

Räumliches und zeitliches Auflösungsvermögen kohärenter und inkohärenter Lichtquellen

E. Häusler

Labor Kurzzeitphysik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

und D. Warken

Abteilung für Ballistik im Ernst-Mach-Institut, Weil am Rhein

(Z. Naturforsch. 32a, 1007–1014 [1977]; eingegangen am 15. Juli 1977)

Spatial and Temporal Resolution of Coherent and Incoherent Light Sources

The spatial resolution of optical methods using lasers is much higher than those using thermal light sources. The temporal resolution of optical methods with lasers for the measurement of the time dependence of physical parameters (velocity of moving targets, elasto-optical measurements of mechanical quantities, e. g. stress, acoustic pressure) is limited by their strong noise, exceeding the noise of thermal light sources by orders of magnitudes.

It is shown that in applications with little requirements on the spatial resolution and temporal coherence the SNR will be greater if thermal light sources are used.

I. Einleitung

Kohärente Lichtquellen ermöglichen eine Fokussierung der Strahlung auf einen Bereich einiger Lichtwellenlängen. Meßverfahren mit kohärenten Lichtquellen haben daher gegenüber solchen mit inkohärenten Lichtquellen ein wesentlich höheres räumliches Auflösungsvermögen. Die Zeitauflösung optischer Verfahren zur punktweisen Messung des zeitlichen Verlaufs physikalischer Größen – z. B. Geschwindigkeitsmessung bewegter Gegenstände mit Lichtschranken, elasto-optische Messung des zeitlichen Verlaufs mechanischer Größen (Spannung, Schalldruck) – wird durch das starke, das Rauschen thermischer Lichtquellen um Größenordnungen übertreffende Laserrauschen begrenzt. Es erscheint daher möglich, daß die thermische Lichtquelle trotz des weniger guten räumlichen Auflösungsvermögens dem Laser wegen ihres geringen Eigenrauschens in manchen Fällen überlegen ist. Im folgenden werden die Zusammenhänge für zwei optische Verfahren zur Untersuchung kurzzeitig belasteter durchsichtiger fester Scheiben ermittelt, die an die Kohärenz der Lichtquelle keine oder nur geringe Anforderungen stellen: das Lichtablenkverfahren^{1, 2} und das spannungsoptische Meßverfahren³.

Eine analoge Untersuchung von Interferenzverfahren ist bereits von Haenggi⁴ durchgeführt worden. Dabei ergab sich in allen Fällen eine Überlegenheit des Lasers. Wie gezeigt werden soll, ist das jedoch bei den im folgenden beschriebenen Verfahren nicht immer der Fall.

Sonderdruckanforderungen an Prof. Dr. E. Häusler, Fachbereich 12 – Angew. Physik der Universität des Saarlandes, D-6600 Saarbrücken.

II. Versuchsaufbau

Abbildungen 1 und 2 zeigen den schematischen Versuchsaufbau des Lichtablenkverfahrens und des spannungsoptischen Meßverfahrens mit kohärenter und inkohärenter Lichtquelle. Der untere Rand einer Plexiglasscheibe (550 × 300 × 4 mm) wurde mit PVC-Zylindern (10, 20, 30, 40 × 4 mm \varnothing , Geschwindigkeit: 2 m/s – 15 m/s) beschossen und der durch die Stoßanregung hervorgerufene Spannungsverlauf im Abstand 1,5 bzw. 5 cm über dem Stoßzentrum gemessen.

Bei dem Lichtablenkverfahren mit kohärenter Lichtquelle (Abb. 1 b) wird der Auskoppelspiegel eines He-Ne-Gas-Lasers (Spectra Physics, Modell 133) mit Hilfe einer Linse L so durch das Modell auf den Rand einer schnellen Photodiode abgebildet, daß der Lichtempfänger bei unbelastetem Modell gerade die halbe Maximalintensität erhält⁵. Auf diese Weise können durch elastooptische Effekte hervorgerufene vertikale Lichtablenkkomponenten nach Betrag und Vorzeichen in elektrische Spannungen umgewandelt werden. Durch Integration gelingt es, in bekannter Weise daraus die optischen Weglängenänderungen und damit den zeitlichen Verlauf der Hauptspannungssumme zu ermitteln.

Dem gleichen Zweck dient die Anordnung in Abb. 1 a mit einer Halogen-Glühlampe (Osram 64640) als inkohärente Lichtquelle. Ein paralleles Strahlenbündel wird von einer horizontal angeordneten Schlitz-Blende (2 × 5 mm) begrenzt. Diese wird durch das Modell auf eine Schlieren-Stopperblende abgebildet. Eine weitere Linse bildet schließlich die Schlierenblende auf die Photodiode ab. So erhält man wie oben einen direkten Zusammenhang zwischen dem Lichtablenkwinkel und der Intensitätsänderung in der Ebene der Photodiode. Daher kann die weitere Verarbeitung des elektrischen Signals nach dem oben angegebenen Schema erfolgen.



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

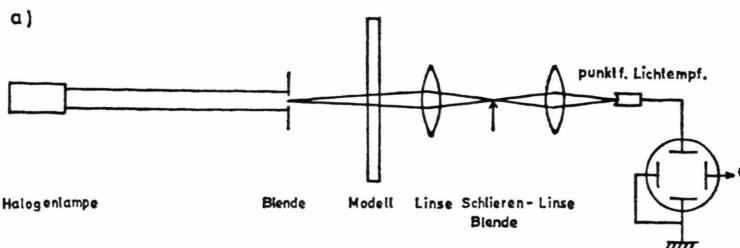


Abb. 1. Versuchsanordnungen des Lichtablenkverfahrens: a) inkohärente Beleuchtung, b) kohärente Beleuchtung.

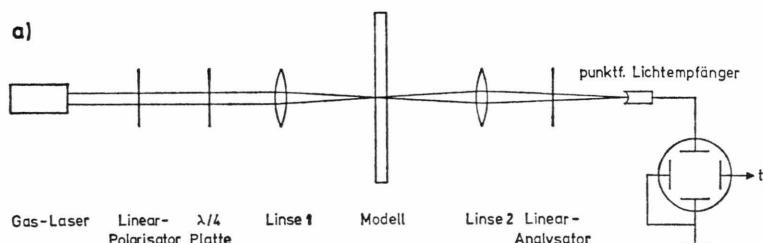
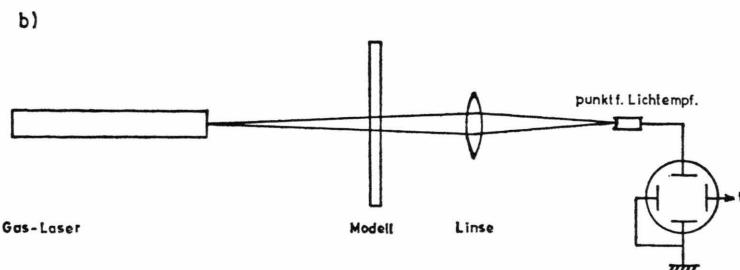


Abb. 2. Spannungsoptische Versuchsanordnungen: a) kohärente Beleuchtung, b) inkohärente Beleuchtung.

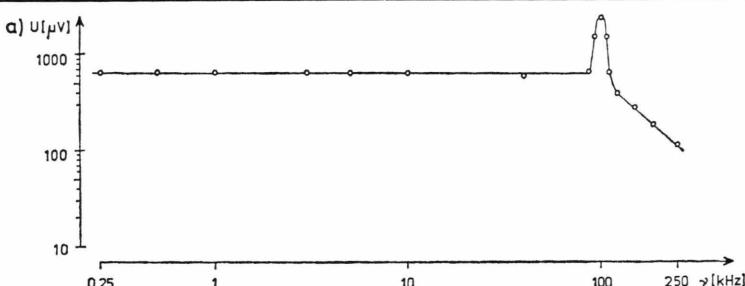
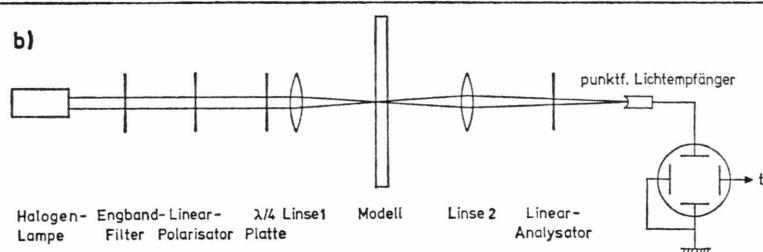


Abb. 3. Spannungsspektren: a) Laser, b) Halogenlampe.

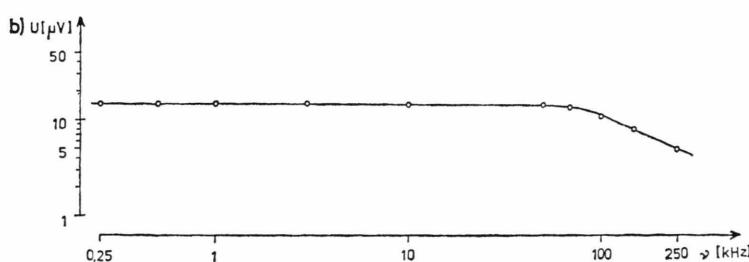


Abbildung 2 zeigt die spannungsoptischen Meßanordnungen mit kohärenter (Abb. 2 a) und inkohärenter Lichtquelle (Abbildung 2 b).

Das vom Gas-Laser kommende kohärente Licht wird mit einem $\lambda/4$ -Plättchen zirkular polarisiert und anschließend mit Hilfe der Linse L 1 auf den Modellpunkt fokussiert. Die Linse L 2 bildet den Meßpunkt über den Linearanalysator, der unter 45° zum Scheibenrand angeordnet ist, auf die Fotodiode ab. Bei der Anordnung mit inkohärentem Licht wird zusätzlich ein Engbandfilter (Mittenfrequenz: 695 nm) in den Strahlengang gebracht. Das räumliche Auflösungsvermögen beider Anordnungen wird begrenzt durch den bei Fokussierung des jeweils parallelen Strahlenbündels auf das Modell erzielbaren minimalen Strahldurchmesser, der im wesentlichen bestimmt wird durch die Beugungunschärfe (kohärente Lichtquelle) bzw. die geometrisch-optische Unschärfe (inkohärente Lichtquelle)⁵.

III. Versuchsergebnisse

Der Zusammenhang zwischen der vom Lichtempfänger an den Oszillographen gelieferten Signalspannung U_s und der Hauptspannungssumme bzw. der Hauptspannungsdifferenz in einem Punkt ist bei Realisierung eines ebenen Spannungszustandes bzw. Kenntnis der Hauptspannungsrichtungen gegeben durch^{1, 3, 6}:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = C_1 \int U_s dt \quad (1)$$

und

$$\sigma_1 - \sigma_2 = C_2 \arcsin (U_s/U_0). \quad (2)$$

C_1 und C_2 sind Konstanten, die sich aus Daten des Modellmaterials und der Meßanordnung ergeben, U_0 ist die im unbelasteten Fall am Oszillographen anliegende Spannung.

Beide Lichtquellen, Laser und Halogen-Glühlampe, werden im folgenden bezüglich des Störabstandes der Meßsignale und der Raumauflösung der Anordnung miteinander verglichen. Störspannungen und Empfindlichkeit werden durch das Rauschspektrum bzw. durch die Angabe des Störabstandes beschrieben, der als $20 \times \log(U_{S_{\text{eff}}}/U_{R_{\text{eff}}})$ definiert ist. $U_{S_{\text{eff}}}$ ist die effektive Signalspannung und $U_{R_{\text{eff}}}$ die effektive Rauschspannung.

1. Rauschspannungsspektren von Laser und Halogen-Glühlampe

Abbildung 3 zeigt die mit einem selektiven Pegelmesser ermittelten Rauschspannungsspektren von Laser und Halogen-Glühlampe. Die bei einer Bandbreite von 300 Hz unter gleichen Bedingungen (Be-

leuchtungsstärke jeweils 1200 lx) gemessenen effektiven Rauschspannungen sind gegen die Frequenz aufgetragen. Die Amplitude der Rauschspannung ist bis etwa 100 kHz konstant. Danach tritt eine durch das elektrische Übertragungssystem bedingte leichte Abnahme ein. Darüber hinaus zeigt das Rauschspektrum des Lasers bei etwa 100 kHz eine Spitze, die auf Resonanzeffekte in der Gasentladung zurückgeführt werden kann⁷. Die beim Laser gemessene Rauschspannung ist im Vergleich zur Halogen-Glühlampe um den Faktor 50 größer.

2. Lichtablenkverfahren: Hauptspannungssumme

2.1. Störabstand

In Anlehnung an bereits bestehende Untersuchungen von Plattendehnungswellen¹ wurden zunächst Versuchsbedingungen realisiert, die im Vergleich zum Störabstand große elektrische Meßsignale liefern.

Abbildung 4 zeigt die bei Messungen 5 cm über dem Stoßzentrum mit dem Lichtablenkverfahren erhaltenen Oszillogramme für Geschoßlängen von 10, 20 und 30 mm und Geschoßgeschwindigkeiten von 10, 12,5 und 15 m/s. Der obere Strahl zeigt jeweils das Meßsignal (Gradient der Lichtwegänderung), der untere den durch Analogintegration erhaltenen Verlauf der Hauptspannungssumme. Die Übereinstimmung der bei kohärenter bzw. inkohärenter Lichtquelle erhaltenen Signale zeigt, daß bei großem Störabstand beide Lichtquellen für dieses Verfahren in gleicher Weise geeignet sind. Für den ersten sinusförmigen Impuls eines durch ein 10 mm Geschoß erzeugten Lichtablenksignals (Abb. 4, oben) erhält man als Störabstände 45 dB bei kohärenter Beleuchtung und 55 dB bei inkohärenter Beleuchtung.

Die durch Verringerung der Geschoßgeschwindigkeit auf 2 m/s erhaltenen Signale des untersten Vorgangs in Abb. 4 zeigt Abb. 5 in Serien von je 6 Oszillogrammen. Während die mit dem Laser als Lichtquelle erhaltenen Signale (obere Serie) nicht reproduzierbare Ergebnisse liefern, sind die mit der Halogen-Glühlampe erhaltenen Signale (untere Serie) gut reproduzierbar. Der für den ersten Impuls des Lichtablenksignals berechnete Störabstand beträgt 16 dB bei kohärenter und 30 dB bei inkohärenter Beleuchtung.

2.2. Raumauflösung

Betrachtet man das von einem 30 mm-PVC-Geschoß (Abb. 4, unten) hervorgerufene Lichtablenk-

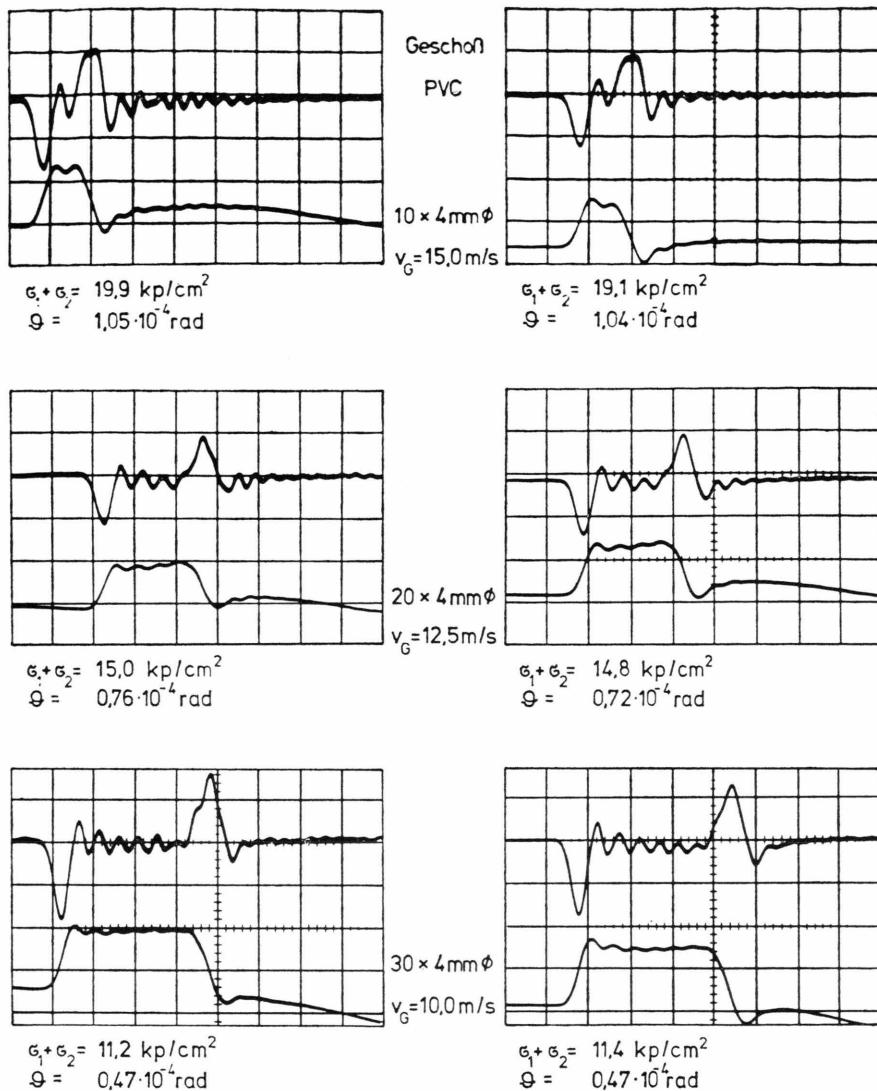


Abb. 4. Plattendehnungswellenimpulse, links: kohärente Beleuchtung, rechts: inkohärente Beleuchtung. Verfahren: Lichtablenkung; oberer Strahl: direktes Signal; unterer Strahl: integriertes Signal. Meßpunkt: 5 cm über dem Stoßzentrum; Zeitablenkung: 10 μ s/Teil.

signal genauer, so erkennt man, daß es aufgrund der zeitlich nacheinander auftretenden verschiedenen „Spektralkomponenten“ die Möglichkeit bietet, durch Messung der „Dämpfung“ dieser Komponenten, das räumliche Auflösungsvermögen der jeweiligen Versuchsanordnung in Abhängigkeit von der Empfindlichkeit und der „Spektralkomponente“ zu ermitteln⁵.

Abbildung 6 zeigt die der räumlichen Auflösung umgekehrt proportionale „Dämpfung“ in Abhängigkeit von der „Spektralkomponente“ bzw. der Wellenlänge der Störung. Parameter ist der der Emp-

findlichkeit proportionale Abstand Blende (Laserauskoppelspiegel) – Modell. Dabei wurde angenommen, daß im Fall des Lasers die „Dämpfung“ bei einem Abstand Laserauskoppelspiegel – Modell von 0,5 m 0 dB beträgt. Im Fall der Halogen-Glühlampe hat der entsprechende Abstand den Wert 0,1 m. In beiden Fällen ist die Unschärfe, die die Raumauflösung begrenzt, so gering, daß diese Annahme bei den betrachteten „Spektralkomponenten“ (bis 250 kHz) berechtigt ist. Beträgt der Abstand Blende – Modell z. B. 1 m, so werden die kleineren Strukturen (187 – 247 kHz) von der Meßanordnung mit

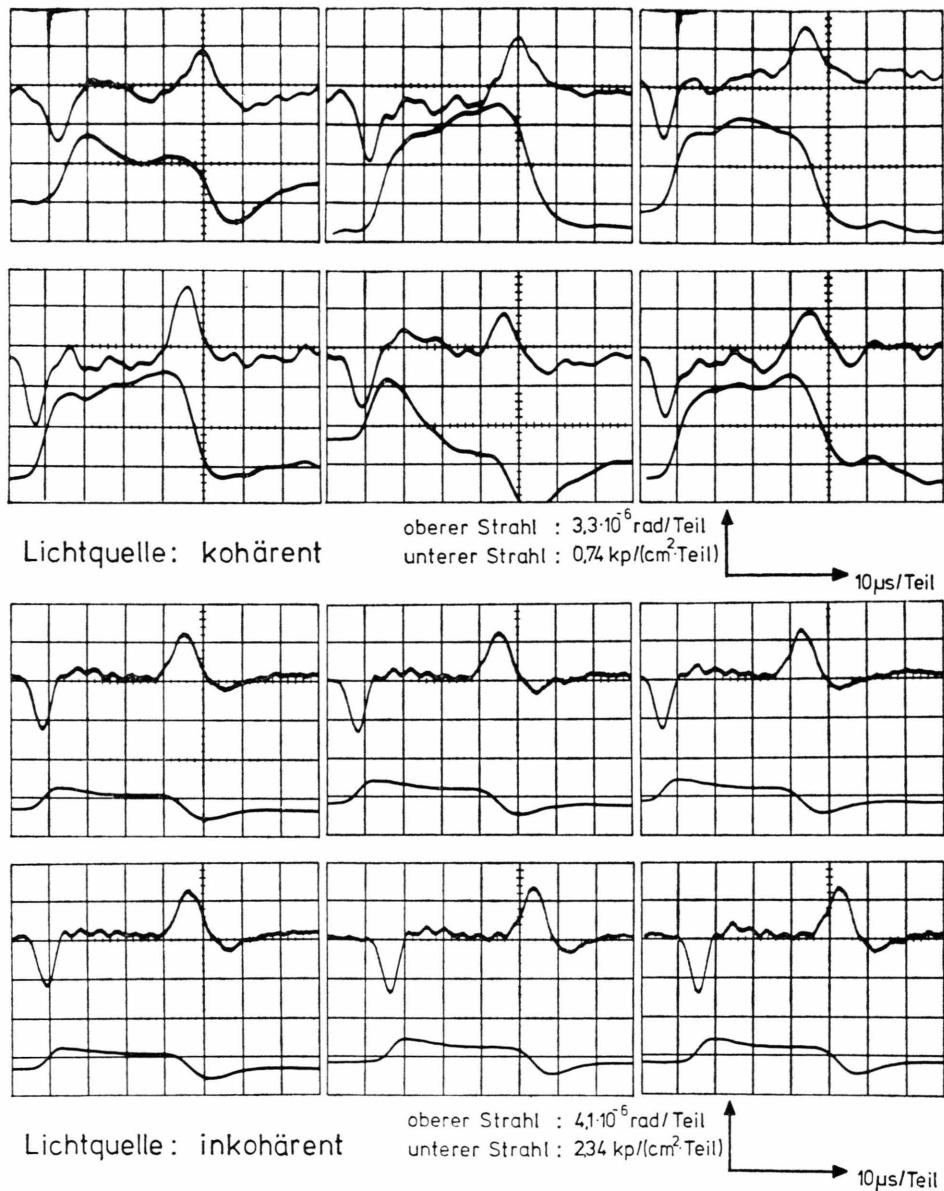


Abb. 5. Plattendehnungswellenimpuls. Verfahren: Lichtablehnung; oberer Strahl: direktes Signal; unterer Strahl: integriertes Signal. Geschoß: PVC 30×4 mm \varnothing ; v_G : 2 m/s. Meßpunkt: 5 cm über dem Stoßzentrum.

inkohärentem Licht nur stark gedämpft wiedergegeben (Abb. 6, unten) (Dämpfung: 3 bis 8 dB, Fehler: 30 bis 60%), während sie von der Anordnung mit kohärentem Licht fast vollständig aufgelöst werden (Abb. 6, oben) (Dämpfung: 0,3 bis 0,7 dB, Fehler: 3 bis 8%). Erst unterhalb einer „Frequenz“ von etwa 150 kHz kann das Auflösungsvermögen der inkohärent beleuchteten Meßanordnung bei

einem Abstand Blende – Modell von 1 m ebenfalls als gut bezeichnet werden.

3. Spannungsoptische Messungen: Hauptspannungsdifferenz

Abbildung 7 zeigt die 1,5 cm über dem Stoßzentrum gemessenen zeitlichen Verläufe der Hauptspannungsdifferenzen für PVC-Geschosse von 10,

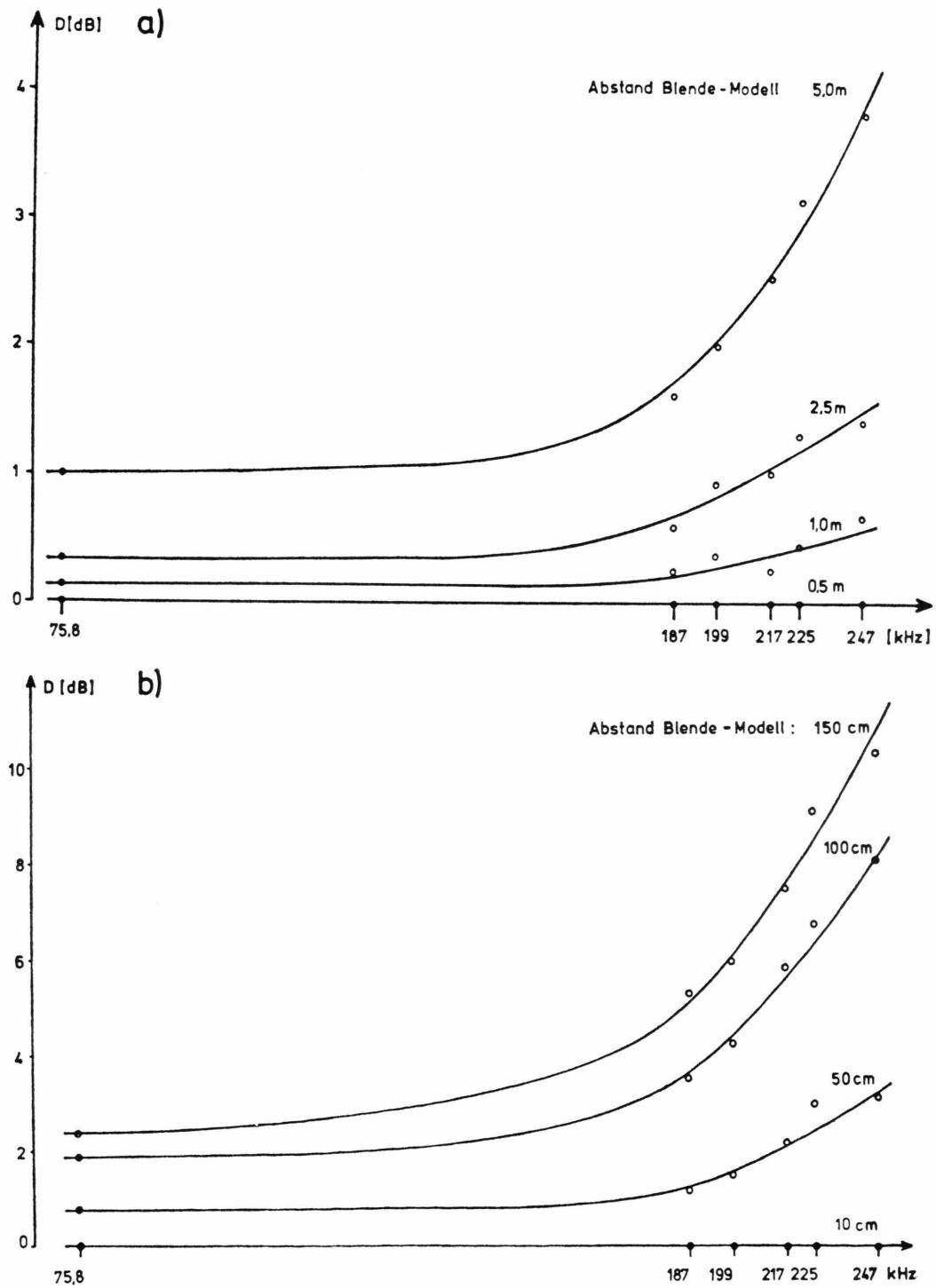


Abb. 6. „Dämpfung“ beim Lichtablenkverfahren: a) kohärente Beleuchtung (Laser); b) inkohärente Beleuchtung (Halogenlampe).

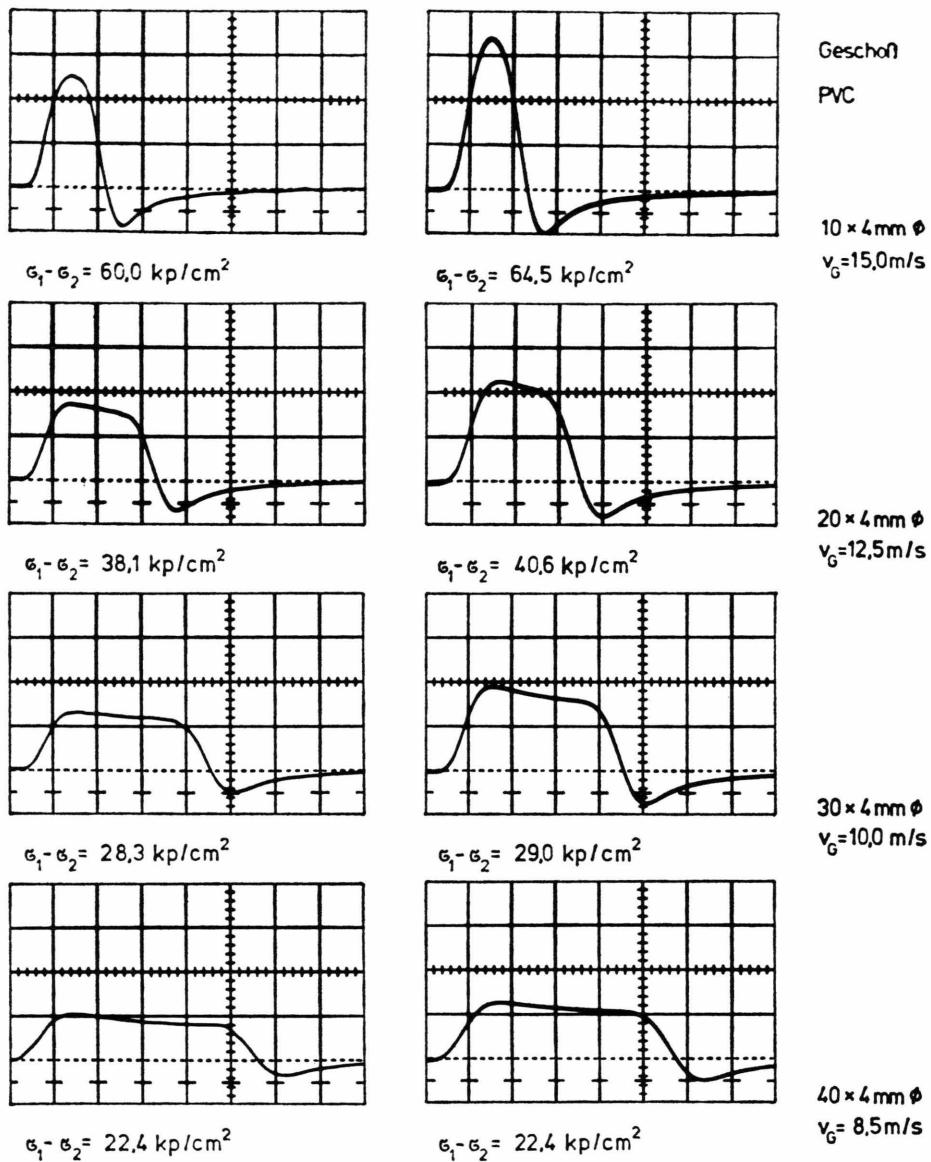


Abb. 7. Zeitlicher Verlauf der Hauptspannungsdifferenz: links: kohärente Beleuchtung; rechts: inkohärente Beleuchtung. Verfahren: Spannungsoptik. Meßpunkt: 1,5 cm über dem Stoßzentrum; Zeitablenkung: 10 μ s/Teil.

20, 30 und 40 mm und Geschwindigkeiten, die zwischen 8,5 und 15 m/s variieren. Die Übereinstimmung der mit kohärenter und inkohärenter Lichtquelle erhaltenen Meßergebnisse und die für das 30 mm-Geschoß berechneten Störabstände von 54 dB für den Laser und 68 dB für die Halogen-Glühlampe zeigen, daß das geringe Eigenrauschen thermischer Strahler bei etwa gleichguter räumlicher Auflösung von Strukturen bis zu ca. 0,2 mm auch

in der Spannungsoptik zu einer erheblichen Verbesserung des Störabstandes führt.

IV. Schlußbemerkungen

Zusammenfassend ist festzustellen, daß man bei dem Lichtablenkverfahren mit konventionellen Dauerlichtquellen durch geeignete Abbildung von Blenden, Versuchsbedingungen realisieren kann, die bei ausreichender Raumauflösung Vorteile gegen-

über kohärenten Lichtquellen bezüglich des Störabstandes bieten. Inkohärente Strahler können in Zusammenhang mit einem Filter auch dann mit Erfolg eingesetzt werden, wenn eine gewisse zeitliche Kohärenz vorausgesetzt wird (Spannungsoptik). Der Störabstand ist auch in diesem Fall im Vergleich zum Laser größer. Stellt man jedoch an den zeitlichen und räumlichen Kohärenzgrad der Lichtquelle oder an das räumliche Auflösungsvermögen der Meßanordnung sehr hohe Anforderungen, so ist der Laser der inkohärenten Lichtquelle über-

legen. Die Frage, welche Lichtquelle eingesetzt werden soll, kann nicht generell beantwortet werden. Dies ist abhängig von der Problemstellung und muß je nach Form und Ausdehnung der aufzulösenden Struktur sowie den an die Kohärenz der Lichtquelle gestellten Anforderungen von Fall zu Fall entschieden werden. Grundsätzlich gilt jedoch, daß thermische Lichtquellen dem Laser bei der Wiedergabe grober Strukturen überlegen sind, während für Strukturen, die hohe Raumauflösung erfordern, der Laser besser geeignet ist.

¹ W. Stumm, Dissertation, Saarbrücken 1968.

² E. Häusler, V. Schmitz u. W. Stumm, *Z. Naturforsch.* **24a**, 1627 [1969].

³ E. Orován, F. H. Scott, and C. L. Smith, *I. Sci. Instrum.* **27**, 118 [1950].

⁴ H. Haenggi, Erweiterung einer photoelektrisch-interferometrischen Methode auf die Messung zeitlich veränder-

licher, ebener Spannungszustände, *Publ. Labor. Photo-élast.* Ecole Polytechn., Zürich, Nr. 10 [1965].

⁵ D. Warken, Diplomarbeit, Saarbrücken 1973.

⁶ H. Favre, *Rév. d'Optique Théor. Instrum.* **8**, 5 [1929].

⁷ L. Prescott u. A. van der Ziel, *Appl. Phys. Let.* **5**, [1964].