

Oberflächenmesstechnik mit optischen Verfahren



H. J. Tiziani¹

Nach der Einführung des Lasers haben leistungsfähige Bildspeicher- und Bildverarbeitungsverfahren, zusammen mit den Tisch-Computern, den industriellen Einsatz der optischen Messverfahren erweitert oder erst ermöglicht. Es wird noch einige Zeit dauern, bis die Universalität und Lernfähigkeit des menschlichen Sichtprüfers von optischen oder elektrooptischen Verfahren übernommen werden können. Teilaufgaben in der Serienprüfung werden zukünftig aber vermehrt von optischen Sensoren mit Rechnerunterstützung ausgeführt werden.

Für das dimensionelle Messen und den Formvergleich eignen sich berührungslose, optische Verfahren, die punktwise oder flächenhaft arbeiten. Auch der «sehende» Roboter ist keine Utopie mehr. Die optische Messtechnik hat verschiedene Phasen durchlaufen. Sie ist nach der Einführung des Lasers, 1960, und der Bereitstellung von kleinen Halbleiterlasern und Halbleiter-Flächenkameras (CCDs), aber besonders wegen der Entwicklung leistungsfähiger Computer, wieder im Aufwind.

Auch die 1965 eingeführte Holografie hat nach der ersten Euphorie und den anschließenden Rückschlägen wirtschaftliche Bedeutung erlangt, allerdings für gezielte Anwendungen. Beispielsweise werden Reifen speziell für die Flugzeugindustrie einer holografischen Hundertprozent-Prüfung unterzogen. Schwin-

gungs-, Verformungs- und Bewegungsanalysen, aber auch die Konturlinienaufzeichnung, sind weitere Anwendungen der Holografie. Moiré-Techniken erweitern bzw. ergänzen die Holografie zur Bewegungs-, Verformungs- und Konturmessung.

Lasertechniken werden weiterentwickelt zur berührungslosen Objekterkennung, zum Formvergleich, zur Qualitätssicherung und Fehlererkennung in der flexiblen Fertigung und Montage. Anstrengungen werden unternommen, um zu einem «sehenden» Roboter zu gelangen.

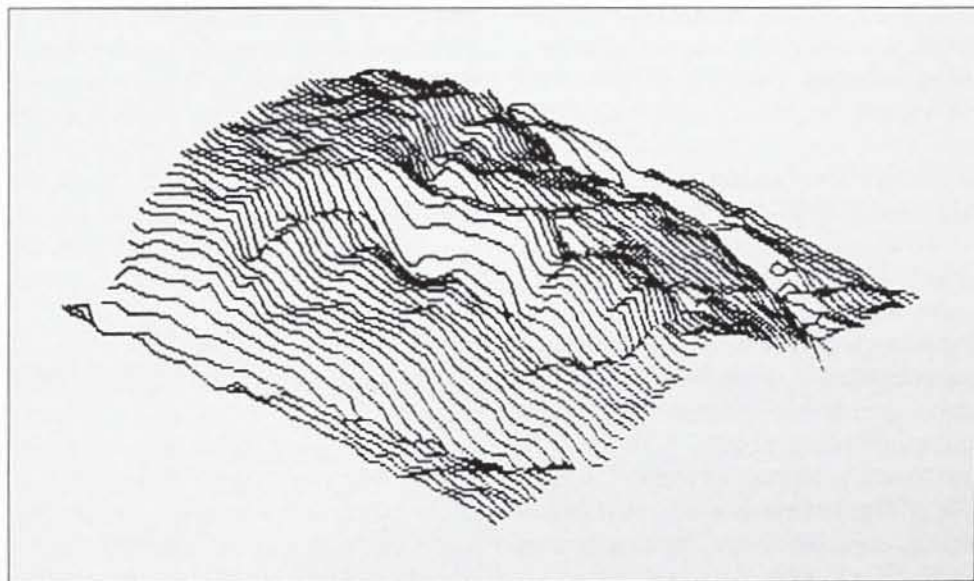


Abb. 1
Oberflächenprofil eines Werkstücks, aufgenommen nach dem Phasenmessprinzip. Objektstand 1 m, Höhenauflösung 2 mm bei einer Modulationsfrequenz von 50 MHz, Messzeit/Punkt 0,1 sec.

¹ Prof. Dr. H. J. Tiziani ist Direktor des Instituts für Technische Optik der Universität Stuttgart sowie Vorsitzender des Grossen Senats der Universität Stuttgart. Er ist auch Governor der SPIE (International Society of optical Engineering) und war Präsident der OD, der Europ. Physik. Gesellschaft.

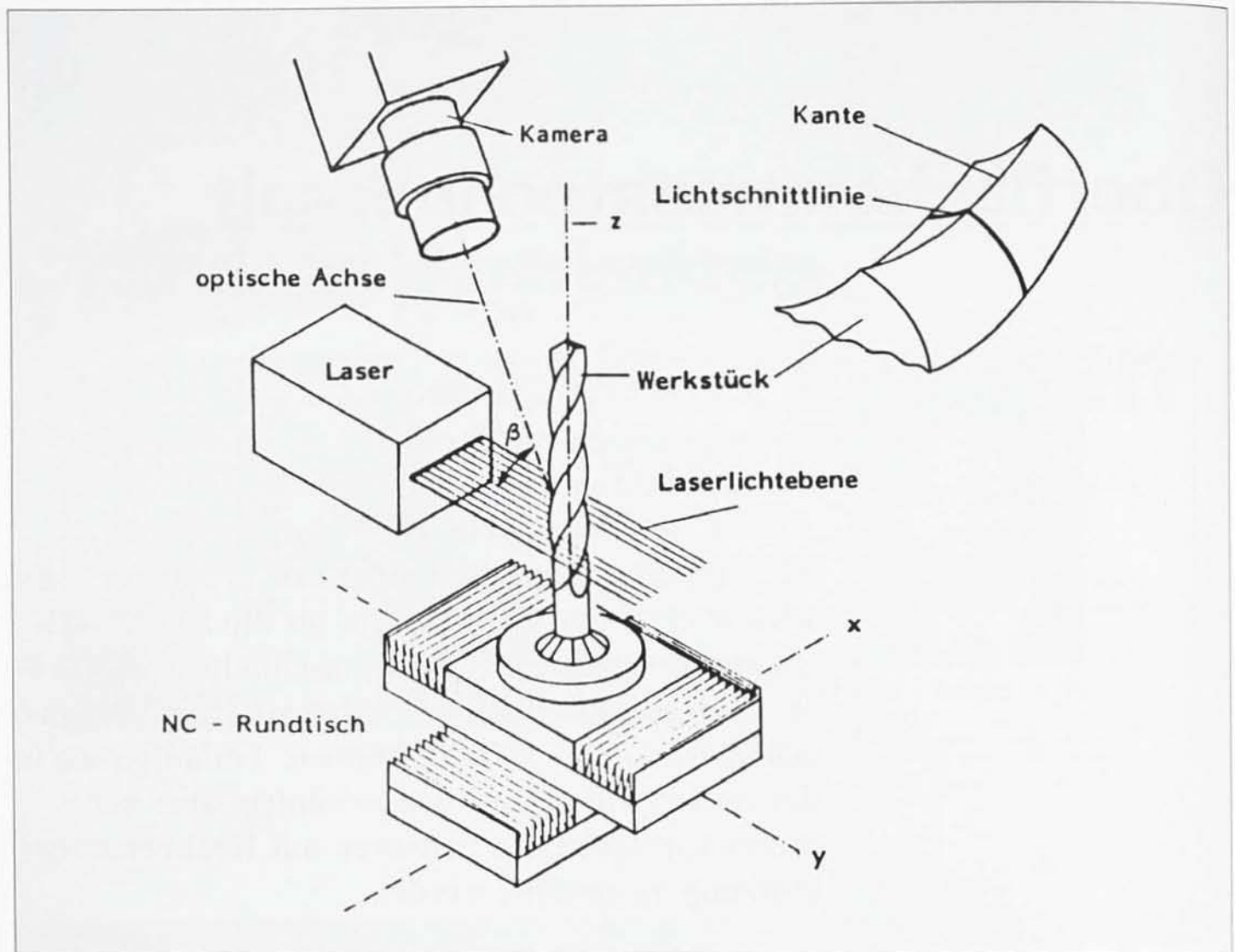


Abb. 2
Prinzip des Lichtschnittverfahrens nach Schmalz.

Die optische Messtechnik spielt nicht nur bei der hochgenauen Abstands- und Winkelmessung eine immer wichtigere Rolle, sondern auch bei der Oberflächenmesstechnik, bei der Makro- und Mikrostrukturanalyse.

Optische Verfahren zur Abstands- und Profilmessung

In der modernen Messtechnik werden neue Sensoren, basierend auf neuen Technologien, aber auch auf altbekannten Grundlagen, teilweise mit Rechnerunterstützung entwickelt und eingesetzt.

Im Zusammenhang mit der digitalen Bildverarbeitung stehen neuronale Netzwerke, wissensbasierte Systeme, aber auch die optische Vorverarbeitung zur Datenreduktion, zusammen mit der Parallelverarbeitung, im Vordergrund. Bedeutende Fortschritte werden in naher Zukunft zu erwarten sein. Eine Kombi-

nation von Verfahren wird zukünftig vermehrt berücksichtigt werden.

Für die Oberflächentopografie, wo die 3-D-Information ermittelt werden muss, wird die herkömmliche digitale Bildverarbeitung noch weitere Unterstützung benötigen. Vorerst sollen einfache Verfahren diskutiert werden, bei denen die vorwiegend optischen Methoden und die optische Vorverarbeitung – und nicht die digitale Bildverarbeitung – bevorzugt werden.

Das bekannteste Verfahren der Profilmessung ist die 3-D-Koordinatenmessung mit taktilen Tastsystemen mit Rechnerunterstützung. Der Entwicklungsstand dieser mechanischen Koordinatenmesstechnik ist sehr hoch und die Geräte sind schon lange eingeführt. Es bestehen aber Grenzen der berührenden Verfahren, besonders bei empfindlichen, weichen Oberflächen und im Einsatz in der Fertigung.

Punktmessungs- und flächenhafte Verfahren

Punktmessende Verfahren sind:

- Laufzeitmessung
- Phasenmessung
- Lichtschnitt
- Triangulation
- Astigmatische Fokussierung
- Fotometrische Gleichgewichts-Verfahren (Balance, Foucault)
- Heterodyn-Verfahren.

Unter flächenhaften Verfahren versteht man:

- Moiré bzw. strukturierte Beleuchtung
- Interferometrie
- Holografie
- Bildverarbeitung.

Diese aufgeführten Verfahren eignen sich für die berührungslose, optische Profilmessung.

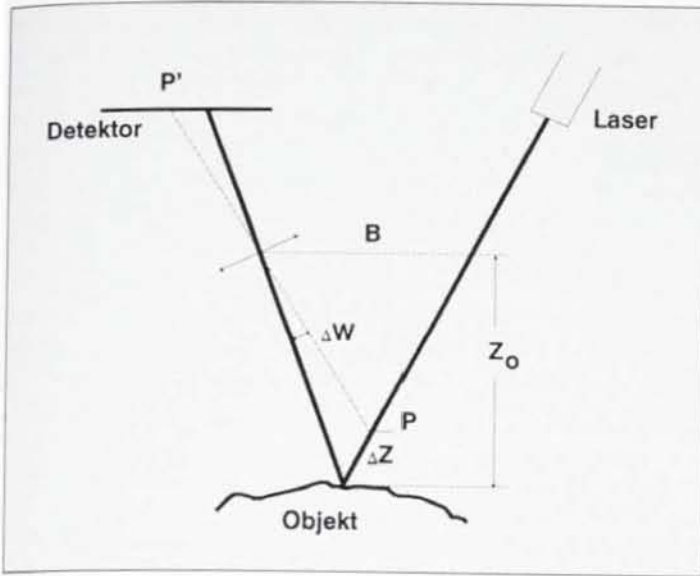


Abb. 3
Prinzip der Triangulation.

Abb. 4
Abtastende Triangulation für 3-D-Messung.

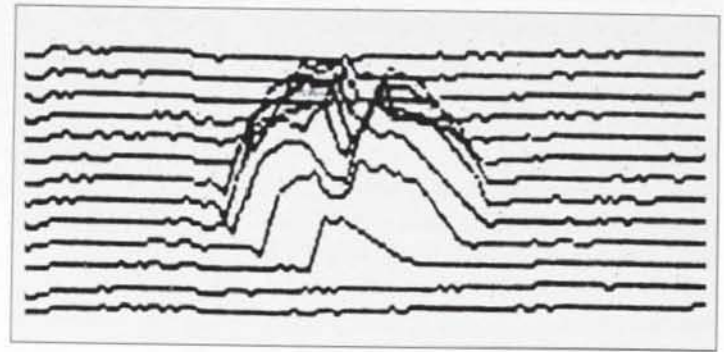
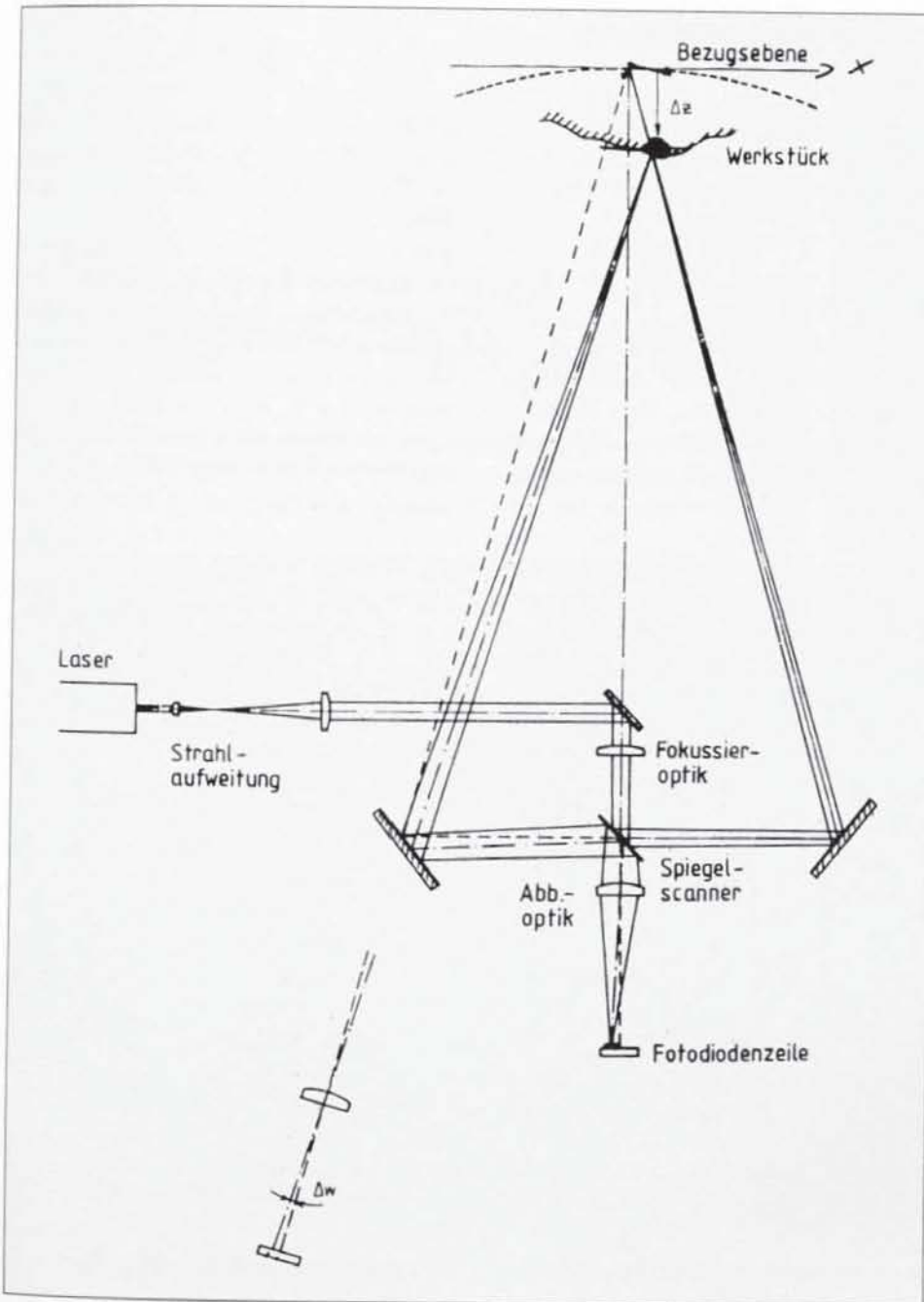


Abb. 5
Aufzeichnung der mäanderförmigen Abtastung eines Werkstücks mit dem in Bild 4 skizzierten abtastenden Triangulationsverfahren.

Laufzeit- und Phasenmessung

Bei der Laufzeitmessung werden Pulse oder Pulsfolgen detektiert. Das Produkt aus der Zeit (zwischen Aussendung und Empfang) und der Lichtgeschwindigkeit führt zur doppelten Distanz. Die Methode ist sehr einfach, wenn eine Distanzauflösung im cm-Bereich gefordert wird. Für mm-Auflösung muss der elektronische Aufwand wesentlich gesteigert werden (ps-Laserpulse oder-Pulsfolgen und ps-Elektronik sind erforderlich).

Bei der Phasenmessung wird die Objektdistanz durch die Phasenmessung zwischen z. B. sinusförmig moduliertem Laserstrahl und dem vom Objekt zurückgestreuten Signal ermittelt. Allerdings wird für eine genaue Messung eine hohe Modulationsfrequenz gefordert, da die Phasenmessung bestenfalls auf einige zehntel Grad realisiert werden kann und dies auch nur bei gutem Signal/Rausch-Verhältnis.

Elektronische Distanzmessgeräte hoher Präzision arbeiten nach dem Prinzip der Phasenmessung. Im Gerät wird eine Messwelle von genau definierter Frequenz (5 MHz bis 500 MHz) einem Träger aufmoduliert und der gesamte Phasenunterschied ϕ zwischen dem Punkt der Abstrahlung und dem Empfangspunkt der über die Messstrecke hin- und zurücklaufenden Messwelle bestimmt. Daraus folgt zu messende Strecke z. *Abb. 1* zeigt eine Profilmessung eines 3-D-Objektes aus einer Distanz von 1 m mit mm-Auflösung bei einer Modulationsfrequenz von 50 MHz.

Für die Phasenmessung bieten sich heute neben Dioden mit grossen Strahldichten Halbleiterlaser an; dabei erfolgt die Modulation über die Strommodulation. Es

muss aber auf eine konstante Temperatur geachtet werden. Die Halbleiterlaser können zukünftig auch vermehrt für 2- λ -Verfahren (2-Wellenlängenverfahren) eingesetzt werden.

Es können auch 2- λ -Verfahren für größere Messbereiche eingesetzt werden. Bei der Überlagerung von 2 Wellenlängen λ_1 und λ_2 ergibt sich eine äquivalente Wellenlänge A

$$A = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

Für $A = 10 \mu\text{m}$ ergibt sich eine Auflösung von 100 nm. Auf den Einfluss der rauhen Oberfläche soll hier nicht eingegangen werden.

Für die Abstandsmessung bieten sich direktes Mischen der Signale, Heterodyn- und Phasenschiebemethoden an. Für hochgenaue Auflösung eignen sich Heterodynverfahren [1, 2]. Alternative Verfahren mit zum Teil reduzierter Auflösung sollen hier nachfolgend kurz erläutert werden.

Ein einfaches und schon relativ altes Verfahren zur optischen Oberflächenprüfung ist das Lichtschnittverfahren von Schmaltz. Dabei wird ein Lichtspalt auf den Prüfling, z. B. unter 45 Grad, abgebildet. Der so entstehende Profillichtschnitt wird z. B. fotoelektrisch detektiert und ausgewertet. Die seitliche Versetzung ist ein Mass der dritten Dimension. *Abb. 2* zeigt prinzipiell eine Anordnung (vorgestellt von Schreiber, Fraunhofer Institut, Stuttgart). Sollen mehrere Schnitte durchgeführt werden, muss das Objekt verschoben, evtl. auch verdreht, oder ein Rechen von Lichtlinien erzeugt werden.

Eine dem Lichtschnittverfahren ähnliche Methode ist die Triangulation. Dabei wird ein Lichtpunkt, z. B. von einem Laser, möglichst schräg auf das Objekt projiziert. Die Versetzung des Lichtpunktes ist ein Mass für die Tiefeninformation.

Laser-Triangulation

Für die punktweise Vermessung im Nahbereich ist die Triangulation weit verbreitet. *Abb. 3* zeigt eine Standardanordnung der Laser-Triangulation zur Abstandsmessung. Ein Lichtstrahl markiert auf dem Objekt einen Punkt P, der durch die Optik L auf den ortssensitiven fotoelektrischen Detektor T (z. B. positionsempfindliche Diode oder Diodenzeile) in P' abgebildet wird. Die gegen den Laserstrahl geneigte Anordnung der Auswertoptik mit Detektor erlaubt die Ab-

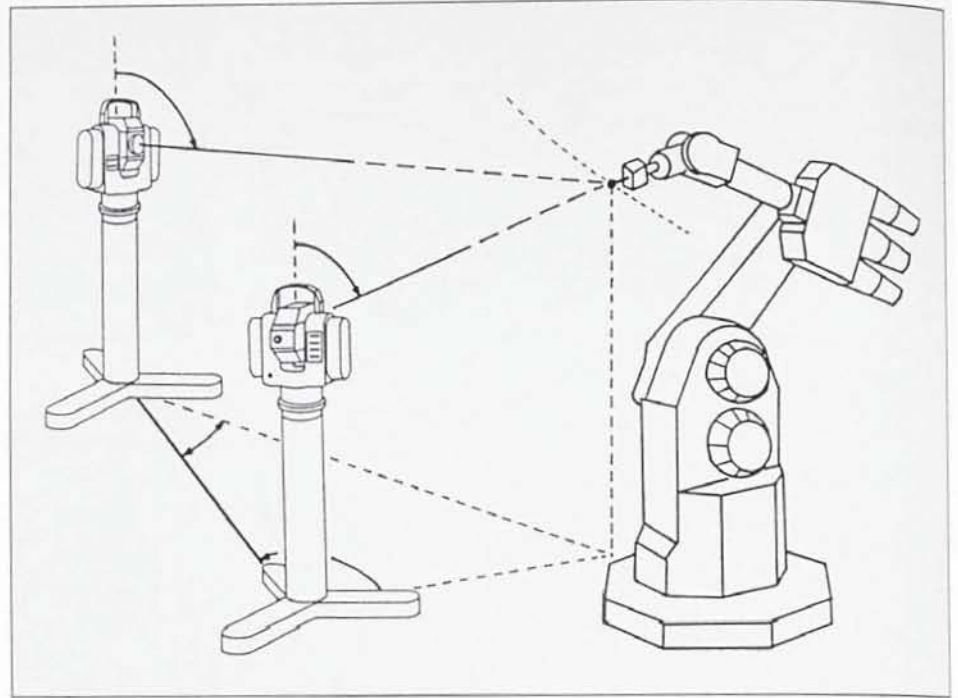


Abb. 6
Einsatzbeispiel eines Industrie-Vermessung-Systems mit motorisierten Theodoliten zur Roboterkalibrierung.

standsbestimmung, z. B. anhand der seitlichen Versetzung der Punktbildposition. Die Auflösung des Verfahrens errechnet sich bei $B \ll z_0$ nach *Abb. 3*

$$\Delta z = \frac{z_0^2}{B} \Delta W, \quad \textcircled{1}$$

wobei B die Basis und ΔW die Winkelauf- lösung des Sensors sind. Das Verfahren ändert quadratisch mit dem Arbeitsab- stand z_0 , was zusammen mit der praktisch zulässigen Basis die Grenzen bei grös-

seren Arbeitsabständen festlegt. Es sollte auch darauf geachtet werden, dass die Scheimpflug-Bedingung eingehalten wird.

Abb. 4 veranschaulicht eine Prinzipskizze der abtastenden Triangulation. Der Beleuchtungslaserstrahl wird vom rechner- gesteuerten Galvanospiegel zur gewählten Objektposition geführt. Der Licht- fleck wird z. B. über die Rückseite des Galvanospiegels mit Hilfe der Linse auf dem Fotodetektor abgebildet. Die Ver- setzung des Bildpunktes führt zur z-

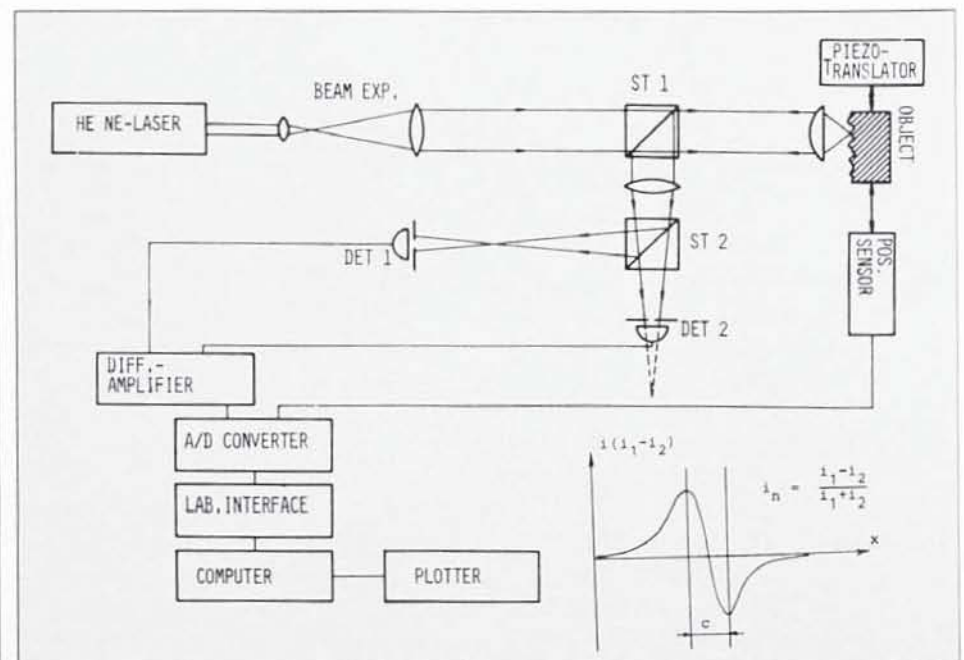


Abb. 7
Anordnung zur Mikroprofilometrie mit Hilfe des fotometrischen Gleichgewichts-Verfahrens.

Koordinate, die auf eine Referenzebene bezogen wird. Das Prinzip kann erweitert werden zum dreidimensionalen Taster durch eine zweite Ablenkungseinheit. Bei der von uns gewählten Konstruktion wird das Verfahren zur Vollständigkeitsprüfung, z. B. von Leiterplatten und anderen Montageobjekten entwickelt. Dabei wird der abtastende 3-D-Taster die 3-D-Positionen des Werkstückes einlernen oder sie werden eingemessen, um sie nachher mit den Werkstücken zu vergleichen.

Abb. 4 zeigt schematisch den Aufbau mit dem rechnergesteuerten Galvanospiegel für die Ablenkung in der x-Koordinate. Für die y-Koordinate wurde der Aufbau mit einem zweiten Galvanospiegel ergänzt. Die entsprechenden z-Koordinaten werden über die Triangulation eingemessen. Das Verfahren ist speziell für die schnelle 3-D-Punktmessung an unserem Institut entwickelt worden und wird gezielt, z. B. in der flexiblen Fertigung und Montage, eingesetzt werden, aber auch zur Vermessung von Ausschnitten von

Leiterplatten. Die Messzeit pro Punkt beträgt wenige ms (bei $\Delta z = 0,1$ mm und $z_0 = 50$ cm).

Abb. 5 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer mäanderförmigen Abtastung eines Werkstückes. Für schnelle Abtastungen kann der Galvanospiegel durch ein rotierendes Prisma ersetzt werden.

Auf der Triangulation basieren auch das Industrievermessungssystem der Firma Wild sowie das von der Firma Kern Aarau 1987 fertigerstellte vollautomatisierte Industrievermessungssystem «space». Damit können industrielle Messaufgaben, die zur Zeit noch mit konventionellen Messmitteln ausgeführt werden, rationell gelöst werden. Besonders geeignet ist das Verfahren bei schwer zugänglichen Objekten. Die Systeme basieren auf 2 bis 4 Theodoliten (Abb. 6). So wird z. B. der Laserpunkt vom ersten Theodoliten mit dem zweiten vermessen. Durch die hohe Winkelmessgenauigkeit ($0,3''$) der motorgetriebenen Theodoliten bieten sich hervorragende Bedingungen für anspruchsvolle Messaufgaben. Die on-line-Verarbeitung der Messwerte und ihre graphische Darstellung erfolgt über einen Tischcomputer. Dabei wird die Grobposition mit Hilfe der motorisch angetriebenen Theodoliten eingestellt. Die Feinpositionsbestimmung des Messpunktes erfolgt über die CCD-Kamera. Objektmerkmale oder Markierungen können mit Hilfe der beiden Theodolite mit kalibrierter Basis auch visuell angefahren und automatisch vermessen werden. Die Auflösung liegt in der Gegend von 0,1 mm.

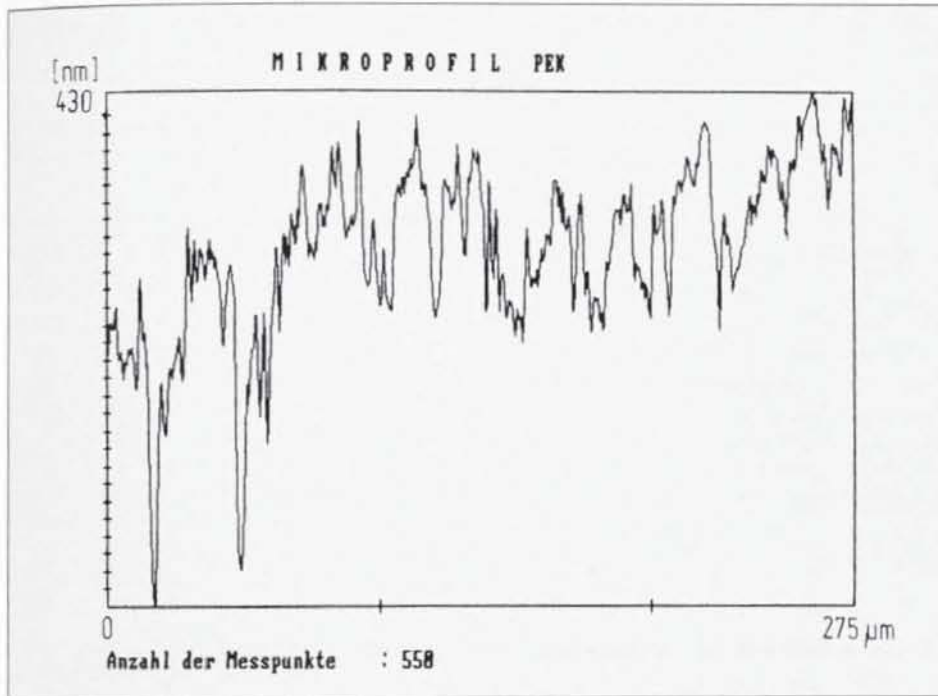
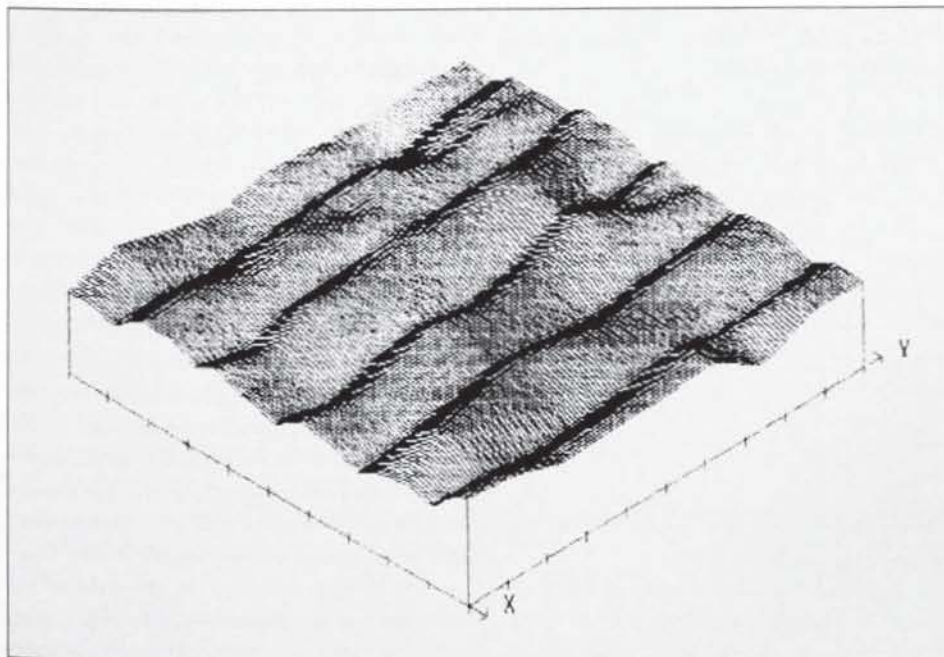


Abb. 8
Mikroprofil einer gesinterten Keramikoberfläche, gemessen mit dem fotometrischen Gleichgewichts-Verfahren.

Abb. 9
Ausschnitt einer diamant-gedrehten Oberfläche, vermessen mit dem abtastenden Heterodyn-Interferenz-Verfahren. Die maximale Profilerhöhung beträgt $\Delta h = 50$ nm.



Astigmatische Fokussierung

Das astigmatische Fokussierungsverfahren ist ein einfaches Verfahren mit guter Tiefenauflösung. Das Prinzip basiert auf der Autokollimation. Ein Lichtpunkt S wird auf den Prüfling in S' abgebildet und durch Autokollimation über den Strahlteiler auf den positionsempfindlichen Detektor, der eine Zylinderlinse vorgeschaltet hat.

Damit entstehen zwei Brennlinien (sagittal, tangential). Befindet sich der 4-Quadrantendetektor in der Mitte zwischen den Brennlinien, ist der detektierte Lichtfleck symmetrisch; andernfalls gibt die Asymmetrie die Fokussierposition an; das Objektiv wird entsprechend nachfokussiert. Alternativen sind das Gleichgewichtsverfahren bzw. das Balance- und das Foucault-Verfahren. Die Tiefenauflösung ist in der Gegend von 0,1 Mikrometer.

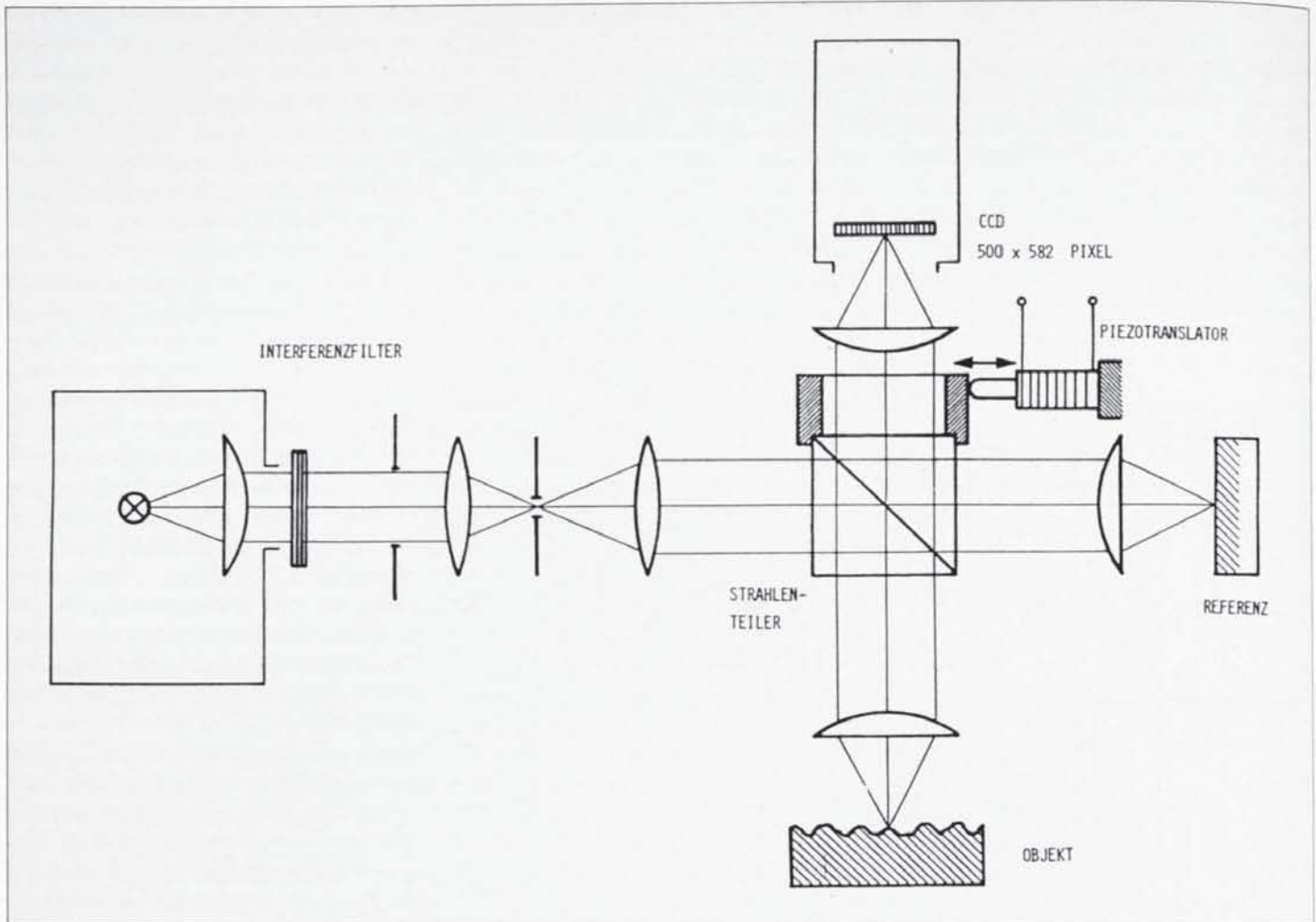


Abb. 10
Aufbau eines modifizierten Wild-Leitz-Interferenz-Mikroskops zur interferometrischen, flächenhaften Mikroprofil-
messung mit automatischer Streifenwertung.

Fotometrisches Gleichgewichts-Verfahren

Beim Fotometrischen Gleichgewichts-Verfahren (Balance-Verfahren), das ebenfalls in Autokollimation arbeitet, wird das Beugungsbild des Stützpunktes durch eine Blende beschnitten, so dass bei Defokussierung weniger Licht auf den Detektor hinter der Blende fällt. Zur eindeutigen Positionsbestimmung (Vorzeichen), und um auch möglichst unabhängig von Lichtschwankungen zu sein, empfiehlt sich ein Aufbau nach *Abb. 7*, bei dem die Blenden symmetrisch zum Autokollimationspunkt angeordnet werden (intra- und extrafokal) [2]. Die Objektposition ermittelt sich aus den Detektorsignalen I_1 , I_2 nach

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

Für einen kleinen Arbeitsbereich bietet sich die Aufnahme einer Kennlinie an; für grössere Defokussierung wird auto-

matisch nachfokussiert. *Abb. 8* zeigt am Beispiel der Mikrorauheitsmessung einer gesinterten Keramikoberfläche (Dichtungsfläche einer Wasserpumpe) die Möglichkeiten unseres Verfahrens. Die Tiefenauflösung des am Institut entwickelten Verfahrens liegt bei 20 Nanometern bei einer seitlichen Auflösung von wenigen Mikrometern.

Eine weitere Möglichkeit zum berührungslosen Abtasten ist die Auswertung der Kantensteilheit im Bild. Dazu werden allerdings natürliche oder künstliche Kanten im Objekt nötig. Ein direkter Vergleich der verschiedenen Verfahren ist insofern schwierig, da die Auflösung von der Apertur des Systems, aber auch vom Messbereich und Arbeitsabstand abhängt.

Interferometrische Verfahren

Für hochgenaue Messungen zur Bestimmung der Mikro- und Makrostruktur der Oberfläche eignen sich interferome-

trische und holografische Verfahren. Vorteilhaft wirkt sich dabei die automatische Streifenwertung aus, welche die Verfahren erst industriereif macht. Die Einführung leistungsfähiger Kleinrechner und Bildspeicherplatinen haben die Entwicklung enorm beschleunigt. Die Einsatzmöglichkeiten sind aber vorerst auf relativ glatte, polierte Oberflächen begrenzt.

Interferometrie für Punktmessung

Bei der interferometrischen Punktmessung wird jeweils ein Laserspot von einem bis wenigen Mikrometern Durchmesser auf die Oberfläche fokussiert. Die Höhenvariationen werden mit der Referenzwelle verglichen und mit verschiedenen Verfahren ausgewertet. Die Vermessung des Unterschieds kann direkt über die Phasenmessung erfolgen. Beim Heterodyn-Verfahren wird beispielsweise im Referenzstrahl die Frequenz um einige MHz verschoben, um Höhenvariationen

als Frequenzänderung genauer vermessen zu können [1, 2]. Die Auflösung kann bis auf Bruchteile von Nanometern gesteigert werden, allerdings bleibt die Dynamik bzw. der Messbereich begrenzt auf Bruchteile von Mikrometern. An der Bereichserweiterung der Verfahren wird noch gearbeitet. Beispielhaft wird das Verfahren zur Vermessung durch punktweise Abtastung einer glatten, diamantgedrehten Oberfläche eingesetzt, wie dies in *Abb. 9* vorgestellt wird. Vermessen wurde die Probe mit dem von uns entwickelten 2-Frequenzen-Interferometeraufbau; Frequenzunterschied $\Delta f = 2$ MHz.

Interferometrie für flächenhafte Messung

Abb. 10 zeigt schematisch den Aufbau eines Mikroskops mit einem von uns abgewandelten Linnik-Interferenzaufbau zur automatischen Streifenauswertung nach

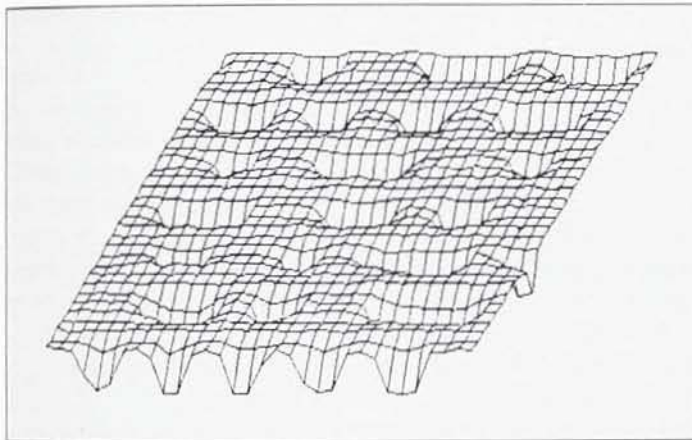


Abb. 11
CD-Platte in pseudo 3-D-Darstellung des mit Hilfe des Interferenzverfahrens mit automatischer Streifenauswertung ermittelten Profils. Der Bereich ist $10 \times 12 \mu\text{m}^2$ und $\Delta h_{\text{max}} = 150 \text{ nm}$.

dem Phasenschiebprinzip. Am Strahlenteiler wird die Lichtwelle (meistens Weisslicht) in Referenz- und Objektwelle aufgeteilt und wieder vereinigt. Die Interferenzstreifen werden auf einem CD-Array-Empfänger abgebildet und mit Hilfe einer Bildspeicherkarte gespeichert und automatisch ausgewertet. Zur Auswertung eignen sich leistungsfähige Kleinrechner. Zur eindeutigen Bestimmung des Oberflächenprofils wird die Phase bzw. der optische Weg im Interferometeraufbau beispielsweise um 90° geschoben. Dazu wird im vorhandenen Aufbau ein Strahlenteiler mit Piezoelementen rechnergesteuert verschoben, um zwischen Referenz- und Messstrahl die nötige Phasenänderung einzuführen. *Abb. 11* zeigt beispielhaft die Mikrostruktur der Oberfläche einer CD-Disk. Die Auswertung dauert wenige Sekunden. Die Tiefenauflösung kann besser sein als ein Nanometer.

Moiré- und holografische Verfahren ergänzen die flächenhaften Oberflächen-

messverfahren. Für den industriellen Einsatz zur Konturlinienaufzeichnung sind Moirémethoden zwar weniger empfindlich, dafür aber auch weniger störungsanfällig. Auf diese Verfahren soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Materialuntersuchung mit Hilfe der Wärmewellen

Optische Verfahren eignen sich nicht nur für die Aufzeichnung von Oberflächentopografien und Formen, sondern können auch für die Materialuntersuchungen herangezogen werden. Zwar sind die akustischen und Röntgen-Methoden besser bekannt als die neuartigen optischen, die kurz erläutert werden.

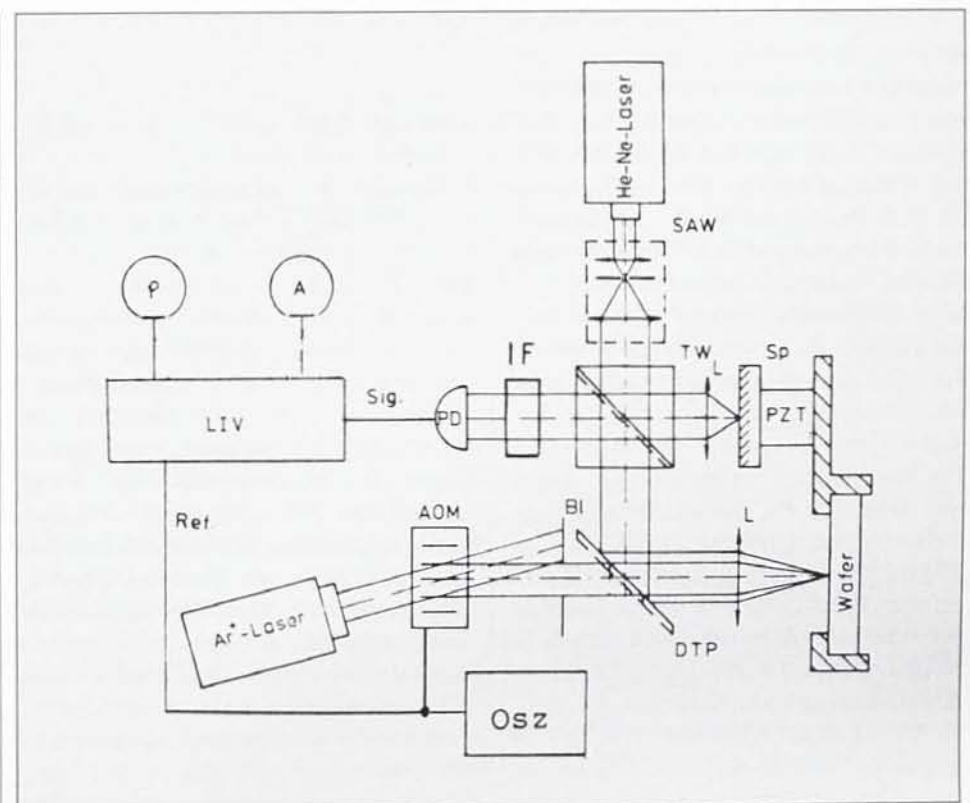
Wird ein Material lokal erwärmt, breitet sich eine Wärmewelle im Material aus. Diese führt zu einer kleinen Oberflächenverformung von wenigen Nanometern,

die interferometrisch vermessen werden kann [3]. Wird zusätzlich der Laser, der die Wärmewelle injiziert, moduliert, kann das zeitliche Verhalten bzw. die Phase detektiert werden.

Abb. 12 zeigt schematisch einen Aufbau zur Detektion der lokalen Verformung am Beispiel der Untersuchung von Silizium-Wafern. Ein mit akustooptischem Modulator (AOM) amplitudenmodulierter Ar^+ -Laser erwärmt lokal das Testobjekt. Die Oberflächenverformung wird mit einem Zweistrahl-Interferenzaufbau mit Hilfe des Phase-Lock-Verfahrens über den dichroitischen Strahlteiler gemessen. Dazu wird der He-Ne-Laser eingesetzt.

Der fokussierte Argon-Laser hat auf der Probenoberfläche eine Leistung von ca. 100 mW und erwärmt den Wafer daher lokal und zerstörungsfrei. Da diese periodische Erwärmung der Probenoberfläche Verformungen im Nanometerbereich oder sogar noch kleiner zur Folge hat,

Abb. 12
Aufbau zur interferometrischen Untersuchung von Dotierungen von Silizium-Wafern. Der Ar^+ -Laser, moduliert mit dem akustooptischen Modulator, AOM, erwärmt die Oberfläche lokal. Der dichroitische Strahlteiler, DTP, trennt die Messwelle des He-Ne-Lasers von der Heizwelle.



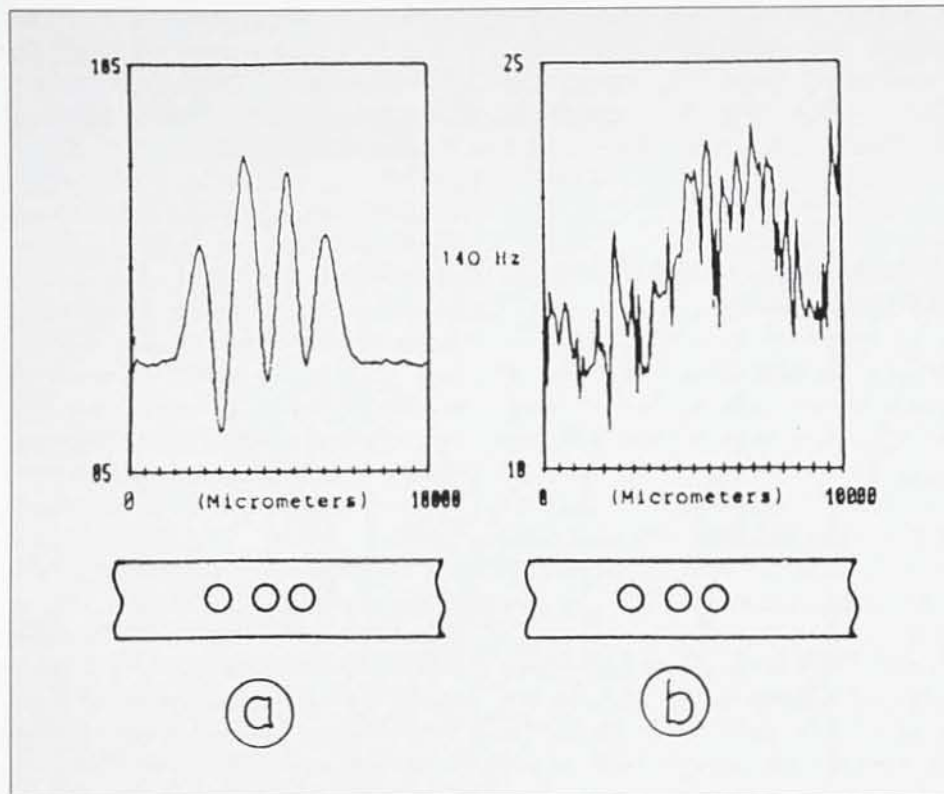


Abb. 13
Materialhomogenitätsprüfung durch optische bzw. interferometrische Vermessung der Wärmedehnung
Bild 13a zeigt die Phasenstörung durch die Löcher in der 3,7 mm dicken Al-Platte und 13b die entsprechende Amplitudenmessung.

muss der Arbeitspunkt des Interferometers in den empfindlichsten Bereich der Interferometer-Kennlinie geregelt werden. Dies erfolgt mit Hilfe des Piezo-Translators (PZT) im Referenzarm.

Das zu untersuchende Objekt, z. B. ein Wafer, befindet sich auf einem x-y-Scantisch. Um den Einfluss von Erschütterungen möglichst zu reduzieren, sind Referenz- und Prüfwelle nebeneinander angeordnet. Ausgewertet wird das Interferometersignal mit Hilfe eines Lock-In-Verstärkers (LIV). Um das Werkstück, z. B. den Wafer zu untersuchen, wird in unserer Anordnung der Wafer vollautomatisch abgetastet und an jedem Messpunkt werden Amplitude und Phasenlage der Oberflächenverformung registriert.

Beispielhaft ist in *Abb. 13* das Ergebnis der eindimensionalen Abtastung einer Al-Platte von 3,7 mm Dicke mit drei Löchern (im Durchlicht) wiedergegeben. Die Modulationsfrequenz der Ar⁺-Laser war dabei 140 Hz. Sie wurde mit einem mechanischen Chopper anstelle des in *Abb. 12* schematisch gezeigten AOM eingeführt. Deutlich sind in der Phasenmessung die Störungen durch die drei Bohrungen von je 0,8 mm Durchmesser im Abstand von 0,9 mm sichtbar.

In *Abb. 14* ist ein Ausschnitt von 20 × 20 μm² eines Silizium-Wafers, in Reflexion, zu sehen, allerdings bei einer Modu-

lationsfrequenz des Ar⁺-Lasers von 20 kHz, die mittels des akustooptischen Modulators eingeführt wurde. Der dotierte Kanal ist deutlich sichtbar. Die Eindringtiefe beträgt bei dieser Modulationsfrequenz 10 μm. Durch Anpassung der Modulationsfrequenz kann die Eindringtiefe materialabhängig variiert werden.

Anwendung der Bildverarbeitung

In der ständigen Auseinandersetzung um die Schaffung wirtschaftlicher Produktionsbedingungen kommt den industriellen Bildverarbeitungssystemen eine grosse Bedeutung zu. Dabei werden Bilder von Prozessgrössen oder Produktionsergebnissen über Videokameras (überwiegend Halbleiter-Flächenkameras, CCDs) aufgenommen und in logische Daten gewandelt. Sie sollen menschliches Seh- und Entscheidungsvermögen ersetzen oder diesem mit maschinellem Seh- und Entscheidungsvermögen zur Seite stehen. Der menschliche Sehapparat mit seinen neurologischen Subsystemen ist nicht dazu geschaffen, in schneller Abfolge stets gleiche Werkstücke auf stets dieselben Merkmale zu überprüfen.

Bildverarbeitungssysteme entlasten den

Menschen von diesen monotonen und nervlich strapaziösen Aufgaben und eliminieren die unvermeidlichen Fehler bei der 100% Sichtprüfung und bei der manuellen Prozesssteuerung. Industrielle Bildverarbeitungssysteme ermöglichen darüber hinaus erst den effektiven Einsatz von Handhabungsgeräten für Werkstückmontage in flexiblen Fertigungssystemen.

In der Bildverarbeitung geht es um das Erkennen von Objekten sowohl in bezug auf ihre Lage, Form und Oberfläche, als auch deren Abweichungen und Fehler. Werkstücke sind u. a. charakterisiert durch drei Koordinaten jedes auflösbaren Objektelements, Oberflächenbeschaffenheit und Farbe.

Die Form ist u. a. bestimmt durch Konturen und Oberflächenreliefs. Diese sind durch die jedem Oberflächenelement zugeordneten Lagekoordinaten eindeutig bestimmt. Da die moderne Fertigung schon grosse Fortschritte gemacht hat, muss die Messtechnik nachziehen. Auflösungen im μm-Bereich und besser werden erwartet.

Schon die Auswertung von zweidimensionalen Abbildungen von Gegenständen nach komplexen Merkmalen stellt hohe Anforderungen an die logischen Schaltelemente der Auswerteeinheit und an die Bildverarbeitungsalgorithmen. Dem menschlichen Sichtsystem steht hierzu die rechte Hälfte des Grosshirns mit einer auf künstlichem Wege bisher unerreichten Effizienz der parallelen Datenverarbeitung zur Verfügung.

Bildverarbeitungssysteme können nur einen geringen Teil der menschlichen visuellen Intelligenz nachahmen und verarbeiten. Während das menschliche Auge die beobachtete Szene in mehrere Millionen Bildpunkte auflösen kann, die allerdings ungleichmässig verteilt sind, sind Bildverarbeitungssysteme noch weit davon entfernt.

Bildverarbeitungsstufen

Die Bildverarbeitung besteht aus mehreren hierarchisch geordneten Verarbeitungsstufen. Die erste Phase des Analyseprozesses, die «ikonische» Verarbeitung, befasst sich mit dem Bild bzw. mit seiner digitalisierten Form als Graustufenmatrix.

Man unterscheidet folgende Stufen:

- Bildaufnahme und -digitalisierung
- Bildaufbereitung
- Bereichsaufteilung (Segmentierung)
- Merkmalsvektor-Berechnung.

Die zweite Phase nennt man die «symbolische» Verarbeitung, weil hier mit den Merkmalsvektoren und darauf aufbauenden Bildsymbolen, die das Bild nicht mehr numerisch repräsentieren, gearbeitet wird und nicht mehr mit dem ursprünglichen Bild. In dieser Phase werden die Eigenschaften des Bildes entweder statistisch klassifiziert oder anhand von vorgegebenen Bedingungen und Modellen symbolisch sortiert und interpretiert.

Die digitale Bildverarbeitung verdankt den Fortschritt der letzten Jahre besonders der Entwicklung der leistungsfähigen Rechner-Hardware. Dabei ist nicht nur die reine Rechenleistung («MIPS» = Megainstructions per second) von Bedeutung, sondern vor allem die Leistungsfähigkeit spezieller Prozessoren.

Die vieldeutigen elementaren Bildmerkmale, die heute mit solchen Bildprozessoren

erschweren diesen Vorgang erheblich.

Das zusätzliche Wissen, das benötigt wird, um Intensitätsmerkmale in ursächliche Objektmerkmale aufzuschlüsseln, kann aus verschiedenen Quellen bezogen werden:

1. Exakte Positionierung von Objekt, Kamera, Beleuchtung: Damit wird in der Regel versucht, eine feste Zuordnung von Objekt- und Bildmerkmal zu erreichen. Dies gelingt nicht in allen Fällen. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kosten bei einer Umstellung auf andere Produktvarianten.

2. Erkennung bei beliebiger Objektposition und -orientierung: Vergleich des Bildes mit «Bildhypothesen», die aus programmierten, gelernten oder CAD-adaptierten Objektmodellen und zusätzlichen Beleuchtungsmodellen generiert werden.

oder Kunststoffoberflächen können nicht mehr aufgelöst werden. Sie liefern homogene Grauwerte, die allerdings stark winkelabhängig sind. Mit geeigneten Beleuchtungsoperatoren kann die Mikrostruktur durch Ausprägung und Orientierung ihres Streuverhaltens charakterisiert werden. Damit ist gleichzeitig eine Orientierungsbestimmung des Objektes realisierbar. Mit geeigneten Beleuchtungssequenzen kann auf eine einfache Weise eine Klassifizierung von Oberflächen bzw. Bearbeitungsfehlern vorgenommen werden.

Bei Sichtprüfungen, die an vorwiegend reflektierenden Metall- oder Kunststoffoberflächen durchgeführt werden müssen, ist zu beachten, dass bestimmte Fehler, die nur unter ganz bestimmten Blickrichtungen oder bei bestimmten Beleuchtungsrichtungen sichtbar sind, bei diffusen Beleuchtungen nicht zu erkennen sind. Verschiedene Beleuchtungsarten sind deshalb für den Formvergleich und die Fehlererkennung von grosser Bedeutung.

Ausblick

Die Einführung der rechnerunterstützten Auswertung der Messergebnisse, insbesondere die Auswertung von interferometrischen, holografischen und Moiré-Streifensystemen eröffnet der optischen Oberflächenmesstechnik neue Wege für den industriellen Einsatz. Optische Verfahren sind allerdings anfällig auf Umwelteinflüsse.

Zweidimensionale Bildverarbeitung ist weit entwickelt. Weitere Arbeiten sind erforderlich, um 3dimensionale Werkstücke zu erfassen und zu vergleichen, z.B. mit vorgegebenen Daten. Zum Formvergleich und zur Qualitätssicherung einer modernen Fertigung wird dies immer wichtiger. Dies wird auch durch die vermehrte Einführung von CAD und CIM immer bedeutungsvoller. Verschiedene Messverfahren werden für verschiedene Aufgaben einzeln oder kombiniert eingesetzt. ■

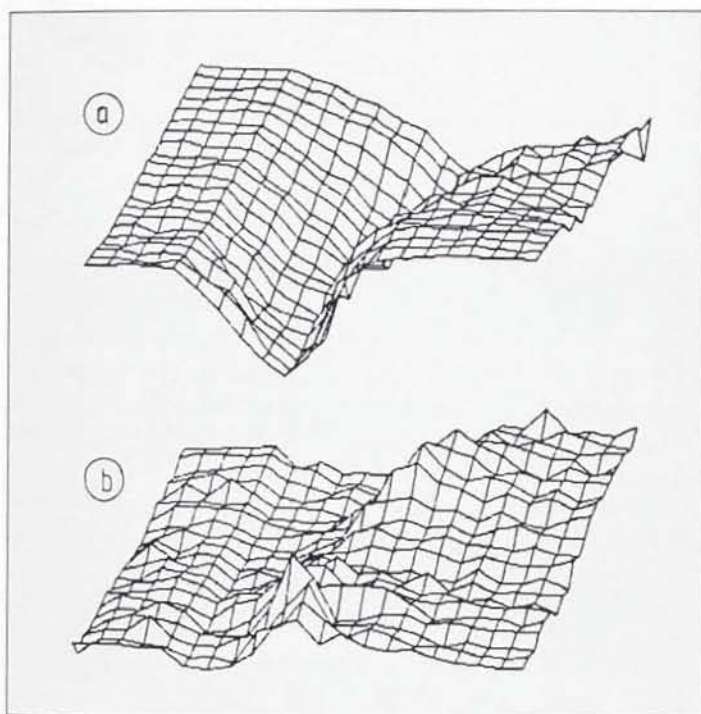


Abb. 14
Untersuchung eines Silizium-Wafers mit unterschiedlicher Dotierung in Reflexion bei einer Modulationsfrequenz von 20 kHz: 14a Phasenmessung bzw. 14b Amplitudenmessung.

ren in «Echtzeit» (TV-Echtzeit) berechnet werden können, lassen sich durch eine numerische oder wissensbasierte Kopplung mit Beleuchtungsparametern in Objektsymbole mit hohem Aussagewert differenzieren, was die weitere Symbolverarbeitung wesentlich vereinfacht. Die Aufgabe der Bildverarbeitung in der Sichtprüfung ist, aus Intensitätsbildern Objekteigenschaften zu bestimmen, diese zu klassifizieren und daraus Entscheidungen abzuleiten. Die fehlende dritte Dimension im Bild und die Schwierigkeit bei der Unterscheidung zwischen transparenten, reflektierenden, streuenden oder selbstleuchtenden Oberflächen-

Die kombinatorische Vielfalt ist dabei ausserordentlich hoch.

Die Rekonstruktion von Objektmerkmalen aus Bildmerkmalen kann erheblich abgekürzt werden, wenn zusätzliche Daten über das aktuelle Objekt herangezogen werden. Hierzu können Beleuchtungsvariationen in unterschiedlichster Weise genutzt werden.

Für die 3-D-Bildverarbeitung kann eines der beschriebenen Verfahren zur punkweisen oder flächenhaften Unterstützung sehr hilfreich sein. Texturen liefern leistungsfähige Merkmale zur Segmentierung von Bildern. Die unterschiedlichen Bearbeitungs-«Texturen» von Metall-

Literatur

- [1] Tiziani, H.J.: «Rechnerunterstützte Laser-Messtechnik» Technisches Messen, tm, 54 S.221–230 (1987).
- [2] Leonhardt, K.; Rippert, K.H.; Tiziani, H.J.: «Optische Profilometrie und Rauheitsmessung» Technisches Messen, tm, 54 S.243–252 (1987).
- [3] Sodnik, Z.; Tiziani, H.J.: «Photothermal Interferometrie for nondestructive subsurface defect detection» Opt. Comm., 58 S.295–298 (1986).
- [4] Cielo P.: «Optical Techniques for Industrial Inspection» Academic Press New York (1988).