

Neue Entwicklungen der berührungslosen optischen Meßverfahren

von Hans Tiziani

1. Einführung

Der berührungslosen optischen Meßtechnik haben sich neue Möglichkeiten eröffnet durch die Einführung des Lasers. Dadurch wurde die praktische Realisierung der Holographie erst möglich. Anwendung finden neue Verfahren in der berührungslosen Abstands-, Entfernungs-, Geschwindigkeitsmessung sowie Deformations- und Schwingungsmessung.

Zum besseren Verständnis werden vorerst einige Begriffe und Phänomene der Optik erläutert:

Werden zwei *kohärente* Lichtströme geeignet überlagert, so können sich ihre Wellen stellenweise addieren, stellenweise subtrahieren: sie *interferieren* miteinander. Dem Beobachter bieten sich an den Orten der Addition Intensitätsmaxima, an den Orten der Subtraktion Intensitätsminima dar: er sieht ein System heller und dunkler Streifen, die *Interferenzen* oder das *Interferenzmuster*. Bei der *Interferometrie* werden Interferenzmuster zur Messung physikalischer Größen eingesetzt.

Voraussetzung für die Interferometrie ist eine über ausreichende Zeit feste Phasenbeziehung der sich überlagernden Wellenzüge: die Lichtströme müssen miteinander *kohärent* sein. Anderenfalls würden die Interferenzstreifen fortlaufend ihre Lage ändern, meist so schnell, daß sie gar nicht zu beobachten wären. Der Gas-Laser als Lichtquelle ist für die Interferometrie besonders geeignet, da er sehr lange, zusammenhängende Wellenzüge liefert.

Bei der *Holographie* (im Auflicht) beleuchtet man das aufzunehmende Objekt mit einem Laser und läßt die vom Objekt reflektierten Wellen z. B. auf einer Photoplatte mit einer wohl definierten kohärenten Referenzwelle interferieren. Die entwickelte Platte – das Hologramm – zeigt ein sehr feines Interferenzmuster, das nicht nur Informationen über die Amplituden der Objektwellen enthält (wie bei der Photographie), sondern auch über die gegenseitige Phasenlage der vom Objekt reflektierten Wellen. Wird die entwickelte Platte mit der Referenzwelle durchleuchtet, so werden durch Beugung die ursprünglichen Wellen wieder erzeugt. Diese enthalten die Amplituden und Phasen der ursprünglichen Objektwellen: das Objekt wird räumlich rekonstruiert.

Aus den rekonstruierten Wellen kann ein Empfänger, z. B. das Auge, die gleichen Informationen gewinnen wie aus den ursprünglich vom Objekt reflektierten Wellen, z. B. räumliche Objekte aus verschie-

denen Perspektiven betrachten, auf verschiedenen Ebenen einer räumlichen Szene scharfstellen. Die holographisch rekonstruierten Wellen können aber auch ihrerseits zur Interferenz gebracht werden mit dem vom Objekt reflektierten Wellen oder mit den durch eine zweite holographische Aufnahme des gleichen Objekts rekonstruierten Wellen. Änderte das Objekt nach der ersten holographischen Aufnahme seine Lage oder Gestalt geringfügig, so ergibt sich ein Interferenzmuster, aus dem quantitative Informationen über die Änderungen entnommen werden können: es wird *holographische Interferometrie* getrieben.

Wenn das im hohen Maße kohärente Laser-Licht auf eine *optisch rauhe* Oberfläche (mit Unebenheiten in der Größe der Lichtwellenlänge oder größer) fällt, dann wird es diffus gestreut. Die vielen gestreuten Wellen mit zufällig verteilten Amplituden und Phasen interferieren in einem großen Bereich miteinander. Ihr Interferenzmuster ist ein unregelmäßiges, körniges Hell-Dunkel-Muster: die *Granulation* oder das *Specklemuster*. Dies Specklemuster ändert sich, wenn sich das Auge des Beobachters gegenüber der streuenden Fläche bewegt, weil die Pupille des Auges dann eine andere Auswahl aus den gestreuten Wellen aufnimmt.

Das Grundprinzip der *Holographie* wurde 1948 von Denis Gabor, dem Nobelpreisträger, veröffentlicht, doch erst nach der Einführung des Lasers (1960) konnte die Holographie einfach demonstriert und sehr populär werden. Sie hat inzwischen Anwendungen gefunden; eine der wichtigsten ist in der berührungslosen optischen Meßtechnik.

Die holographische *Interferometrie* ist ein optisches Meßverfahren, mit dem berührungslos Verformungen im Mikrometerbereich erfaßt werden können. Das Verfahren erlaubt die Vermessung der gesamten Oberfläche bzw. des Volumens bei transparenten Objekten. Anwendungen sind beispielsweise:

- Zerstörungsfreie Prüfung des Verformungsverhaltens von Objekten unter Belastung sowie Erkennung und Lokalisierung von Fehlern;
- Analyse des Schwingungsverhaltens als Hilfsmittel zur konstruktiven Optimierung von Bauteilen;
- Einsatz von synthetischen Hologrammen zum Formvergleich.

Speckleerscheinungen, ein Phänomen der *kohärenten* Optik, bei dem optisch rauhe

Oberflächen statistisch verteilte *Interferenzmuster* erzeugen, können ebenfalls für Bewegungs-, Verformungs- und Schwingungsmessungen, aber auch für Rauheitsmessungen, herangezogen werden, um die holographischen Methoden zu ergänzen.

Das bis heute verbreitete Speichermaterial ist die photographische Schicht, basierend auf der Lichtempfindlichkeit der Silberhalogenidsalze; andere Speichermaterialien werden schon eingesetzt bzw. untersucht. Die zur Zeit aussichtsreichsten Kandidaten sind photothermoplastische Materialien und Photopolymere (Photolacke), magnetische Bildspeicher sowie elektrooptische Kristalle. Der photo-refraktive Effekt, auf dem die Wirkungsweise der benutzten Kristalle beruht, ist ebenso wie der Pockels-, Kerr- und Stark-Effekt ein elektrooptischer Effekt. Durch eine Intensitätsverteilung wird eine entsprechende Ladungsverteilung aufgebaut, die zu einer geringen Brechzahlvariation führt. Durch den elektrooptischen Effekt entsteht demnach eine der Lichtintensität entsprechende Brechzahlverteilung im Kristallvolumen. Elektrooptische Kristalle sind Phasenvolumenspeicher.

Im Bericht wird eines der Arbeitsgebiete am Institut für Technische Optik beschrieben mit entsprechenden Anwendungen.

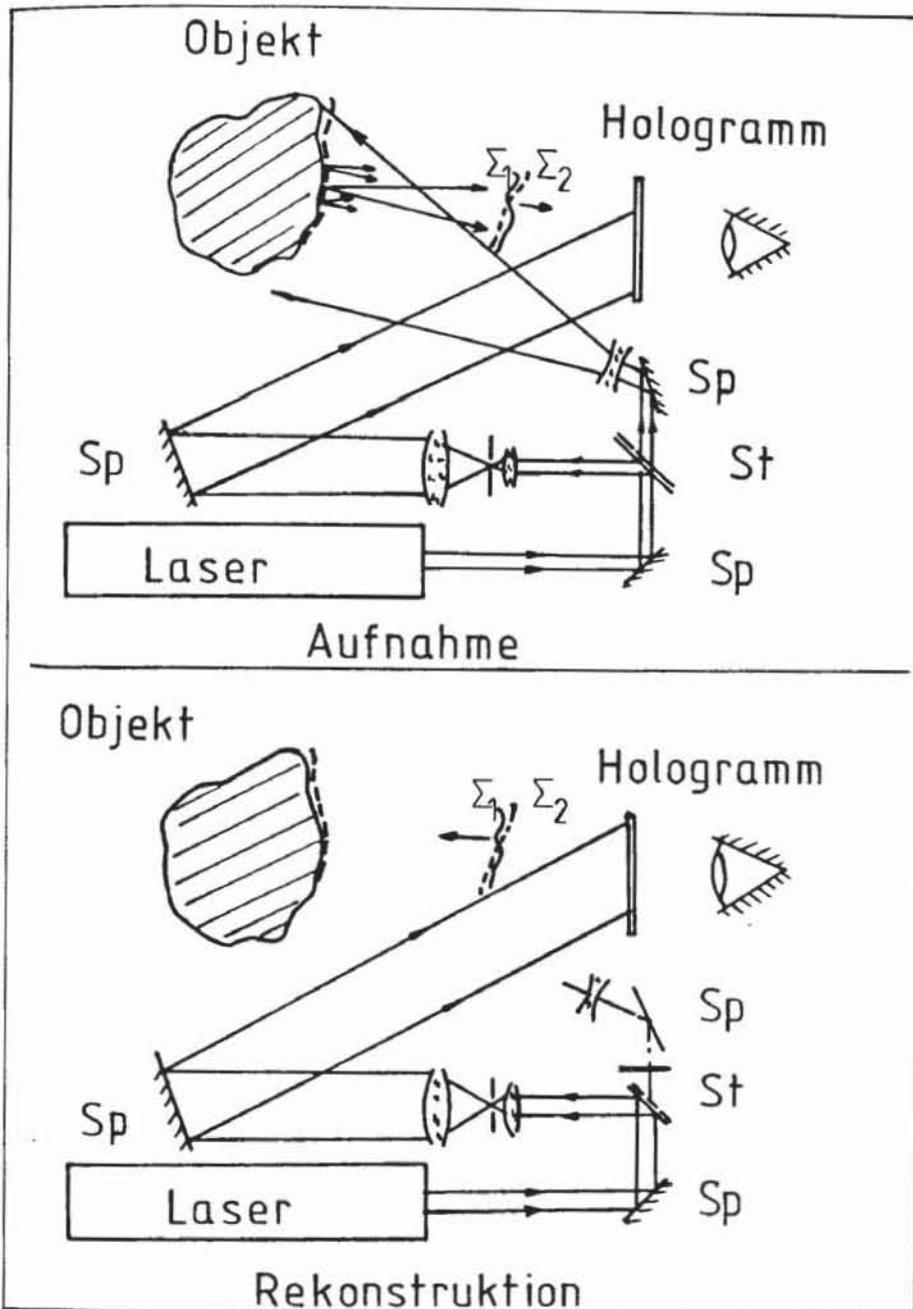
2. Holographische Interferometrie in der Meßtechnik

In der Holographie wird das vom Objekt kommende kohärente Licht mit einer kohärenten Referenzwelle (Laser) überlagert (Abb. 1) und auf einem Speicher (z. B. hochauflösende Photoplatte) gespeichert. Bei der nachfolgenden Rekonstruktion wird die gespeicherte Wellenfront des Objektes rekonstruiert. Es entsteht die räumliche Rekonstruktion des Objektes.

Bei der holographischen Interferometrie wird das zu untersuchende Objekt ebenfalls mit kohärentem Licht beleuchtet und ein Hologramm erstellt. Interferenzen entstehen von geringfügigen Abweichungen des Objektes zum ursprünglich registrierten Zustand; die Wellenfront Σ_1 wird zu Σ_2 in Abb. 1.

Die wichtigsten holographischen Interferometrie-Verfahren sind: Doppelbelichtungsverfahren mit einer bzw. mehreren Referenzwellen, Echtzeitmethoden. Für die Analyse von harmonischen Schwingungen werden stroboskopische oder Zeitmittelungsholographie angewendet

Abb. 1: Prinzip der Holographie



terferometrie noch attraktiver und vielseitiger einsetzbar für den Ingenieur zu machen.

3. Schwingungs- und Geräuschanalyse rotierender Objekte

Die Anwendung der holographischen Interferometrie für rotierende Objekte zur Deformations- und Schwingungsmessung wird etwas schwieriger, da vorerst die Ganzkörperbewegung, die Rotation, kompensiert werden muß, um kleine überlagerte Verformungen und Schwingungen zu untersuchen. Dazu eignet sich besonders ein Bild-Derotator, wie er mit einem mit halber Winkelgeschwindigkeit mit dem Objekt synchron rotierenden Prisma erreicht werden kann. Am Beispiel eines durchgeführten Forschungsvorhabens zur Geräuschanalyse rotierender Autoreifen soll dies veranschaulicht werden. Der holographische Aufbau ist schematisch in Abb. 2 zu sehen. Die Objektwelle des mit kurzen Lichtpulsen (40 ns) beleuchteten rotierenden Reifens verläuft über den Bildderotator, bevor sie auf dem Hologramm mit der kohärenten Referenzwelle überlagert wird. Der Bildderotator kompensiert die Rotation des Reifens durch das synchrone Drehen des Prismas mit halber Winkelgeschwindigkeit. Mit Hilfe zweier kurzzeitig nacheinander erfolgenden Lichtblitze (Pulsabstand einige μ s) eines Doppelpuls-Rubin-Lasers mit Pulsbreite von 40 ns können überlagerte Schwingungen registriert werden. Das gleichzeitig eingesetzte Laser-Doppler-Vibrometer wird später diskutiert werden. Durch den Straßenkontakt des rotierenden Reifens entstehen kleine mechanische Schwingungen, die zur Geräuscentwicklung wesentlich beitragen. Abb. 3 zeigt Interferenzstreifensysteme, die an der Stelle des Straßenkontakts am engsten sind und dann im Ein- und Auslauf weiterlaufen.

4. Echtzeitanalyse mit dem Laser-Doppler-Vibrometer

Zur berührungslosen Strömungsgeschwindigkeitsmessung dient vielfach ein auf der Dopplerrfrequenzverschiebung basierendes Verfahren. Dabei ist die Strömungsrichtung meistens senkrecht zur Strahlrichtung. Beim Vibrometerprinzip wird die Schwingung parallel zur Lichtrichtung vermessen. Das angewandte Prinzip ist in Abb. 4 schematisch dargestellt anhand des Twyman-Green-Interferometers. Die ein-

[1]. Beim Doppelbelichtungsverfahren werden zwei Zustände eines Objektes, meist der unbelastete und der belastete Zustand, in einem Hologramm überlagert. Bei der Rekonstruktion der Hologramme gewinnt man ein Verformungsbild anhand der Interferenzstreifen, die Linien gleicher Verformung mit Streifenabständen (bei Reflexion) der halben Wellenlänge des verwendeten Lichtes darstellen. Zusätzliche Referenzwellen können bei der Streifenauswertung nützlich sein.

Beim Echtzeitverfahren wird im Hologramm ein Zustand des Objektes gespeichert. Bei der Rekonstruktion wird das Objekt ebenfalls gleichzeitig beleuchtet. Geringfügige Objektveränderungen ändern die Wellenfront und erzeugen Interferenzstreifen als Maß der Objektverformung. Ursachen der Änderungen sind beispielsweise Belastungsänderungen, Schrumpfen, Druckänderungen oder thermische Einflüsse. Allerdings ist das sehr genaue Einstellen des entwickelten Ho-

logramms (auf Lichtwellenlänge genau) sehr schwierig. Eine In-situ-Entwicklung ist deshalb vorteilhaft.

Um mechanische harmonische Schwingungen zu analysieren, können Belichtungszeitpunkte von der Objektbewegung getriggert werden. So kann bei zwei zu vergleichenden Schwingungsphasen während einer oder mehrerer definierter, periodisch wiederkehrender Phasenlagen vielfach belichtet werden. Beim Zeitmittelverfahren wird eine einzige Belichtung der Hologrammplatte vorgenommen, wobei die Belichtungszeit wesentlich länger als eine Schwingungsperiode ist. Bei der Rekonstruktion wird eine Gesamtheit von Wellenfeldern produziert. Allerdings liefern die Zustände mit der längsten Wellenzeit den Hauptbeitrag zur Interferenz. Die holographische Interferometrie wird in der Industrie für verschiedene Verformungs- und Schwingungsprobleme eingesetzt. Verschiedene Arbeiten zur Vereinfachung der Streifenauswertung werden durchgeführt, um die holographische In-

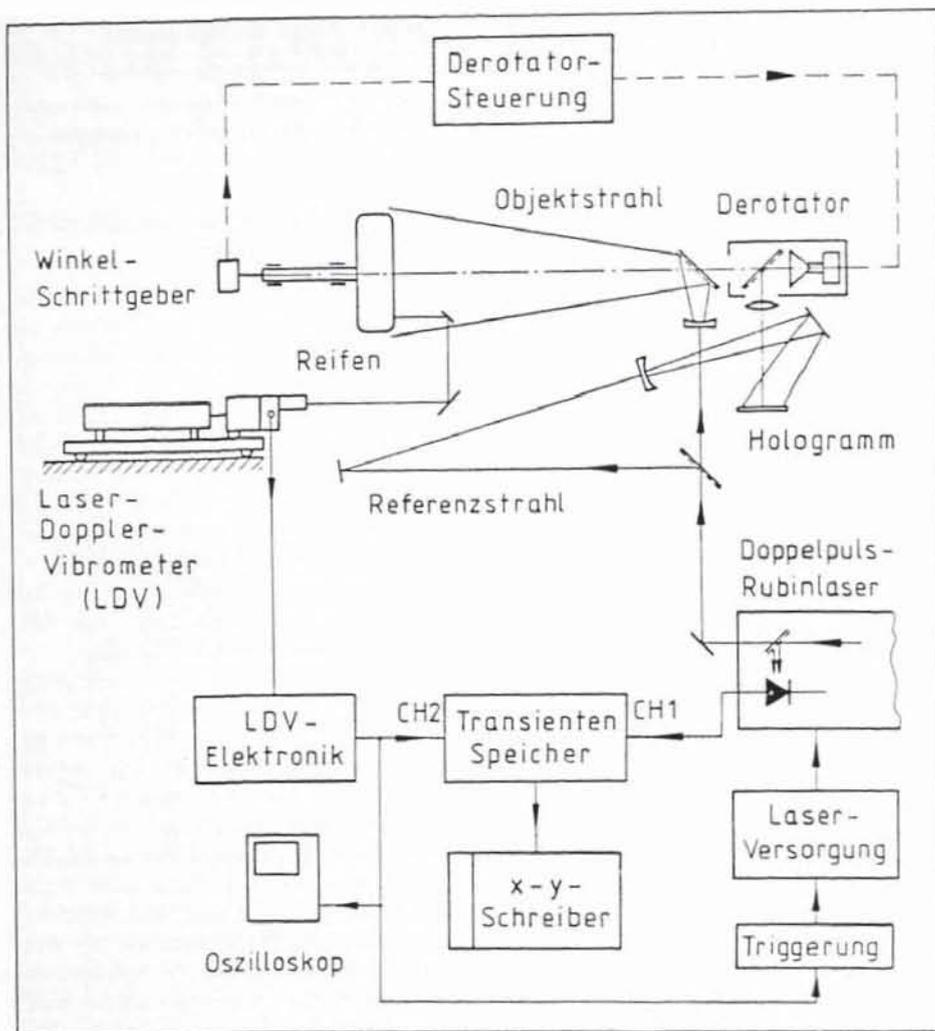


Abb. 2: Aufbau für Doppelpuls-Holographie mit Bilderrotator zur Geräuschanalyse rotierender Pkw-Reifen



Abb. 3: Interferenzstreifen der Doppelpuls-Holographie nach Abb. 2 mit $n = 320 \text{ min}^{-1}$, Pulsseparation $50 \mu\text{s}$ und Pulsbreite 40 ns

fallende Welle der Schwingungsfrequenz $\omega_1(t)$ wird durch den Strahlteiler ST in zwei Hälften aufgeteilt. Der Spiegel M_1 reflektiert die Referenzwelle entlang dem optischen Weg (1). Vom Objekt wird entlang dem Weg (2) eine Welle mit verschobener Frequenz reflektiert. Sowohl zur Bestimmung des Vorzeichens der Frequenzverschiebung als auch zur einfachen elektronischen Auswertung wird zusätzlich noch die Frequenz ω_1 mit einer Braggzelle (BZ) um $\Delta\omega$ verschoben.

Die resultierende Frequenz des Meß-Signals am Ausgang des Interferometers wird maßgebend von der Frequenzverschiebung $\Delta\omega$ durch den frequenzverschiebenden Kristall (Braggzelle) sowie von der momentanen Geschwindigkeit $v(t)$ des Objekts bestimmt. In Abb. 4 wird das schwingende Objekt mit einem Laserstrahl beleuchtet. Das vom Objekt reflektierte, frequenzverschobene Licht wird im Interferometer vereinigt mit der kohärenten Referenzwelle vom Spiegel M_1 . Die Intensität am Ausgang des Interferometers wird photoelektrisch registriert. Für $\omega_1 = \omega_2$ ergibt sich das klassische Interferenzmuster. Für $\omega_1 \neq \omega_2$ ist die gesamte Frequenzänderung infolge der momentanen Objektgeschwindigkeit $v(t)$ als Frequenzmodulation im Interferenzglied am Interferenzgang enthalten. Trägerfrequenz ist die Frequenzverschiebung $\Delta\omega$

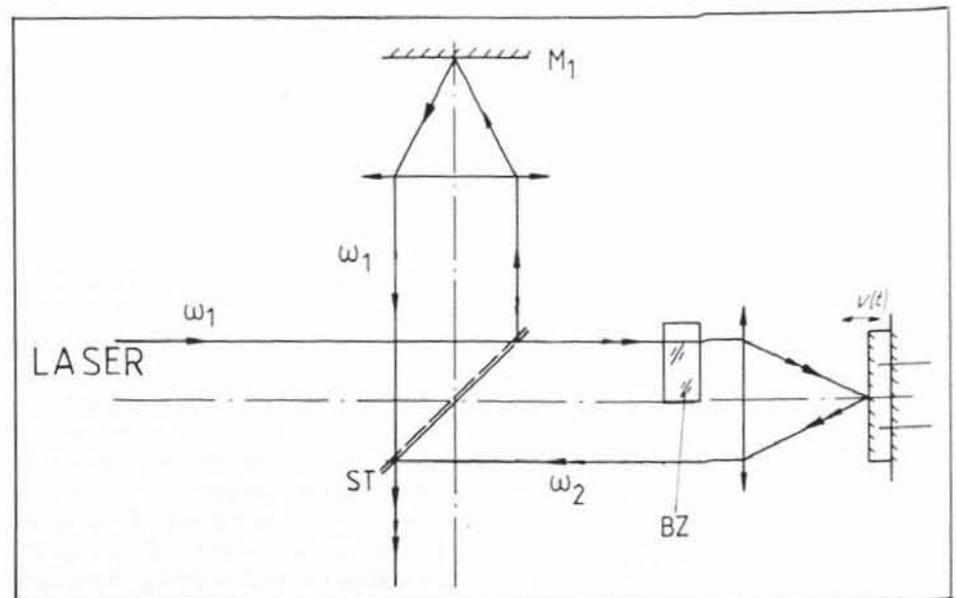


Abb. 4: Prinzip der Heterodynetchnik

der Braggzelle (BZ). Nach der elektronischen Demodulation und Frequenzspannungswandlung ergibt sich eine zur momentanen Objektgeschwindigkeit $v(t)$ proportionale Ausgangsspannung. Dieses Zeitsignal der momentanen Objektgeschwindigkeit wird zur Frequenzanalyse einem schnellen Fouriertransformationsanalysator zugeführt. Daraus ergibt sich ein Echtzeitanalysenverfahren, das Schwingungsschnelle, Schwingungsampli-

tude und -frequenz in dem angetasteten Objektpunkt liefert.

Ein typisches Ergebnis im Zusammenhang mit der Schwingungs- bzw. Geräuschanalyse von rotierenden Autoreifen ist in Abb. 5 für einen Punkt des rotierenden Autoreifens ersichtlich. Die Ergebnisse einer Messung mit dem Vibrometer (ausgezogen) und einer unabhängigen Ge-

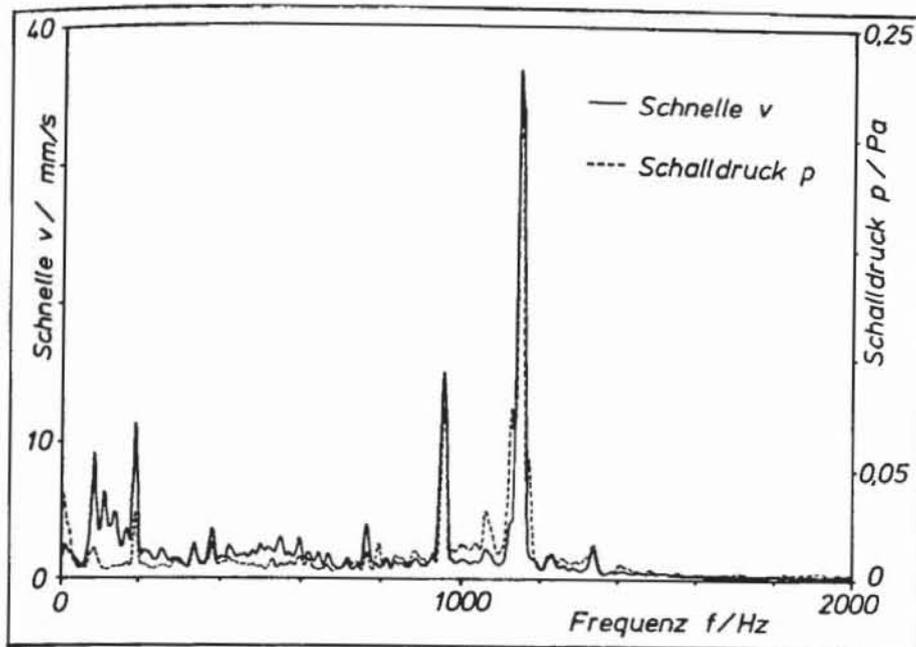


Abb. 5: Vergleich der Messungen der mechanischen Schwingungen und der akustischen Meßwerte, registriert mit einem Mikrofon (punktiert eingetragen)

räuschmessung mit einem Mikrofon (punktiert) sind vorgeführt. Die Übereinstimmung zwischen der optischen berührungslosen Schwingungsmessung und der Geräuschmessung ist gut. Daraus folgt, daß in diesem Fall die mechanische Schwingung maßgebend das Geräusch verursacht. Die räumliche Verteilung der Schwingung eines rotierenden Autoreifens ist in Abb. 3 ersichtlich. Feine Interferenzstreifen bedeuten große Schwingungsamplituden, wie sie beim Kontakt mit der simulierten Straße auftreten. Die Zielsetzung der Arbeit ist die Analyse und anschließende Reduzierung von Autoreifengeräuschen.

Mit dem eingesetzten Vibrometer wird nicht nur die Frequenz der mechanischen Schwingung ermittelt, sondern auch die momentane Geschwindigkeit, was für die Streifenbewertung der holographischen Aufnahmen hilfreich wurde. In Abb. 2 ist auch die gleichzeitig ausgeführte punktweise Vibrometermessung angedeutet. Die Verfahren werden jetzt unter normalen Bedingungen im Prüfstand des Forschungsinstitutes für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS) eingesetzt. Sie resultieren aus einem gemeinsamen Forschungsprojekt. Dieses Beispiel zeigt, daß neue optische Verfahren für sehr schwierige Aufgaben entwickelt und eingesetzt werden, wo die klassischen Meßverfahren nicht geeignet sind [2].

5. Einsatz photorefraktiver Kristalle in der berührungslosen Meßtechnik

Elektrooptische und akustooptische Ablenker und Modulatoren sind schon gut eingeführt. Die in den letzten Jahren entwickelten akustooptischen Ablenk- und Modulationskomponenten werden schon vielseitig eingesetzt, z. B. zum schnellen Abtasten und Identifizieren von Konsumgütern. In den nachfolgenden Anwendungen werden photorefraktive Kristalle zur Informationsspeicherung eingesetzt.

Vor mehr als 16 Jahren wurden bei Lithium-Niobaten, LiNbO_3 -Kristallen, unter Laserbestrahlung Brechzahlveränderungen festgestellt. Auch andere Kristalle zeigten ähnliche Effekte, die aber meistens kleiner waren als bei LiNbO_3 . Zehn Jahre später wurde der gleiche Effekt auch bei Wismuthgermaniumoxid, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO), und Wismuthsiliziumoxid, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), gefunden, allerdings mit 100fach höherer Photoempfindlichkeit. Bei BSO-Kristallen wurde schon früher der Pockels-Effekt ausgenutzt. LiNbO_3 -Kristalle als optische Speicher sind zur Zeit die bekanntesten. Sie wurden als Speicher für Reflexionshologramme mit gutem Wirkungsgrad benutzt sowie zur optischen Informationsspeicherung [3].

An unserem Institut haben wir speziell den BSO-Kristall untersucht und in der Meßtechnik eingesetzt. Es ist ein kubischer Kristall, welcher sowohl den linearen elektrooptischen (Pockels-)Effekt als auch Photoleitungseigenschaften zeigt. Die maximale Empfindlichkeit liegt im grün-blauen Spektralbereich.

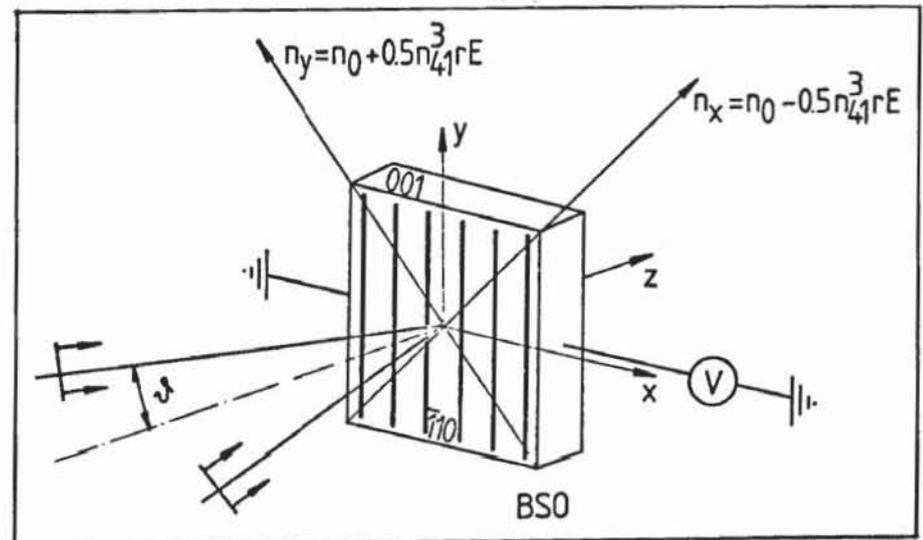
In Abb. 6 ist eine Anordnung zur opti-

schon Speicherung der Information im BSO-Kristall schematisch angegeben. In dieser Anordnung wird der transverse elektrooptische Effekt ausgenutzt. Zur Empfindlichkeitssteigerung wird ein transversales elektrisches Feld E in der 110-Kristallrichtung angelegt (6 KV/cm). Der Kristall ist ein Volumenspeicher und ist am empfindlichsten im blau-grünen Spektralbereich. Damit werden Empfindlichkeiten erreicht, die vergleichbar sind mit denen hochauflösender photographischer Emulsionen, wie sie in der Holographie benutzt werden (z. B. Kodak 649 F). Empfindlichkeiten für die Informationsspeicherung bei einprozentigem Beugungswirkungsgrad sind nachfolgend aufgeführt:

Material	Speicherenergie
$\text{LiNbO}_2\text{-Fe}$	30 mJ/cm^2
BSO	0,3 mJ/cm^2
BGO	1,25 mJ/cm^2
Thermoplast. Material	0,02 mJ/cm^2

In Abb. 6 entsteht durch Interferenz der linear polarisierten Planwellen ein räumliches Interferenzmuster. Dadurch werden Elektronen an den hellen Stellen freigesetzt und wandern zu dunkleren, wo sie wieder gebunden werden. Dies führt zu einer entsprechenden Ladungsverteilung, welche eine Brechzahländerung infolge des elektrooptischen Effekts bewirkt. Diese Brechzahländerung führt zur Informationsspeicherung und wird nachfolgend für Echtzeitverfahren in der berührungslosen optischen Meßtechnik benutzt. Die Information kann mindestens 24 Stunden gespeichert werden. Der Kristall zeigt praktisch keine Ermüdungserscheinungen. Bei Beleuchtung mit Licht im blau-

Abb. 6: Informationsspeicherung in einem BSO-Kristall mit transversalem elektrischem Feld



grünen 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 %.

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 $500 \mu\text{Jcm}^{-2}$.

6. Echtzeit holographie in der Meßtechnik mit BSO-Kristallen

Die holographische Interferometrie hat sich für bestimmte Anwendungen wie berührungslose Verformungs-, Verschiebungs- oder Schwingungsmessung als nützlich erwiesen. Als Speichermaterialien für die Hologrammaufzeichnung werden vielfach feinkörnige photographische Schichten verwendet; bereits werden auch schon thermoplastische Materialien eingesetzt. Für die Echtzeitwiedergabe eignen sich aber 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 Echtzeit holographie mit Kristallen ist in Abb. 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_{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 beobachtet werden kann [4].

Mit Hilfe eines Vidikons kann die Rekonstruktion auch auf einem Fernsehmonitor sichtbar gemacht werden. Die Rekonstruktion mit der Aufnahmewelle ist allerdings destruktiv, d. h. die Raumladungverteilung gleicht sich aus.

Durch Ausnutzung der Integrationseigenschaft des Speichers können dem BSO zwei Aufnahmen des Objekts überlagert werden. Dabei wird die erste vor, die

Abb. 9: Schwingungsmessung einer harmonisch schwingenden Membrane, mit BSO-Kristall registriert

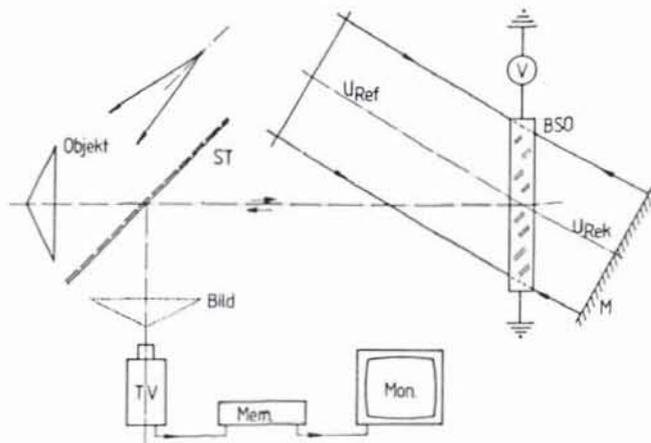


Abb. 7: Anordnung zur holographischen Echtzeitrekonstruktion und Interferometrie mit einem BSO-Kristall als Speicher



Abb. 8: Echtzeitverformungsmessung einer Platte nach dem Doppelbelichtungsverfahren mit dem BSO-Kristall als Speicher

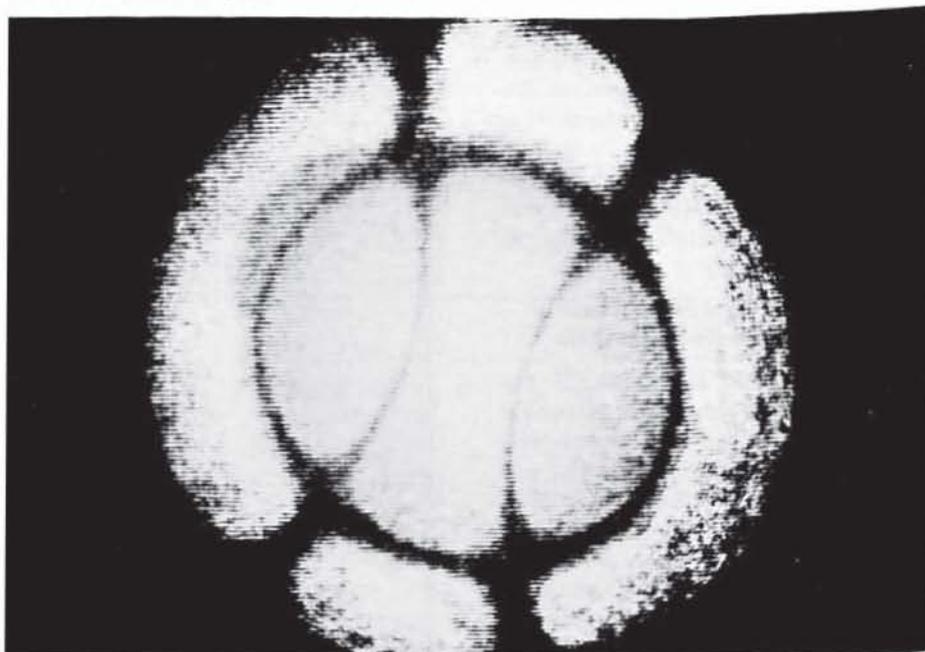


Abb. 10: Aufbau zur Echtzeit-Höhenschichtlinienaufnahme

zweite nach der Verformung oder Verschiebung des Objekts registriert, um beide wieder gleichzeitig zu rekonstruieren. Kleinste Unterschiede des Objekts zwischen den beiden Belichtungen können auf diese Art und Weise als Interferenzstreifen bei der gleichzeitigen Rekonstruktion beider Wellenfelder, dem rekonstruierten Objekt überlagert, beobachtet werden. Dabei entsprechen die einzelnen Streifen jeweils den optischen Wegänderungen einer Wellenlänge λ ($\lambda = 514 \text{ nm}$). Dieses wird am Beispiel der Verformung einer Platte zwischen den beiden Belichtungen in Abb. 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 vorerst gespeicherte Hologramm geringfügig abgebaut. Die Rekonstruktion erfolgt direkt nach der zweiten Belichtung. Dem rekonstruierten Bild sind Interferenzstreifen überlagert, die auf einem Bildspeicher registriert werden können zur automatischen Streifenbewertung. Typische Belichtungszeiten sind 0,5 sec für Beleuchtung mit Argon-Ionen-Laser, $\lambda = 514 \text{ nm}$.

Zur Analyse harmonischer, mechanischer Schwingungen eignet sich die Zeitmittelholographie. 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 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 Abb. 9 war ca. 700 ms, so daß praktisch von Echtzeitbeobachtung der Streifen geredet werden kann. Das Bild zeigt die Rekonstruktion der Zeitmittelaufnahme einer schwingenden Membrane der Schwingungsfrequenz von 500 Hz. Durch Änderungen der Frequenz ändert sich das örtliche Schwingungsmuster, das beobachtet werden kann, praktisch in Echtzeit.

7. Echtzeit-Höhenschichtlinienaufnahme

Verschiedene Methoden erlauben die Aufzeichnung von Höhenschichtlinien oder Konturlinien. Es sind dies die klassischen photogrammetrischen Methoden, die Moiré-Technik oder aber holographische Verfahren. Mit Moiré-Techniken

Abb. 12: Einfluß der Oberflächenrauheit auf die Speckelverteilung

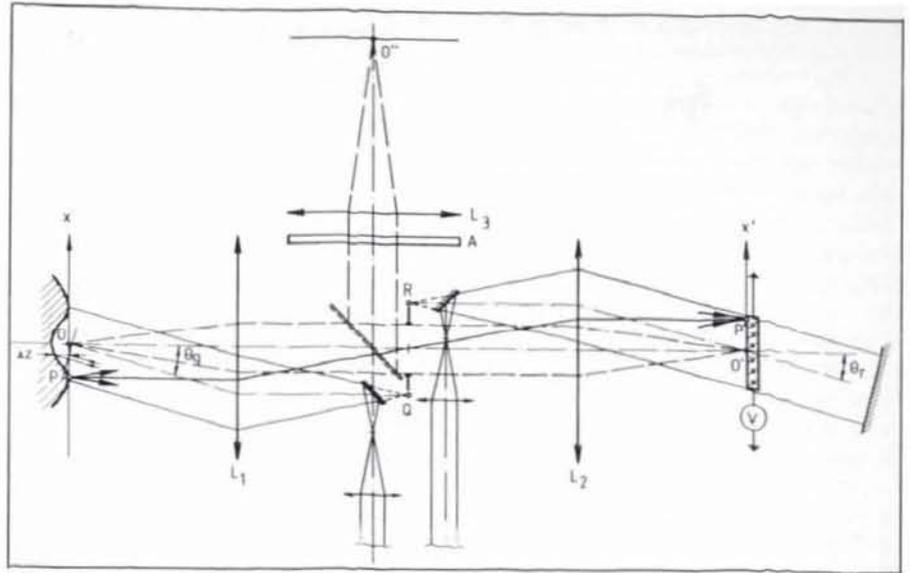


Abb. 11: Echtzeit-Höhenschichtlinienaufnahme einer Münze, Streifenabstand $13,9 \mu\text{m}$

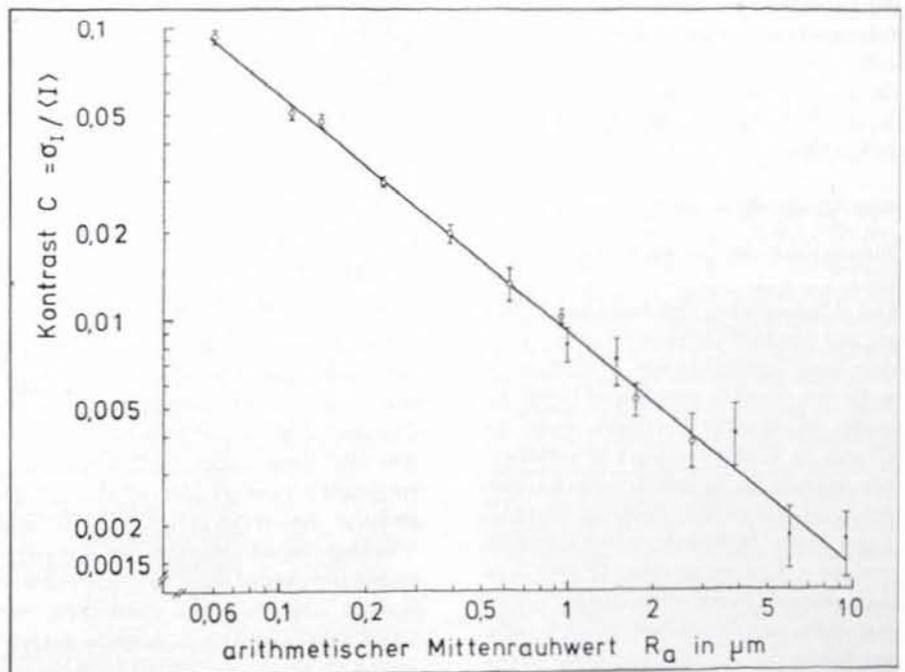


Abb. 13: Specklekontrast als Funktion der arithmetischen Mittenrauheit

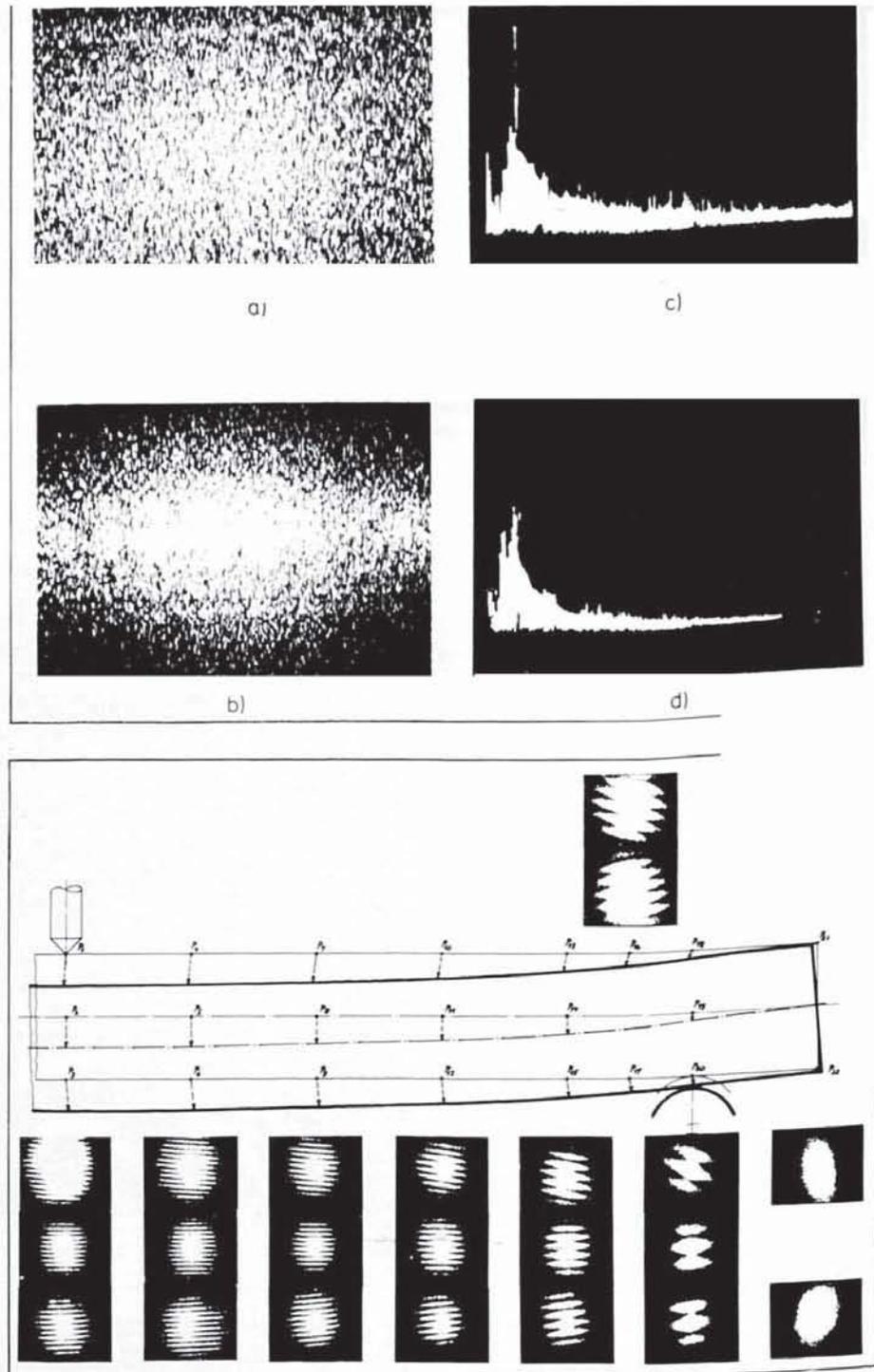
können kleinste Höhenschichtlinienabstände von einigen Zehntel mm erreicht werden; mit holographischen Methoden sind einige μm möglich. Holographische Methoden werden aber vermehrt attraktiv, wenn sie in Echtzeit ausgeführt werden können.

Zur Echtzeit-Höhenschichtlinienaufnahme eignen sich BSO-Kristalle als Speicher mit einem angelegten transversalen elektrischen Feld zur Empfindlichkeitssteigerung in der 110-kristallographischen Richtung. Verschiedene Anordnungen wurden an unserem Institut untersucht. Ein typischer experimenteller Aufbau ist als Prinzipsskizze in Abb. 10 ersichtlich. Für das Zweiwellenlängenverfahren wurde ein telezentrischer Strahlengang gewählt. Dabei wird das Objekt mit einer Planwelle, die unter dem Winkel Θ_q einfällt, beleuchtet und in den Kristall abgebildet. Die Referenzwelle fällt unter dem Winkel Θ_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 sie mit den Referenzwellen der Wellenlängen, z. B. λ_1 und λ_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

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(1 + \cos \Theta_q)(\lambda_1 - \lambda_2)}$$

wenn $\frac{f_1}{f_2} \sin \Theta_q = \sin \Theta_r$ und f_1, f_2 die Brennweiten der Linsen L_1 und L_2 sind [5].

Der Höhenschichtlinienabstand ist abhängig von den Wellenlängen λ_1 und λ_2 sowie dem Einfallswinkel Θ_q der Beleuchtungswelle des Objekts und Θ_r der Referenzwelle. Mit diesem Verfahren kann das Objekt in Echtzeit justiert und Höhenschichtlinien beobachtet werden. Ein ausgewähltes Wellenlängenpaar mit Krypton-Laser ergibt Höhenschichtlinienabstände von $\Delta z = 13,9 \mu\text{m}$ in Abb. 11. Die Auswahl der gewählten Wellenlängen erfolgt mit Hilfe von Farbfiltern bzw. Interferenzfiltern aus den gleichzeitig zur Verfü-



gung stehenden Spektrallinien des Krypton-Lasers. Andere Laser können ebenfalls eingesetzt werden.

8. Speckeltechnik zur Echtzeitverformungs- und Schwingungsmessung mit BSO

Speckling oder Granulation tritt immer dann auf, wenn kohärentes Licht, z. B. von einem Laser, eine optisch raue Oberfläche beleuchtet. Optisch rau ist eine Oberfläche, wenn die Unebenheiten vergleichbar oder größer sind als die Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Die Specklegröße ist abhängig von der Geometrie der Anordnung, der Kontrast der Speckle aber von der Rauigkeit der Oberfläche. Die Abb. 12 zeigt die vergrößerten Specklemuster unterschiedlich rau-

Abb. 14: Specklephänomen, eingesetzt zur Bestimmung der Durchbiegung eines Balkens

her Oberflächen und daneben die entsprechenden Frequenzanalysen der Oberflächenrauheit. Der Specklekontrast ist ein Maß zur Beschreibung der Rauheit technischer Oberflächen, wie dies in Abb. 13 ersichtlich ist. Sie zeigt den Kontrast aufgetragen als Funktion der Oberflächenrauheit [6]. Die Speckle, obwohl statistisch verteilt, folgen der Objektbewegung sehr genau, mindestens für kleine Bewegungen. Diese Eigenschaft wird bei der sogenannten Speckle-Photographie ausgenutzt. Bei der Doppelbelichtung vor und nach einer kleinen Verschiebung entstehen paarweise Speckle. Wie beim Youngschen Doppelspalt-Experiment

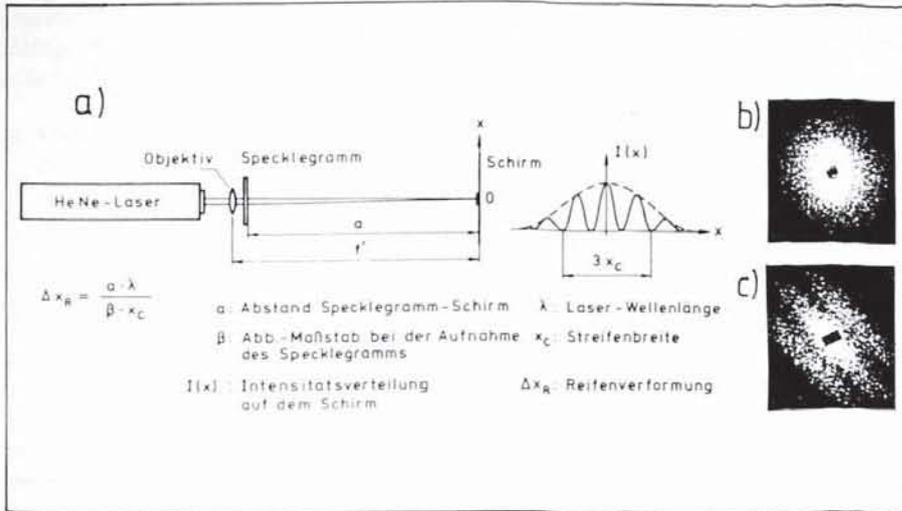


Abb. 15 a: Auswertung von Doppelbelichtungsspecklegrammen; Abb. 15 b: Beugungsbild ohne Schwingungen; Abb. 15 c: Beugungsbild mit Schwingungen.

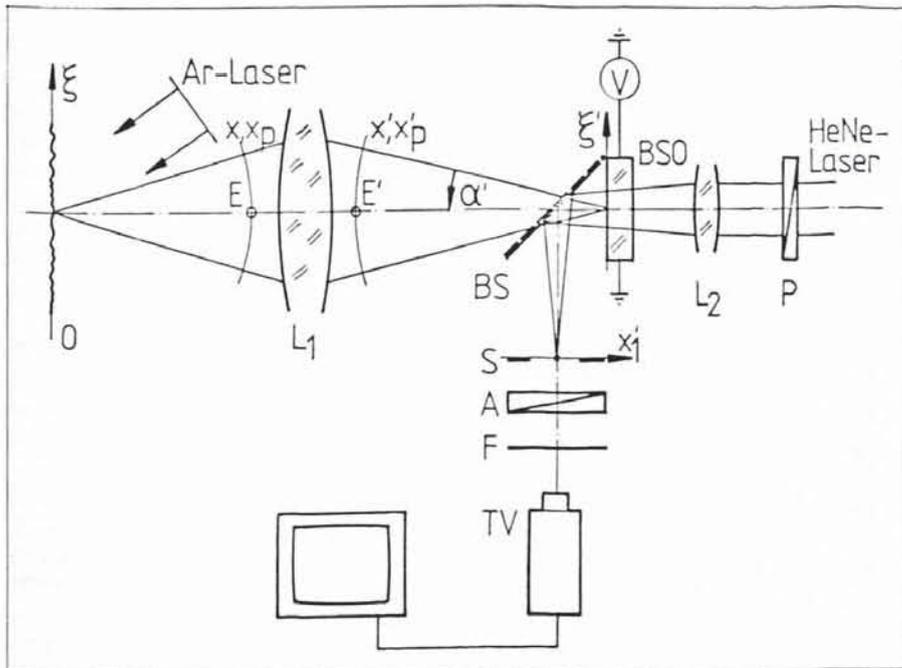


Abb. 16: Anordnung für Echtzeitspecklephotographie mit BSO-Kristall als Speicher

führen zwei identische, aber verschobene Speckle zu den Youngschen Interferenzstreifen in der Brennebene einer Linse, deren Periode umgekehrt proportional der Verschiebung bzw. Verformung im Objekt ist (Abb. 14a). 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 holographischen Interferometrie.

Die Speckle-Photographie ist für den Ingenieur interessant, dies um so mehr, weil sie die Holographie ergänzt in bezug auf Empfindlichkeit und Bereich, vielseitig eingesetzt werden kann und weniger anfällig ist für Umweltstörungen. Die Auswertung der Youngschen Streifen ist vielfach einfacher. In Abb. 14 ist ein Ergebnis der Verbiegung eines Balkens vorgestellt anhand der Streifenabstände der Youngschen Interferenzstreifen. Der Streifenabstand ist umgekehrt proportional der Verschiebung oder Verformung. Abb. 15 zeigt die Auswertung der Specklegramme, die durch Bildverarbeitung automatisiert werden kann. Mit Hilfe der BSO-Kristalle kann die Speckle-Photographie auch in Echtzeit eingesetzt werden (Abb. 16). Dazu wird das doppelbelichtete Specklemuster im BSO-Kristall gespeichert. Da die Absorption des verwendeten Kristalls 2 cm^{-1} für $\lambda_1 = 514 \text{ nm}$ und $0,28 \text{ cm}^{-1}$ für $\lambda_2 = 633 \text{ nm}$ ist, wird die Speckleregistrierung vorteilhaft bei λ_1 und das Auslesen bei λ_2 vorgenommen, so daß das gespeicherte Specklemuster beim Echtzeitvergleich oder bei der Doppelbelichtung erhalten bleibt. Auf einen elektronischen Speicher kann verzichtet werden. Die punktweise Aufzeichnung der Streifen kann mit einem 1-mW-He-Ne-Laser erfolgen. Die Streifenauswertung kann mit fernsehtechnischen Mitteln oder direkt durch optische Fourier-Transformation erfolgen.

Der Rückschluß auf Verschiebungen oder Verformungen ist bei der Speckle-Photographie einfacher als bei den holographischen 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 defokussierten Anordnungen [7]. Etwas aufwendiger wird die Analyse dreidimensionaler Verformungen. Beispiele der Echtzeitaufzeichnung von Youngschen Streifen sind in Abb. 15 für Verschiebungs-, Verkippungs- und Schwingungsmessung zu sehen. Zusätzlich ver-

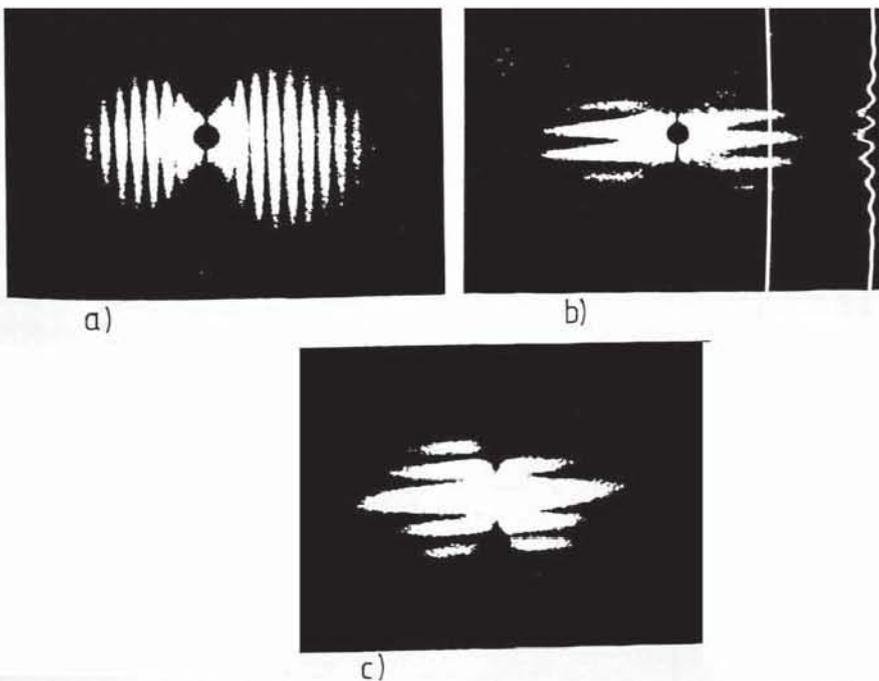


Abb. 17: Ergebnisse der Echtzeitspeckleanwendungen mit BSO-Kristall: a) Verschiebungsmessung; b) Verkippungsmessung; c) Schwingungsmessung im Zeitmittel.

Übereinstimmung vorliegend. Eine zukünftige Anwendung ist damit schon angedeutet.

10. Einsatz synthetischer Hologramme in der Meßtechnik

Hologramme können auch für physikalisch nicht vorhandene einfache Objekte als auch für rechnerisch bestimmte Wellenfronten aufgezeichnet werden. Am Beispiel der Prüfung asphärischer Flächen soll dies kurz erläutert werden. Das Computer-Hologramm wird bei uns punktweise rechnergesteuert aufgezeichnet, wobei bis zu 20 000 x 20 000 Punkte auf ein Format von 23 x 23 cm² gezeichnet werden können. Nach anschließender 6facher Verkleinerung ist das Hologramm einsatzbereit. In einer Zweistrahlordnung wird ein Hologramm so gerechnet, daß durch Beugung die ideale Wellenfront entsteht. Da der Prüfling aber Abweichungen zu dieser Wellenfront aufweisen kann, entstehen Interferenzstreifen zwischen der wirklichen Wellenfront und der rechnerisch vorgegebenen. Die Abweichungen sind ein direktes Maß für die Geometriefehler in Wellenlängen des verwendeten Lichtes. Abb. 20 zeigt den Meßaufbau schematisch, wobei PR der Prüfling ist und HO das synthetische Hologramm. HL und PO sind Hilfslinsen. Zur Phasenverschiebung kann z. B. die Verkippung einer Planparallelplatte im Referenzstrahl dienen, was die automatische Streifenauswertung vereinfacht und speziell bei geschlossenen Streifen wichtig ist. In Bruchteilen von Sekunden bis einigen Sekunden, abhängig von der Genauigkeit und ob flächenhaft ausgewertet werden muß oder nur in einem Azimut, werden in unseren Anordnungen die Streifen automatisch ausgewertet. Ein typisches Beispiel ist in Abb. 21 vorgestellt. Die automatische Streifenauswertung liefert die Abweichung von der Soll-Geometrie nach Abb. 22 in Wellenlängen. Die Holografie ermöglicht die genaue absolute Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen.

11. Ausblick

Echtzeit-, berührungslose, optische Meßverfahren werden vermehrt eingesetzt werden. Als Informationsspeicher für nahezu Echtzeitverarbeitung eignen sich z. B. elektrooptische Kristalle oder photoelektrische Verfahren. Je nach Anwendung ist auch das zeitliche oder räumliche Verhalten einer Bewegung oder Schwingung wichtig. Die Entwicklung der Echtzeitverfahren ist aber noch keineswegs abgeschlossen. Das Verfahren, das für eine

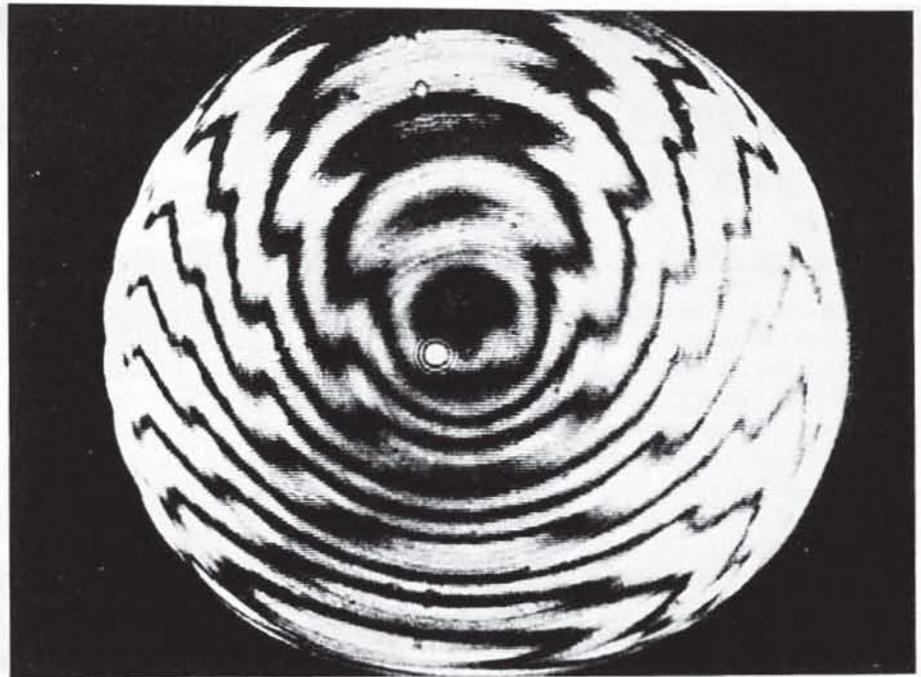


Abb. 21: Vermessen einer asphärischen Germanium-Oberfläche: Interferenzbild

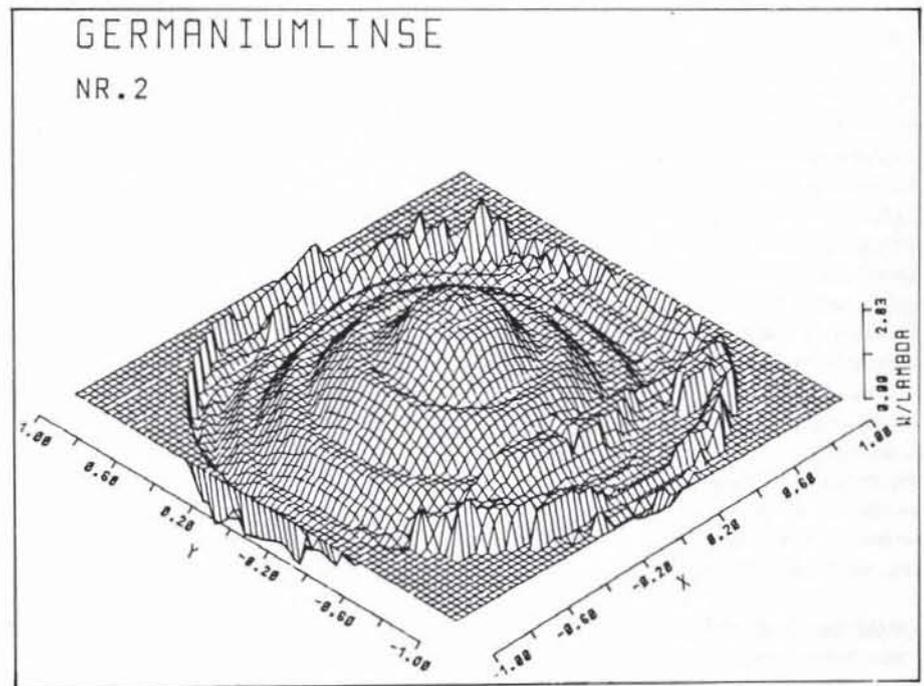


Abb. 22: Streifenauswertung des Interferenzbildes in Abb. 21

bestimmte Aufgabe herangezogen werden soll, ist von Fall zu Fall zu bestimmen. Universalmethoden gibt es noch nicht.

Literaturhinweise

- [1] Erf, K.: Holographic nondestructive testing, Academic Press, London 1974.
- [2] Eberspächer, Liedl, Tiziani, Litschel, Pfister, Zeller: Vergleich von Reifen-Luftschallmessungen und Schwingungsmessungen mit Hilfe von laseroptischen Verfahren, in: Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Straßenverkehr, Forschungsbilanz 1981 (9. Statusseminar), Verlag TÜV Rheinland GmbH.

- [3] Glass, A. M.: The photorefractive effect. Optical Engineering, Vol. 17, S. 470-479 (1978).
- [4] Tiziani, H. J.: Real time metrology with BSO crystals, Optica Acta, Vol. 29, S. 463-470 (1982).
- [5] Küchel, M.: Zwei-Wellenlängen-Konturlinienholographie in der Meßtechnik, Dissertation Universität Stuttgart 1983, Bd. 2 der Berichte aus dem Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart.
- [6] Leonhardt, K., Tiziani, H. J.: Removing ambiguities in surface roughness measurements, Optica Acta, Vol. 29, S. 493-499 (1982).
- [7] Tiziani, H. J.: Vibration analysis by speckle techniques in real time, Applied Optics, Vol. 20, S. 1467-1470 (1981).