

Joachim Tr ä g e r

Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik

VERFAHREN UND ANWENDUNG DER DYNAMISCHEN SPANNUNGSOPTIK

Einleitung

Die Spannungsoptik liefert an durchsichtigen Modellen ein sehr anschauliches Bild der Spannungsverteilung. Da ihr Informationsträger, das Licht, trägheitsfrei mit sehr hoher Geschwindigkeit das Modellmaterial durchheilt, ist auch die Verfolgung und Messung zeitlich schnell veränderlicher Beanspruchungen möglich. Hierbei interessieren in erster Linie die instationären Prozesse, d.h. Einschwing-, Wellenausbreitungs-, Stoß- und Bruchvorgänge. Voraussetzung für die Registrierung ist ein Meßorgan, das der Geschwindigkeit des Beanspruchungsvorgangs angepaßt ist. Die Hilfsmittel der Elektronik und Hochgeschwindigkeitsfotografie erlauben dies heute ohne Schwierigkeiten.

Die Anfänge der dynamischen Spannungsoptik gehen auf Tuzi (1928) und Frocht zurück, die mit Kinokameras erste Aufnahmen gewannen /1,2/. Umfassende Darstellungen wurden von Goldsmith, Dally, Chesin u.a. gegeben /3-6/.

Theoretische Aspekte

Das wesentliche Kennzeichen instationärer Beanspruchungen sind die entstehenden Trägheitskräfte aufgrund der Geschwindigkeitsgradienten in den Körperelementen und die dadurch bedingte Fortpflanzung der Beanspruchung in Form von Wellen, vor allem elastischer Wellen. Die Wellengeschwindigkeiten sind in den üblichen Konstruktionsmaterialien sehr hoch und betragen einige 100 bis einige 1000 m/s je nach Wellentyp, abhängig von den Materialkonstanten Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl. Auch bei den normalen spannungsoptischen Modellwerkstoffen liegen sie in der gleichen Größenordnung. Dies bedingt relativ hohe Anforderungen an die Meßapparaturen.

Die Übertragung der Modellergebnisse auf reale Objekte oder Bauteile ist nur unter Berücksichtigung der konkreten Bedingungen vornehmbar. Allgemeine Ähnlichkeitsbeziehungen wie in der Modellstatik sind für dynamische Prozesse zwar formulierbar, aber kaum lösbar bzw. anwendbar. Der Grund hierfür liegt in der Komplexität der Vorgänge: die wirkenden Kräfte sind im allgemeinen nicht bekannt; die Materialeigenschaften, die Geometrie und Massen der Körper gehen insgesamt mit ein. Hinzu kommt, daß die Materialparameter der Modellwerkstoffe selbst Abhängigkeiten von der Frequenz zeigen, die nur in Näherung vernachlässigt werden können. Die experimentellen Untersuchungen können daher in vielen Fällen nur für Grenzfälle konzipiert werden, d.h. vornehmlich zur Gewinnung qualitativer Aussagen und Schranken für Quantitäten.- Eine weitere Einschränkung der Modellierung ist die, daß im wesentlichen nur ebene Probleme behandelt werden können. Die Untersuchung räumlicher Beanspruchungen ist prinzipiell zwar möglich, erfordert aber die Anwendung komplizierter Verfahren (Einbettung von Polarisationsfiltern, Zwischenschicht-, Streulichtverfahren, integrale Spannungsoptik) mit zusätzlichen theoretischen Überlegungen.

Zur Auswertung ist zu bemerken, daß die Ermittlung der Randspannungen an freien Rändern wie im Statischen möglich ist. Die Separation der Spannungen im Innern ist nicht ohne weiteres erreichbar, da die Gleichgewichtsbeziehungen die Verschiebungsgrößen enthalten. Experimentell einfacher ist es häufig, die Methode der Schrägdurchstrahlung anzuwenden (insbesondere in Symmetrieschnitten) bzw. gleichzeitig die Isopachen interferometrisch (mit der holografischen Spannungsoptik) aufzunehmen. Die Kombination mit dem Moiréverfahren wurde ebenfalls schon vorgenommen.

Verfahren der dynamischen Spannungsoptik

Zur Gewinnung von Vollfeldaufnahmen denkt man in erster Linie an hochfrequenzkinematografische Verfahren. Die normalen Hochfrequenzkameras mit Bildfrquenzen von 5000 - 10000 Bildern/s (Fastax, Pentazet 16 u.a.) sind jedoch kaum aus-

reichend, nur bei Anwendung von Materialien mit besonders niedrigem Elastizitätsmodul. Für die bekannten Materialien (Epoxyd-, Polyesterharze) sind im allgemeinen Bildfrequenzen von 10^5 bis 10^6 /s erforderlich. Ihr Nachteil ist das mit wachsender Frequenz kleinere Bildformat; damit ist die Aussagefähigkeit gering. Weiterhin ist eine hohe Beleuchtungsintensität nötig (Blitzbeleuchtung). Im Streben nach höherem Informationsgehalt wurden weitere Methoden entwickelt:

Quasikinematografische Verfahren: Gewinnung nur weniger oder einer Aufnahme während eines Vorgangs und Wiederholung des Vorgangs. Verlangt eine exakte Synchronisierung des Vorgangs mit der die Momentphase bestimmende Belichtung (Lichtblitz oder Kurzzeitverschuß) bei geöffneter Kamera. Das Verfahren liefert qualitativ hochwertige Aufnahmen; der Nachteil ist, daß nur reproduzierbare Vorgänge aufgenommen werden können. Mit Anwendung der Funkenzeitlupe nach Cranz-Schardin kann dieser Nachteil überwunden werden. Hierbei werden getrennte Beleuchtungsfunkens mittels Feldlinsen in getrennte Kamerasysteme abgebildet. Da keine bewegten Systeme vorhanden sind, sind hohe Bildfrequenzen erreichbar. Dieses Verfahren wird heute sehr häufig angewendet, insbesondere auch für die Untersuchung von Bruchvorgängen.

Streak- oder Streifenverfahren: Von Tuzi und Nisida erstmals eingesetzt und von Frocht wesentlich entwickelt. Abbildung eines ausgeblendeten Spaltes des Modells auf einen schnell rotierenden Film (Streak-Kamera, Fotoregistrator). Eindimensionale Darstellung des Vorgangs als Funktion der Zeit, vor allem für Symmetrieschnitte. Hohe Zeitauflösung erreichbar. Wiedergabe der Isochromatenausbreitung im Dunkelinfeld.

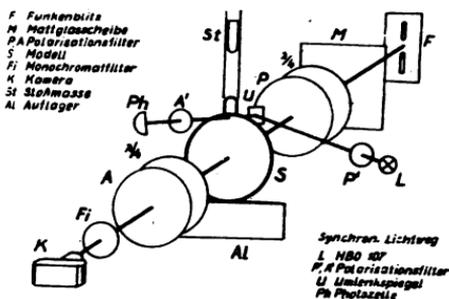
Fotometrisches oder fotoelektronisches Verfahren: Messung der spannungsoptischen Intensitätsänderungen an diskreten Punkten des Modells fotoelektronisch und oszillografische Registrierung. Mittels der Intensitätsbeziehungen sind die Gangunterschieds- (Isochromatenbruchteile) und Isoklinien-

parameter ermittelbar. Das Verfahren ist sowohl in Durchlicht als auch Auflicht bei spannungsoptischen Oberflächenschichten anwendbar.

Vielfach werden die Verfahren untereinander oder mit anderen Verfahren (Moiré, Dehnmessstreifen) kombiniert, insbesondere das quasikinetografische mit dem fotoelektronischen Verfahren zur exakten Bestimmung der Zeiten und zur Synchronisation, Abb. 1.

Abb. 1

Schema einer quasikinetografischen Apparatur mit fotoelektronischer Synchronisation



Die in neuerer Zeit entwickelte holografische Spannungsoptik erlaubt die gleichzeitige Aufnahme der Isochromaten- und Isopachenausbreitung. Ein Problem ist dabei die Trennung der Interferenzlinienscharen, da sich beide Scharen überlagern und die Isopachen nur als Differenz zweier Zustände (zu verschiedenen Zeiten) aufnehmbar sind. Eine günstige Methode hat Holloway vorgeschlagen /7/.

Die Gerätetechnik der dynamischen Spannungsoptik umfaßt außer den polarisationsoptischen Hilfsmitteln als wesentliche Elemente zur Registrierung Kameras (insbesondere Hochfrequenz-, Streak-Kamera), Funkenblitzgeräte, verschiedene elektronische Geräte, vor allem Kathodenstrahlzilloskope. Zur Erregung des dynamischen Vorgangs kommen der Stoß durch fallende Massen (bzw. die Modelle selbst), die Schußbelastung durch Projektile, die Impulsbelastung durch chemische Explosionen oder elektrische Entladungen infrage. Ihre Hauptunterschiede liegen in den Belastungszeiten: der Fallstoß liefert nur lange Zeiten; sehr kurze Zeiten werden durch Sprengla-

dungen und elektrische Entladungen erreicht; letztere gestatten auch eine breite Variation der Impulsform und verteilte Belastungen. Damit ist ein breites Spektrum von Wellen erzeugbar.

Als Modellmaterialien werden vorwiegend Epoxidharze und Polyesterharze benutzt. Auch ist der Einsatz von Polyurethangummi möglich; sein Vorteil sind geringe Wellengeschwindigkeiten, der Nachteil die höhere Dämpfung. Ein sehr günstiges Material aus mechanischer Sicht ist Glas; es zeigt keine Relaxationserscheinungen bei kurzen Zeiten; als Nachteile sind die hohen Wellengeschwindigkeiten, die geringe spannungsoptische Empfindlichkeit und schwierige Bearbeitung zu nennen.

Anwendungen und Ergebnisse

Grundlagenuntersuchungen. Sie sind vor allem aus theoretischer Sicht interessant. Von den eigenen Untersuchungen sollen insbesondere die Biegewellenausbreitung in Balken und Platten, die Wellenausbreitung in Scheiben mit dem besonderen Fall des Hertzschens Stoßes erwähnt werden /6,8/.

Abb. 2 zeigt als Beispiel eine Streakaufnahme vom Stoß einer fallenden Kreisscheibe. Deutlich sind der symmetrische Stoßkraftimpuls und die ausgelösten Scheibenschwingungen zu erkennen.

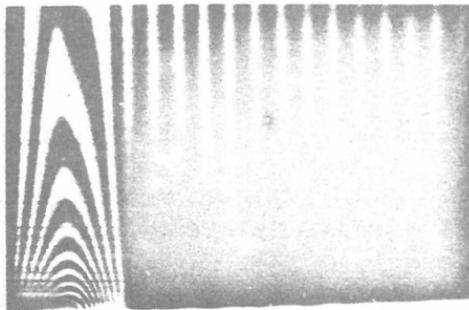


Abb. 2

Wellenausbreitungsvorgänge und dynamische Spannungskonzentrationen wurden in großem Umfang vor allem von Durelli, Dally, Chesin und Mitarbeitern untersucht /3-5/. Hierbei wurden verschiedene geometrische Bedingungen, Wellentypen,

Wellenlängen und Impulsformen berücksichtigt. Teilweise waren Vergleiche zu theoretischen Arbeiten möglich /9,10/. Bei reinen Wellentypen, die allerdings im Experiment nicht immer einfach zu realisieren sind und in der Praxis selten auftreten, zeigten sich im allgemeinen gute Übereinstimmungen zwischen theoretischen und experimentellen Ergebnissen. In Abb. 3 ist als Beispiel die Änderung der Spannungskonzentration K_{σ} für einen gelochten Stab als Funktion des Verhältnisses vom Durchmesser des Kreisloches a zur Wellenlänge λ einer ebenen Druckwelle (P-Welle) wiedergegeben. Die Kurven 1 und 2 sind theoretische Verläufe, die Kreise sind Meßwerte; K_{St} ist der entsprechende Wert bei statischer Zugbeanspruchung. Charakteristisch ist die Abnahme der Spannungskonzentration mit kleinerer Wellenlänge.

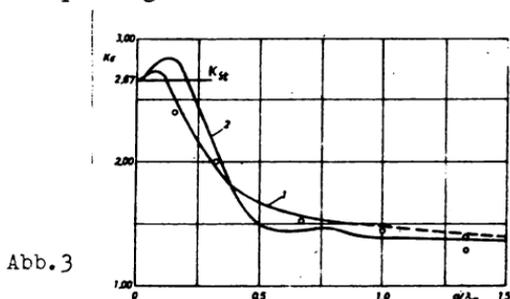


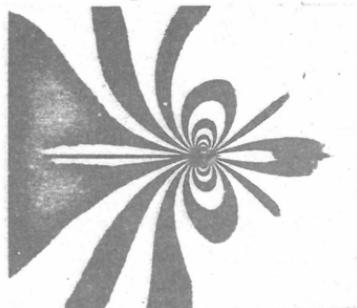
Abb. 3

Ähnliche Abhängigkeiten wurden für ebene Schubwellen (S-Wellen) erhalten, wobei sich hier Unterschiede zwischen Ein- und Auslauf ergeben, da die maximalen Konzentrationen unter 45° zur Ausbreitungsrichtung auftreten. Eine Folge davon ist zum Beispiel das Entstehen von Abspaltzonen bei randnahen Öffnungen infolge der Überlagerung der einfallenden und reflektierten Wellen. Analoge Untersuchungen wurden für verschiedenste Kerbformen angestellt.

In den letzten Jahren haben die Untersuchungen zur Bruchmechanik starken Aufschwung genommen. Die dynamische Spannungsoptik wird hier insbesondere zur Veranschaulichung der Rißausbreitung und zur Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren $K_{I,II}$ sowie des Spannungsfeldes an der Riß-

spitze erfolgreich eingesetzt. Als günstiges Registriermittel erweist sich hier die Funkenzeitlupe. Abb. 4 zeigt die Aufnahme der Isochromatenverteilung an der Rißspitze bei einem Rißöffnungsversuch. Im Innern treten stets zwei symmetrische Isochromatenellipsen auf, aus deren Geometrie der Spannungsintensitätsfaktor K_I bestimmt werden kann.

Abb. 4



Neuere Arbeiten beschäftigen sich vor allem mit Untersuchungen zur Charakterisierung des dynamischen Bruchverhaltens nach dem Konzept der K_I - \dot{a} -Relation (Abhängigkeit des Intensitätsfaktors von der Bruchgeschwindigkeit) /11/. Hierbei ergeben sich charakteristische Kurven, die als material-spezifisch anzusehen sind.

Untersuchungen für die Praxis. Zwei eigene Arbeiten sollen hier angeführt werden, die für den Generatorenbau durchgeführt wurden /12/. Im ersten Fall handelt es sich um eine Wandscheibe mit diversen Öffnungen, die in ihrer Ebene durch ein Stoßmoment belastet wird. Bei einer Stoßdauer im ms-Bereich zeigten sich hier kaum Abweichungen von der statischen Spannungsverteilung.

Im anderen Fall wurde ein Schwalbenschwanzbalken, ebenfalls ein Bauteil eines Generators, genauer untersucht. Hier stellen die Kerben des Schwalbenschwanzes eine Schwachstelle bei der Übertragung des Stoßmomentes auf die Wandscheiben dar. Die Stoßbelastung des Modells erfolgte bei zwei unterschiedlichen Stoßzeiten, durch Pendelschlag mit einer Belastungsdauer von wenigen ms, ferner durch eine Schußbelastung

mit einer Stoßdauer von ca. 60 μ s. Zur Registrierung wurde die quasikinematografische Methode eingesetzt. Abb. 5 gibt einige Momentaufnahmen der Isochromatenverteilung zu diskreten Zeiten nach Stoßbeginn wieder.

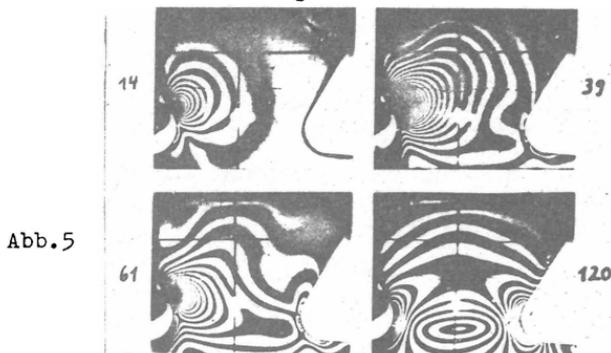


Abb. 5

Auch bei dieser sehr kurzen Belastungszeit ergab sich, daß die Werte der dynamischen Spannungskonzentration nur geringfügig von den entsprechenden statischen Werten abweichen.

Aus diesen Untersuchungen lassen sich einige allgemeine Schlußfolgerungen zur Modellierung von Stoßvorgängen ziehen: Die Übertragung von Versuchsergebnissen ist hauptsächlich aus zwei Gründen schwierig:

1. für alle Einflußgrößen, die zum Teil voneinander abhängen, sind die Ähnlichkeitsbedingungen nicht einhaltbar;
2. die wichtigen Größen Stoßdauer und Stoßkraft sind vom Originalproblem her meistens nicht bekannt.

Versuche sind da-her nur für Grenzfälle sinnvoll. Die wesentliche charakteristische Größe ist die Stoßdauer im Vergleich zur Haupteigenperiode der Körper. Als Stoßdauer ist dabei die Dauer der Hauptkrafteinwirkung anzusehen (im Unterschied zur Berührungsdauer), die Eigenperiode ist durch die Laufzeit der elastischen Wellen durch den Körper im Hauptbereich der Kraftwirkung gegeben. Drei Hauptfälle lassen sich dann unterscheiden:

- die Stoßdauer ist groß gegenüber der Eigenperiode. Dann ist der Energieanteil des Wellenfeldes gering; die Stoßbeanspruchung erfolgt quasistatisch;

- die Stoßdauer ist in der Größenordnung der Eigenperiode. Das Wellenfeld nimmt einen größeren Energiebetrag auf und bestimmt die Beanspruchung in weiten Gebieten; im Stoßbereich herrschen noch quasistatische Verhältnisse vor;
- die Stoßdauer ist kurz zur Eigenperiode. Das Wellenfeld nimmt den größten Teil der Stoßenergie auf; die Beanspruchung ist rein dynamisch.

Zu ähnlichen Resultaten gelangte auch Kuske bei verschiedenen Untersuchungen /13/. Er formulierte auch vereinfachte Ähnlichkeitsbeziehungen, die für quasistatische Verhältnisse gültig sind.

Literatur

- /1/ Tuzi, Z. Photographic and cinematographic study of photoelasticity. Sci. Pap. Inst. phys. chem. Res., Tokio 8, 149, (1928), 247-267.
- /2/ Frocht, M.M. Kinematography in Photoelasticity. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 54 (1932), APM 83-96.
- /3/ Goldsmith, W. Dynamic Photoelasticity.
 - Exp. Techniques in Shock and Vibration, ASME 1962;
 - Kurzzeitphysik (Herausgeber K. Vollrath, G. Thomer), Springer-Verlag Wien, N.Y. 1967, 579-619.
- /4/ Streltschuk, N.A., Chesin, G.L. (Herausgeber) Metod fotouprugosti, tom 2, Moskwa Strojizdat 1975.
- /5/ Dally, J.W. Classical and Advanced Methods of Photoelasticity. IUTAM Symp. The Photoelastic Effekt and its Application, Ottignies/Belgium 1973; Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/N.Y. 1975, 17-101.
- /6/ Träger, J. Spannungsoptische Verfahren zur Untersuchung dynamischer Beanspruchungsprobleme. ZAMM 52 (1972), T348.
- /7/ Holloway, D.C. Simultaneous Determination of the Isopachic and Isochromatic Fringe Patterns for Dynamic Loading by Holographic Photoelasticity. Rep.Nr. 349, Dep. Theor. Appl. Mech., Univ. Illinois, 1971.
- /8/ Reimann, V. Polarisationsoptische Untersuchungen des Biegestoßes auf einen Kragbalken. Beiträge zur Spannungs- und Dehnungsanalyse I, Akademie-Verlag Berlin 1965, 115.

- /9/ Pao, Y., Mow, C. Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations. Crane Russak, N.Y., Adam Hilger, London, 1973.
- /10/ Achenbach, J.D. Wave Propagation in Elastic Solids. North-Holland Amsterdam, American Elsevier N.Y., 1973.
- /11/ Dally, J.W. Developments in Photoelastic Analysis of Dynamic Fracture. IUTAM Symp. Optical Methods of Mechanics of Solids, Poitiers 1979.
- /12/ Träger, J., Haberland, G., Reimann, V. Spannungsoptische Untersuchungen an einer Blechpaketaufhängung bei stoßartiger Belastung. Elektrische 33, 1 (1979), 34-38.
- /13/ Kuske, A., Robertson, G. Photoelastic Stress Analysis. John Wiley & Sons, London, N.Y., 1974.

Anschrift des Verfassers:

Dr. J. Träger

Akademie der Wissenschaften der DDR

Institut für Mechanik

DDR-1199 Berlin, Rudower Chaussee 5