

# Optische Verfahren zur Abstands- und Topografiebestimmung

Optical Methods to Measure Distance and Topography

H. J. Tiziani, Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart



Prof. Dr. H. Tiziani studierte Maschinenbau in St. Gallen, Optik in Paris und promovierte in London. Er war Technischer Berater von IBM in San José und leitete die Optik-Gruppe am Institut für Technische Physik der ETH Zürich, wo er auch habilitierte. Von 1973 bis 1978 war er Leiter des Zentrallabors der Firma Wild Heerbrugg, seit 1978 Leiter des Instituts für Technische Optik der Universität Stuttgart.

Berührungslose Verfahren zur Oberflächentopografie werden für den industriellen Einsatz gefordert. Optische Methoden zur 3-D-Meßtechnik haben in den letzten Jahren vermehrtes Interesse gefunden. Wesentlich dazu beigetragen haben die Entwicklungen auf den Gebieten der Laser, der Speicher und leistungsfähigen Rechner. Der Verarbeitung der Information des Sensors wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Hybride Verfahren, die eine optische Vorverarbeitung mit anschließender digitaler Verarbeitung kombinieren, sind erstrebenswert. Zwischen Bereich und Auflösung sind Kompromisse zu machen.

Optische Methoden eignen sich zur 3dimensionalen Messung und Fehlererkennung. Kohärente als auch mit inkohärentem Licht arbeitende Verfahren bieten sich an. Spezieller Schwerpunkt ist die hochgenaue 3-D-Meßtechnik. Auch werden Ergebnisse aus Arbeiten unseres Instituts vorgestellt.

Contactless 3-D-methods to measure distance and surface topography are very desirable for industrial applications. Optical methods for 3-D-measurements are excellent candidates for it. The reason is partly due to the development of the laser, the storage facilities of the information and availability of powerful small computers. The processing of the information of the sensors is becoming more important. Hybrid methods, using optical preprocessing followed by the digital image analysis are desirable.

A compromise is mostly needed between resolution and range. Optical methods are also most appropriate for 3-D-measurements and defect analysis using coherent as well as incoherent light. In particular precision 3-D-measuring methods will be discussed. Some results of the work carried out at our Institute will be presented.

## 1. Einführung

Ständig steigende Anforderungen an Leistungsfähigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit der Produkte und Maschinen fordern neue berührungslose Meßverfahren zur Prozeßsteuerung und zur Qualitätssicherung. So müssen auch vermehrt topografische Parameter der Prüfobjekte wie Form- und Oberflächentreue, Welligkeit und Rauheit sowie Verformungseigenschaften geprüft werden. Optische 3-D-Meßverfahren sind vermehrt gefordert. Auf der Triangulation basierende Verfahren sind industriell eingeführt. Andere Tiefenmeßverfahren, wie z.B. Ultraschall-Sensoren, finden zur Abstandsmessung Anwendung. Es gilt zukünftig vermehrt, die aktive Triangulation mit der intelligenten Bildverarbeitung zu koppeln. 3-D-Meßtechniken werden immer wichtiger für den industriellen Einsatz, z.B. für Anwendungen auf dem Gebiet der Robotics, in der automatischen Fertigung, aber auch in der Mikroelektronik [1-9]. Verschiedene optische Meßverfahren und Anwendungen werden diskutiert; häufig ist ein Kompromiß zwischen Auflösung und Meßbereich erforderlich. Die optischen Verfahren können sowohl einzeln als auch in Verbindung mit der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt werden und damit die Information für die nachfolgende digitale Verarbeitung wesentlich vereinfachen.

## 2. Optische-3-D-Meßmethoden

Optische 3-D-Meßverfahren können nach verschiedenen Kriterien z.B. in kohärent und nicht kohärent arbeitende sowie in punktwise und flächenhaft operierende Methoden eingeteilt werden. Die nachfolgende Aufzählung soll beispielhaft die Aufteilung in punktwise und flächenhaft arbeitende Verfahren vorstellen.

In Tabelle 2 sind die Auflösungen einiger Verfahren zusammengefaßt. Die Grenzdaten der Verfahren stammen zum größeren Teil aus eigenen Ergebnissen; sie sind als Anhaltspunkte zu verstehen.

Verschiedene 3-D-Meßverfahren basieren auf der Triangulation. Photogrammetrische Verfahren basierend auf der passiven Triangulation werden in jüngster Zeit vermehrt bei Nahbereichsanwendungen in der Industrie eingesetzt. Aktive Triangula-

**Tabelle 1: Verfahren zur Abstands- und Profilmessung**

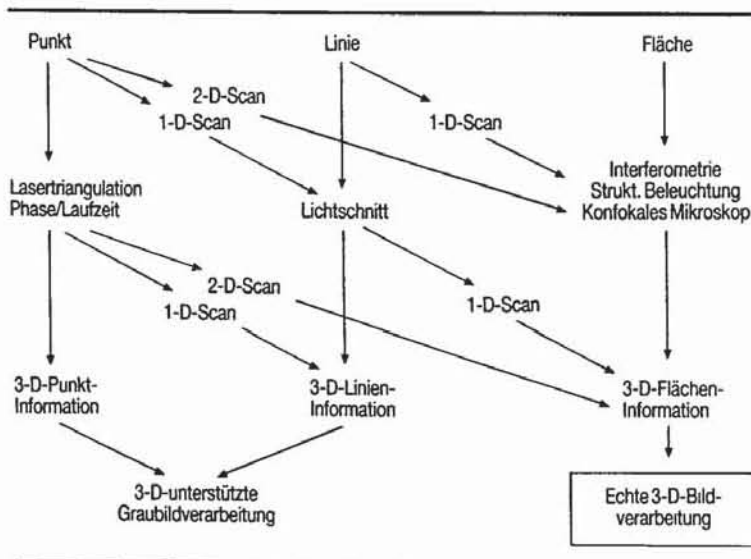
Punktweise arbeitende Verfahren	Flächenhaft arbeitende Verfahren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laufzeitmessung</li> <li>• Phasenmessung</li> <li>• Lichtschnitt</li> <li>• Triangulation</li> <li>• Astigmatische Fokussierung</li> <li>• Optische Balance, Foucault</li> <li>• Heterodyn-Verfahren</li> <li>• Tunnelmikroskop</li> <li>• Konfokales Mikroskop</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moiré-Verfahren, strukturierte Beleuchtung</li> <li>• Interferometrische Verfahren</li> <li>• Holografie, Speckle</li> <li>• Bildverarbeitung</li> <li>• Lichtschnitt</li> </ul>

**Tabelle 2: Optische Verfahren zum Berührungslosen Antasten**

	$\Delta z$
1. Radiometrische Verfahren: - Einkanal - Zweikanal - Weißlicht Fokussier-Verfahren	30 nm
2. Astigmatische Fokussierverfahren	0,1 $\mu\text{m}$
3. Auswertung der Kantensteilheit im Bild	0,1 $\mu\text{m}$
4. Elektrooptische Symmetrieverfahren zur Fokussierung (Philips)	0,1 $\mu\text{m}$
5. Lichtschnittverfahren	10 $\mu\text{m}$
6. Strukturierte Beleuchtung - Moiré	10 $\mu\text{m}$ (0,5 $\mu\text{m}$ )
7. Triangulation	1‰ v. Meßber.
8. Interferometrie	0,1 nm
9. Specklebewegung	1 $\mu\text{m}$
10. Radarverfahren - Laufzeitmessung - Phasenmessung	1 mm 0,3 mm

tionsverfahren sind in der Industrie eingeführt; sie erweisen sich als relativ robuste Verfahren. Diese Methoden werden punktweise, linien- oder flächenhaft eingesetzt, wie in Tabelle 3 veranschaulicht wird.

**Tabelle 3: 3-D-Meßverfahren**

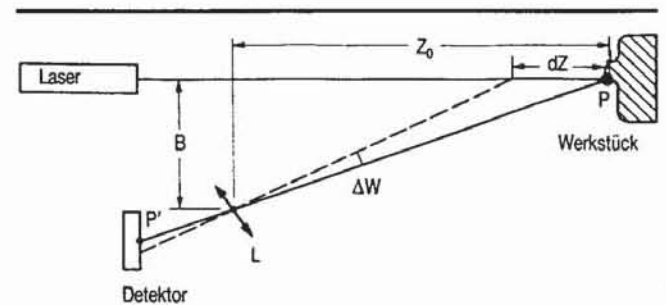


Eine Erweiterung des projizierten Laserpunktes zum Linienfokus bzw. zur Gitterstruktur führt zum Lichtschnittverfahren nach Schmalz bzw. zu strukturierten Beleuchtungsverfahren bei stationärem Objekt. Zur schnellen Bestimmung von Oberflächentopografien eignen sich parallel operierende Methoden. Alternativen zu den statischen Verfahren sind die dynamischen, wo der Laserpunkt oder die Linie das Objekt flächenhaft abtastet bzw. das Objekt am Meßpunkt oder der Meßlinie vorbeifährt.

### 3. Optische Triangulation für die 3-D-Messung

Die Triangulation ist ein sehr vertrautes Verfahren; so wird die passive Triangulation in der Photogrammetrie schon lange eingesetzt. Vom Prinzip her ist es ein sehr einfaches Verfahren für die Tiefenmessung. Allerdings gibt es verschiedene Begrenzungen. Durch die Entwicklung der leistungsfähigen Rechner und der digitalen Bildverarbeitung wird das Verfahren vermehrt für industrielle Fragestellungen zur 3-D-Datenerfassung im Nahbereich interessant.

Bei der aktiven Triangulation wird im einfachsten Fall ein Lichtpunkt aufs Objekt projiziert, der nachher unter einem unterschiedlichen Winkel beobachtet und vermessen wird. Durch strukturierte Beleuchtung wird das Verfahren erweitert. Als einfache Struktur kann auch eine Linie verwendet werden, was dann zum Lichtschnittverfahren führt. Speziell die strukturierte Beleuchtung hat verschiedene Vorteile; sie ermöglicht beispielsweise eine sehr schnelle Verarbeitung der Information.



**Bild 1: Prinzip der Triangulation**

Die Grundlagen der Triangulation sind aus Bild 1 ersichtlich. Der aufs Objekt projizierte Laserpunkt wird mit Hilfe einer CCD-Zeile, einem -Array oder einem positionsempfindlichen Detektor vermessen. Es wird angenommen, daß der Objekt-Abstand wesentlich größer als die Basis des Triangulationsverfahrens ist. Die Auflösung  $\Delta z$  kann geschrieben werden als

$$\Delta z = \frac{z^2}{B} \Delta w, \tag{1}$$

wobei  $\Delta w$  die Winkelauflösung der Empfängersysteme darstellt. Die Triangulation ist eine sehr robuste Methode für die punktweise 3-D-Messung und bietet sich auch bei schwierigen Umweltbedingungen an.

Ein abtastender Triangulations-Sensor ist sehr wirkungsvoll für das dreidimensionale Vermessen von Objektoberflächen. Ein fokussierter Laser wird über die Objektoberfläche gefahren, wobei die Strahlablenkung z.B. mit Hilfe von Galvanometer-Spiegeln erfolgen kann. Die x-,y-Koordinaten des Laser-Spots sind dann durch die Positionen der Galvanometer-Spiegel gegeben. Eines unserer abtastenden Verfahren ist schematisch in Bild 2 vorgestellt; die für die x-, y-Positionierung des Laserspots verwendete n Galvanometer-Spiegel sind oben links angedeutet. Dieses Verfahren eignet sich besonders für eine gezielte Vermessung von Objektpunkten bzw. Gebieten, die punktweise rechnergesteuert angefahren werden. Die Integration des dynamischen Scanners in ein flexibles Fertigungs- und Montagesystem, z.B. für den Einsatz zur automatischen Vollständigkeitsprüfung, ist eine Herausforderung für das Sensorsystem.

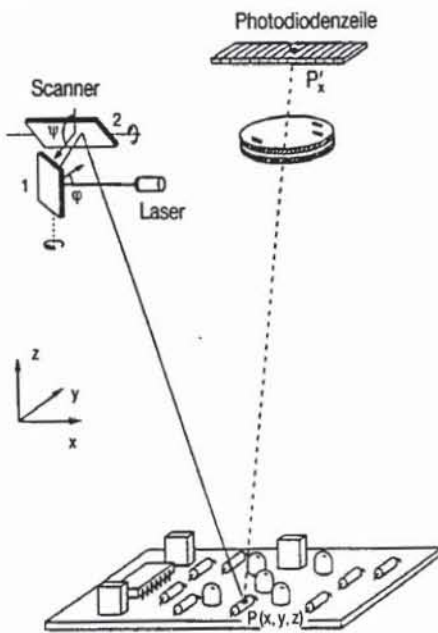


Bild 2: Prinzip des Triangulationsscanners

Bei einem Arbeitsabstand von 0,8 m beträgt die Auflösung in z-Richtung 0,05 mm. Zum schnellen Abtasten der Oberfläche eignen sich Polygon-Spiegel. Zur Verbesserung der Auflösung kann die Basis noch erweitert werden. Dies kann z.B. erreicht werden mit zwei Motor-Theodoliten. Der erste Theodolit kann beispielsweise den Laserspot generieren; im zweiten wird die Position des Laserspots vermessen und dadurch die 3-D-Information gewonnen. Hohe Auflösungen in Bruchteilen einer Bogensekunde werden erreicht.

### Strukturierte Beleuchtungs- und Streifenprojektionstechniken

Beim Moiré-Verfahren wird ein Gittermuster, das auch interferometrisch erzeugt werden kann, auf die Objektoberfläche projiziert und unter einem anderen Winkel mit einer Kamera beobachtet. Bei unebenen Objektoberflächen werden die Streifen verformt. Die Verformungsstreifen werden mit einem Referenzmuster verglichen. Daraus ergeben sich Höhenschichtlinien der Oberfläche. Mit entsprechender automatischer Streifenauswertung können die Konturlinien auch vorzeichenrichtig vermessen und dargestellt werden. Beispielhaft ist ein Aufbau einer Streifenprojektion in Bild 3 schematisch dargestellt.

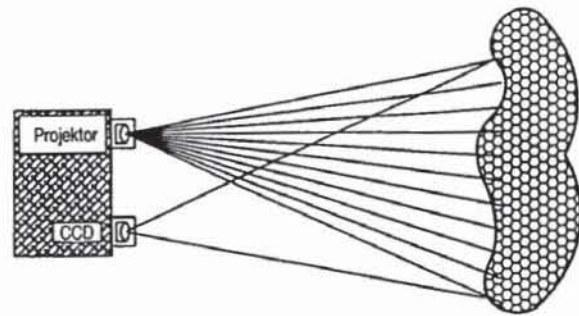


Bild 3: Prinzipskizze der Streifenprojektion mit variabler Periode und Phasenschiebung zur automatischen Auswertung

Ein Gittermuster mit einer Gitterperiode  $p$  wird über eine Projektionsoptik auf das Objekt projiziert. Das durch die Topografie des Objekts verformte Gitter wird mit Hilfe einer Abbildungsoptik auf eine CCD-Kamera abgebildet und ausgewertet. Die vorwiegend automatische Streifenauswertung führt zur Topografiebeschreibung. Hierzu eignen sich statische und dynamische Auswerteverfahren [11]. Bei den dynamischen kann das Gitter jeweils um eine viertel Periode verschoben und die Streifenmuster jeweils registriert und ausgewertet wer-

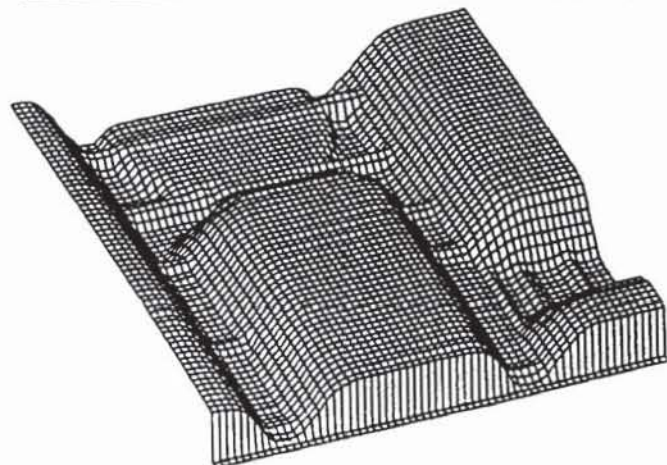


Bild 4: Konturlinien eines Werkstücks. Auflösung 1 mm, Arbeitsabstand 2 m

den. Beim Einsatz zweier oder mehrerer unterschiedlicher Gitterperioden dient das grobe Gitter zur Erfassung von Sprüngen und das feine zur Feinmessung der Topografie und zur Vermessung der Höhenschichtlinien.

Bild 4 zeigt beispielhaft Konturlinien eines Werkstücks mit 1 mm Auflösung bei 2 m Arbeitsabstand. Die Auswertung erfolgte mit einem statischen Verfahren in wenigen Sekunden. Als Alternative können auch Gitter mit unterschiedlicher Periode durch Überlagerung zweier ebener Wellenfronten erzeugt, projiziert und ausgewertet werden. Bei den Untersuchungen hat es sich auch herausgestellt, daß zur Konturlinienaufzeichnung auch nicht-periodische Muster vorteilhaft eingesetzt und ausgewertet werden können. In jüngster Zeit werden Flüssigkristalle zur Erzeugung von Gitterstrukturen eingesetzt [16].

Verschiedenartige Streifenprojektionstechniken führen zu einer Erweiterung des schon lange bekannten Lichtschnittverfahrens nach Schmalz. Lichtschnittverfahren ermöglichen in Ergänzung zu Video-Techniken sehr hohe lokale Intensität und sind deshalb widerstandsfähig gegen Umweltstörungen. Die Form des registrierten Lichtbalkens ermöglicht die Tiefeninformation in Quasi-Echtzeit über die gesamte Länge des Lichtstreifens, ohne daß bewegte Teile nötig werden. Parallel arbeitende Verfahren, die z.B. von der Objekttopografie verformte Gitterstrukturen vermessen, können schneller und deshalb besonders attraktiv werden.

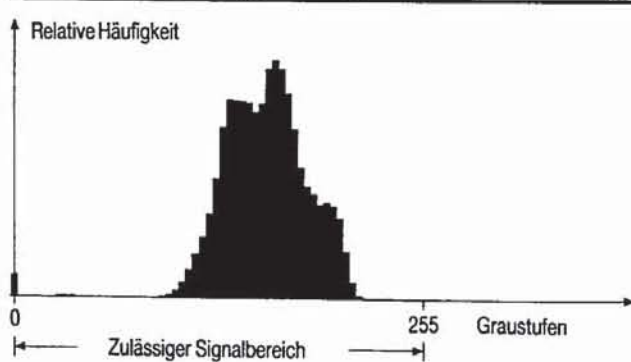


Bild 5: Histogramm einer mattweißen Oberfläche

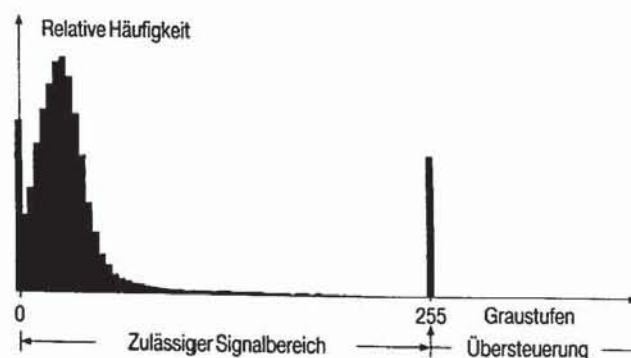


Bild 6: Histogramm eines Metallobjektes

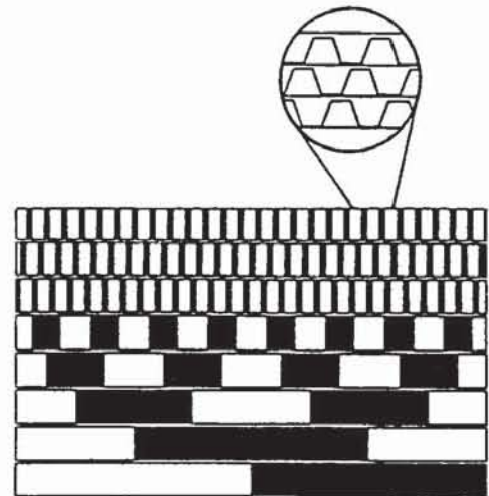


Bild 7: Streifencodierung: MZXpx-Code

### Flexible Streifencodierung

Viele Oberflächen im industriellen Bereich, wie Metall- oder Kunststoffoberflächen, liefern meist Signale mit großen Schwankungen. Dies hat zur Folge, daß das Nutzsignal häufig bei niedrigen Grauwerten liegt, um zu starke Übersteuerung zu vermeiden. Anhand von zwei Histogrammen der Grauwertmodulation soll dies erläutert werden. Bild 5 zeigt ein Histogramm einer mattweißen Oberfläche und Bild 6 das Histogramm eines Metallobjektes. Der rechte Balken zeigt die Helligkeitsübersteuerung. Die von hellen Stellen, sog. „Blinkern“ verursachte Übersteuerung tritt in der Praxis häufig auf. Für die Vermessung der übrigen Bereiche der Objekt Oberfläche steht dann nur eine geringe Dynamik zur Verfügung.

Für den flexiblen, industriellen Einsatz der triangulationsbasierten 3-D-Meßtechnik ist daher eine effiziente optische Markierung der Objekt Oberfläche Voraussetzung.

Für die Codierung eignen sich vor allem hybride Markierungs codes. Damit lassen sich auch bei variierender Dynamik hohe Auflösungen erreichen. Wegen der Eindeutigkeit der Codes bereiten Sprünge keine Schwierigkeiten. Ein Beispiel ist der MZXpx-Code (Bild 7). Sein analoger, trapezförmiger MZX-Teilcode hat bei gleicher absoluter Ortsauflösung die größtmögliche Codelänge und damit ein sehr niederfrequentes Ortsfrequenzspektrum, was sich bei reduzierter Bildauflösung als besonders vorteilhaft erweist. Er nutzt die verfügbare Modulationsamplitude immer vollständig aus. In diesem Zusammenhang ist die On-line-Generierung optimaler Markierungs codes eine Technologie, die eine wesentliche Bereicherung zur Topografiebestimmung darstellt. Für die Projektion beliebiger Codes wurde ein Laserprojektor mit quasi analogen Eigenschaften an unserem Institut entwickelt [17]. Er erlaubt die Projektion von Codes mit maximal 3000 Worten bei 2 bis 4096 Graustufen. Die Projektion erfolgt mit einer maximalen Frequenz von 50

Hz. Damit ist eine zeitlich lückenlose Bildaufnahme möglich (6 Vollbilder in 240 Millisekunden). Eine Erhöhung auf 100 bis 200 Hz wäre realisierbar.

Die geforderte Flexibilität des Codierungssystems für wechselnde Anforderungen setzt eine automatische Optimierung voraus. Dazu wird eine Analyse der Systemeigenschaften, der optischen und topologischen Eigenschaften von Meßobjekt-Typ und Umgebung durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse liefern die Kriterien für eine automatische Generierung geeigneter Codes. Am Beispiel eines typischen Industrie-Objektes, einem quaderförmigen Pneumatik-Teil (Länge 64 mm), wird die Anpassung demonstriert. Mit dem Verfahren des klassischen projizierten Streifens gleicher Helligkeit könnte nur ein kleiner Ausschnitt vermessen werden. In Bild 8 sind die Konturlinien (Abstand 0,3 mm) deutlich erkennbar, was die 3-D-Vermessung des Pneumatik-Ventils im Industrieinsatz ermöglicht.



Bild 8: Konturlinien von einem Pneumatik-Teil, Konturlinienabstand 0,3 mm

Unterstützend zur 3-D-Meßtechnik wird auch die flexible Objektbeleuchtung für das 3-D-Maschinen-Sehen immer wichtiger. Die Rekonstruktion von Objektmerkmalen aus Grauwerten wird zuverlässiger; dies um so mehr, als zusätzliche Daten über das aktuelle Objekt herangezogen werden können. Dazu gehört z.B. die Merkmalextraktion durch raum-zeitliche Beleuchtungsdynamik (und strukturierte Beleuchtung zur Bestimmung der 3-D-Topografie).

Die aus unterschiedlichen Richtungen eingesetzte Objektbeleuchtung ist ein wichtiges Element zur Objekt- und Fehlererkennung, insbesondere wenn es sich um 3-dimensionale Strukturen handelt.

Raum-zeitliche Beleuchtungsveränderungen lassen sich vorteilhaft als Instrument der Merkmalsextraktion und Segmentierung einsetzen, wenn sie rechnergesteuert und in Video-Echtzeit zur Verfügung stehen.

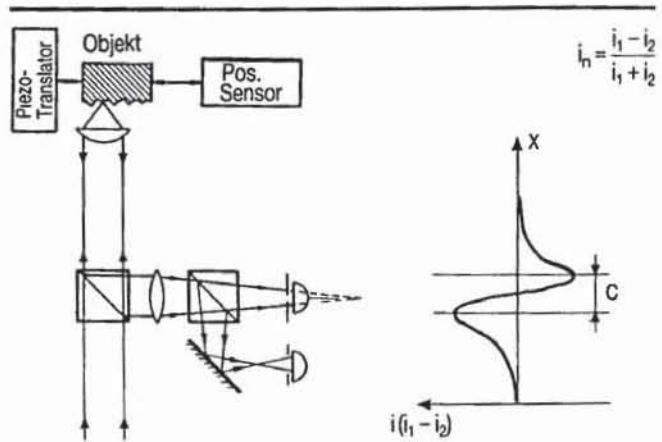


Bild 9: Prinzipskizze eines Fokusetektors nach dem fotometrischen Gleichgewichtsprinzip (Lichtwaage)

#### 4. Optische Bildebenen-Lokalisierungssysteme

Interferometrische Profilmeßgeräte sind im wesentlichen noch Laborgeräte, deren Einsatz vorerst noch beschränkt ist. Zur Rauheitsmessung in der Produktion eignen sich z.B. Streuverfahren oder geometrisch-optische Anordnungen. In Bild 9 wird ein in unserem Labor entwickeltes Verfahren stellvertretend für Bildebenen-Lokalisierungssysteme näher erläutert. Ein Laserpunkt wird auf die Meßoberfläche mit Hilfe eines Mikroskopobjektivs projiziert. Dieser Laserpunkt wird in Autokollimation detektiert. Der Lichtfluß, der die Lochblende passiert, wird gemessen. Das maximale Signal wird erhalten, wenn der Objektpunkt konjugiert zur Lochblende ist. Für Objektpunkte, die eine unterschiedliche Höhe haben, wird der Lichtpunkt defokussiert, auf das Objekt abgebildet, zusätzlich wird der Autokollimationsspot auf der Blende breiter, der

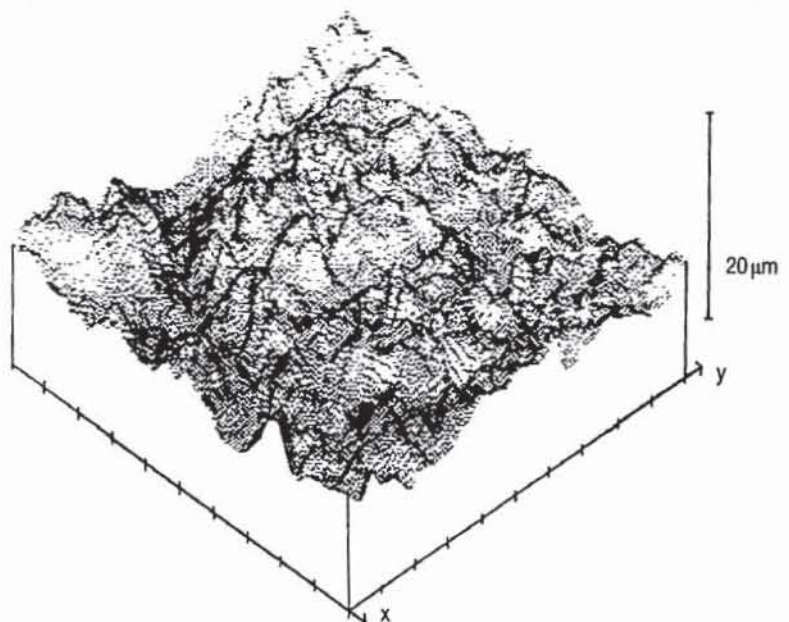


Bild 10: Topografie eines Tiefziehblechs

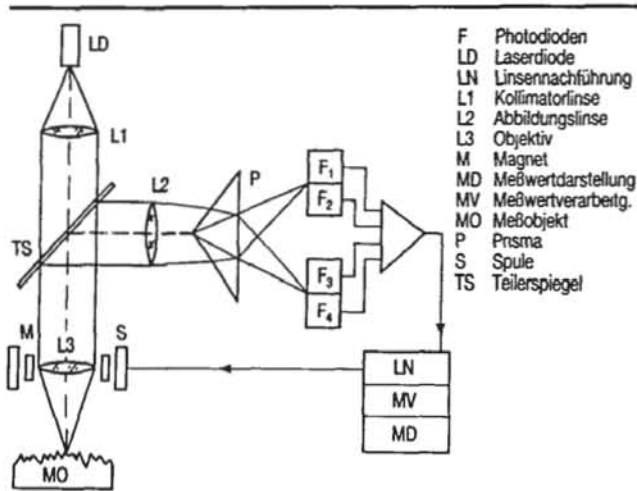


Bild 11: Prinzipskizze des Fokusdetektors nach dem Foucault-Prinzip

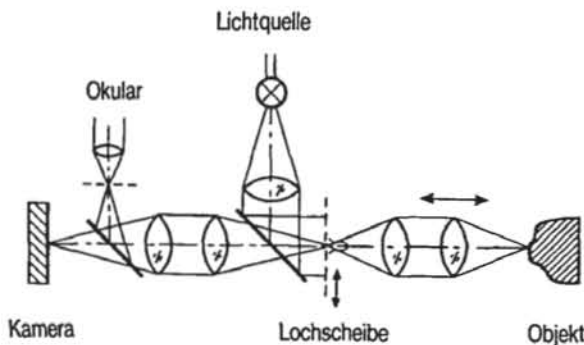


Bild 12: Prinzip des konfokalen Mikroskops

Lichtfluß durch die Blende wird kleiner, so daß der Detektor weniger Licht empfängt. Der entsprechende Bildpunkt wird dunkler. Zur Vermeidung von Störungen durch Variation der Lichtquelle usw., werden zwei Blenden symmetrisch zum Autokollimationspunkt, die eine intra-, die andere extrafokal platziert. Ist das Werkstück im Fokus, sollten beide Detektoren den gleichen Lichtfluß erhalten. Es bietet sich an, die Differenz der Lichtsignale über die Summe, d.h. über die normierte Intensi-

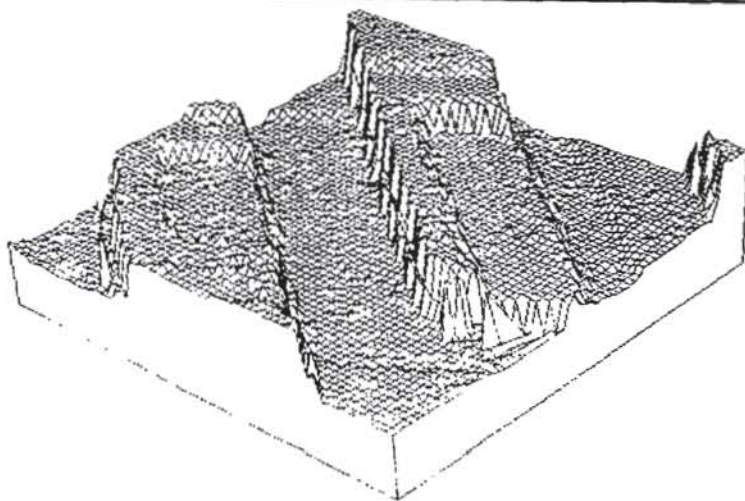


Bild 13: Vermessung eines Mikrochips in Pseudo-3-D-Darstellung

tät, aufzutragen. Für größere Meßbereiche wird das Objektiv jeweils mit einem Piezo-Element nachfokussiert. Darüber hinaus ist im Bild 9 noch eine Kalibrierkurve aufgetragen. Auflösungen in der Gegend von 20 nm wurden erreicht. Der Arbeitsbereich kann auf mehrere  $\mu\text{m}$  erweitert werden. Bild 10 zeigt eine Topografie eines Tiefziehbleches mit Vertiefungen, die als Schmieraschen dienen. Das Tiefziehblech wurde mit dem beschriebenen Fokusdetektor nach dem Prinzip der Lichtwaage vermessen.

Verschiedene Alternativen eignen sich zur Bild-ebenenlokalisierung. Dazu gehört auch ein zum Profilometerkopf modifizierter Philips CD (Compact Disk) Abtastkopf. Bild 11 zeigt schematisch den Meßkopf mit Autofokussiersystem. Nur im fokussierten Zustand erhalten die zwei Detektoren (Dioden) die gleiche Intensität. Auch die optischen Taster der Firmen Rodenstock und Dr. Breitmeier basieren auf dem Foucault-Prinzip, das Philips nutzte.

### Konfokales Mikroskop

Die konfokale Mikroskopie ist eine interessante Entwicklung der letzten Jahre für die Topografiebestimmung. Das Prinzip ist in Bild 12 zu sehen. Prinzipiell wird ein Lichtpunkt, z.B. eine beleuchtete Lochblende, als sekundäre Lichtquelle auf das Objekt abgebildet. Objektpunkte, die konjugiert zur Lochblende sind, ergeben bei idealen Abbildungsverhältnissen ein beugungsbegrenztes Punktbild. Bei Autokollimation passiert ein maximaler Lichtfluß die Blende, um anschließend detektiert zu werden. Der entsprechende Bildpunkt erscheint hell. Im Gegensatz dazu werden defokussierte Objektpunkte dunkler, da durch die Defokussierung das Punktbild verbreitert wird und weniger Licht passiert. Zur Vermeidung der Punktabtastung, bzw. der Objektbewegung, haben wir ein Punktmuster generiert, das entweder durch gegeneinander rotierende, periodische Gitter entsteht, oder eine bewegte Maske, wie dies in Bild 12 angedeutet wird. Wird ein piezo-elektrischer Transducer zur Durchfokussierung des Objektivs benutzt, und werden die einzelnen Bildschnitte gespeichert, kann mit Hilfe der Verfahren der Bildverarbeitung ein dreidimensionales Gebilde schnittweise aufgezeichnet werden. Zu jedem Zeitpunkt kann aber auch die jeweilige fokussierte Bildebene oder Punkte dieser Bildebene als hellste Stellen beobachtet werden, so daß auch der Beobachter schon die Information eines 3-D-Bilds ohne Bildverarbeitung erhält. Durch die Speicherung der einzelnen Schnitte kann ein dreidimensionales Bild aufgebaut und anschließend stereoskopisch beobachtet oder entsprechend ausgewertet und dargestellt werden. Bild 13 zeigt ein Ergebnis der Vermessung eines Mikrochips in Pseudo-3-D-Darstellung. Die Höhenauflösung liegt bei 20 nm. Als Alternative zu unserem Laboraufbau kann das Objekt auch punktweise abgetastet werden [12].

## 5. Kohärent arbeitende optische 3-D-Meßverfahren

Die Interferometrie, aber auch die Holografie und die Speckle- und Moiré-Verfahren sind nützliche Techniken für die 3-D-Präzisionsmeßtechnik in der Forschung und für industrielle Anwendungen. Die rechnerunterstützte Streifenanalyse wird immer wichtiger bei den Anwendungen. Mehr Information kann aus den Interferogrammen gewonnen werden. Die Auflösung, die Genauigkeit und insbesondere die Geschwindigkeit werden gesteigert. Robustere Verfahren werden für den industriellen Einsatz entwickelt.

Verschiedene Streifenanalyse-Verfahren werden heute eingesetzt. Man kann sie einteilen in **statische** und **dynamische** Verfahren. Bevorzugt eingesetzt werden dynamische Verfahren. Das Prinzip wird kurz erläutert:

Durch die Überlagerung zweier Wellenfelder ergibt sich die Intensität

$$I(x) = I_0 \{1 + m \cos \Phi(x)\}, \quad (2)$$

wobei

$$\Phi(x) = \Phi_1(x) - \Phi_2(x) \quad (3)$$

die Differenz der Phasen,  $I_0 = I_1 + I_2$  die Summe der Intensitäten der beiden Wellenfelder und  $m$  den Streifenkontrast darstellen. In Gleichung (2) sind drei Unbekannte, nämlich die gesuchte Phase  $\Phi$ , sowie  $I_0$  und  $m$ , die mit drei Gleichungen aufgelöst werden können. Werden zwei Phasenschiebungen von jeweils  $90^\circ$  eingeführt, können drei Gleichungen bzw. drei Interferogramme im Rechner gespeichert und entsprechend voneinander subtrahiert werden. Daraus folgt die gesuchte Phase  $\Phi$ , bzw. die Wellenfront, welche zu Konturlinien führt [11].

Werden mehr als drei Interferogramme zur Auswertung benutzt, reduzieren sich die Auswirkungen von Fehlern bei den Phasenschiebungen; vier und fünf Interferogramme werden häufig eingesetzt. Der benutzte Interferenzaufbau nach Linnik mit angelegter Phasenschiebung ist in Bild 14 skizziert. Ein Leitz-Interferenzvorsatz wurde entsprechend modifiziert.

Vielfach sind interferometrische Verfahren, speziell bei rauen Oberflächen, zu empfindlich. Der Einsatz interferometrischer Verfahren zur Topografie rauherer Oberflächen wird ermöglicht, wenn Lichtquellen mit längeren Wellenlängen, z.B.  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  ( $\text{CO}_2$ -Laser) eingesetzt werden. Alternativen sind Zwei-Wellenlängenverfahren oder schräger Lichteinfall. Sie dienen auch zur Erweiterung der Eindeutigkeit.

Wird mit zwei Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  operiert, folgt daraus eine äquivalente (synthetische) Wellenlänge  $\lambda_{\text{eq}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ . Für die Eindeutigkeit ist  $\lambda_{\text{eq}}$  verantwortlich. Ein typisches Ergebnis der Vermes-

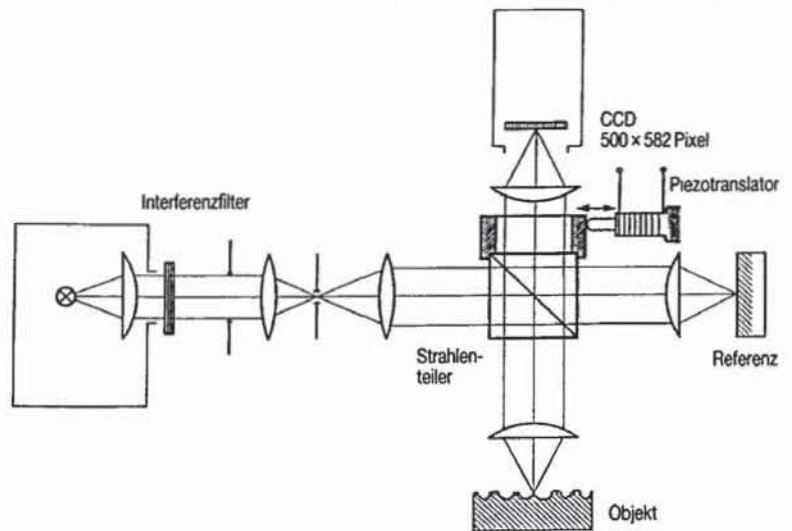


Bild 14: Prinzip des Linnik-Interferenzaufbaus mit Phasenschiebung

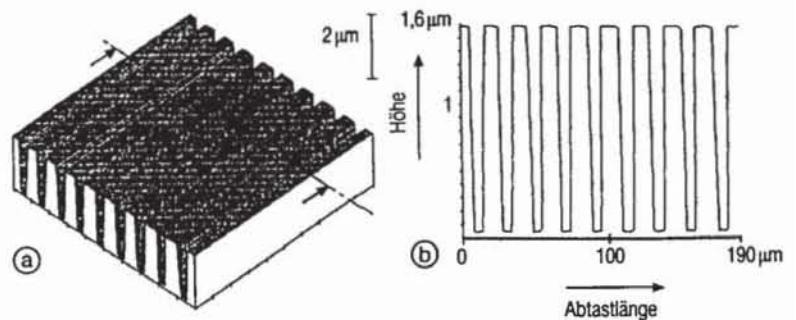


Bild 15: Auswertung der Topografie eines holografisch-optischen Elementes mit dem Linnik-Interferometer mit  $\lambda_1 = 550 \text{ nm}$  und  $\lambda_2 = 618 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{eq}} = 5 \mu\text{m}$

sung eines holografisch-optischen Elementes ist in Bild 15 vorgestellt.

Bild 16 zeigt schematisch den Fizeau-Interferenzaufbau mit schrägem Einfall. Die Empfindlichkeit wird abhängig vom Einfallswinkel reduziert. Zur automatischen Streifenauswertung wird in unserem Fall die Objekthalterung mit Piezoelemen-

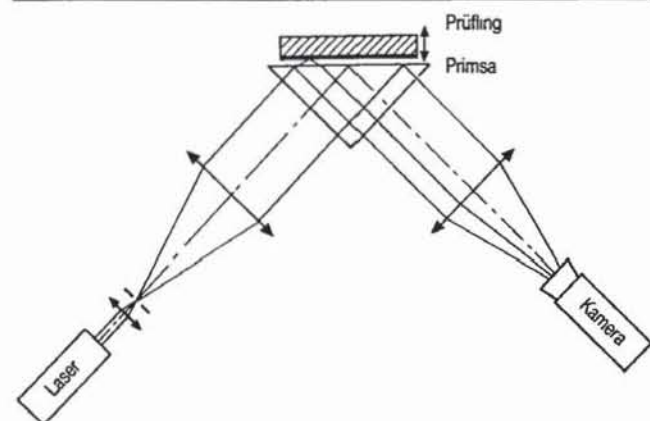
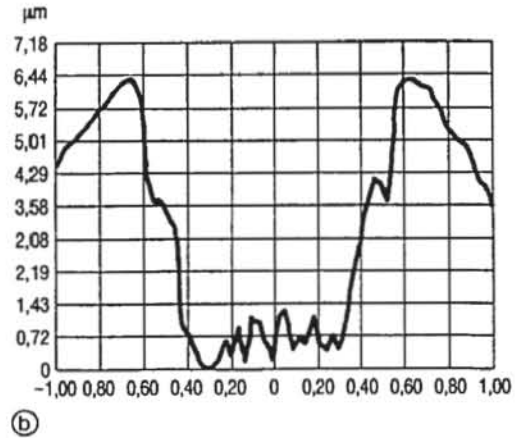
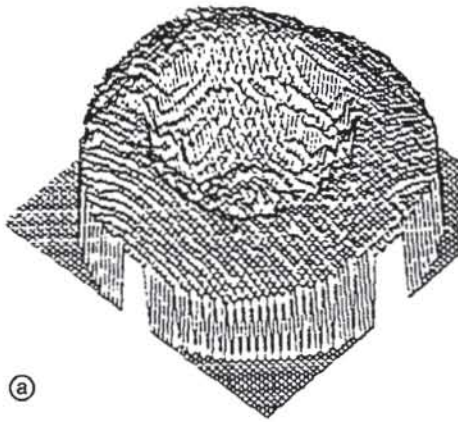


Bild 16: Prinzipskizze zur Interferometrie im Fizeau-Aufbau mit schrägem Einfall



**Bild 17: Oberflächenmessung einer raunen phosphatbeschichteten Metalloberfläche mit Höhenabweichung von 8 µm in Pseudo-3-D-Darstellung 16a) und als Schnitt 16b)**

ten verschoben; die Phasenschiebung wird dem jeweiligen Neigungswinkel angepaßt.

Bild 17 zeigt das Ergebnis der Vermessung einer raunen phosphatbeschichteten Metalloberfläche mit Höhenabweichungen von 8 µm.

### 6. Heterodyn-Verfahren

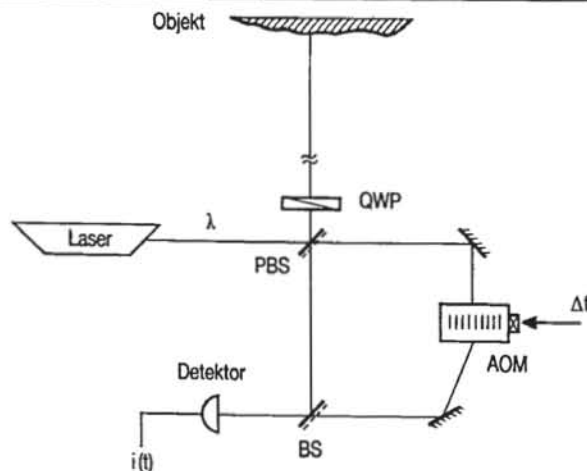
In der Interferometrie werden Phasendifferenzen von optischen Feldern als Intensitätsvariation detektiert. Auflösungen in der Gegend von einem Hundertstel Streifen werden, z.B. mit den Phasenschiebverfahren zur automatischen Streifenbewertung erreicht. In der Heterodyn-Interferometrie wird die zeitabhängige Phasenvariation im Frequenzbereich analysiert, was Auflösungen bis zu einem Tausendstel des Streifenabstands ermöglicht. Dabei ist die Verschiebung z in die Beleuchtungsrichtung projiziert.

Bei der Heterodyn-Interferometrie wird die Frequenz in einem der Interferometerarme z.B. um 40 oder 80 MHz geschoben. Die durch die optische Wegänderung verursachte Phasenänderung wird

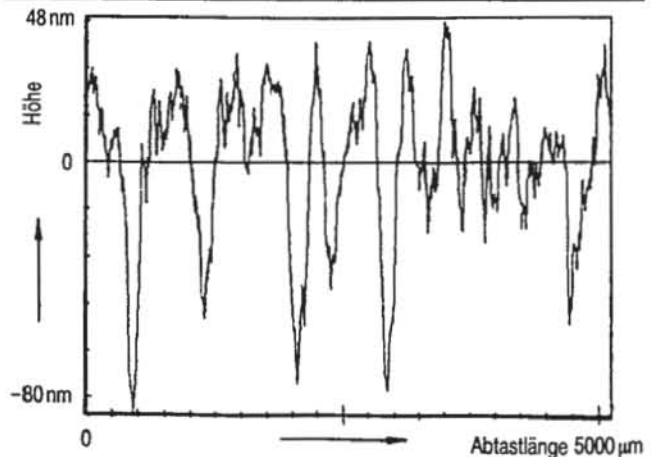
über die Frequenzänderung detektiert. Die Intensität der zwei sich überlagernden Wellen folgt nach

$$I = I_0 \left[ 1 + m \cos \left( 2\pi f_B t + \frac{2\pi 2Vt}{\lambda} + \Phi_2 - \Phi_1 \right) \right] \quad (4)$$

Die Auswertung des Signals erfolgt nach den Verfahren der Dopplershift-Technik. Schwingungen und optische Wegunterschiede werden auf dieser Basis hochgenau ermittelt. Zur Frequenzschiebung eignen sich verschiedene Verfahren, wie ein akustooptischer Modulator (Bragg-Zelle), ein rotierendes Gitter, die Zeemann-Aufteilung im He-Ne-Laser oder polarisationsoptische Verfahren. Bild 18 zeigt prinzipiell einen Aufbau mit einer Bragg-Zelle.



**Bild 18: Prinzipskizze des Zweistrahl-Heterodyn-Interferometers**



**Bild 19: Mikroprofil einer handpolierten Metalloberfläche, vermessen mit dem Heterodyninterferometer**

In Bild 18 teilt ein polarisierender Strahlteiler PBS den Laserstrahl mit der Frequenz  $f_1$  in den Objekt- und Referenzstrahl. Der Referenzstrahl ist frequenzverschoben. Die Frequenzverschiebung erfolgt mit einem akustooptischen Modulator AOM. Nach dem Strahlteiler BS sind die zwei Wellen wieder vereinigt und das Objektprofil ergibt sich aus der Analyse des Detektorsignals  $i(t)$ . Dies ist im Einklang mit Gleichung (4).



Das Bild 19 zeigt ein typisches Resultat der Abtastung einer handpolierten Metalloberfläche mit einer mittleren Höhenvariation von 20 nm. Die Gerätekonfiguration, die wir einsetzen, war ähnlich der beschriebenen. Tiefenaufösungen in Bruchteilen von nm und Lateralaufösungen von 1  $\mu\text{m}$  konnten erhalten werden. Allerdings handelte es sich um polierte Oberflächen. Heterodyn-Verfahren sind die vielversprechendsten Verfahren für hochgenaue Profilmessung [10, 11]. Weitere Techniken werden noch entwickelt. Weiter sind Verbesserungen in Bezug auf Robustheit, aber auch auf Bereichserweiterung für den industriellen Einsatz erforderlich.

### Zwei-Wellenlängen-Heterodyn-Interferometrie

Bei der Zwei-Wellenlängen-Interferometrie handelt es sich um die Überlagerung von zwei Interferenzmustern, die mit unterschiedlichen Wellenlängen erhalten werden. Die wichtigsten Vorteile sind:

- Vergrößerung des Eindeutigkeitsbereichs mit der Erweiterung der inkrementalen zur absoluten Interferometrie und
- Messung an rauen Oberflächen.

In Bild 20 ist eine an unserem Institut entwickelte alternative Gerätekonfiguration mit hoher Auflösung schematisch dargestellt. Anstelle von Diodenlasern wird in diesem Aufbau ein Zwei-Wellenlängen-HeNe-Laser mit den Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  eingesetzt. In der ersten Beugungsordnung (unter Bragg-Bedingung) des mit der Frequenz  $f_d$  betriebenen akustooptischen Modulators (AOM) sind die Frequenzen  $\nu_1 = \lambda_1/c$  und  $\nu_2 = \lambda_2/c$  ( $c$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) zu  $\nu_1 + f_d$  bzw.  $\nu_2 + f_d$  frequenzverschoben. Die beiden Wellen haben beim Verlassen des AOM einen Winkel zueinander. Die nicht frequenzmodulierten Wellenfronten von  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  überlagern sich nach der Objektbeleuchtung nach den Strahlteilern PST mit den frequenzmodulierten. Für die Referenzwellen werden ein stationäres Gitter G und ein rotierendes Gitter RG so ausgelegt, daß die nullte Ordnung von  $\lambda_2$  und die erste Ordnung von  $\lambda_1$  nach RG parallel verlaufen.  $\lambda_1$  erleidet zusätzlich zur Frequenzmodulation vom AOM ( $f_d$ ) eine Frequenzverschiebung  $f_m$  als Folge der Gitterrotation. Referenz- und Objektwellen interferieren nach dem Polarisator, werden von einer Avalanche-Photodiode PD registriert und anschließend mit Hilfe der Auswertetechnik analysiert. In unserem speziellen Aufbau, skizziert in Bild 20, liefert ein Bandpaß mit einer Resonanzfrequenz von 20 kHz (Schwebefrequenz) das gewünschte demodulierte Signal.

Als typisches Beispiel wurde eine optisch raue Oberfläche, ein gefräster Aluminiumblock mit Stufen von 5 und 10  $\mu\text{m}$ , bei einem Verfahrensweg von 11 mm (zweimal) vermessen. Die Höhenauflösung, die noch durch mechanische und thermische Instabilitäten begrenzt wird, beträgt 0,2  $\mu\text{m}$  bei einer re-

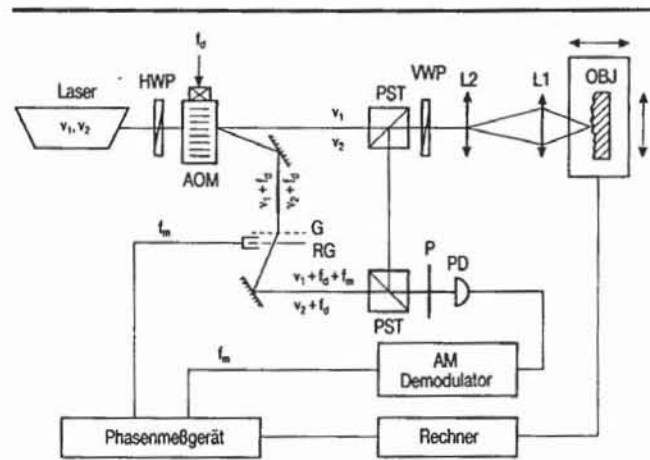


Bild 20: Prinzipskizze des Aufbaus zur 2- $\lambda$ -Heterodyn-Interferometrie

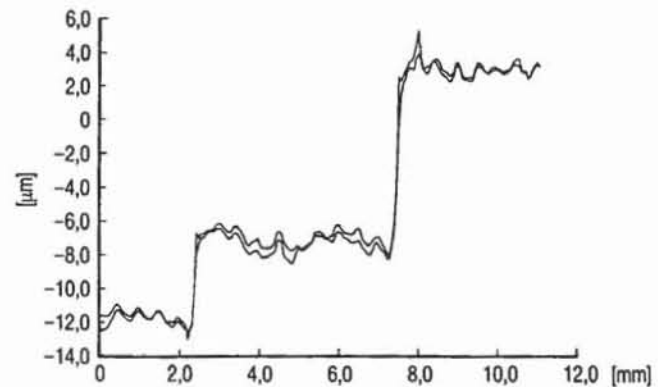


Bild 21: Ergebnis der Vermessung eines gefrästen Aluminiumblocks mit Stufen von 5  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  mit dem 2- $\lambda$ -Heterodyn-Interferometer

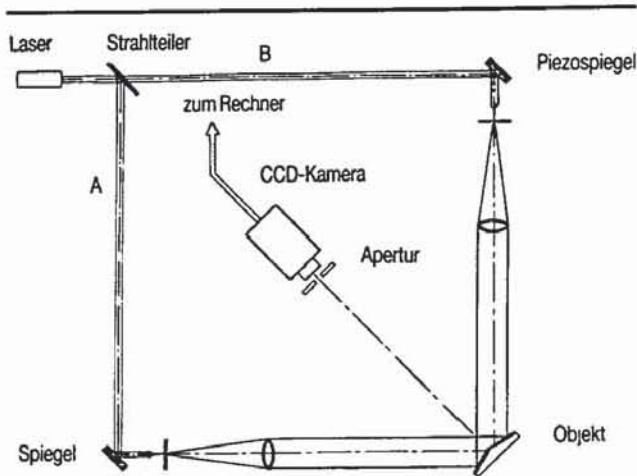
sultierenden Wellenlänge von  $\lambda_{\text{eq}} = 56 \mu\text{m}$  und einem Arbeitsabstand von 20 mm. Stellvertretend ist ein Ergebnis einer zweimaligen Abtastung in Bild 21 zu sehen. Durch das neue Verfahren wird es möglich, technische Oberflächen berührungslos hochgenau zu vermessen.

## 7. Konturvermessung mit digitaler Speckleinterferometrie

Für die Konturlinienaufzeichnung in der Holografie und Speckleinterferometrie eignen sich prinzipiell:

- Zwei-Objektstrahlverfahren
- Zwei-Brechzahlverfahren und
- Zwei-Wellenlängenverfahren.

Darüber hinaus wird hier ein Verfahren vorgestellt, bei dem Konturlinien infolge einer Objektverkipfung generiert werden. In Bild 22 ist die Skizze des Versuchsaufbaues, eines Zweistrahl-Speckleinterferometers, ersichtlich. Das diffuse streuende Objekt wird von zwei Richtungen beleuchtet und mit Hilfe einer CCD-Kamera abgebildet. Es werden zwei Specklebilder in einen Bildspeicher abgelegt; eines vor, das andere nach der Veränderung

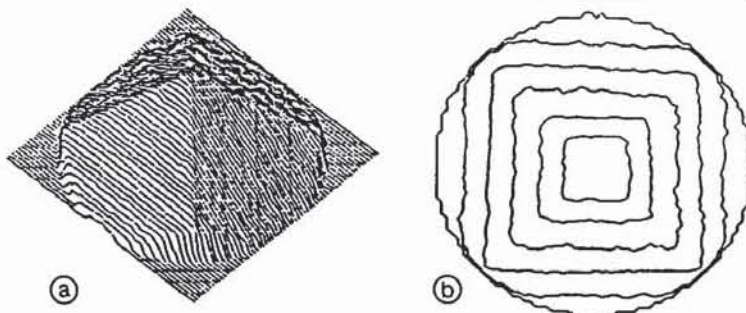


**Bild 22:** Prinzipskizze des Speckleinterferometers zur Konturvermessung

z.B. der Wellenlänge, der Brechzahl, der Einfallsrichtung oder der Objektverkipfung. Die durch die optische Wegänderung zwischen beiden Registrierungen erhaltenen Höhenschichtlinienabstände sind proportional zur verwendeten Laser-Wellenlänge und umgekehrt proportional zum Winkel zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung und der Objektverkipfung.

Die Höhenschichtlinien ergeben sich aus der Subtraktion der vor und nach der Objektverkipfung gespeicherten Specklebilder. Die Auswertung erfolgt rechnergestützt, z.B. mit Hilfe der Phasenshiftmethode, wobei die Phasenschiebung mit einem Piezospiegel im Referenzarm eingeführt werden kann.

Ein typisches Ergebnis der Konturlinienvermessung zeigt Bild 23 bei einer Objektverkipfung von 0,2 mrad. Daraus resultierte ein Höhenschichtlinienabstand von 2,2 mm bei einer Laserwellenlänge von 623 nm.



**Bild 23:** Typisches Ergebnis der Topografiebestimmung eines Metallwerkstücks

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Optische Methoden zur 3-D-Meßtechnik werden zukünftig immer wichtiger. Sie eignen sich zur schnellen, berührungslosen Erfassung der 3-D-Objektdaten, die nachher mit Methoden der Bildverar-

beitung weiterverarbeitet werden können. Die Verbindung der optischen Sensoren mit der Datenverarbeitung zu einem Sensorsystem ist sehr zukunfts-trächtig.

Ein wichtiger Parameter für die 3-D-Datenerfassung mit Kameras, z.B. für die Sichtprüfung, ist die Beleuchtungsanpassung zur optischen Vorverarbeitung. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch eine sehr schnelle variable Beleuchtung. Dynamische Beleuchtungsverfahren können zu robusteren Auswertemethoden führen.

Die berührungslose 3-D-Meßtechnik wird auch für die immer wichtiger werdende Qualitätssicherung allein und in Verbindung mit der Bildverarbeitung von Bedeutung sein.

### Literatur

- [1] Hobrough, G.L.: A Future for Realtime Photogrammetry, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Sept., Heft 9 (1985), pp. 312-315
- [2] Murai, S., Otomo, F., Ohtani, H.: Automated Three-Dimensional Measurements using stereo CCD camera in the Application to close range photogrammetry. Proc. of the Symposium „Real time Photogrammetry – A new Challenge“, June 16-19, 1986 Ottawa, Camadi Inst. Arch. of Phot. and Remote Sensing, Vol. 26, Part 5 (1986), pp. 409-413
- [3] Optical Engineering „3-D-Sensing for inspection“. Collection of papers in optical Engineering“, Vol. 24 (1984), pp. 925-980
- [4] Strand, T.C.: Optical Three-dimensional Sensing for Machine Vision. Optical Engineering 24 (1985), pp. 33-40
- [5] Tiziani, H.J.: „Automatisierung der optischen Qualitätsprüfung“, Technisches Messen, tm 55 (1985), pp. 481-491
- [6] Kompa, G., IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-33, Nr. 2, June (1984), pp. 97-100
- [7] Lettieri, T.R.: „Pulsed Laser caliper for noncontact dimensional measurement“, Appl. Opt. 25 (1986), pp. 1443-1449
- [8] Seitz, G., Tiziani, H.J., Litschel, R.: „3-D-Koordinatenmessung durch optische Triangulation“, Feinwerktechnik & Meßtechnik 94 (1986) 7, pp. 423-425
- [9] Zumburn, R.: „Automatic fast shape determination of diffuse reflecting object at close range by means of structured light and digital phase measurement“, ISPRS, Intercommission conf. on fast processing of photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland (1987)
- [10] Leonhardt, K., Rippert, K.H., Tiziani, H.J.: „Optische Mikroprofilometrie und Rauheitsmessung, Technisches Messen, tm 54 (1987), pp. 243-252
- [11] Tiziani, H.J.: „Lasergestützte Meßtechnik“, Technisches Messen, tm 54 (1987), pp. 221-230
- [12] Wilson, T., Sheppard, C.: „Theory and Practice of Scanning optical microscopy“, Academic Press, London (1984)
- [13] Tiziani, H.J.: „Optical methods for precision measurements“, Optical and Quantum electronics 21 (1989), pp. 253-282
- [14] Binning, G., Rohrer, H., Gerber, C.H., Weibel, E., Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 57
- [15] Küchel, F.M., Tiziani, H.J.: „Real time contour holography using BSO crystals“, Optics Comm. 38 (1981), pp. 17-20
- [16] Wahl, F.M.: „A coded light approach for depth mac acquisition, in „Mustererkennung 1986“, G. Hartmann (ed), Springer Verlag (1986)
- [17] Malz, R.: Der Einsatz schneller Beleuchtungsoperationen für robuste Merkmalsextraktion und Segmentierung in der industriellen Objekterkennung und Qualitätsprüfung. 10. DAGM-Symposium, Zürich, Informatik-Fachbereich 180, Springer (1988)