

## Berührungslose optische Echtzeitmesstechnik Contactless Optical Measuring Techniques in Real Time

H.J. Tiziani, Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, D-7000 Stuttgart 80

Eingegangen 13. 10. 1983

### Key words

photorefractive crystals, optical information storage, interferometric analysis in real time, holography, speckle interferometry

### Inhaltsübersicht

1. Einleitung
2. Echtzeitformvergleich am Beispiel von asphärischen Flächen
3. Einsatz fotorefraktiver Kristalle in der Messtechnik
4. Echtzeitholografie in der Messtechnik mit BSO-Kristallen
5. Echtzeit-Höhenschichtlinienaufzeichnung
6. Speckle-Technik zur Echtzeitverformungs- und -Schwingungsmessung mit BSO-Kristallen
7. Echtzeitkorrelation mit BSO-Kristallen
8. Echtzeitanalyse an bewegten Objekten

### Kurzfassung

Es wird über einige Messverfahren der berührungslosen optischen Messtechnik berichtet. Neben dem Einsatz von synthetischen Hologrammen zum Formvergleich von asphärischen Flächen werden Messverfahren zur Verformungs- und Schwingungsmessung vorgestellt.

Der Einsatz fotorefraktiver Kristalle steht noch am Anfang. Verschiedene Anwendungen mit dem BSO-Kristallspeicher werden kurz diskutiert, wie holografische Interferometrie, Konturlinien-Holografie, Speckle-Anwendungen und optische Korrelation.

Am Ende wird auch gezeigt, wie eine Dopplershift-Technik zur Geschwindigkeits- und Schwingungsmessung eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse werden verglichen mit denen der Doppelpulsholografie.

### Abstract

Optical contactless measuring techniques will be discussed. In addition to the use of computer generated holograms for the comparison of macroscopic shape of aspherical surfaces, methods for the deformation and vibration analysis will be introduced.

The application of photorefractive electro-optical crystals is at the beginning. A few recent applications of BSO crystals for holographic interferometry and contourline-holography, speckle applications and optical correlation will be indicated.

Finally, a Doppler shift method will be applied for velocity and vibration analysis. The results will be compared with those of the double pulse holography.

### 1. Einleitung

Der Aufschwung der berührungslosen optischen Messtechnik basiert wesentlich auf der Einführung des Lasers (1960). Eine Anwendung der kohärenten Lichtquelle, des Lasers, finden wir in der interferometrischen Holografie sowie den Speckle-Techniken. Neue Mess- und Prüfverfahren werden entwickelt und eingesetzt.

Die holografische Interferometrie hat sich für bestimmte Anwendungen wie berührungslose Verformungs-, Verschiebungs- oder Schwingungsmessung als sehr nützlich erwiesen. Verschiedene Verfahren können eingesetzt werden.

Beim Doppelbelichtungsverfahren werden zwei Zustände eines Objektes, meist der unbelastete und der belastete Zustand, in einem Hologramm überlagert. Eine Aufnahmeanordnung ist in Bild 7 ersichtlich. Aus der Rekonstruktion gewinnt man ein Verformungsbild anhand von Interferenzstreifen. Die Interferenzlinien zeigen die Verformungen als Höhenschichtlinien auf, deren Abstände, in Reflexion, einer halben Wellenlänge des verwendeten Lichtes entsprechen. Beim «Echtzeitverfahren» wird im Hologramm ein Ausgangszustand des Objektes gespeichert und anschließend rekonstruiert und mit dem neuen Zustand des Objektes selbst verglichen. Das Objekt kann sich geringfügig verformen durch Belastungsänderungen, Schrumpfen sowie Druck- oder Temperaturänderung. Durch Überlagerung der vom ursprünglichen Objekt rekonstruierten Wellenfront und der vom verformten Objekt ausgehenden Wellenfront entstehen Interferenzlinien. Allerdings ist das sehr genaue Einstellen des entwickelten Hologramms (auf Lichtwellenlänge genau) schwierig. Eine In-situ-Entwicklung ist deshalb vorteilhaft. Das Verfahren ermöglicht das Beobachten von fortlaufenden Änderungen.

Das bis heute verbreitete Speichermaterial ist die fotografische

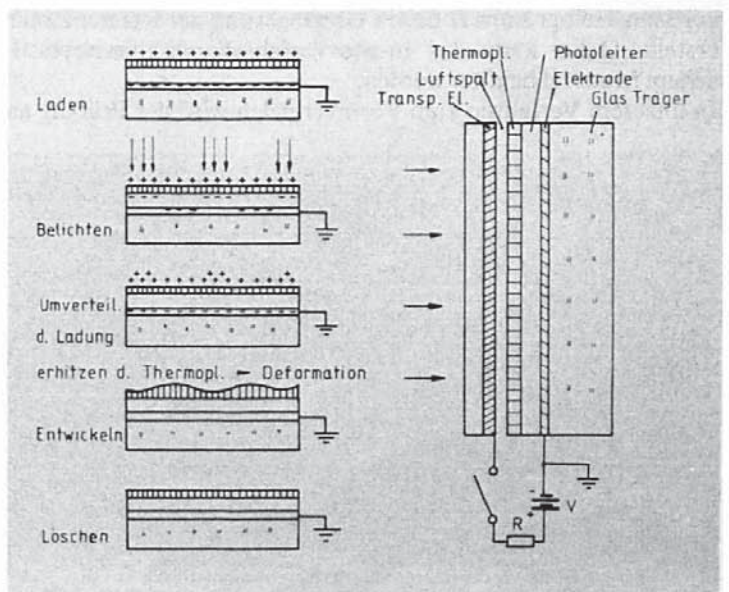


Bild 1 Hologrammspeicherung auf thermoplastischem Material

Schicht, basierend auf der Lichtempfindlichkeit der Silberhalogenidsalze; neue Speichermaterialien werden untersucht. Die zurzeit aussichtsreichsten Kandidaten für die Informationsspeicherung sind fothermoplastische Materialien, Fotopolymere (Fotolacke), elektrooptische Kristalle sowie magnetische Bildspeicher. Die Einführung von thermoplastischen Materialien ist für den Ingenieur ein wichtiger Schritt. Urbach und Meier haben 1966 die ersten Hologramme auf thermoplastischem Material vorgestellt [1]. Das Grundprinzip ist aus Bild 1 ersichtlich. Der thermoplastische Speicher besteht aus drei Schichten auf dem Träger: den Elektroden, dem Fotoleiter sowie dem thermoplastischen Material.

Die Thermoplastschicht befindet sich auf einem glasklaren Träger und wird elektrostatisch aufgeladen. Bei Belichtung ändert sich die Ladungsverteilung; durch Erwärmung des Thermoplasts entstehen durch die lokalen Ladungsunterschiede lokale Schichtdickenänderungen. Es entsteht ein Phasenhologramm, das durch Abkühlen fixiert werden kann. Dieser Vorgang erfolgt in einem holografischen Sofortbildgerät in einem Zyklus von 40 s, von denen 10 s für Filmtransport, Sensibilisierung und Aufnahme und 30 s für das Abkühlen erforderlich sind. Dieses Verfahren ermöglicht die In-situ-Entwicklung und wird schon verschiedentlich erfolgreich eingesetzt. Der Prozess ist vielfach nicht ganz reversibel. Der Beugungswirkungsgrad bei der Rekonstruktion von Hologrammen, die auf thermoplastischem Material gespeichert werden, liegt zwischen 10 und 30%. Der Beugungswirkungsgrad ist, wie in der Zweistrahlinterferometrie üblich, definiert als Verhältnis der Intensität des vom entwickelten Hologramm abgebeugten Lichts zur Intensität des einfallenden Lichts.

Im nächsten Abschnitt wird anhand des Formvergleichs von asphärischen Flächen das Verfahren anwendungsorientiert erläutert. Fotorefraktive Speicher und Einsatzmöglichkeiten werden anschliessend diskutiert.

## 2. Echtzeitformvergleich am Beispiel von asphärischen Flächen

Nicht nur Objektverformungen, sondern auch Formabweichungen können mit dem beschriebenen Verfahren vermessen werden. Eine Anordnung ist in Bild 2 schematisch vorgestellt. Vom Objekt (P), z. B. einer komplizierten asphärischen Fläche, wird ein Hologramm H durch Überlagerung der Referenzwelle erstellt. Dabei kann das In-situ-Verfahren mit thermoplastischem Material benützt werden.

In unserem Verfahren zum Formvergleich wird der Prüfling an

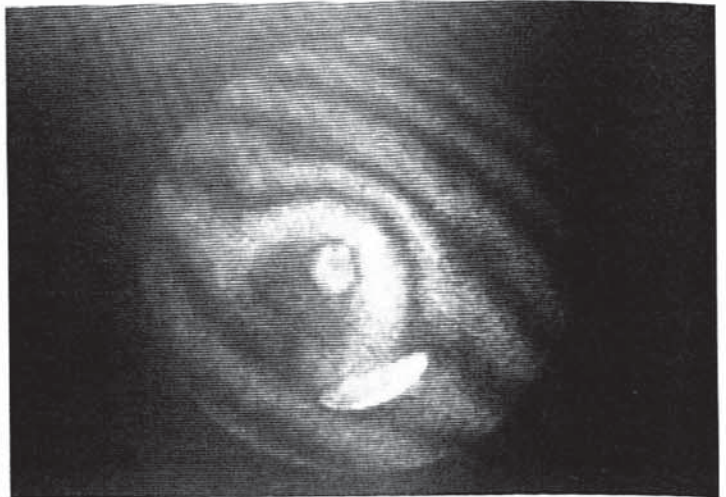


Bild 3 Beispiel des Formvergleichs einer asphärischen Fläche

die Stelle der Referenzsphäre gesetzt. Beim Beleuchten des Hologramms mit der Referenzwelle wird die Wellenfront der Referenzfläche rekonstruiert. Stimmen die geometrischen Formen der Oberflächen nicht überein, entstehen Interferenzstreifen, die Höhenschichtlinien der Abweichung darstellen und automatisch ausgewertet werden können. Die Positionierung des Prüflings ist nicht ganz unkritisch. Das neuartige Verfahren kann für die Serienprüfung von asphärischen Glas-, Kunststoff- oder Metallflächen benützt werden. Zur Hologrammaufzeichnung wurde das Rottenkolber-Sofortbildgerät HSB-1000 mit thermoplastischem Film als Speicher benützt.

In Bild 3 ist das Ergebnis einer Relativprüfung zu sehen. Sowohl die Interferometrie als auch die holografische Interferometrie eignen sich für Vergleichsmessungen. Die absolute Vermessung der Objektform mit der Genauigkeit von Bruchteilen der Wellenlänge ist etwas aufwendiger. Beispielsweise könnte eine 3-D-Messmaschine dazu benützt werden. Eleganter kann diese Messaufgabe mit einer interferometrischen Methode, bei der computergenerierte Hologramme (CGH) als Referenz dienen, gelöst werden. Sie arbeitet nach folgendem Prinzip:

Zwei Wellen, eine Plan- und eine kompliziert verformte Soll-Wellenfront, werden im Hologramm gespeichert. Mit der verformten Wellenfront kann die Planwelle genau rekonstruiert werden. Da aber die ursprüngliche Soll-Wellenfront physikalisch nicht existiert, sondern nur theoretisch vorgegeben werden kann, wird das Hologramm rechnergesteuert erstellt. Es wird

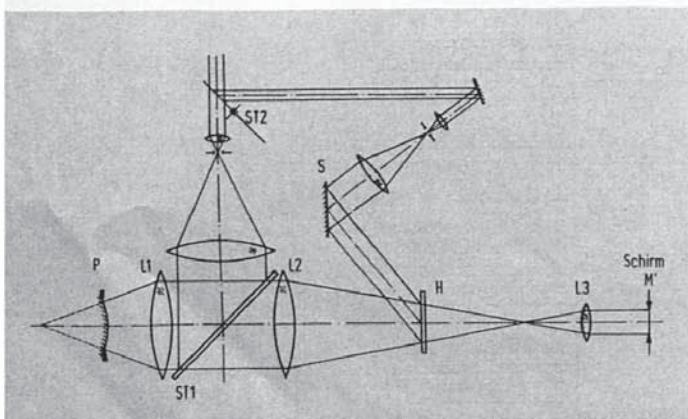


Bild 2 Anordnung zum Echtzeitformvergleich von asphärischen Flächen

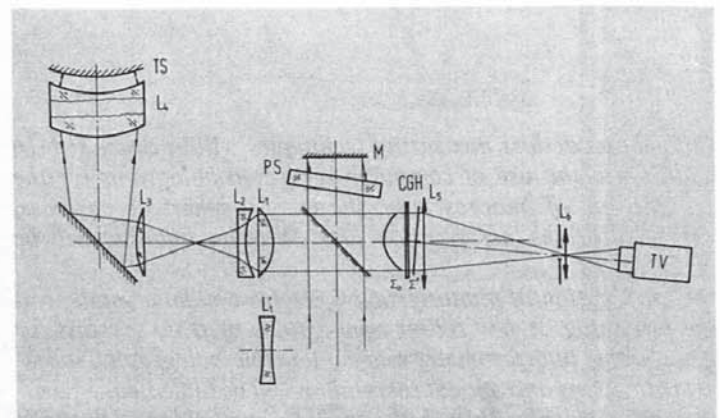


Bild 4 Aufbau zur industriellen Prüfung asphärischer Flächen

mit einem schnellen, hochpräzisen Trommelplotter (Optronics) auf Planfilm aufgezeichnet; andere Ausgabemöglichkeiten sind herkömmliche Digitalplotter (oft nicht ausreichend genau) sowie Laser- und Elektronenstrahl-Aufzeichnungsverfahren. In Bild 4 ist eine typische Anordnung zum Formvergleich skizziert. Der Prüfling TS wird über die Hilfslinsen  $L_1, L_2, L_3, L_4$  voll beleuchtet. Die vom Prüfling reflektierte tatsächliche Wellenfront beleuchtet das Hologramm und dient als Rekonstruktionswelle für das CGH. Die leicht schräg einfallende perfekte Planwelle (vom Planspiegel M reflektiert) dient als Referenzwelle. Weicht die Ist-Wellenfront des Prüflings von der Soll-Wellenfront ab, entstehen Abweichungen von der perfekten, vom CGH rekonstruierten Planwelle, die mit der Referenzwelle (ungebeugt) verglichen wird. Abweichungen erscheinen als Interferenzstreifen, die automatisch analysiert werden können durch Abtasten des Interferenzbildes mit Hilfe von CCD-Arrays oder aber fernsehtechnisch (z.B. Hamamatsu-C-1000-Kamera). In Bild 5a ist als typisches Beispiel ein Interferenzbild der Formabweichung einer Germaniumlinse mit Durchmesser 80mm gezeigt, mit entsprechenden Ergebnissen unserer automatischen Streifenauswertung in den Bildern 5b und 5c. Um geschlossene Streifen auswerten zu können, ist es notwendig, drei Streifensysteme zu analysieren mit jeweils einer Phasen-

schiebung von  $\pi/2$  dazwischen. Diese Phasenschiebung wird im Referenzarm des Interferometers (Bild 4) eingeführt. Die 3-Interferogramm-Methode ermöglicht auch die einfache Bestimmung des Vorzeichens der Abweichung. Für eindimensionale Auswertung sind die Abtastzeiten  $< 0,05$  s.

### 3. Einsatz fotorefraktiver Kristalle in der Messtechnik

Vor mehr als 16 Jahren wurden bei Lithium-Niobaten,  $\text{LiNbO}_3$ -Kristallen, unter Laserbestrahlung Brechzahlveränderungen festgestellt. Auch andere Kristalle zeigten ähnliche Effekte, die aber meistens kleiner waren als bei  $\text{LiNbO}_3$ . Zehn Jahre später wurde der gleiche Effekt auch bei Wismutgermaniumoxid,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) und Wismutsiliziumoxid,  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) Kristallen gefunden, allerdings mit 100fach höherer Fotoempfindlichkeit. Bei BSO-Kristallen wurde schon früher der Pokels-Effekt ausgenutzt.  $\text{LiNbO}_3$ -Kristalle als optische Speicher sind zurzeit die bekanntesten. Sie wurden als Speicher für Reflexionshologramme mit gutem Wirkungsgrad benützt sowie zur optischen Informationsspeicherung.

An unserem Institut haben wir speziell den BSO-Kristall untersucht und in der Messtechnik eingesetzt. Es ist ein kubischer

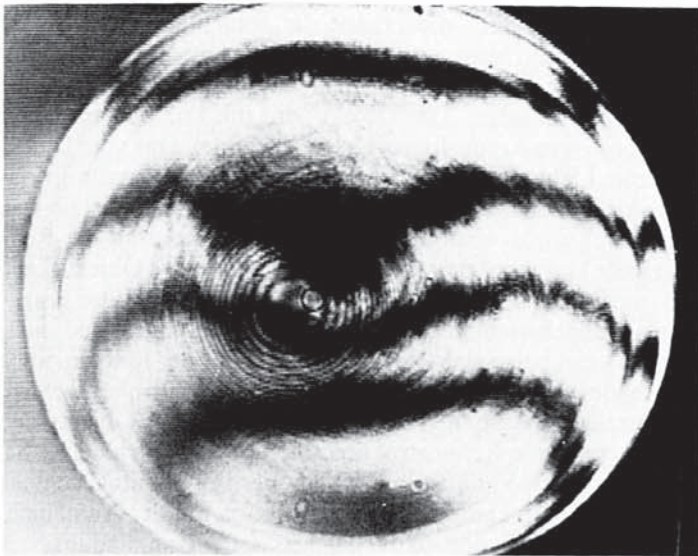
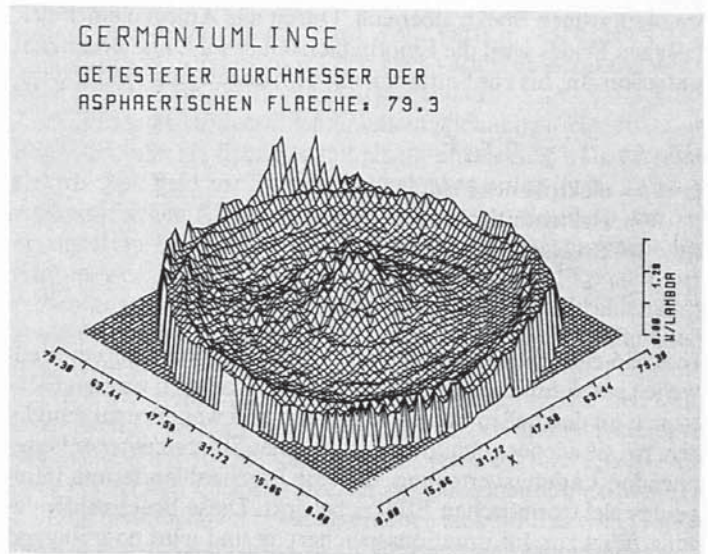
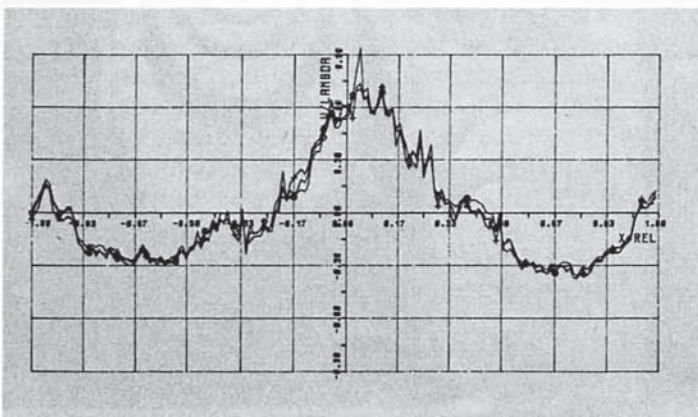


Bild 5 Beispiel der Prüfung der asphärischen Fläche einer Germaniumlinse  
a) Streifenbild, das die Abweichungen vom Sollwert anzeigt



c) Flächenhafte Streifenauswertung



b) Beispiel der eindimensionalen Streifenauswertung

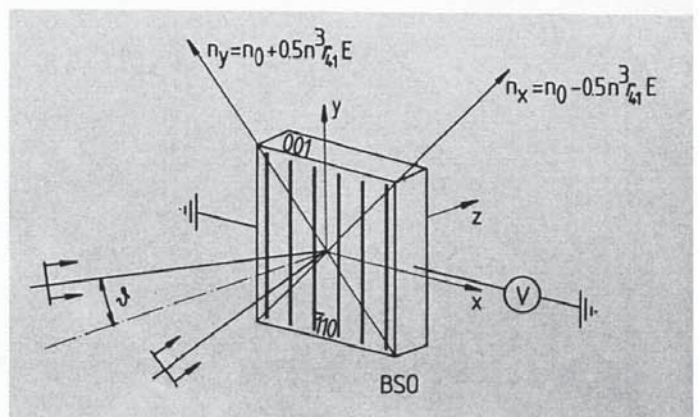


Bild 6 Speicherung der Information im BSO-Kristall

# Laser-Anwendung

Kristall, der sowohl den linearen elektrooptischen (Pockels-) Effekt als auch Fotoleitungseigenschaften zeigt. Die maximale Empfindlichkeit liegt im grün-blauen Spektralbereich.

In Bild 6 ist eine Anordnung zur optischen Speicherung der Information im BSO schematisch angegeben. In dieser Anordnung wird der transversale elektrooptische Effekt ausgenutzt. Zur Empfindlichkeitssteigerung wird ein transversales elektrisches Feld angelegt (6 kV/cm). Damit werden Empfindlichkeiten erreicht, die vergleichbar sind mit denen hochauflösender fotografischer Emulsionen, wie sie in der Holografie benützt werden (z. B. Kodak 649 F). Empfindlichkeiten für die Informationsspeicherung bei einprozentigem Beugungswirkungsgrad sind nachfolgend aufgeführt:

Material	Speicherenergie
LiNbO <sub>2</sub> :Fe	30 mJ/cm <sup>2</sup>
BSO	0,3 mJ/cm <sup>2</sup>
BGO	1,25 mJ/cm <sup>2</sup>
Fotothermoplast	0,02 mJ/cm <sup>2</sup>

Bild 6 zeigt den Kristall in der transversalen elektrooptischen Konfiguration mit den Kristallebenen und der Anordnung für das transversale elektrische Feld in der 110 Kristallrichtung. Der Kristall ist ein Volumenspeicher. Er ist am empfindlichsten im blau-grünen Spektralbereich. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes wird die Empfindlichkeit erhöht. Die Brechzahlvariation  $\Delta n_s$  bis zur Sättigung mit dem angelegten Feld E wird

$$\Delta n_s = -\frac{1}{2} n^3 r_{41} E.$$

E = elektrisches Feld

$r_{41}$  = elektrooptischer Koeffizient

n = Brechzahl des Kristalls

$$\Delta n_s \approx -3 \cdot 10^{-5}, \text{ wenn } E = 6 \text{ kV/cm}$$

In Bild 6 entsteht durch Interferenz der linear polarisierten Planwellen ein räumliches Interferenzmuster. Dadurch werden Elektronen an den hellen Stellen freigesetzt und wandern zu dunklen, wo sie wieder gebunden werden. Dies führt zu einer entsprechenden Ladungsverteilung, die eine Brechzahländerung infolge des elektrooptischen Effekts bewirkt. Diese Brechzahländerung führt zur Informationsspeicherung und wird nachfolgend für Echtzeitverfahren in der berührungslosen optischen Mess-

technik benützt. Die Information kann mindestens 24 Stunden gespeichert werden. Der Kristall zeigt praktisch keine Ermüdungserscheinungen. Bei Beleuchtung mit Licht im blaugrünen Spektralbereich wird die Information wieder schnell gelöscht. Die räumliche Auflösung des kornlosen Speichers ist grösser als 1000 Lp/mm, vorzugsweise wird mit einigen hundert Lp/mm gearbeitet. Der maximale Beugungswirkungsgrad liegt bei 2% [2-4].

In den nachfolgenden Beispielen wird von «Echtzeitmesstechnik» geredet; gemeint sind Aufzeichnungs- und Wiedergabezeiten von Bruchteilen einer Sekunde bis 2 Sekunden. Die Brechzahländerungen sind klein ( $\Delta n \approx 10^{-5}$ ). Die Beleuchtungsenergie liegt zwischen  $100 \mu\text{Jcm}^{-2}$  und  $500 \mu\text{Jcm}^{-2}$ .

## 4. Echtzeitholografie in der Messtechnik mit BSO-Kristallen

Die holografische Interferometrie hat sich für bestimmte Anwendungen wie berührungslose Verformungs-, Verschiebungs- oder Schwingungsmessung als nützlich erwiesen. Als Speichermaterialien für die Hologrammaufzeichnung werden meist noch feinkörnige fotografische Schichten verwendet; es werden aber auch schon fotothermoplastische Materialien eingesetzt. Für die Echtzeitwiedergabe eignen sich besonders auch elektrooptische Kristalle wie BSO-Kristalle. Durch eine Echtzeitspeicherung und -wiedergabe der Information werden die berührungslosen Messverfahren für den Ingenieur attraktiver.

Eine mögliche Anordnung zur Echtzeitholografie mit Kristallen ist in Bild 7 zu sehen. Das Objekt wird mit kohärentem Licht, z. B. von einem Argon-Ionen-Laser beleuchtet. Das vom Objekt gestreute Licht wird mit einer kohärenten Referenzwelle überlagert. Als Speicher der Information dient ein BSO-Kristall. Das Objektwellenfeld wird mit Hilfe der Interferenz mit der Referenzwelle  $U_{\text{Ref}}$  registriert. Die Rekonstruktion des Objekts kann z. B. mit Hilfe des Spiegels M erfolgen. Dabei muss der Bragg-Winkel eingehalten werden. Weitere Anordnungen sind möglich. So kann beispielsweise ohne Spiegel mit der Referenzwelle als Rekonstruktionswelle die Objektwelle rekonstruiert werden. Im skizzierten Aufbau erscheint an der Stelle des Objekts eine dreidimensionale Rekonstruktion, die über den Strahlteiler ST mit Hilfe eines Vidikons auf einem Fernsehmonitor sichtbar gemacht werden kann. Die Rekonstruktion mit der Aufnahme-welle ist allerdings destruktiv, das heisst, die Raumladungsverteilung gleicht sich aus.

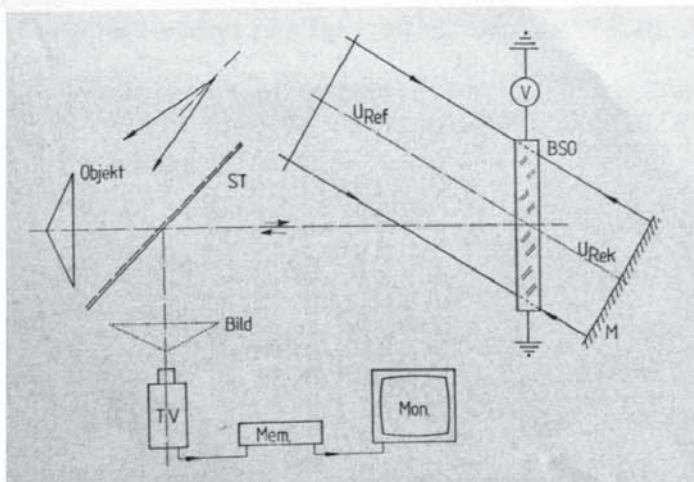


Bild 7 Anordnung zur holografischen Echtzeitrekonstruktion mit BSO-Kristallen



Bild 8 Doppelbelichtung zur Messung der Verformung einer Platte in Echtzeit mit BSO-Kristall als Speicher

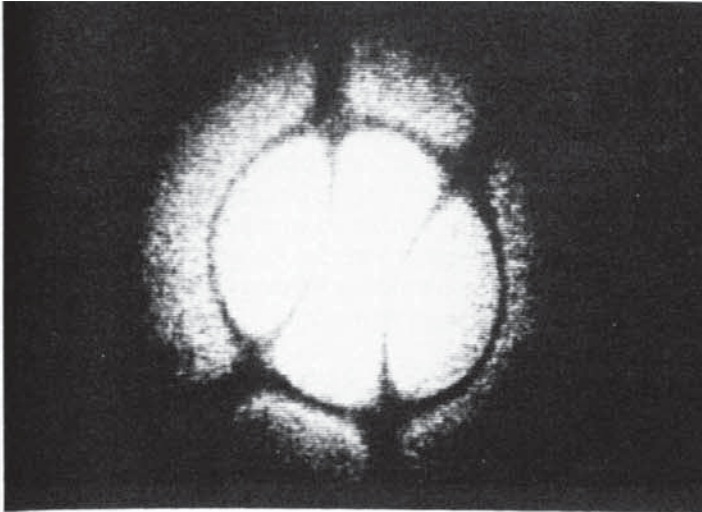


Bild 9a Analyse eines harmonisch schwingenden Objektes

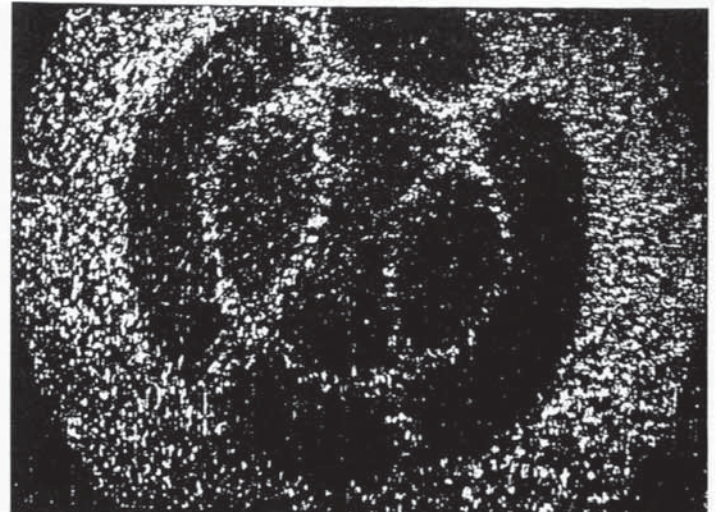


Bild 9b Vergleich der Analyse mit Speckle-Interferometrie

Durch Ausnützung der Integrationseigenschaft des Speichers können dem BSO zwei Aufnahmen des Objekts überlagert werden. Dabei wird die erste vor, die zweite nach der Verformung oder Verschiebung des Objekts registriert, um dann beide gleichzeitig zu rekonstruieren. Kleinste Formunterschiede des Objekts bei den beiden Belichtungen können auf diese Art und Weise als Interferenzstreifen, die bei der gleichzeitigen Rekonstruktion beider Wellenfelder dem rekonstruierten Objekt überlagert sind, beobachtet werden. Dabei entsprechen die einzelnen Streifen jeweils einer Änderung des optischen Weges von einer Wellenlänge  $\lambda$  ( $\lambda = 514 \text{ nm}$ ). Dieses wird am Beispiel der Verformung einer Platte zwischen den beiden Belichtungen in Bild 8 gezeigt. Für die Doppelbelichtung wird die Belichtungszeit so gewählt, dass die Sättigung der Brechzahlvariation nahezu erreicht wird; dann wird die Belichtung unterbrochen und das Objekt den verformenden Kräften ausgesetzt. Durch die zweite Belichtung wird das zuerst gespeicherte Hologramm geringfügig abgebaut. Die Rekonstruktion erfolgt direkt nach der zweiten Belichtung. Dem rekonstruierten Bild sind Interferenzstreifen überlagert, die zur automatischen Streifenauswertung auf einem Bildspeicher registriert werden können. Typische Belichtungszeiten sind 0,5 s für Beleuchtung mit Argon-Ionen-Laser,  $\lambda = 514 \text{ nm}$ , bei einer Laserleistung von 0,5 W.

Zur Analyse harmonischer mechanischer Schwingungen eignet sich die Zeitmittelholografie. Harmonisch schwingende Objekte können mit BSO im Zeitmittel direkt registriert und die Interferenzstreifen anschließend beobachtet werden. Die Zeitkonstante zum Aufbau des Hologramms bis zur Sättigung muss wesentlich länger sein als die Schwingungsdauer einer Periode. Ein Streifensystem, entsprechend der Besselfunktion nullter Ordnung, entsteht für jede Anregungsfrequenz des schwingenden Objekts. Die Zeitkonstante zum Aufbau des Hologramms in Bild 9 war ca. 500 ms, so dass praktisch von Echtzeitbeobachtung der Streifen geredet werden kann. Das Bild zeigt die Rekonstruktion der Zeitmittelaufnahme einer schwingenden Membrane der Schwingungsfrequenz 500 Hz. Durch Änderungen der Frequenz ändert sich das örtliche Schwingungsmuster, das beobachtet werden kann.

## 5. Echtzeit-Höhenschichtlinien-Aufzeichnung

Verschiedene Methoden erlauben die Aufzeichnung von Höhenschichtlinien oder Konturlinien. Es sind dies die klassi-

schen fotogrammetrischen Methoden, die Moiré-Technik oder aber holografische Verfahren. Mit Moiré-Techniken können üblicherweise kleinste Höhenschichtlinienabstände von einigen Zehntelmillimetern erreicht werden; mit holografischen Methoden sind einige Mikrometer möglich. Die holografische Höhenschichtlinienaufzeichnung wird von Varner beschrieben [5]. Holografische Methoden werden aber vermehrt attraktiv, wenn sie in Echtzeit ausgeführt werden können [6].

Zur Echtzeit-Höhenschichtlinienaufzeichnung eignen sich BSO-Kristalle als Speicher mit einem angelegten transversalen elektrischen Feld zur Empfindlichkeitssteigerung in der 110 kristallografischen Richtung. Verschiedene Anordnungen wurden an unserem Institut untersucht. Ein typischer experimenteller Aufbau ist als Prinzipskizze in Bild 10 dargestellt. Für das Zweiwellenlängenverfahren wurde ein telezentrischer Strahlengang gewählt. Dabei wird das Objekt mit einer Planwelle, die unter dem Winkel  $\theta_q$  einfällt, beleuchtet und in den Kristall abgebildet. Die Referenzwelle fällt unter dem Winkel  $\theta_r$  auf den elektrooptischen Kristall ein. Da das Licht der unterschiedlichen Wellenlängen von der angedeuteten Referenzfläche, z. B. auf dem vordersten Objektpunkt, zu den einzelnen Objektpunkten unterschiedlich lange braucht, ergeben sich für das vom Objekt zur Referenzebene zurückgestreute Licht unterschiedliche wellenlängenabhängige Phasen. Die Referenzebene wird anschließend mit den Linsen  $L_1$  und  $L_2$  auf den Kristall abgebildet, wo

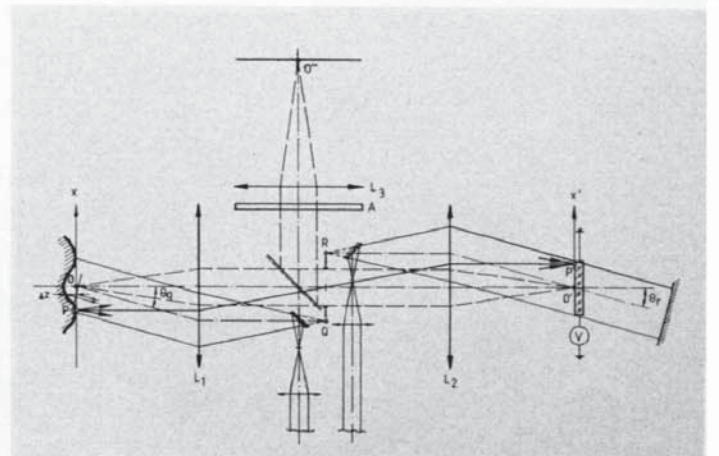


Bild 10 Anordnung zur Echtzeithöhenschichtlinien-Aufzeichnung

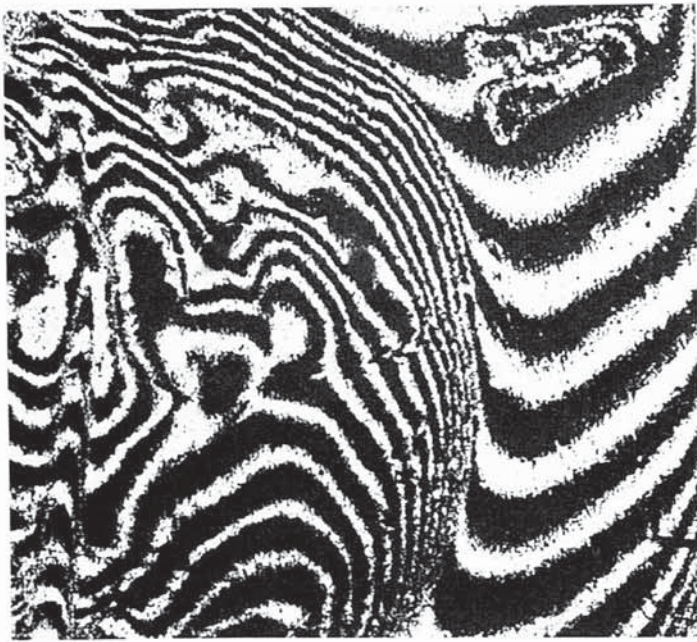


Bild 11 Konturlinienaufzeichnung einer metallischen Oberfläche mit Höhenschichtabständen von 13,9 µm

sie mit den Referenzwellen der Wellenlängen, z. B.  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , die gleichzeitig vorhanden sind, überlagert werden. Bedingt durch den unterschiedlichen optischen Weg bzw. Phasen der zwei Wellenlängen, entstehen gleichzeitig zwei unterschiedliche Hologramme, die aber wieder gleichzeitig von einer Rekonstruktionswelle ausgelesen werden. Dabei entsteht das rekonstruierte Bild, das mit Höhenschichtlinien überlagert ist. Der Abstand der Höhenschichtlinien ist

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{(1 + \cos \theta_q)(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad \text{wenn} \quad \frac{f'_1}{f'_2} \cdot \sin \theta_q = \sin \theta_r \quad \text{ist}$$

und  $f'_1, f'_2$  die Brennweiten der Linsen  $L_1$  und  $L_2$  sind.

Der Höhenschichtlinienabstand ist abhängig von den Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  sowie dem Einfallswinkel  $\theta_q$  der Beleuchtungswelle des Objekts und  $\theta_r$  der Referenzwelle. Mit diesem Verfahren können das Objekt in Echtzeit justiert und Höhenschichtlinien beobachtet werden. Für die vorgestellten Bilder wurde ein Kryptonlaser als Lichtquelle verwendet. Ein ausge-

wähltes Wellenlängenpaar ergibt Höhenschichtlinienabstände von  $\Delta z = 13,9 \mu\text{m}$  (Bild 11). Die Auswahl der gewählten Wellenlängen erfolgt mit Hilfe von Farbfiltern bzw. Interferenzfiltern oder Dispersionsprisma aus den gleichzeitig zur Verfügung stehenden Spektrallinien des Kryptonlasers. Ein Argon-Ionen-Laser wurde im Versuchsaufbau ebenfalls eingesetzt. Für das typische Ergebnis in Bild 11 war die Bestrahlungsstärke  $200 \mu\text{W cm}^{-2}$  und die Zeit zur Brechzahländerung für den entsprechenden Beugungswirkungsgrad  $T \approx 0,5 \text{ s}$ . Andere Anordnungen zur Echtzeit-Schichtlinienanwendung können gewählt werden; darauf soll hier nicht eingegangen werden.

## 6. Speckle-Technik zur Echtzeitverformungs- und -schwingungsmessung mit BSO-Kristallen

Speckling oder Granulation tritt immer dann auf, wenn kohärentes Licht, z. B. von einem Laser, eine optisch rauhe Oberfläche beleuchtet (Bild 12a). Optisch rauhe ist eine Oberfläche, wenn die Unebenheiten vergleichbar mit oder grösser als die Wellenlänge des verwendeten Lichtes sind. Die Speckle-Grösse ist abhängig von der Geometrie der Anordnung, der Kontrast der Speckle aber von der Rauigkeit der Oberfläche. Die Speckle, obwohl statistisch verteilt, folgen der Objektbewegung sehr genau, mindestens für kleine Bewegungen (Bild 12b). Diese Eigenschaft wird bei der sogenannten Speckle-Fotografie ausgenutzt. Bei der Doppelbelichtung vor und nach einer kleinen Verschiebung entstehen paarweise Speckle: Wie beim Youngschen Doppelspalt-Experiment führen zwei identische, aber verschobene Speckle, zu den Youngschen Interferenzstreifen in der Brennebene einer Linse, deren Streifenabstand umgekehrt proportional der Verschiebung bzw. Verformung im Objekt ist. Im Gegensatz dazu wird bei der Speckle-Interferometrie die Variation innerhalb eines Speckles betrachtet, wobei vorteilhaft jeweils auch eine Referenzwelle überlagert wird. Die Speckle-Interferometrie ist in bezug auf Empfindlichkeit vergleichbar mit der holografischen Interferometrie. Bild 9b zeigt ein Beispiel der Speckle-Interferometrie einer schwingenden Membrane.

Die Speckle-Fotografie ist für den Ingenieur interessant, dies um so mehr, weil die Speckle-Fotografie, die die Holografie in bezug auf Empfindlichkeit und Messbereich ergänzt, vielseitig eingesetzt werden kann und weniger anfällig ist für Umweltstörungen. Prinzipiell funktioniert das Verfahren so, dass zwei Speckle-Muster auf dem Speicher registriert werden, nämlich vor und nach der Verformung (Bild 13). Eine anschliessende

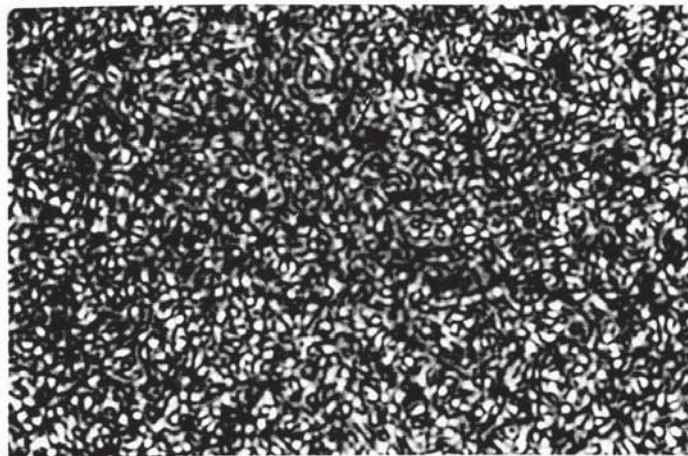


Bild 12a Stationäres Speckle-Muster

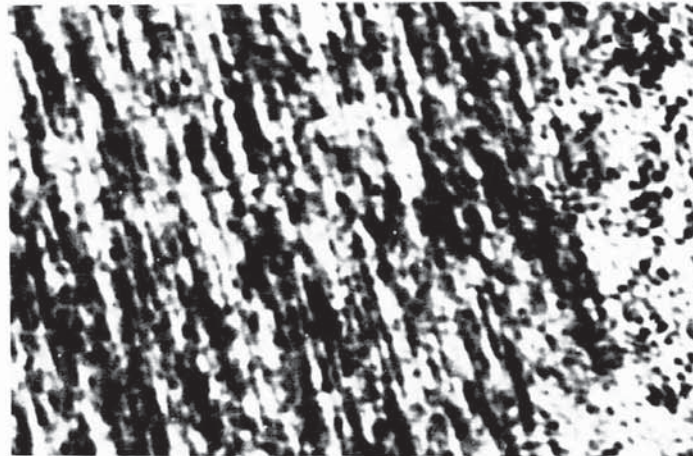


Bild 12b Bewegtes Speckle-Muster

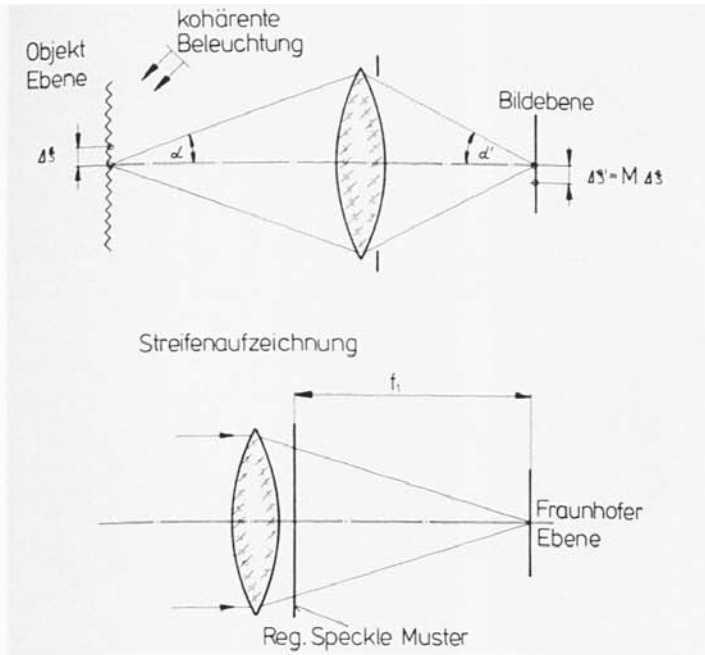


Bild 13 Anordnung zur Aufzeichnung von Specklegrammen

Beleuchtung mit einem Laserstrahl führt zu den Youngschen Streifen in der Brennebene einer Linse. Bild 14 zeigt das Ergebnis der punkweisen Speckle-Auswertung zur Verformungsmessung eines Balkens. Der Streifenabstand ist umgekehrt proportional zur Verformung. Die Auswertung der Youngschen Streifen ist einfacher als die Streifenauswertung bei der Holografie. Mit Hilfe der BSO-Kristalle kann die Speckle-Fotografie auch in Echtzeit eingesetzt werden. In Bild 15 ist ein Aufbau mit einem BSO-Kristall als Speicher schematisch gezeigt. Da die Absorption des verwendeten Kristalls  $2\text{ cm}^{-1}$  für  $\lambda_1 = 514\text{ nm}$  und  $0,28\text{ cm}^{-1}$  für  $\lambda_2 = 633\text{ nm}$  ist, wird die Speckle-Registrie-

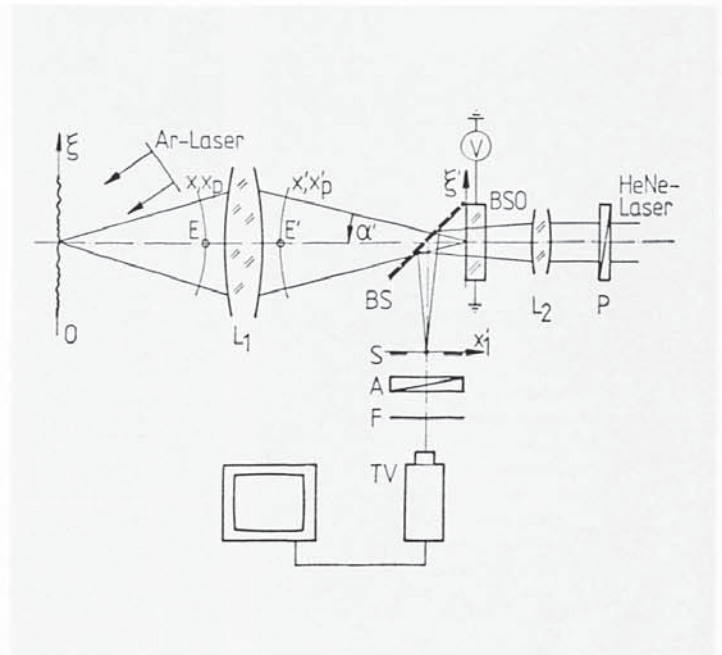


Bild 15 Anordnung zur Echtzeit-Speckle-Fotografie mit BSO-Kristallen

rung vorteilhaft bei  $\lambda_1$  und das Auslesen bei  $\lambda_2$  vorgenommen, so dass das gespeicherte Speckle-Muster beim Echtzeitvergleich oder bei der Doppelbelichtung erhalten bleibt. Auf einen elektronischen Speicher kann verzichtet werden. Eine kurze Analyse ist in Referenz [8] wiedergegeben. Die punktwise Aufzeichnung der Streifen kann mit einem 1-mW-HeNe-Laser erfolgen. Die Streifenauswertung kann mittels digitaler Bildverarbeitung (FFT) oder direkt durch optische Fourier-Transformation durchgeführt werden. Der Rückschluss auf Verschiebungen oder Verformungen ist bei der Speckle-Fotografie einfacher als bei den holografischen

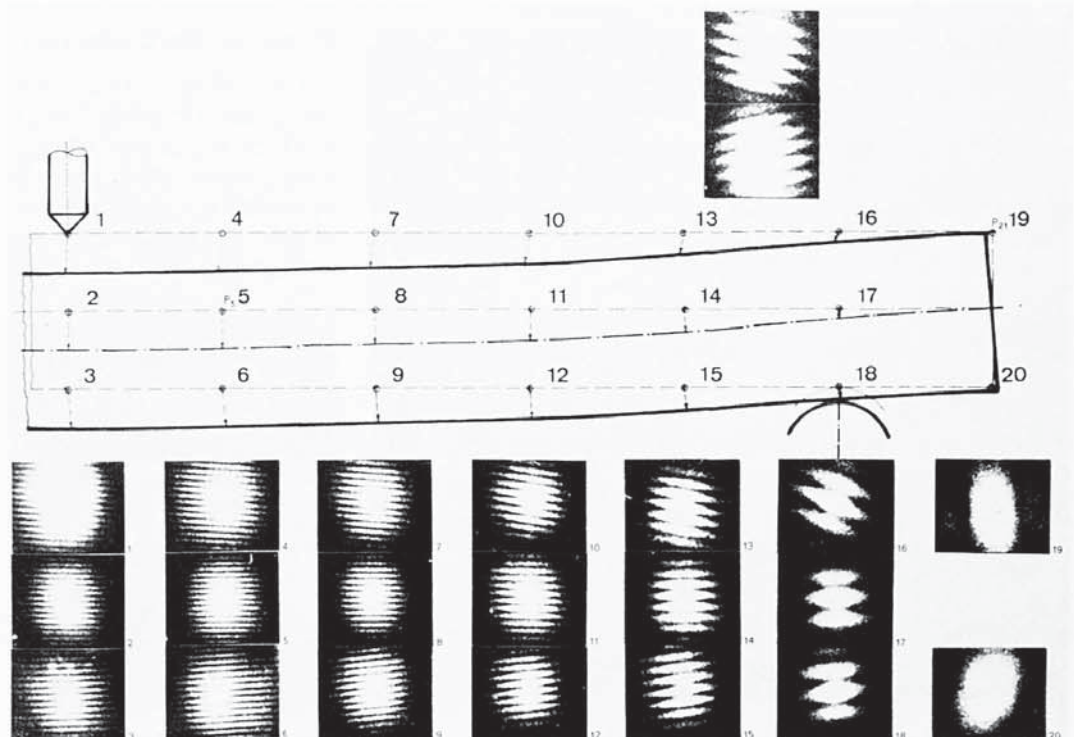


Bild 14 Verformungsmessung eines Balkens mittels Speckle-Fotografie (Doppelbelichtung, Speckle vor und nach der Verschiebung, registriert auf Fotoplatte)

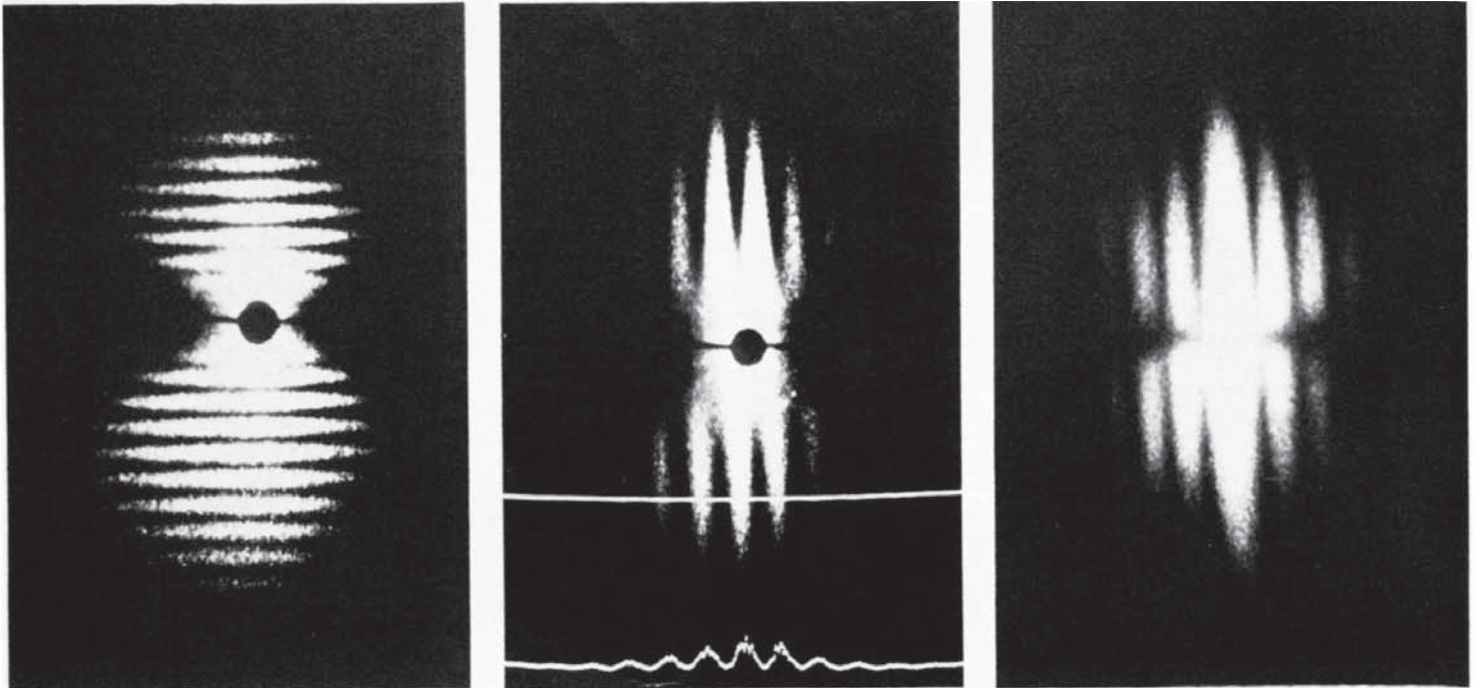


Bild 16 Verschiedene Streifen der Echtzeit-Speckle-Fotografie mit BSO-Kristallen

Verfahren. Verschiebungen in der Ebene oder Verkippungen können einfacher getrennt werden: Verschiebungen in der Ebene durch Speicherung der Speckle-Muster in der Bildebene und Auslesen in der Fraunhofer-Ebene; Verkippungen durch Speicherung in der Fourier-Ebene oder in defokussierter Anordnung.

Etwas aufwendiger wird die Analyse dreidimensionaler Verformungen. Beispiele der Echtzeitaufzeichnung (mit Hilfe des BSO-Kristalls) von Youngschen Streifen sind in Bild 16 für a Verschiebungs-, b Verkippungs- und c Schwingungsmessung zu sehen.

## 7. Echtzeitkorrelation mit BSO-Kristallen

In der optischen Korrelation und optischen Filterung wird üblicherweise ein auf fotografische Schichten registriertes Filter (Van-der-Lugt-Filter) benützt. Der BSO-Kristall kann aber auch zum Formvergleich in Echtzeit herangezogen werden. Ein Aufbau, wie er bei uns benützt wird, ist schematisch in Bild 17 gezeigt. In diesem Aufbau wird das Spektrum des Prüflings O mit dem des Masters R gleichzeitig überlagert und die Intensität gebildet.

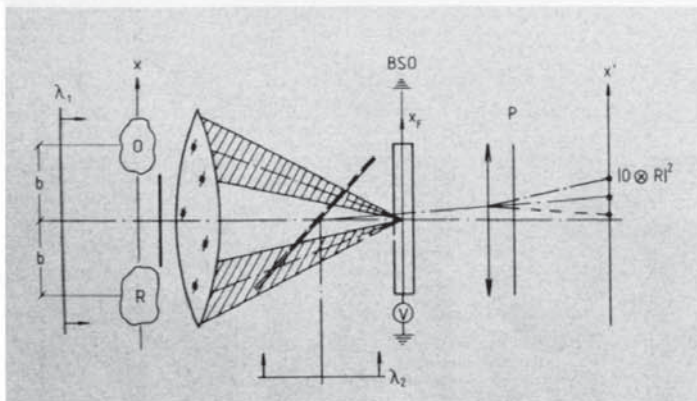


Bild 17 Aufbau zur Echtzeitkorrelation mit BSO-Kristallen

Ausgelesen wird wieder vorteilhaft mit einer Wellenlänge  $\lambda_2$  des HeNe-Lasers, bei der die Kristallabsorption kleiner ist als bei der Speicherung. Die Intensität der Fourier-Transformation führt in der Ebene  $x'$  zur gesuchten Kreuzkorrelation, die ein Mass der Ähnlichkeit des Prüflings mit dem Referenzobjekt liefert.

Bei Übereinstimmung von Prüfling und Master ergibt sich die Autokorrelation. Das Verfahren ist positionsunabhängig, nicht aber unabhängig von der Richtungsorientierung zwischen Referenz und Prüfling.

In Bild 18 wurden Fingerabdrücke verglichen. Im vorliegenden Beispiel ist sehr gute Übereinstimmung erreicht worden.

## 8. Echtzeitanalyse von bewegten Objekten

Bei der Reflexion an einem bewegten Objekt erfährt das Licht, infolge des Dopplereffekts, eine der Geschwindigkeitskomponente in Reflexionsrichtung proportionale Frequenzverschiebung (Dopplershift). Diese kann gemessen werden, indem man einen Teil des ausgesandten Lichtes mit einem Teil des vom Gegenstand zurückgestreuten Lichtes auf einen Fotoempfänger zur Interferenz bringt. Der Fotosensor registriert eine Intensi-



Bild 18 Beispiel der Korrelation von Fingerabdrücken



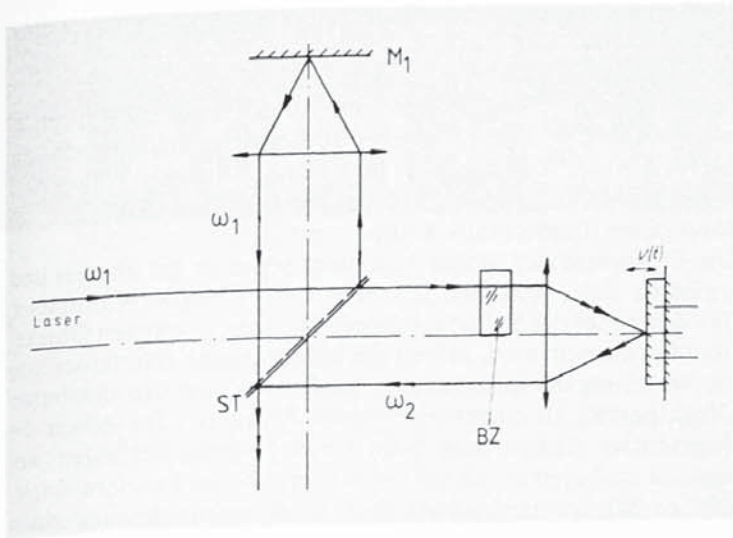


Bild 19 Prinzip des Heterodyne-Interferometers zur Schwingungsmessung

tätsänderung mit der Schwebungs- oder Differenzfrequenz der Teilstrahlen, die der Dopplershift entspricht. Nach diesem Prinzip des Heterodyn-Interferometers arbeiten Messgeräte für die hochgenaue inkrementale Wegmessung (HP-Interferometer), für die Geschwindigkeitsmessung von Partikeln in Gas- und Flüssigkeitsströmungen (Laser-Doppler-Anemometer) und für die Geschwindigkeits- und Schwingungsmessung an Festkörpern (Laser-Doppler-Vibrometer).

In Bild 19 ist das Prinzip des Heterodyn-Interferometers dargestellt. Als Lichtquelle wird ein Laser verwendet, einerseits weil die Wellenlänge in das Messergebnis eingeht und deshalb genau bekannt sein muss, und andererseits aus Kohärenzgründen, weil die Weglängendifferenz der Teilarme gross sein kann. Die einfallende Welle der Schwingungsfrequenz  $\omega_1(t)$  wird durch den Strahlteiler ST in zwei Hälften aufgeteilt. Der Spiegel

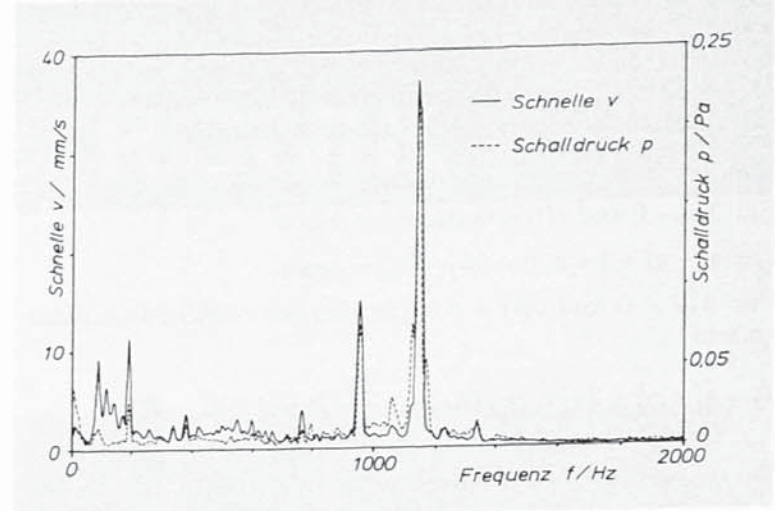


Bild 21 Vergleich der Frequenzspektren der Schwingschnelle und des Schalldruckes eines rotierenden Reifens, die gleichzeitig mit Vibrometer und Mikrofon gemessen wurden

$M_1$  reflektiert die Referenzwelle entlang dem optischen Weg (1). Vom bewegten Objekt wird eine Welle mit unterschiedlicher Phase entlang Weg (2) reflektiert. Der Wegunterschied entsteht durch den zeitlich unabhängigen optischen Wegunterschied und die zeitabhängige mechanische Bewegung oder Schwingung des Objektes. Zur einfachen elektronischen Auswertung und zur einfachen Bestimmung des Vorzeichens der zeitabhängigen Bewegung oder Schwingung, wird zusätzlich noch die Frequenz  $\omega_1$  mit einer Bragg-Zelle um  $\Delta\omega$  verschoben.

Die beiden interferierenden Wellen haben die Amplituden

$$A_1 = a_1 \cos(\omega_1 t + \Phi_1) \text{ und } A_2 = a_2 \cos(\omega_2 t + \Phi_2) \text{ mit}$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega + \omega_1 \frac{2v(t)}{c_1} = \omega_1 + \Delta\omega + \frac{2\pi}{\lambda_1} 2v(t)$$

wenn  $a_1, a_2$  die Amplituden der Teilwellen,  $\lambda_1$  die Wellenlänge

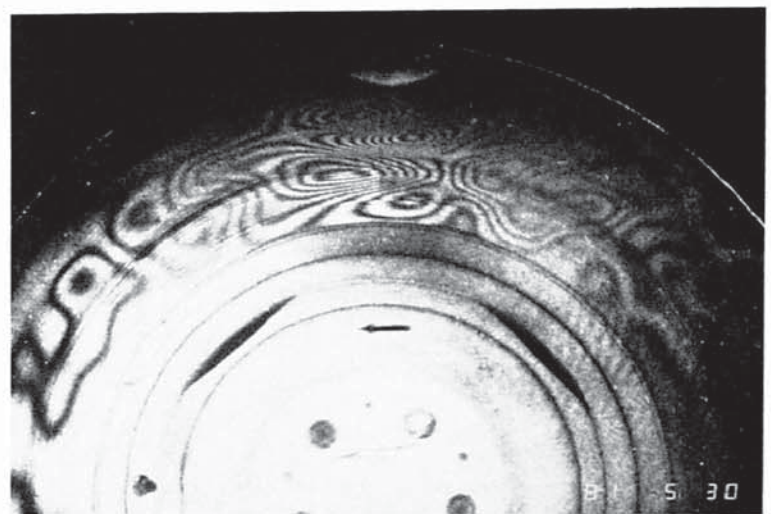
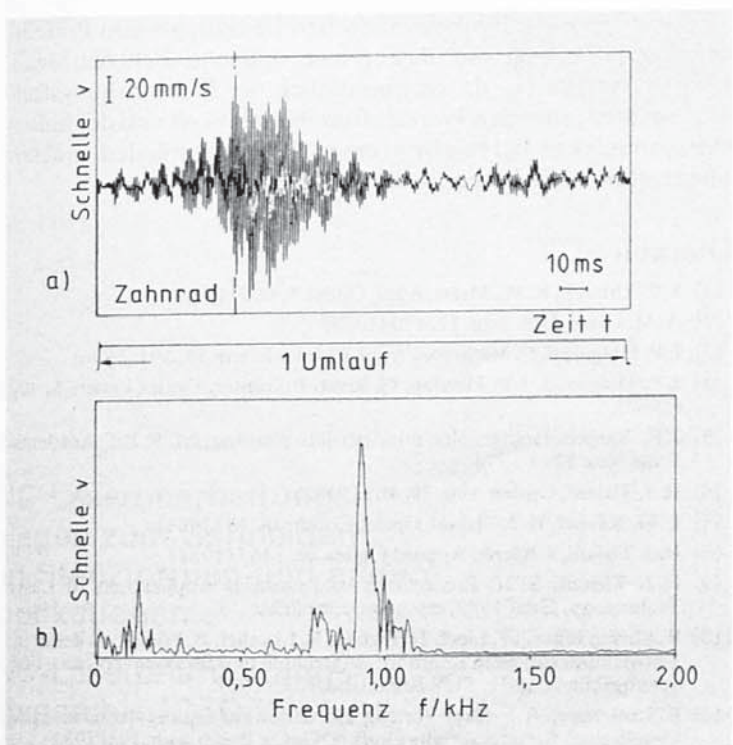


Bild 22 Ergebnis der Doppelpulsholografie eines rotierenden Autoreifens (Reifendrehzahl  $320 \text{ min}^{-1}$ , Pulsabstand  $50 \mu\text{s}$ )

Bild 20a Ergebnisse der Schwingungsanalyse mittels Dopplershift-Messung an einem Punkt der Seitenwand eines rotierenden Reifens

Bild 20b Frequenzanalyse des zeitlichen Schnellesignals in Bild 20a

und  $c_1$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit des verwendeten Lichtes sind.  $\Phi_1, \Phi_2$  sind zeitunabhängige Phasen, die als Gerätekonstante betrachtet werden können.  $v(t)$  ist die Objektgeschwindigkeit. Die Überlagerung der Wellen von Weg (1) und (2) ergibt am Interferometerausgang eine Intensität

$$I = |A_1 + A_2|^2.$$

Für  $\Delta\omega = 0$  und  $v(t) = 0$ , also  $\omega_1 = \omega_2$ , ist

$$I_1 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\Phi_1 - \Phi_2) = \text{const.}$$

Für  $\Delta\omega \neq 0$  und  $v(t) \neq 0$  ergibt sich der zeitliche Intensitätsverlauf

$$I_2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\Delta\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} 2v(t)t + \Phi_1 - \Phi_2).$$

Diese Intensität  $I_2$  am Ausgang des Interferometers wird fotoelektrisch registriert. Die resultierende Frequenz des Messsignals am Ausgang des Interferometers wird massgebend von der Frequenzverschiebung  $\Delta\omega$  durch den frequenzverschiebenden Kristall (Bragg-Zelle BZ) sowie von der momentanen Geschwindigkeit  $v(t)$  bestimmt. Nach der elektronischen Demodulation und Frequenzspannungswandlung ergibt sich eine zur momentanen Objektgeschwindigkeit  $v(t)$  proportionale Ausgangsspannung. Ein Beispiel für ein Zeitsignal der momentanen Objektgeschwindigkeit ist in Bild 20a wiedergegeben. Untersucht wird die Seitenwandschwingung eines abrollenden Pkw-Reifens.

Zur Frequenzanalyse wird das Signal von Bild 20a einem schnellen Fourier-Transformations-Analysator zugeführt. Aus dem Frequenzspektrum der Schnelle in Bild 20b können Rückschlüsse auf den Anregungsmechanismus der Schwingung gezogen werden.

In Bild 21 ist ein Vergleich der Echtzeitschwingungsanalyse, basierend auf der Vibrometermessung (Dopplershift-Messung) mit gleichzeitig aufgenommenen Schalldruckmessungen (Mikrofon) dargestellt. Aus der guten Übereinstimmung der beiden Spektren kann geschlossen werden, dass die Schwingung als Ursache für den Luftschall anzusehen ist. Diese Art der Korrelationsmessung ist bei bewegtem Messobjekt nur mittels berührungsloser Schwingungsmessung möglich, da mitbewegte Aufnehmer gegenüber dem festaufgestellten Mikrofon infolge des Dopplereffekts frequenzverschobene Signale liefern. Da zum Übergang auf andere Messstellen lediglich der Messstrahl des Vibrometers auf diese Stellen fokussiert werden muss, stellt

die Kombination aus Vibrometer und FFT-Analysator ein sehr wirkungsvolles und flexibles Instrument für die Schwingungs- und Geräuschanalyse dar.

In den Bildern 22 und 23 sind zum Vergleich mit den Vibrometernmessungen in Bild 20 Ergebnisse der Schwingungsmessung am rotierenden Reifen mittels Doppelpulsholografie vorgestellt. Dabei wurde die Ganzkörperbewegung (Rotation) des Reifens durch einen Bildrotator kompensiert [10].

Die Ergebnisse der beiden Verfahren stimmen gut überein und ergänzen sich. Während mit dem Laser-Doppler-Vibrometer das Zeitsignal der Schwingungsschnelle in einem gewählten Objektpunkt gemessen wird, erfasst die holografische Interferometrie die Verteilung der Schwingungsamplituden über den sichtbaren Objektpartien zu einem bestimmten Zeitpunkt. Da jedoch die quantitative Auswertung beim Laser-Doppler-Verfahren wesentlich einfacher ist als bei der holografischen Interferometrie, gibt es bei der berührungslosen Schwingungsmessung einen Trend zur Vielstellenmesstechnik nach dem Vibrometerprinzip. In den neuesten Arbeiten werden seriell arbeitende (scanning) Vibrometer verwirklicht [11], die vor allem für die Analyse von Modenschwingungen geeignet sind. Parallel arbeitende Systeme, mit denen auch kurzzeitige oder instationäre Schwingungsformen untersucht werden können, werden angestrebt.

## 9. Zusammenfassung

Wie die vorgestellten Beispiele zeigen, wird die berührungslose optische Messtechnik schon in vielen Einsatzgebieten erfolgreich angewandt. Sie wird in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen. Dies vor allem, weil die Mess- und Auswertzeiten durch den Einsatz neuer optischer Speichermedien (elektrooptische Kristalle) soweit verkürzt werden können, dass Quasi-Echtzeitanwendungen der Holografie, Speckle-Fotografie und der Bildkorrelation möglich werden. Ausserdem können durch die Fortschritte der Optoelektronik und der Computertechnik die grossen Informationsmengen, die z. B. in Hologrammen oder Specklegrammen enthalten sind, mit immer geringerem zeitlichem Aufwand ausgewertet werden. Die Messverfahren können deshalb wirtschaftlicher eingesetzt werden. Auch der zukünftige verstärkte Einsatz von automatischen Fertigungs- und Prüfeinrichtungen verlangt berührungslose optische Echtzeit-Mess- und Prüfverfahren, da sie hinsichtlich der Rückwirkungsfreiheit, der weitgehenden Werkstoffunabhängigkeit und der hohen Messgenauigkeit bei relativ grossen Arbeitsabständen anderen Messverfahren überlegen sind.

## Literatur

- [1] S. C. Urbach, R. W. Meier, Appl. Optics 5, 666 (1966)
- [2] A. M. Glass, Opt. Eng. 17, 470 (1978)
- [3] J. P. Huignard, F. Micheron, Appl. Physics Letters 29, 591 (1976)
- [4] J. P. Huignard, J. P. Herriau, G. Rivet, P. Günter, Optics Letters 5, 102 (1980)
- [5] J. R. Varnier: Holographic nondestructive testing, ed. R. Erf, Academic Press New York 1974
- [6] H. J. Tiziani, Optica Acta 29, 463 (1982)
- [7] F. M. Küchel, H. J. Tiziani, Optics Comm 38, 17 (1981)
- [8] H. J. Tiziani, J. Klenk, Applied Optics 20, 1467 (1981)
- [9] H. J. Tiziani, SPIE Proceedings of Industrial Applications of Laser Technology, Genf 1983, erscheint demnächst
- [10] R. Eberspächer, W. Liedl, H. Tiziani, R. Litschel, B. Pfister, A. Zeller in: Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Strassenverkehr - Forschungsbilanz 1981, TÜV Rheinland, Köln 1982
- [11] B. Stoffregen, A. Felske, Vortrag auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO), Darmstadt, Juni 1983

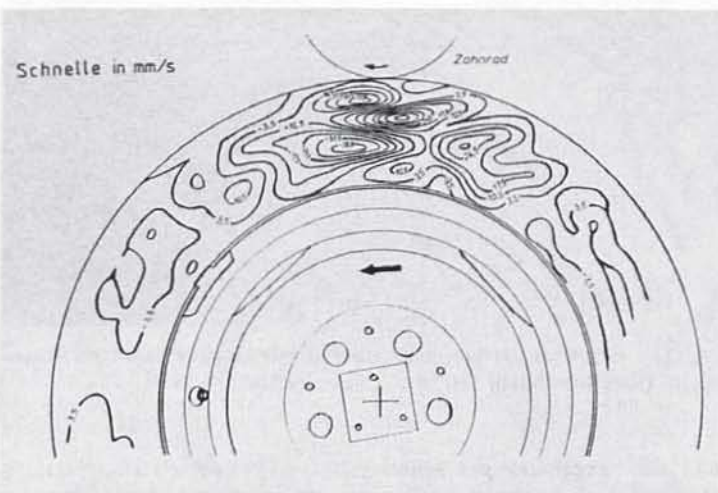


Bild 23 Quantitativ ausgewertetes Doppelpulshologramm aus Bild 22