

Zur Kombination von holographischer und Speckle-Interferometrie in der experimentellen Festkörpermechanik

J. Kießling

1. Einführung

Den kohärent-optischen Meßverfahren kommt innerhalb der experimentellen Verfahren in der Festkörpermechanik eine steigende Bedeutung zu. Mit Beginn der 60er Jahre setzte die Entwicklung holographischer Meßver-

fahren ein. Die Basis dafür war die Arbeit von Leith und Upatnieks [1] über holographische Interferometrie (HI), dasjenige Gebiet der Holographie, das die größte technische Anwendung gefunden hat. Die HI mißt absolute Verschiebungen.

Jede holographische Abbildung oder Aufnahme besitzt infolge des kohärenten Lichts eine Granulations- oder

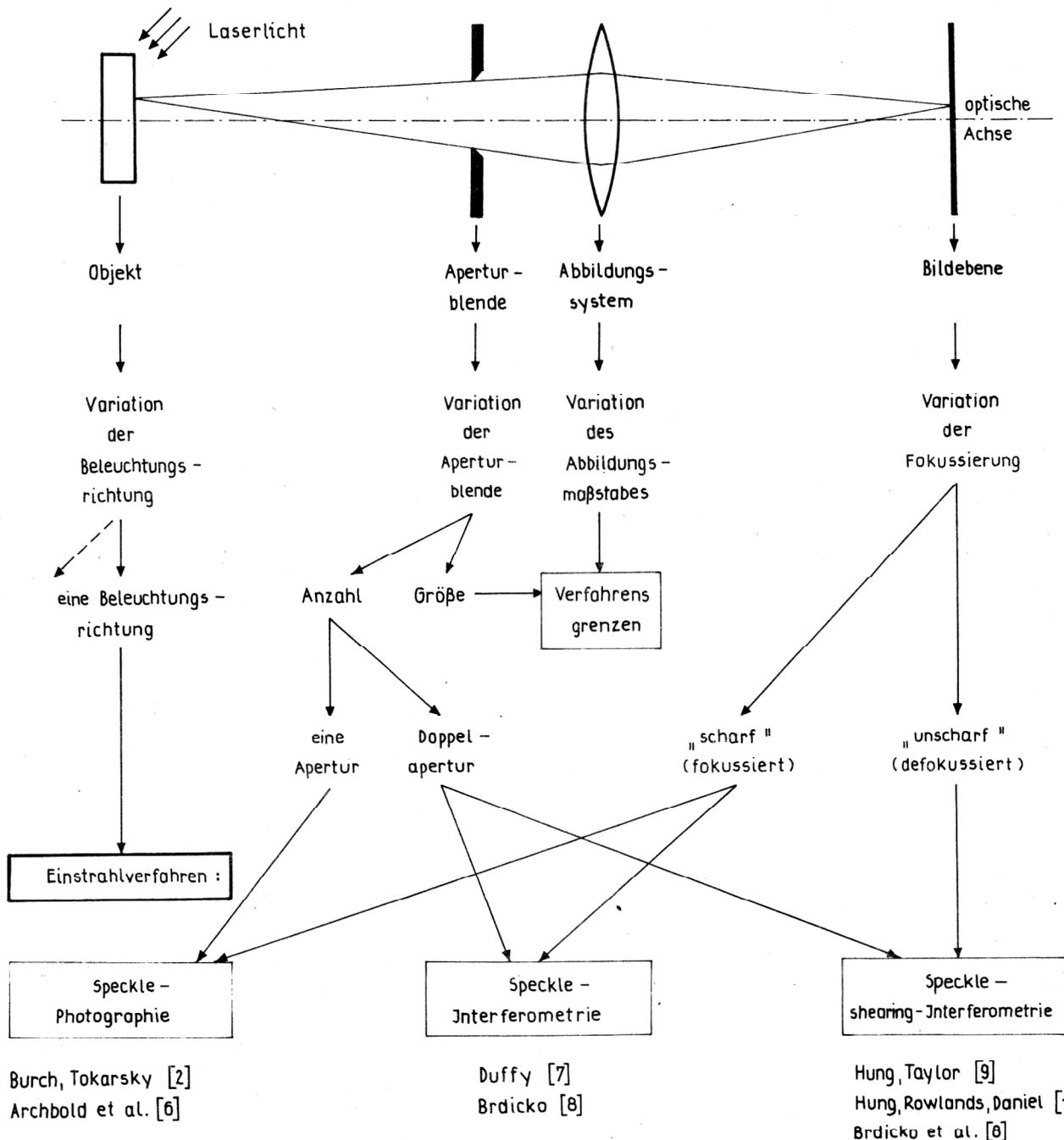


Bild 1
Einstrahl-Speckle-Verfahren: Prinzip und Variationsmöglichkeiten des experimentellen Aufbaus

Speckle-Struktur. Diese im allgemeinen negative Erscheinung begrenzt das Auflösungsvermögen von Strukturen bei Hologrammen. Das trifft natürlich auch auf die Interferenzerscheinungen bei der HI zu.

In einer bahnbrechenden Arbeit von Burch und Tokarsky [2] aus dem Jahre 1968 wird die Speckle-Struktur benutzt, um ebenfalls wie durch die HI Aussagen über Verschiebungen des beobachteten Objekts zu erhalten.

Beide Verfahrensgruppen, HI und Speckle-Verfahren, entwickelten sich in der Folgezeit getrennt weiter. Für viele technische Probleme ist die Anwendung der HI zu empfindlich. Außerdem sind verfahrenstechnisch bedingt bei der HI sehr hohe Anforderungen an die Stabilität des Versuchsaufbaus zu stellen. Die Speckle-Verfahren dagegen lassen sich bei etwas geringerer Meßgenauigkeit auch mit geringerem experimentellen Aufwand für einen größeren Meßbereich realisieren. Es ist deshalb zu erwarten, daß die Speckle-Verfahren mindestens die gleiche Breite in der technischen Anwendung finden werden wie die HI.

Die Tatsache, daß jede holographische Aufnahme auch eine Speckle-Aufnahme im weiteren Sinne ist, war der Grund dafür, daß kombinierte Verfahren, sogenannte Hybrid-Verfahren, entstanden. Diese Systeme verbinden Vorteile beider Gruppen miteinander und lassen sich entsprechend den technischen Anforderungen optimieren. Eine mögliche Kombination soll im Abschnitt 3 diskutiert werden.

2. Speckle-Verfahren

Speckle-Meßverfahren lassen sich je nach zu bestimmendem Verschiebungsvektor mit einem oder zwei kohärenten Strahlen realisieren. Die Verwendung einer Referenzwelle oder eines zweiten Strahls bringt stets hohe Anforderungen an die Stabilität des experimentellen Aufbaus mit sich. Prinzipiell ist es möglich, das Verformungsfeld dreidimensional zu bestimmen [3]. Alle Speckle-Verfahren arbeiten mit dem photographischen Abbild des Objekts. Ausführliche Darstellungen findet man in [4] und [5].

An die Oberflächenbeschaffenheit des zu untersuchenden Objekts sind die gleichen Anforderungen zu stellen wie bei der HI. Die Oberfläche muß undurchsichtig sein und diffus reflektieren. Es kann also in den meisten Fällen die Messung ohne Oberflächenbehandlung vorgenommen werden. Die Belichtungszeit des Photomaterials hängt dann vom Reflexionsgrad und der Intensität ab.

Bild 1 zeigt die einfachste Anordnung zur Aufnahme eines Specklegramms. Diese Darstellung beschränkt sich auf Einstrahlverfahren. Das bedeutet, daß nur Aussagen über in-plane-Verschiebungen möglich sind. Im Bild 1 wurden weiterhin die möglichen Variationen dieses Standard-Aufbaus angegeben, die charakteristisch für unterschiedliche Verfahren sind. Bei diesen Verfahren werden prinzipiell zwei Objektzustände miteinander verglichen, d. h. die Bilder dieser zwei Zustände werden auf der Photoplatte gespeichert.

Die Auswertung geschieht mit Hilfe einer Durchstrahlung der entwickelten Photoplatte mit dem Laserstrahl. Bei der Speckle-Photographie ergibt sich als Beugungsbild ein äquidistantes Streifenmuster, das dem durch-

strahlten Punkt eine Verschiebung senkrecht zu den beobachteten Streifen zuordnet. Der Richtungssinn muß dabei a priori bekannt sein, da auf der Photoplatte beide Objektzustände gleichberechtigt gespeichert sind.

Bei den verschiedenen Verfahren der Speckle-Interferometrie ergibt sich bei der Durchstrahlung der Photoplatte mit parallelem Laserlicht ein Bild des Objekts, das mit Interferenzstreifen überzogen ist. Diese Streifen stellen je nach Verfahren entweder Isotheten oder Linien gleicher Dehnung in einer vorgegebenen Richtung dar. Ein Beispiel für diese Auswertung wird in Abschnitt 3 angeben und diskutiert.

3. Hybrid-Verfahren in der Festkörpermechanik

In der Literatur ist bisher in mindestens vier Arbeiten die Kombination von Speckle-Photographie mit Volumenhologramminterferometrie diskutiert worden. Die meisten Autoren benutzen dabei die Image-Plane-Holographie als holographische Variante [11] bis [13]. In der Arbeit von Boone [14] wird dagegen von einem Reflexionshologramm Gebrauch gemacht.

Eine weitere wichtige Kombination entsteht dadurch, daß ein Amplitudenhologramm, das für die HI aufgenommen wurde, mit einer Doppelapertur rekonstruiert wird [15]. Die Auswertung erfolgt dann entsprechend den Prinzipien der Speckle-Interferometrie.

Diese zitierten Hybrid-Verfahren verwenden eine gemeinsame Photoplatte als Aufzeichnungsmedium. Als Folge dieser geometrischen Bedingung treten Einschränkungen für beide zu kombinierenden Verfahren auf. Das erfordert ein Optimieren und somit einen Kompromiß entsprechend den zu messenden Größen.

Im folgenden soll ein Verfahren angegeben werden, das mit zwei separaten Photoplatten arbeitet. Bild 2 zeigt die verwendete Hybridanordnung. Im Bild 3 sind die dazugehörigen geometrischen Größen des experimentellen Aufbaus eingetragen. Zur Anwendung kommt die konventionelle HI mit einem Amplitudenhologramm zur Bestimmung der out-of-plane-Komponente der Verschiebung. Die in-plane-Komponenten des Verschiebungsvektors werden mittels der Doppelapertur-Speckle-Interferometrie (double aperture speckle pattern interferometry, DASPI) gemessen.

Dieser Versuchsaufbau besitzt folgende Vorteile gegenüber den zitierten Hybrid-Verfahren:

Amplitudenhologramme stellen geringere Anforderungen an die Photoschicht als Volumenhologramme. Der Sensibilitätsvektor (d. h. die Richtung der größten Empfindlichkeit) der HI kann senkrecht auf der zu vermessenden Objektoberfläche stehen. Das bedeutet, daß eine Messung der out-of-plane-Komponente der Verschiebung direkt möglich ist. Dieser Vorteil läßt sich bei Hybrid-Verfahren sonst nur durch Verwendung der Reflexionsholographie erreichen.

Beide Verfahren lassen sich unabhängig voneinander für die jeweilige zu messende Komponente optimieren.

Die Mismatch-Technik des Experimentierens läßt sich getrennt auf beide Verfahren anwenden. Bei Verwen-

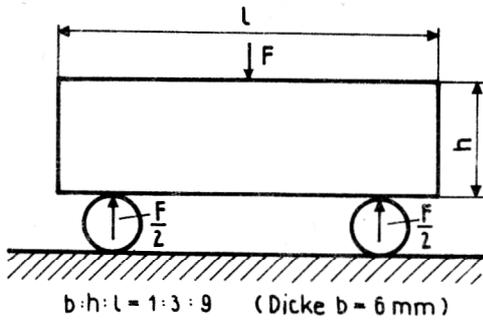


Bild 4
Verwendete Dreipunktbiegeprobe mit Belastungsprinzip

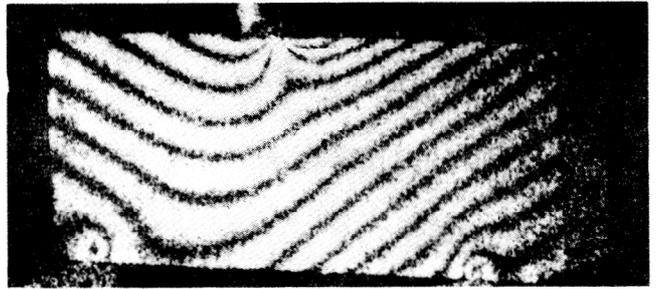


Bild 5
HI – Aufnahme, Sensibilitätsvektor in der Mitte der Probe in Normalenrichtung
Isothetenkonstante: $C_z = 0,2 \mu\text{m}$



Bild 6
Isotheten in senkrechter Richtung,
Isothetenkonstante: $C_y = 7 \mu\text{m}$

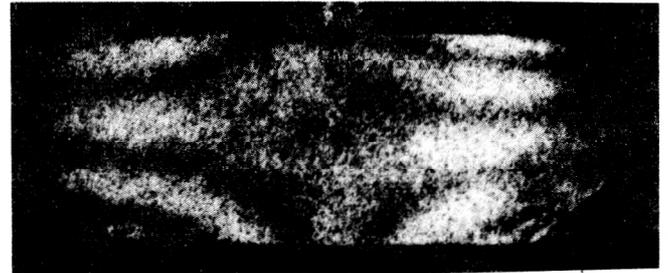


Bild 7
Isotheten in waagerechter Richtung
Isothetenkonstante: $C_x = 7 \mu\text{m}$

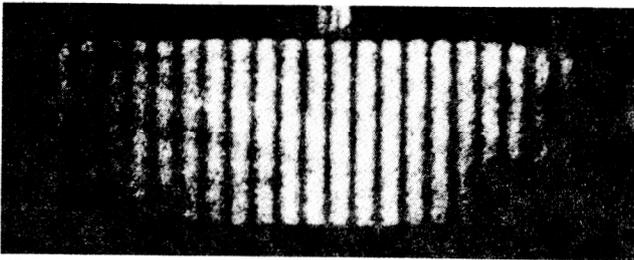


Bild 8
Isotheten in senkrechter Richtung infolge Drehung

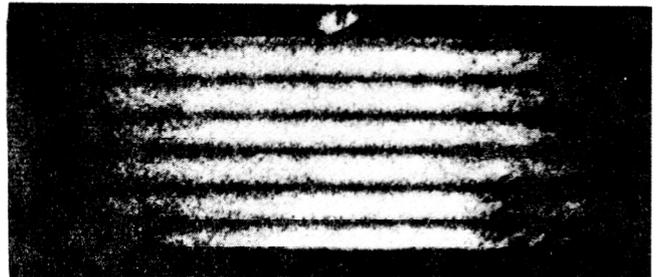


Bild 9
Isotheten in waagerechter Richtung infolge Drehung



Bild 10
Isotheten in senkrechter Richtung infolge Verformung und Drehung

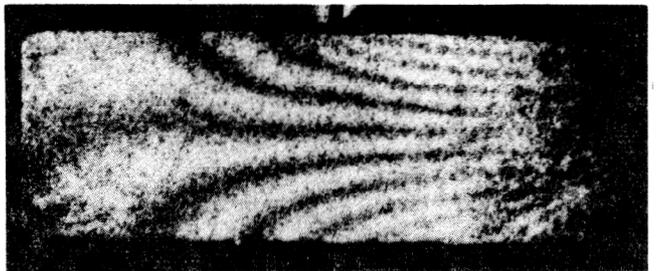


Bild 11
Isotheten in waagerechter Richtung infolge Verformung und Drehung

sich mit dem unaufgeweiteten Laserstrahl im Specklegramm punktweise und damit genauer vermessen. Weiterhin läßt sich der angegebene Versuchsaufbau leicht zum Feldmeßverfahren der in-plane-Komponenten der Dehnungen erweitern gemäß dem Prinzip der Defokussierung ([10], [8]).

Als Beispiel wurde im folgenden die Untersuchung einer Dreipunktbiegeprobe ohne Kerb gewählt. Im Bild 4 ist die Belastungsgeometrie zu erkennen. Die Bilder 5 bis 7 zeigen die entsprechenden Verschiebungsfeldaufnahmen.

Bei der DASPI ergibt sich die Isothetenkonstante c nach Duffy [7], wobei Fehler infolge des geometrischen Aufbaus unbedingt nach Brdicko et al. [8] eingeschätzt werden müssen, zu

$$c_i = \lambda \frac{p}{D} m \quad (i = x, y) \quad (1)$$

mit

λ : Wellenlänge des Laserlichts

p : Abstand Objekt – Aperturblende

D : Abstand der beiden Aperturblenden

m : Vergrößerung der photographischen Abbildung (geometrische Größen siehe auch Bild 3)

Bei der HI stellen die Interferenzstreifen Projektionen des Verschiebungsvektors auf den Sensibilitätsvektor, d. h. auf die Winkelhalbierende zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung, dar. Bei ausgedehnten Objekten ändert sich der Sensibilitätsvektor über der Oberfläche, so daß es auch infolge einer in-plane-Drehung zu Interferenzstreifen kommt [16].

Für den Fall, daß der Sensibilitätsvektor nahezu in Objektnormalenrichtung liegt, ergibt sich die Isothetenkonstante zu

$$c_z = \frac{\lambda}{2 \cos \psi} \quad (\psi \text{ vgl. Bild 3}). \quad (2)$$

Bei der Auswertung des Interferogramms aus Bild 7 ist entsprechend dann zwischen Drehungs- und Verschiebungsanteil zu unterscheiden. Da man die interessierenden Gebiete des zu untersuchenden Objekts kennt, kann man die Geometrie so wählen, daß ein Drehungsanteil in diesen Gebieten gering gegenüber der Verschiebung in Normalenrichtung ist. Solche ausgezeichneten Gebiete sind z. B. Krafteinleitungspunkte (Auflagerpunkte, Einspannungen) oder spezielle Bereiche der Berandung wie Kerb- oder Rißspitzenumgebung.

Mit nur einer Aufnahme der HI lassen sich im Rahmen der Größe der Photoplatte stets mehrere Gebiete nacheinander vermessen, auf denen der Sensibilitätsvektor in Objektnormalenrichtung zeigt. Mit dem Hologramm, das dem Bild 7 zugrunde liegt, ist das entsprechend für die drei interessanten Bereiche möglich.

4. Starrkörperbewegung und Mismatch-Technik

Starrkörperverschiebungen spielen in der HI eine große Rolle. Sie führen zu Interferenzerscheinungen, die nicht von denen, die durch Deformationen hervorgerufen werden, zu unterscheiden sind. Dadurch sind besondere Pro-

bleme bei der Herstellung und Auswertung der Interferogramme bedingt.

Eine nützliche Anwendung finden absichtlich und definiert vorgenommene Starrkörperverschiebungen bei der sogenannten Mismatch-Technik der HI. Ziel dabei ist es, ein paralleles Streifensystem zu erzeugen, das sich dem Streifensystem der Verformung überlagert. Dadurch sind schon auf qualitativem Wege geringe Unstetigkeiten in der Verformung gut zu erkennen [17].

Im Gegensatz zur HI spielen bei der DASPI die Starrkörperverschiebungen eine andere Rolle. Es wird bei der Speckle-Interferometrie stets der Verformungszustand über einer Fläche beurteilt. Es treten also, wie im Abschnitt 2 gezeigt, Isotheten für eine vorgegebene Richtung auf. Das bedeutet, daß kein Unterschied im Isothetenfeld entsteht, wenn eine geringe Starrkörperverschiebung additiv in einer beliebigen Richtung hinzukommt. Als Bedingung dabei darf der Gesamtbetrag der maximal auftretenden Verschiebung die Meßgrenze des verwendeten Versuchsaufbaus nicht überschreiten. Diese Schranke folgt aus der Geometrie und ist für verschiedene Verfahren unterschiedlich [5], [18]. Bei Anwendung der DASPI ist auch hier der Gesamtfehler infolge der Geometrie nach Brdicko [8] zu bestimmen.

Mismatch-Technik in der Speckle-Interferometrie

Ein paralleles Interferenzstreifenbild entsteht bei der DASPI durch eine Rotation des Objektes oder der Photoplatte. Beide Möglichkeiten sind gleichberechtigt. Dieses Streifenbild bedeutet einen konstanten Verschiebungsgradienten für die beobachtete in-plane-Richtung. Diesen Streifen überlagert sich das Streifensystem der Verformung.

Eine Mismatch-Technik bei der Speckle-Interferometrie gewinnt auch deshalb an Bedeutung, weil die erreichbaren Streifendichten aufgrund der Verformung und aufgrund der Verdrehung nicht gleich sind. Nach Chiang [19] ergibt sich stets die geringere Streifendichte für den Verformungsanteil.

Es bleibt die Randbedingung bestehen, daß die maximal auftretende Verschiebung infolge Rotation und Verformung den erwähnten Grenzwert nicht überschreitet.

In den meisten Anwendungsfällen wird man einen Verschiebungsgradienten subtrahieren, so daß die Gesamtverformung geringer wird. Damit wird der Bereich der größten Empfindlichkeit verschoben. In Auswertung der Speckle-Aufnahmen lassen sich andere Bereiche als die der geringsten Verformung im Feldmeßverfahren besser beurteilen.

Für das im Abschnitt 3 gewählte Beispiel sind die sich mit Hilfe der Mismatch-Technik ergebenden Aufnahmen in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Die Bilder 8 und 9 zeigen die Streifensysteme infolge der Starrkörperdrehung. Im Bild 10 ist der Verschiebungsgradient so überlagert, daß sich etwa für das Ende des Objekts die Gesamtverschiebung Null ergibt.

Die Mismatch-Technik der Speckle-Interferometrie stellt also eine Erweiterung der bestehenden Möglichkeiten der Verformungsbeurteilung dar.

LITERATUR

- [1] Leith, E. N., Upatnieks, J.: Reconstructed wavefronts and communication theory *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 1123 – 1130 (1962).
- [2] Burch, J. M.; Tokarski, J. M. J.; Production of multiple beam fringes from photographic scatterers. *Optica Acta*, 15, 101 – 111 (1968).
- [3] Chiang, F. P.: A new family of 2 D and 3 D experimental stress analysis techniques using laser speckles. *Solid Mech. Archives*, 3, 1, 1 – 32 (1978).
- [4] Dainty, J. C., (ed.): *Laser Speckle and Related Phenomena*. Springer-Verlag Berlin 1975.
- [5] Erf, R. K.; (ed.): *Speckle Metrology*. Academic Press New York 1978.
- [6] Archbold, E., Burch, J. M., Ennos, A. E.: Recording of in-plane surface displacement by double-exposure Speckle photography. *Optica Acta*, 17, 883 – 898 (1970).
- [7] Duffy, D. E.: Moire gauging of in-plane displacement using double apertur imaging. *Appl. Opt.*, 11, 1778 – 1781 (1972).
- [8] Brdicko, J., Olson, M. D., Hazell, C. R.: Theory for surface displacement and strain measurements by laser speckle interferometry. *Opt. Acta*, 25, 10, 963 – 989 (1978).
- [9] Hung, Y. Y., Taylor, C. E.; Speckle-Shearing Interferometric Camera – A Tool for measurement of derivations of surface displacement. *Proc. SPIE* 41, 169 – 175 (1973).
- [10] Hung, Y. Y., Rowlands, R. E., Daniel, I. M.: Speckle-Shearing Interferometric Technique: A Full-Field Strain Gauge. *Appl. Opt.*, 14, 3, 618 – 622 (1975).
- [11] Adams, F. D., Maddux, G. E.; Synthesis of holography and speckle photography to measure 3 D displacements. *Appl. Opt.*, 13, 219 (1974).
- [12] Uozato, H., Iwata, K., Nagata, R.: Measurement of 3-Dimensional Displacement from a Single Image Hologram using a combined Holographic and Speckle Interferometry. *Japan. J. Appl. Phys.*, 16, 1689 – 1690 (1977).
- [13] Shakher, C., Sirohi, R. S.: Hologram interferometry and speckle photography combined for stress analysis. *Optik*, 51, 141 – 146 (1978).
- [14] Boone, P. M.: Use of reflection holograms in hologram interferometry and speckle correlation for measurement of surface displacement. *Opt. Acta*, 22, 579 – 590 (1975).
- [15] Yoshikawa, K., Kato, T., Tashiro, H.: A New Technique of Holographic Interferometry by a Double-aperture Reconstruction. *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, 44, 11, 1380 – 1385 (1978).
- [16] Kreitlow, H.: *Untersuchung quantitativer Zusammenhänge in der holografischen Interferometrie*. Diss., Hannover 1976.
- [17] Cadoret, G.: Applications of Holography to the study of structures and materials. *SPIE Vol. 136*, 114 – 126.
- [18] Leis, H. G.: Verformungsmessung mit Hilfe des Laser-Speckles. *VDI-Berichte Nr. 297*, S. 45 – 51 (1977).
- [19] Chiang, F. D., Khetan, R. P.: Strain analysis by one-beam laser speckle interferometry II multiaperture method. *Appl. Opt.*, 18, 13, 2175 – 2186 (1979).