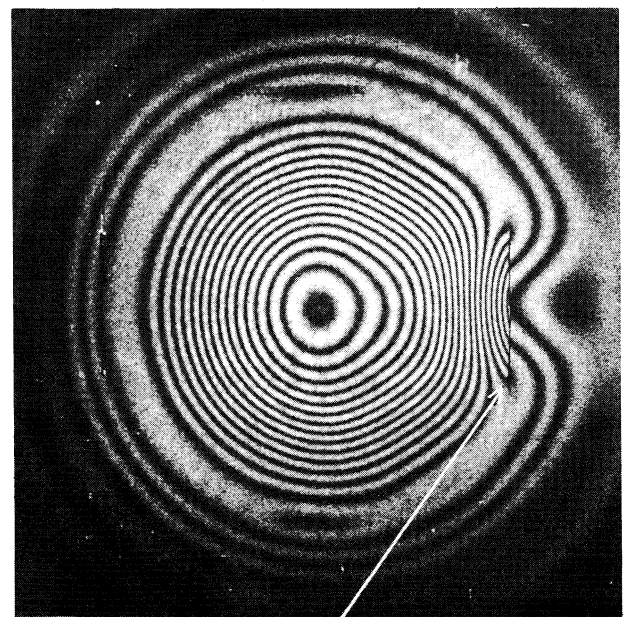


Bild 14.

- c) nicht durch-
gehende Bohrungen
- je nach Tiefe und
Abstand
etwa 70 bis 90%

Alle drei Fehlertypen wurden in eine 15 mm dicke Aluminiumplatte eingebracht und diese dann mit Hilfe der Impulsholographie untersucht.

Damit die Aluminiumplatte für weitere Messungen erhalten bleibt, wurde zunächst der kleinste Fehler mit der größten Übertragbarkeit der Spannungen in die Platte eingebracht (Fehlertyp c). Zwei Bohrreihen wurden symmetrisch zum Stoßzentrum so angeordnet, daß die Bohrungen einmal auf der beobachteten Seite und zum anderen auf der gegenüberliegenden Seite (Stoßseite) lagen (Bild 11 b).

Wie in Bild 12 zu sehen ist, lassen sich diese beiden Fehler mittels der Pendelstoßerregung (etwa 30 μ s Stoßzeit) kaum nachweisen (Fehlertyp und Lage durch Pfeile gekennzeichnet). In Bild 13 jedoch sind diese Fehler deutlich durch eine Anomalie des Interferenzstreifenmusters zu erkennen, hier wurde mit dem Druckluftapparat und einer Stoßzeit von rund 8 μ s gearbeitet. Bild 14 zeigt die Störung des Streifenmusters durch den Fehlertyp a und in Bild 15 ist die Störung durch Fehlertyp b deutlich zu erkennen. Hier genügt bereits die relativ lange Stoßzeit von etwa 30 μ s des Pendels mit einer Stahlkugel.

Um den Einfluß der verschiedenen Stoßzeiten und den daraus resultierenden Wellenlängen weiter zu verdeutlichen, wurden die Oberflächendeformationen nach Bild 13 und 14 mit Hilfe der Gleichung (3) ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den Bildern 16 und 17 dargestellt. In Bild 16 ist die Fehlerstelle durch einen leichten Amplitudensprung im Schnitt C—D gekennzeichnet. Man erkennt eine Überlagerung der Grundschwingung mit einer höherfrequenten Schwingung. Diese kürzere Schwingung ermöglicht den Nachweis der relativ kleinen Fehler in dieser Platte. Bild 17 zeigt die gleiche Platte mit dem Sägeschnitt als Materialfehler, angestoßen durch das Pendel. Der Schnitt A—B zeigt an der Fehlerstelle einen starken Amplitudensprung,

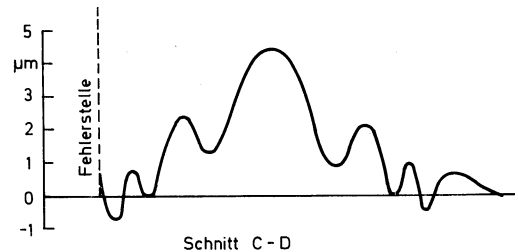
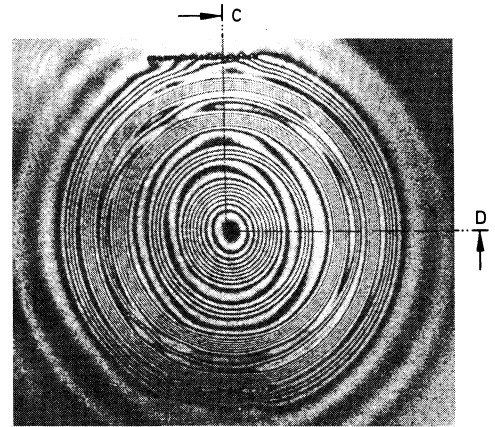
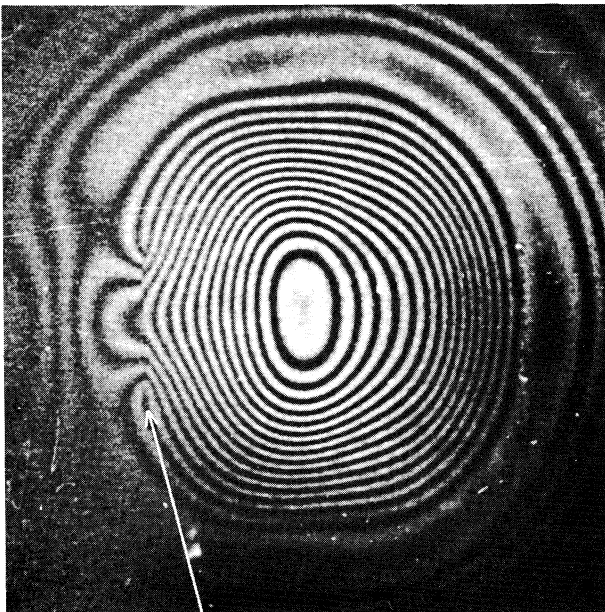


Bild 16. Auslenkung der Oberfläche nach dem Stoß mit einer Druckluftgewehrkugel.

der die Unregelmäßigkeit des Interferenzmusters bewirkt.

AUSBLICK

Die Untersuchungen von geometrisch einfachen Körpern (Platten) haben gezeigt, daß sich die Holographie wirksam zur Rißerkennung in metallischen Werkstoffen einsetzen läßt. Haarrisse, die durch teilweise Trennung, Berührung und Verbindung des Materials gekennzeichnet sind, wurden durch nebeneinanderliegende Bohrungen unterschied-



Fehlerart b

Bild 15.

Bilder 12 bis 15. Interferenzstrukturen der durch den Pendelstoß (Bilder 12, 14, 15) und durch die Druckluftgewehrkugel (Bild 13) verformten 15 mm dicken Aluminiumplatte.

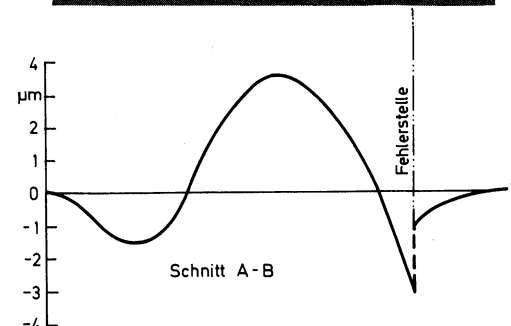
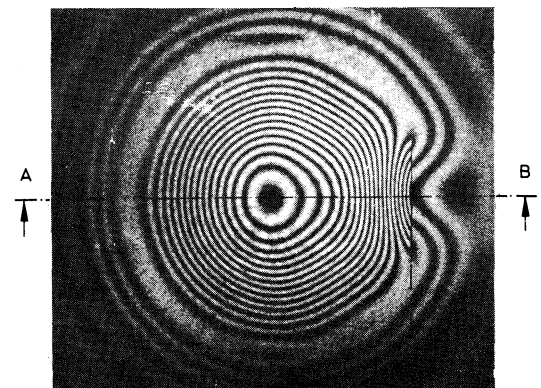


Bild 17. Auslenkung der Oberfläche nach dem Stoß mit einem Pendel.

lichen Abstandes und Durchmessers nachgebildet. Sie konnten durch den Stoß mit einer Druckluftgewehr­kugel wirksam nachgewiesen werden. Die zur Verfügung stehen­den Stoßapparate (Pendel, Druckluftgewehr) ließen nur die Untersuchung von relativ dünnwandigen Platten zu (<20 mm), da die minimale Oberflächenbewegung zwischen 1 und 2 µm betragen muß. Zum Nachweis von sehr kleinen Materialfehlern werden Stoßapparate benötigt, mit deren Hilfe sich bei ausreichender Energie sehr kurze Stoßzeiten verwirklichen lassen. Weiter ist daran gedacht, in Ver­gleichsmessungen unterschiedliche Wellenausbreitung an komplizierteren Werkstücken zu messen, um auch hier bei Abweichungen der Interferenzmuster auf Materialfehler schließen zu können.

SCHRIFTTUM

[1] Gabor, D.: A New Microscopic Principle. Nature 161, 777 (1948).
Microscopy by Reconstructed Wavefronts. Proc. Roy. Soc. A 197,

454 (1949).

Microscopy by Reconstructed Wavefronts II. Proc. Phys. Soc. B 64, 449 (1951).

[2] Kiemle H., and Röss, D.: Einführung in die Technik der Holo­graphie. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt a.M., (1969).

[3] Smith, H.M.: Principles of Holography Wiley (Interscience). New York (1969).

[4] Caulfield, H.J., and Sun Lu: The Applications of Hologra­phy. Wiley (Interscience), New York (1970).

[5] Collier, R.J., Burckhardt, C.B., and Lin, L.H.: Optical Ho­lography. Academic Press, New York (1971).

[6] Gregor, E.: Holographische Interferometrie bei der Untersu­chung der Ausbreitung von Stoßwellen. Laser und angewandte Strahlentechnik, Nr. 2/1971, S. 18/19.

[7] Chu, W.P., Robinson, D.M., and Goad, J.H.: Holography Nondestructive Testing with Impact Excitation. Applied Optics, Vol. 11, No. 7, July 1972, S. 1644/1645.

[8] Snell, R.F.: An Electromagnetic Plane Stress Wave Generator. Exp. Mech. 13 (1973), 11, 472—478.

Einfluß von Werkstoff-Inhomogenitäten auf einige Gebrauchseigenschaften von Stählen für schwere Schmiedestücke.

Von U. Schieferstein und W. Wiemann*

Vorgetragen als Bericht Nr. 45 bei der 7. Internationalen Schmiedetagung in Paris, 20. bis 25. April 1975.

Herrn Dr.-Ing. E. h. Dipl.-Ing. Rudolf Schinn zur Vollendung seines 65. Lebensjahres gewidmet.

TEIL II: UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE¹⁾

EINFLUSS VON INHOMOGENITÄTEN AUF DAS SPRÖDBRUCHVERHALTEN

Wegen der Bedeutung, welche der linearen elastischen Bruchmechanik bei der Lebensdauerberechnung von Turbo­schmiedestücken zukommt, wurden zunächst Untersuchun­gen über den Einfluß von Werkstoff-Inhomogenitäten (Po­ren, Seigerungen, Risse bis 8 mmØ, künstliche Fehler) auf das Spröbruchverhalten der Stähle durchgeführt. Hierzu wurden ausschließlich Proben mit natürlichen Anrissen ver­wendet, also entweder Fallgewichtsproben nach ASTM-E 208 (Pelliniprüben) oder Zugproben des Typs CT (Compact Tension) nach ASTM-E 399. Die Gründe für den Einsatz die­ser Proben wurden wiederholt erörtert, unter anderem auch in [7, 8, 10].

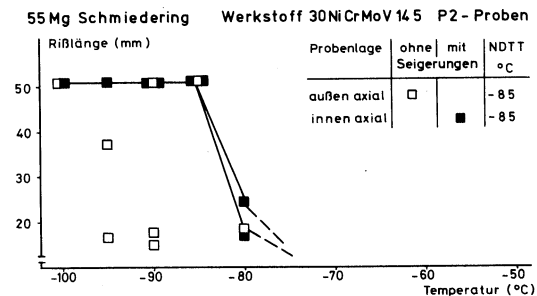
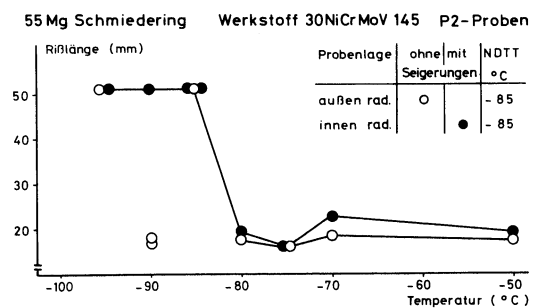
Spröbruch-Übergangstemperatur NDTT

Die Ergebnisse der Fallgewichtsversuche zur Bestimmung der NDT-Temperatur an Proben mit und ohne Inhomogenitäten sind in den Bildern 18 bis 25 zusammengestellt, mit Ergänzung durch einige Modellversuche an Proben mit künstlichen Fehlern in den Bildern 26 und 27.

Art und Aussehen der untersuchten Inhomogenitäten ist aus den Bildern 20, 22 und 24 zu erkennen, zusätzlich sind die Bilder 28, 30 und 32 zu beachten. Alle Fallge­wichtsversuche wurden mit Proben der Form P2 nach ASTM-E 208 durchgeführt, Prüfquerschnitt 2" x 3/4" = 50,8 x 19 mm. In den Reißlänge-Temperatur-Diagrammen (Bilder 18, 19, 21, 23, 25, 27) ist jeweils zwischen Proben mit und ohne Inhomogenitäten unterschieden.

Ergebnis:

In keinem Fall ist die Spröbruch-Übergangstemperatur NDTT zu höheren Temperaturen verschoben, also ver­schlechtert worden. Inhomogenitäten der hier untersuch­ten Arten und Stärken haben demnach keinen Einfluß auf diese Werkstoffeigenschaft.



Bilder 18 und 19. Einfluß auf NDTT:

Seigerungsstreifen („ghost lines“) im Ringschmiedestück nach Bild 16.

* Dr.-Ing. U. Schieferstein und Dipl.-Ing. W. Wiemann, Kraftwerk Union AG, Mülheim an der Ruhr, Bereich Technik Werkstoffe.

¹⁾ Teil I und Schrifttum siehe VGB KRAFTWERKSTECHNIK 56 (1976), H. 5, Seiten 268 bis 273. Die Bildnumerierung in Teil II schließt an diejenige in Teil I an.