

ANWENDUNG DER HOLOGRAPHISCHEN INTERFEROMETRIE ZUR ZERSTÖRUNGSFREIEN MATERIAL- UND BAUTEILEPRÜFUNG

1. Einleitung

Im gesamten Apparatebau werden eine Vielzahl von Komponenten verwendet, die mit konstruktionsbedingten Schwachstellen, wie z.B. Schweißnähte, Stützeinführungen usw. behaftet sind. Es ist deshalb von großem Interesse, für den Hersteller zu wissen wie sich diese Schwachstellen auf die Verformung z.B. eines Behälters unter betriebsbedingten Belastungen auswirken. Daraus können Erkenntnisse für den Konstrukteur solcher Anlagen gewonnen werden, die sich zu einer Verbesserung und anderen Auslegung der erwähnten Schwachstellen heranziehen lassen. Bisher konnten Verformungen mit genügender Genauigkeit nur an besonders gefährdeten Stellen punktförmig mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen bzw. Weggebern gemessen werden. Eine großflächige berührungslose Verformungsmessung wurde erst mit Hilfe der holographischen Interferometrie möglich, wobei neben statischen auch dynamische Vorgänge meßbar sind. Aus dieser berührungslosen, großflächigen Verformungsmessung ergeben sich weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Holographie; bekannterweise stellen Materialfehler besonders ausgeprägte Schwachstellen in einem Bauteil dar, so daß es nach einer aufgezwungenen Belastung zu einer ausgeprägten Verformungsänderung in Fehlernähe kommt. Diese, von der übrigen Umgebung abweichende Verformung wird im holographisch gespeicherten Interferenzbild sichtbar.

2. Grundlagen der holographischen Interferometrie

Es würde hier zu weit führen, die Technik der Holographie und die ihr zugrundeliegende Theorie darzulegen. Beides ist in der Literatur /1,2/ ausführlich beschrieben. Hier sei nur kurz das Prinzip, soweit

es zum Verständnis des Meßverfahrens notwendig ist, in einer anschaulichen Darstellung erklärt. Die holographische, dreidimensionale Aufzeichnung von Gegenständen beruht auf der Speicherung der von dem mit Laserlicht beleuchteten Gegenstand ausgehenden Wellenfront. Diese Speicherung wird so vorgenommen, daß diese Wellenfront zunächst mit einer zweiten Welle, der sogenannten Bezugs- oder Referenzwelle überlagert wird. Im Überlagerungsgebiet entstehen wegen des kohärenten Laserlichtes Interferenzstreifen, die in der Emulsion einer speziellen Fotoplatte gespeichert werden. Nach dem Entwicklungsprozeß der Fotoplatte bildet dieses mikrofeine Interferenzstreifensystem für die nunmehr zur Rekonstruktion verwendete Referenzwelle ein Beugungsgitter, wobei hinter der jetzt als Hologramm bezeichneten Fotoplatte drei Wellen zu beobachten sind, von denen eine die exakte Rekonstruktion der aufgenommenen ursprünglichen Objektwelle darstellt. Sie erzeugt ein virtuelles Bild des vorher vorhandenen Objektes.

Wegen der in weiten Bereichen geradlinig verlaufenden Schwärzungskurve lassen sich nun in der Fotoplatte mehrere Aufnahmen speichern und rekonstruieren. Verändert sich zwischen zwei holographischen Aufnahmen das Objekt in seiner Lage oder seiner Oberflächengestalt geringfügig und werden diese beiden Zustände in der gleichen Hologrammplatte gespeichert, so interferieren in der Rekonstruktion beide zu den verschiedenen Objektzuständen gehörigen Wellenfronten miteinander und man kann auf dem virtuellen Bild des Objektes ein makroskopisches Muster der bekannten Interferenzstreifen beobachten. Diese Interferenzstreifen stellen in erster Näherung Linien konstanter Verschiebung oder Verformung dar.

3. Versuchseinrichtung und -durchführung

Der für die holographischen Messungen verwendete Versuchsaufbau ist in Abb. 1 wiedergegeben. Der monochromatische, kohärente Laserstrahl wird aufgeweitet und mit Hilfe des Strahlteilers in zwei Anteile zerlegt. Ein Strahl wird über ein Spiegelsystem direkt auf die Hologrammplatte gelenkt. Er stellt die sogenannte Bezugs- bzw. Referenzwelle dar. Der zweite Strahl beleuchtet das zu untersuchende Objekt, von dem durch Reflexion und Beugung die in ihrer Form komplizierte Objektwelle ausgeht.

Um bei der Versuchsdurchführung bereits das erste mikroskopisch feine Interferenzmuster aus Referenz- und Objektwelle aufzeichnen zu können, darf sich der gesamte Versuchsaufbau, einschließlich Laser und Objekt, während der Belichtung der Fotoplatte nicht bewegen. Diese Forderung kann in der Regel nur erfüllt werden, wenn die gesamte Versuchseinrichtung schwingungsisoliert aufgestellt ist. Diese für Messungen in der Praxis oft hinderliche Forderung läßt sich umgehen, wenn die Belichtungszeit derart kurz gewählt wird, daß eine Bewegung der Komponenten mit Sicherheit auszuschließen ist. Derartig kurze Belichtungen lassen sich mit einem Impulslaser erzielen, der in der Lage ist, Laserblitze mit kürzester Zeitdauer (ca. $20 \cdot 10^{-9}$ s) und hoher Leistung abzugeben. Ein für Messungen von stoßartigen Verformungen verwendeter Versuchsaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Der Impulslaser wird dabei über eine Lichtschranke bzw. einen Schwingungsaufnehmer gesteuert. Der eingezeichnete zusätzliche Dauerstrichlaser dient zur Justierung und Rekonstruktion der aufgenommenen Hologramme. Durch Anpassung der elektronischen Schaltung zur Steuerung der Laserblitze lassen sich mit dieser Versuchsanordnung sämtliche statische und dynamische Verformungsvorgänge holographisch aufzeichnen.

4. Ergebnisse der holographisch-interferometrischen Messungen

In den folgenden Abschnitten wird zunächst gezeigt, wie die Verformung eines Gasdruckbehälters unter Innendruck holographisch gemessen werden kann. Anschließend werden Auswirkungen von Materialfehlern auf die Verformung und somit auf die Gestaltung des Interferenzmusters untersucht.

4.1 Verformungsuntersuchung eines Zyklonabscheiders

In Abb. 3 ist ein Zyklonabscheider für Naßentstaubungsversuche zu sehen. Dieser Abscheider wurde aus einem Gasdruckbehälter ($d = 500 \text{ mm}$, \varnothing , $s = 6 \text{ mm}$) hergestellt. Dazu wurde ein Rohr senkrecht zur Mittellinie außermittig angeschweißt. Durch diese Maßnahme entstand eine konstruktionsbedingte Schwachstelle, deren Einfluß auf die Verformung holographisch gemessen werden sollte. Dazu wurde der Behälter mit einer ersten holographischen Belichtung unter Außendruck aufgenommen. Anschließend erfolgte nach einer Innendruckerhöhung um $0,8 \text{ bar}$ die zweite holographische Aufnahme. Die zwischenzeitlich stattgefundenen Ausdehnung des untersuchten Behälterteiles zeigt interferometrisch Abb. 4. Auf dem Interferenzbild ist zu erkennen, daß sich im Gebiet der Rohreinführung ein in sich geschlossenes Interferenzstreifensystem ausgebildet hat.

Zur Mitte des Behälters hin fällt weiter die relativ hohe Liniendichte auf. Diese beiden Bedingungen zeigen, daß die Behälterwand sich hier glockenförmig ausgedehnt hat. Diese hohe Liniendichte ist weiter auf dem unteren Teil, dem Behälterboden, zu erkennen, auch hier hat eine relativ starke Ausdehnung gegenüber dem unbelasteten Behälter stattgefunden. Zur besseren Übersicht wurde die Ausdehnung dieses Behälterabschnittes dreidimensional dargestellt (Abb. 5), wobei die Verformung aus den Bedingungen für Interferenz errechnet wurde.

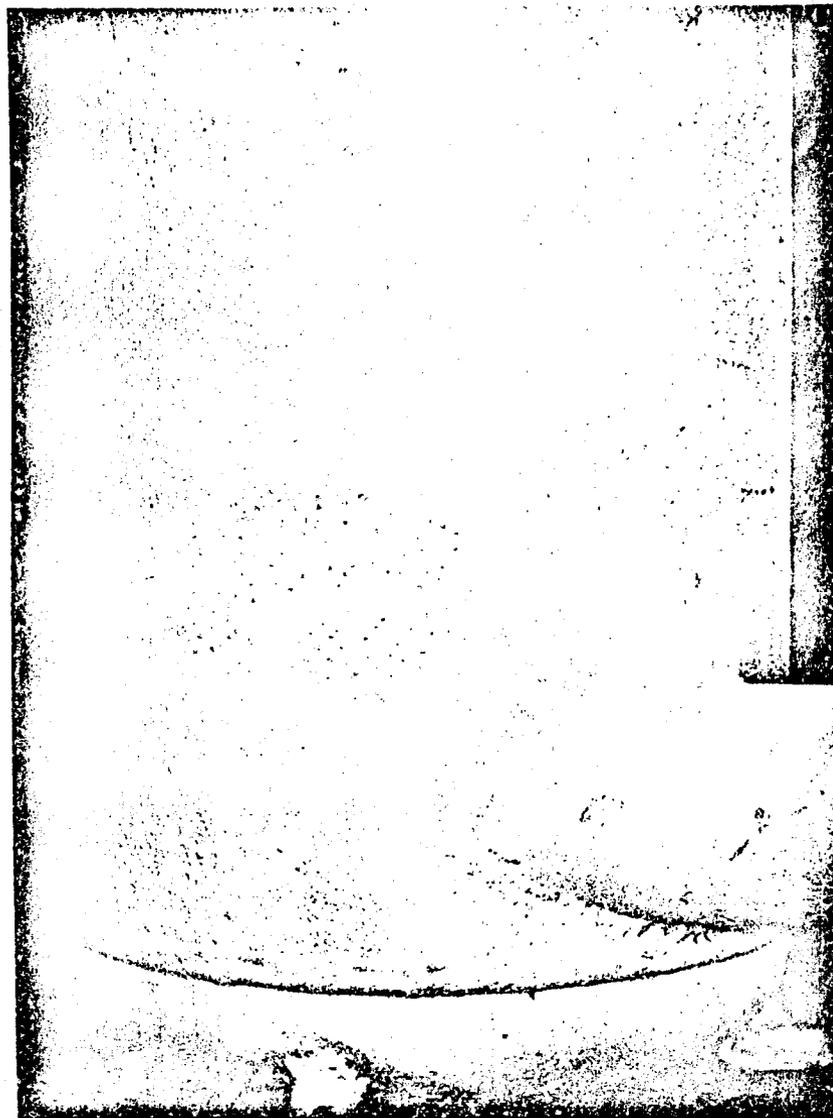


Abb. 3 Zyklonabscheider mit seitlich eingeführtem Zulaufrohr

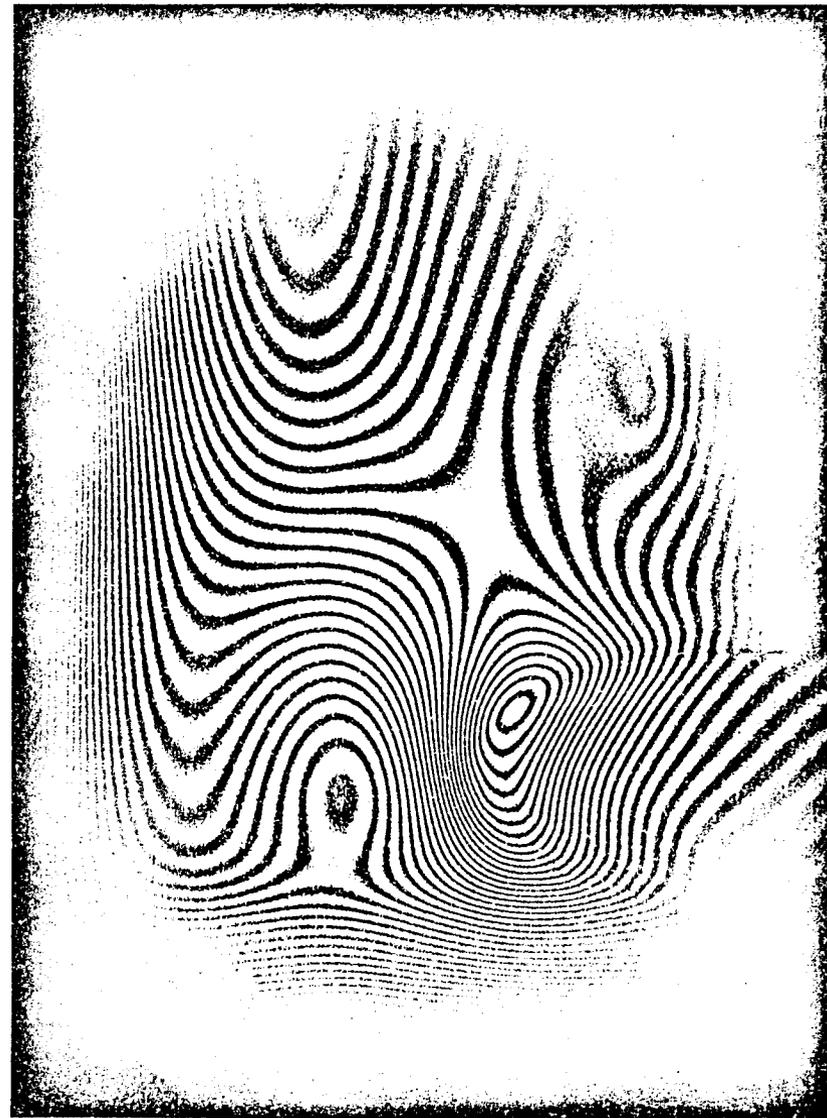


Abb. 4 Interferogramm des Zyklonabscheiders, hervorgerufen durch eine Druckdifferenz von 0,8 bar

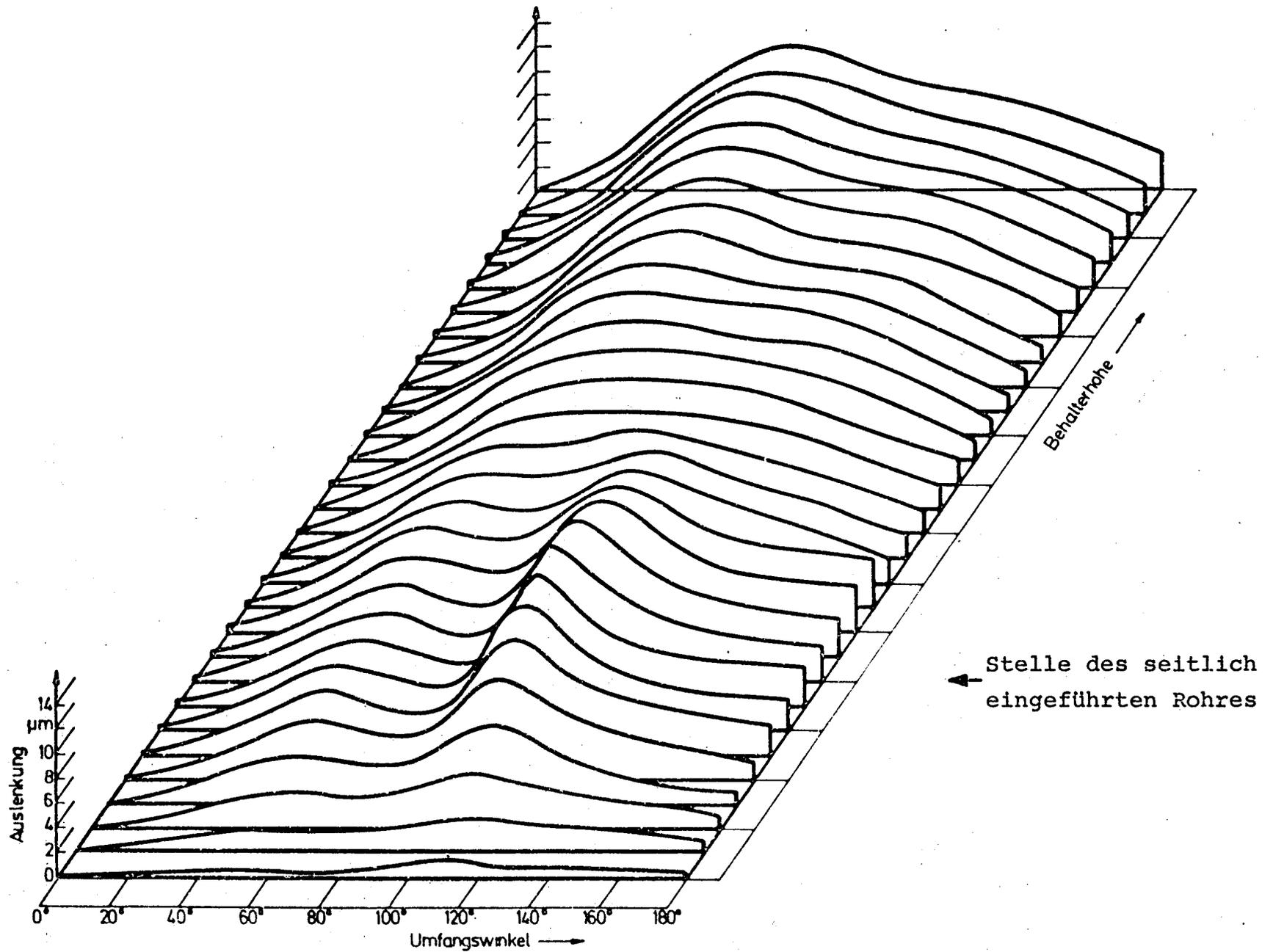


Abb. 5 Graphische Darstellung der Behälterauslenkung nach einer Innendruckerhöhung um 0,8 bar

$$d = \frac{(2n + 1) \lambda}{2 \cos \theta}$$

d: Verformung eines Oberflächenpunktes

n: Interferenzstreifenzahl

λ : Wellenlänge des Laserlichtes

θ : Winkel im holographischen Aufbau

Auch in dieser Darstellung ist die relativ starke, anomale Verformung des Behälters durch das seitlich eingeführte Rohr erkennbar.

4.2 Holographische Rißerkennung

Aus der Möglichkeit, Oberflächenverformungen großflächig messen zu können, ergibt sich der Einsatz der Holographie in der zerstörungsfreien Materialfehlerprüfung. Vermutlich ebenso alt wie alle übrigen zerstörungsfreien Meßverfahren ist wohl auch der Vorschlag, aus Oberflächenverformungen, die durch eine beliebige Belastung des Werkstückes hervorgerufen werden, auf Fehlstellen im Material zu schließen. Jede Art der Belastung führt zu Spannungen im Inneren und an der Oberfläche des betreffenden Werkstückes oder Behälterteiles. Ist das Material fehlerfrei, verlaufen diese Spannungen stetig, was wiederum zu einer gleichmäßigen Verformung der Oberfläche führt. Ein Riß oder ein anderer Materialfehler bewirken eine Unstetigkeit des Spannungsverlaufes und haben, sofern sich diese Unstetigkeit bis an die Oberfläche durchsetzt, eine anomale Verformung derselben zur Folge. Diese holographisch gemessene anomale Verformung der Oberfläche äußert sich im Interferenzbild in einem von der übrigen Umgebung abweichenden Interferenzmuster.

4.2.1 Messungen von Materialfehlern unter statischer Belastung der Testobjekte

Die einfachste Belastungsart, die eine entsprechende Verformung der Oberfläche zur Folge hat, ist die der statischen Krafteinwirkung auf das Testobjekt. Mit Hilfe dieser statischen Belastung wurden folgende Werkstücke bzw. Behälterteile untersucht:

- a) eine Turbinenschaufel mit einem Haarris
- b) ein Ausschnitt eines Speisewasserbehälters mit einem Korrosionsriß in der Schweißnaht

Bei Turbinenschaufeln, die im Betrieb sehr hohen Belastungen ausgesetzt sind, werden besondere Anforderungen an das Material und damit die Materialprüfung gestellt. Die zerstörungsfreie Prüfung auf eventuell vorhandene Risse ist bei derartigen Objekten deshalb besonders wichtig. Aus diesem Grund wurden an einer Turbinenschaufel mit einem Haarris grundsätzliche Versuche durchgeführt, um die Wirksamkeit der holographischen Rißprüfung zu untersuchen. Die in Abb. 6 dargestellte Schaufel wurde dazu einseitig am unteren Ende in einen Maschinenschraubstock eingespannt und anschließend nach einer ersten holographischen Aufnahme durch eine aufgezwungene statische Krafteinwirkung verformt. Mit der zweiten holographischen Aufnahme wurde dieser Verformungszustand mit dem unbelasteten verglichen. Das derart erzeugte Interferenzbild zeigt Abb. 7. Der Haarris ist deutlich durch den anomalen Verlauf der Interferenzstreifen gekennzeichnet. Der abrupte Abriß der Interferenzlinien deutet auf einen Fehler hin, der keine Materialverbindung mehr aufweist.

Ähnliche Versuche wurden mit einem Abschnitt eines Speisewasserbehälters aus einem Kernkraftwerk durchgeführt. Bei diesem Behälter war im Laufe der Zeit ein Korrosionsriß entstanden. Derartige Behälter werden im Betrieb sowohl mit Überdruck als auch mit Unterdruck betrieben. Aus diesem Grunde sind diese Behälter mit einem außen aufgeschweißten spiralförmig verlaufenden Stützring versehen. Die holographische Prüfung des in Abb. 8 dargestellten Abschnittes sollte mit einer Belastungsart durchgeführt werden, die in etwa auch einer im Betrieb auftretenden Belastung entspricht. Wird der Behälter mit Unterdruck belastet, so ist zu erwarten, daß sich das Gebiet um den Stützring nahezu so verformt wie in Abb. 9 dargestellt ist. Eine derartige Verformung des Abschnittes zu erzeugen, ist

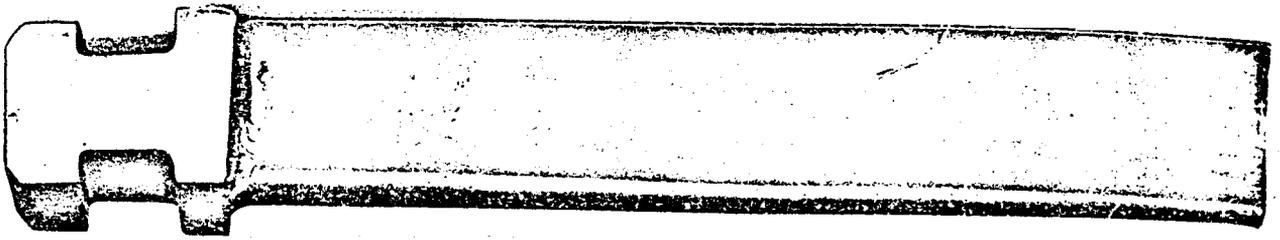


Abb. 6 Turbinenschaufel mit einem Haarriß

↓ Riß

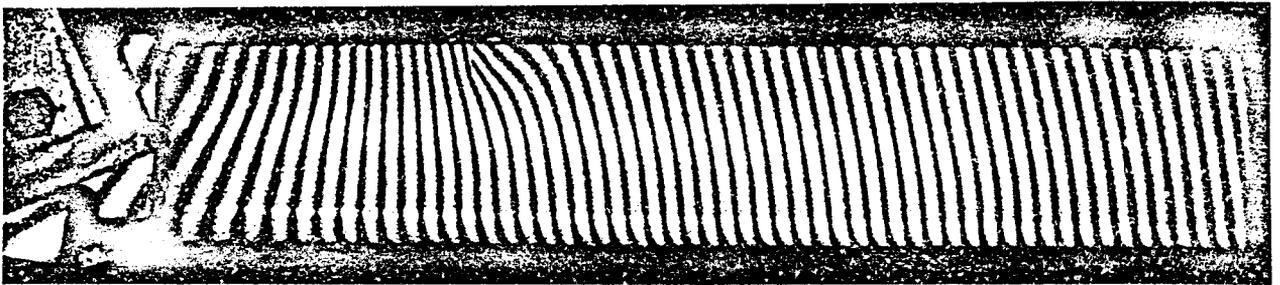


Abb. 7 Interferogramm der Turbinenschaufel nach einer statischen Biegebeanspruchung

relativ schwierig und konnte nur durch ein innen aufgebrachtes Kältemittel (Kältespray) hervorgerufen werden. Unterstützt wurde die Verformung noch durch eine Vorspannung des Abschnittes in einem Maschinenschraubstock. Das auf diese Weise aufgenommene Interferenzbild zeigt Abb. 10. Die von unten nach oben verlaufende Schweißnaht ist gut zu erkennen, wobei auf der rechten Seite der Naht keine Beeinflussung der Interferenzlinien stattfindet. Der linke Schweißnahttrand dagegen ruft eine starke un stetige Ablenkung und Versetzung der Interferenzlinien hervor. Dieser anomale Verlauf der Interferenzstreifen wird hervorgerufen durch einen Riß, bei dem in Oberflächennähe ebenfalls keine Materialverbindung mehr vorhanden ist.

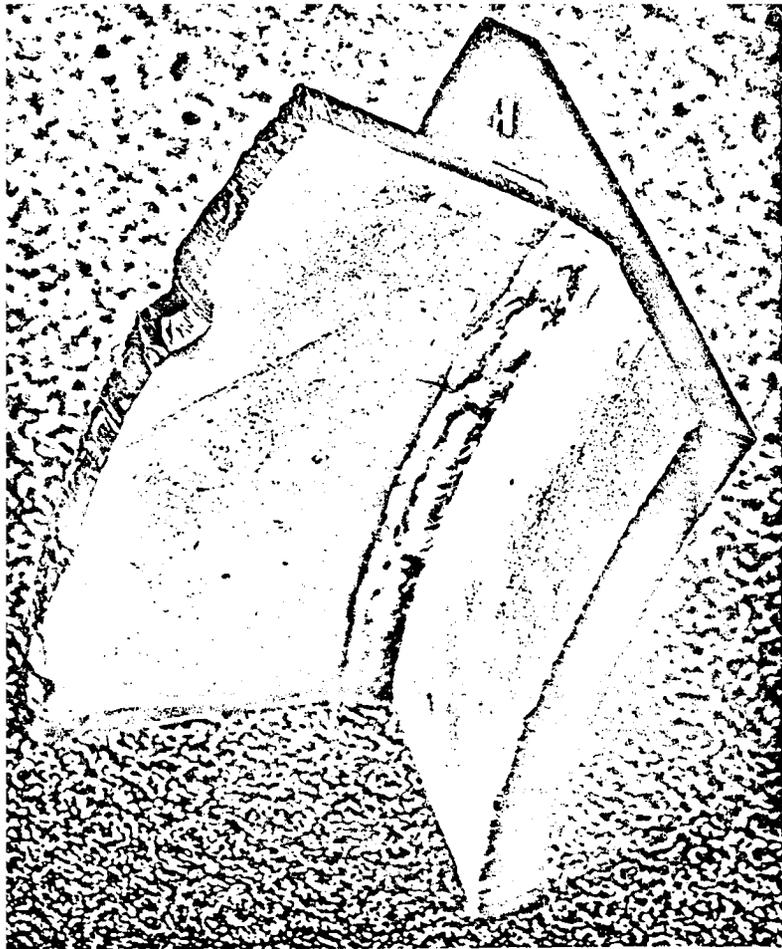


Abb. 8 Ausschnitt eines Speisewasserbehälters mit einem Riß in der Stützringsschweißnaht

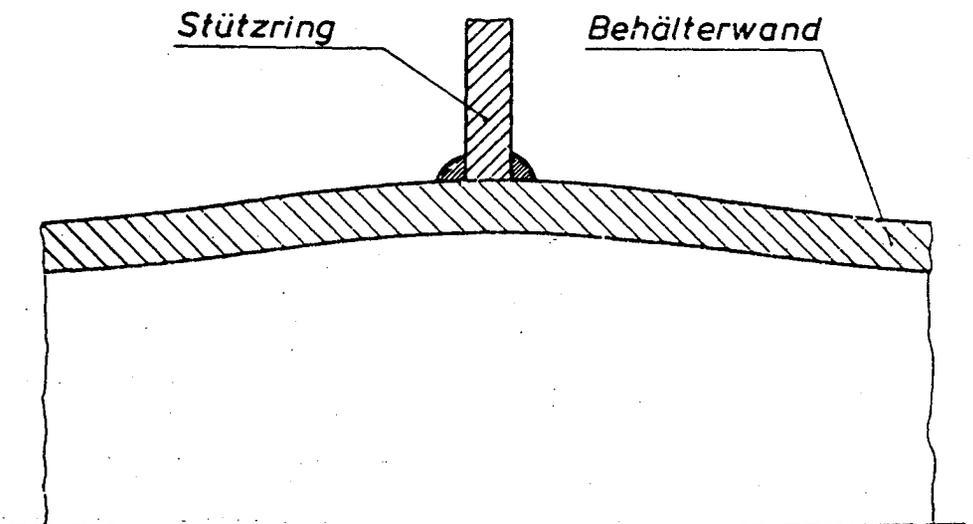
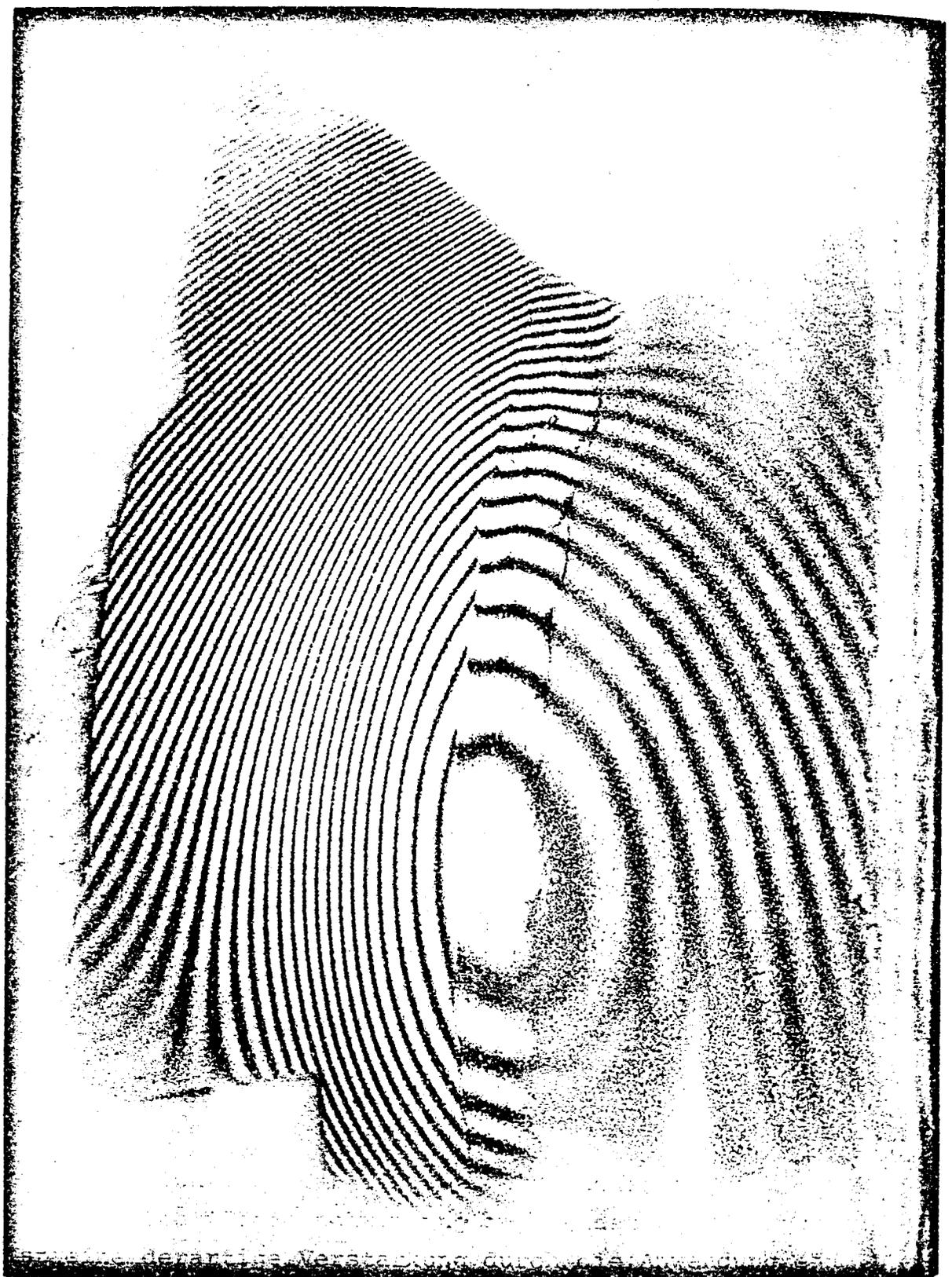


Abb. 9 Verformung eines Behälters in der Umgebung eines Stützringes bei Unterdruck



fehlerhafte Schweißnaht-
randzone

Abb. 10 Interferogram des Speisewasserbehälterausschnittes
unter Einwirkung eines einseitig aufgetragenen Kälte-
mittels

4.2.2 Messungen von Materialfehlern bei stoßartiger Belastung des Testobjektes

Aus der durch den Impulslaser gegebenen Möglichkeit, schnell ablaufende Vorgänge holographisch messen zu können, ergeben sich weitere Gesichtspunkte für den Einsatz dieser Technik in der zerstörungsfreien Materialfehlerprüfung. Die durch eine stoßartige Belastung des Testobjektes hervorgerufene Wellenausbreitung erfährt auch hier wegen der Nichtübertragbarkeit von Spannungen an Rissen eine Störung, die, sofern sich der Fehler in Oberflächennähe befindet, zu einer anomalen Verformung der Oberfläche in Fehlernähe führt /3,4/.

Versuche mit dieser Belastungsart zeigen, daß Risse mit einer Ausdehnung im Millimeterbereich in relativ dünnwandigen Stahlplatten ($d < 30$ mm) gut schweißbar sind. Mechanische Stöße (siehe Abb. 2) auf Platten dieser Dicke erzeugen Biegewellen, deren Störung an Rissen sich in einer Störung des Interferenzmusters äußert (Abb. 11).

Weiterführende Untersuchungen an dickwandigeren Stahlplatten zeigten, daß jetzt bei ähnlichen Stoßparametern wie bei den dünnwandigen Platten Oberflächenwellen entstehen, deren Amplituden jedoch unterhalb der noch meßbaren Größe einer halben Wellenlänge des Laserlichtes liegen, so daß diese Wellenbewegung interferometrisch nicht mehr aufgezeichnet werden kann. Abhilfe könnten hier zwei Methoden schaffen, nämlich einmal eine Steigerung der Meßempfindlichkeit der Versuchsanlage oder zum anderen eine Verstärkung der Oberflächenschwingung selbst. Eine Steigerung der Meßempfindlichkeit um den Faktor $10^2 - 10^3$ ist nach /5/ möglich, wobei das Laserlicht mit einer niederfrequenten Schwingung moduliert wird. Eine spezielle Phasenmessung und Interpolation auf elektronischem Wege führt dann zu der bereits beschriebenen Steigerung der Meßempfindlichkeit. Diese Möglichkeit bestand jedoch während der Versuchsdurchführung nicht, so daß die zweite Methode, nämlich eine Verstärkung der Oberflächenschwingung angewendet wurde. Nach Pernick /6/ ist eine derartige Verstärkung durch die Anwendung einer dünnen flüssigen Auftragsschicht möglich. Versuche mit Wasser und Gelatine zeigten, daß jetzt auch Messungen an dickwandigen Stahlplatten möglich sind, wobei wegen der verstärkenden Wirkung dieser Schichten auch Störungen der Wellenausbreitung an kleinsten Rissen holographisch

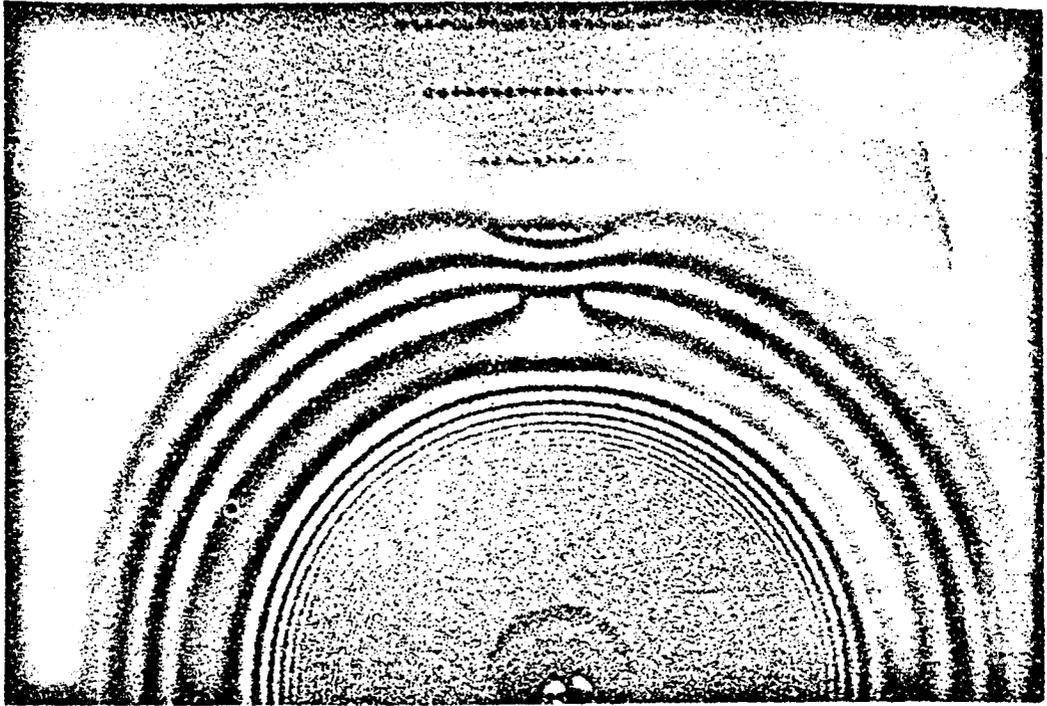


Abb. 11 Interferenzmuster nach einem Kugelstoß auf eine 20 mm dicke Stahlplatte mit simulierten Rissen

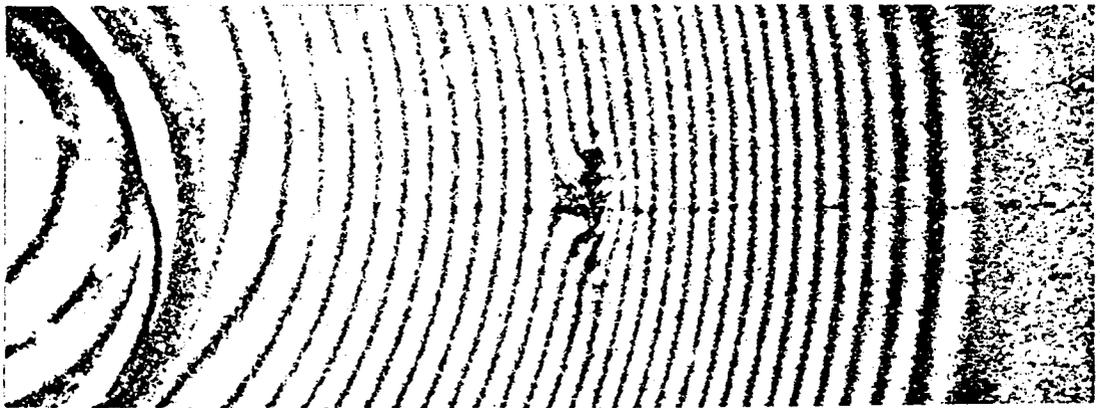


Abb. 12 Interferenzmuster nach einem Kugelstoß auf eine 85 mm dicke Stahlplatte mit einem RiB von ca. 70 μm Breite und 0,5 mm Tiefe. Verwendung einer dünnen Auftragschicht aus Wasser

meßbar sind. In Abb. 12 ist das Interferenzmuster einer 85 mm dicken Stahlplatte mit einem Oberflächenriß zu sehen. Der Riß, der durch ein Funkenerosionsverfahren erzeugt wurde (Rißbreite 50 - 80 μm , Tiefe 0,5 mm, Länge 8 mm) ist deutlich durch eine ausgeprägte Störung der Interferenzstruktur erkennbar.

5. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß die holographische Interferometrie ein geeignetes Hilfsmittel zur großflächigen Verformungsmessung beliebiger Bau- bzw. Anlagenteile darstellt. Bei der Anwendung der im Betrieb auftretenden Belastungen lassen sich Schwachstellen erkennen, die konstruktionsbedingt durch unsachgemäße Herstellung oder durch Materialfehler zu einer Gefährdung des Bauteils führen könnten.

Besonders kleine Materialfehler sind darüber hinaus nachweisbar, wenn durch eine stoßartige Belastung Wellen erzeugt werden, deren Störung an Rissen zu einer ausgeprägten Anzeige im holographisch gespeicherten Interferenzbild führen.

Literatur

- /1/ H. Kiemle und D. Röss
Einführung in die Technik der Holographie
Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt a.M., (1969)
- /2/ R.J. Collier, C.B. Burckhardt and L.H. Lin
Optical Holography
Academic Press, New York (1971)
- /3/ E. Gregor
Holographische Interferometrie bei der Untersuchung der
Ausbreitung von Stoßwellen
Laser und angewandte Strahlentechnik, Nr. 2/1971, S. 18-19
- /4/ W.P. Chu, D.M. Robinson, J.H. Goad
Holography Nondestructive Testing with Impact Excitation
Applied Optics, Vol. 11, No. 7, July 1972, S. 1644-1645
- /5/ R. Dändliker, B. Eliasson, B. Ineichen und F.M. Mottier
Quantitative Determination of Bending and Torsion through
Holographic Interferometry. Conference on the Engineering
Uses of Coherent Optics, 8-11 April 1975, University of
Strathclyde, Glasgow
- /6/ B.J. Pernick
Limits to the Detection of Small Internal Voids in Solids
with Holographic Techniques
Appl. Optics, July 1974, Vol. 13, No. 7, S. 1711-1722