

Übersichtsvortrag:

Optische Methoden zur Bildverarbeitung

Optische Methoden der 3-D-Meßtechnik und Bildverarbeitung

o. Prof. Dr. phil. Dipl.-Ing. H. J. Tiziani
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

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 vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. Hybride Verfahren, die eine optische Vorverarbeitung mit anschließender digitaler Verarbeitung kombinieren, sind erstrebenswert.

Dieser Übersichtsbeitrag konzentriert sich auf optische Methoden zur 3-dimensionalen Messung und optischen Vorverarbeitung sowohl mit kohärentem als auch mit inkohärentem Licht. Spezieller Schwerpunkt ist die hochgenaue 3-D-Meßtechnik. Auch werden Ergebnisse aus Arbeiten unseres Instituts vorgestellt.

Abstract

Optical methods for 3-D-measurements become very interesting. 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.

The survey paper will concentrate on optical methods for 3-D-measurements and optical preprocessing using coherent as well as incoherent light. In particular precision 3-D-measuring methods will be discussed. Some results of the work of our Institute will be presented.

1. Einführung

Die binokulare Stereo-Betrachtung basiert auf der Triangulation. Andere Tiefenmeßverfahren, die wir in der Natur finden, basieren z.B. auf Ultraschall-Sensoren, die beispielsweise bei Fledermäusen für die Abstandsmessung Anwendung finden. Es ist aber immer schwierig, mit der Natur konkurrenzfähig zu sein; speziell gilt dies auch für das visuelle System, wo die Stereo-Vision mit intelligenter Bildverarbeitung gekoppelt ist. Von diesem Modell können wir viel lernen. 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. Verschiedene optische Meßverfahren und Anwendungen werden diskutiert. Es wird aber immer ein Kompromiß sein zwischen Auflösung und Meßbereich. Die optischen Verfahren können sowohl einzeln als auch in Verbindung mit der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt werden und damit die Information wesentlich vereinfachen für die digitale Bildverarbeitung.

2. Optische 3-D-Meßmethoden

Große Fortschritte wurden sowohl auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung als auch der Streifenanalyse gemacht. Die größten Durchbrüche ergaben sich in der Mikroelektronik und auf dem

Gebiet der Halbleiter und leistungsfähigen Kleinrechner. Auch photogrammetrische Verfahren werden bei den Nahbereichsanwendungen in der Industrie vermehrt eingesetzt. In der optischen 3-D-Meßtechnik können wir die wichtigsten Techniken, wie folgt, in 2 Bereiche einteilen, nämlich in inkohärente und kohärente Verfahren.

Inkohärente Verfahren

- Laufzeit- und Phasenmessungen
- Triangulation, strukturierte Beleuchtung, Moiré-Techniken
- Bildebenen-Lokalisierungssysteme

Kohärente Verfahren

- Homodyne Methoden

Interferometrie und Holografie

Moiré-Techniken

Speckle-Verfahren

- Heterodyn-Methoden

Einwellen-Heterodyn-Interferometrie

Vielfach-Wellen-Heterodyn-Interferometrie

3. Inkohärente Verfahren in der 3-D-Meßtechnik

Laufzeit- und Phasenmessungen

Für die Distanz-Messung sind schon lange Puls-Echo-Laser-Verfahren bekannt. Das Grundprinzip basiert auf der Aussendung eines

sehr kurzen Laserpulses zum Objekt. Die Verzögerung zwischen der Lichtaussendung und der Detektion des Pulses wird gemessen. In jüngster Zeit werden Sub-Piko-Sekunden lange Pulse, von Diodenlasern, ausgesandt und detektiert. Dadurch wird die Auflösung wesentlich erhöht und es entstehen auch recht preiswerte Laser-Distanzmeßgeräte. Sie werden speziell auch beim Einsatz im Zusammenhang mit Robotern sehr vorteilhaft sein.

Verschiedene Laserabstandsmeßverfahren basieren auf dem Phasenmeßprinzip. Ein modulierter CW-Laser wird in die Richtung des Objekts geschickt. Das empfangene Signal wird dann verglichen mit dem modulierten Signal, und die Phase bzw. Phasenschiebung, führt zur Information über den Abstand zum Objekt. Wegen der relativ kleinen Laserleistungen, die eingesetzt werden, muß über eine bestimmte Zeit integriert werden, um genaue Messungen zu erhalten. Submillimeter-Auflösungen können erreicht werden; speziell, wenn Retro-Reflektoren als "Target" verwendet werden. Mehrere kommerziell verfügbare Geräte, speziell in der Geodäsie, arbeiten mit modulierter Strahlung und unterschiedlichen Wellenlängen und erreichen Submillimeter-Auflösung. Die Geräte sind z.B. Wild-Leitz (DI 2000), Kern (Mekometer).

Bild 1 zeigt schematisch unseren Aufbau zur Phasenmessung. Als Lichtquelle dient eine Laserdiode. Bild 2 zeigt ein typisches Meßergebnis einer Profilaufzeichnung bei einem Arbeitsabstand von 4 m. Die Auflösung war besser als 1 mm.

Triangulation

Die Triangulation ist ein sehr vertrautes Verfahren, auch für die Photogrammetrie. Vom Prinzip her ist es ein sehr einfaches Verfahren für die Tiefenmessung. Allerdings gibt es verschiedene Begrenzungen.

Passive Triangulation

Die passive Triangulation wird schon lange eingesetzt in der Landvermessung und der Navigation. Es ist die Basis für die lange etablierte Stereo-Photogrammetrie, wobei das Objekt aus mindestens 2 Winkeln aufgenommen wird. Nach der Aufnahme der 2 Stereo-Bilder erfolgt die Auswertung zum 3-dimensionalen Modell. Die computer-unterstützte Photogrammetrie hat sich zu einem sehr wirkungsvollen Werkzeug in der Meßtechnik entwickelt; sie wird in Zukunft vermehrt für den industriellen Einsatz im Nahbereich Anwendung finden.

Aktive Triangulation

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.

Die Grundlagen der Triangulation sind aus Bild 3 ersichtlich. Der aufs Objekt projizierte Laserpunkt wird mit Hilfe einer CCD-Zeile oder mit einem -Array oder einem positionsempfindlichen Detektor vermessen. Es wird angenommen, daß der Objektabstand wesentlich größer ist als die Basis des Triangulationsverfahrens. Die Auflösung Δz kann geschrieben werden als

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

wobei Δw die Winkelauflösung der Empfängersysteme darstellt. Die Triangulation ist eine sehr robuste Methode für die punktweise

3-D-Messung. Sie bietet sich auch an bei schwierigen Umweltbedingungen.

Ein abtastender Triangulations-Sensor ist sehr wirkungsvoll für das 3-dimensionale Vermessen von Objektoberflächen. Ein fokussierter Laser wird über die Objektoberfläche gefahren, wobei die Strahlableitung z.B. mit Hilfe von Galvanometer-Spiegeln, erfolgen kann. Die x-,y-Koordinaten des Laser-Spots sind gegeben durch die Position der Galvanometer-Spiegel. Eines unserer abtastenden Verfahren ist schematisch in Bild 4 vorgestellt, angedeutet sind Galvanometer-Spiegel. Dieses Verfahren eignet sich besonders für eine gezielte Vermessung von Objekt-Punkten. Polygon-Spiegel eignen sich zum schnellen Abtasten der Oberfläche. Ein typisches Ergebnis ist in Bild 5 angedeutet. Es handelt sich um die 3-D-Vermessung eines Zylinderkopfes. Der Arbeitsabstand war 0,8 m, die Auflösung in z-Richtung 0,1 mm. Zur Verbesserung der Auflösung kann die Basis noch erweitert werden. Dies ist angedeutet in Bild 6, wo 2 Motor-Theodolite benützt werden. Der erste Theodolit kann beispielsweise den Laser-Spot generieren und im zweiten wird die Position des Laser-Spots vermessen und dadurch die 3-D-Information gewonnen. Hohe Auflösung in Bruchteilen von Bogensekunden werden erreicht.

Moiré-Kontur und strukturierte Beleuchtungstechniken

Beim Moiré-Verfahren wird ein Gittermuster, das auch interferometrisch erzeugt werden kann, auf die Objektoberfläche projiziert und unter einem unterschiedlichen 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 Phasenschiebung sind die Konturlinien auch vorzeichenrichtig dargestellt. Beispielhaft soll die Streifenprojektion, basierend auf einem Interferenzmuster,

im Zusammenhang mit Bild 7 erläutert werden. Die Spiegel M_1 und M_2 sind gegeneinander geneigt und produzieren durch Interferenz der kohärenten Wellen ein Streifenmuster auf dem Objekt. Dieses Streifenmuster kann modifiziert werden bei geringfügiger Verkipfung von M_1 relativ zu M_2 . Zur automatischen Streifenanalyse wird der Spiegel M_2 mit einem Piezoelement verschoben, d.h. die Phasenschiebung führt zur automatischen Streifenauswertung. Das Streifenmuster wird mit einer CCD-Kamera registriert und verarbeitet. Bei der Anwendung des Verfahrens hat es sich auch herausgestellt, daß es sehr nützlich ist, mit beispielsweise 2 Frequenzen zu operieren, nämlich einer groben Gitterperiode, um die Ordnungszahl sicher zu stellen und auch bei Sprüngen die richtige Höhe zu ermitteln. Die feine Gitterstruktur dient dann zur genauen Höhenschichtlinienaufzeichnung. Mit der automatischen Streifenauswertung wird auch das Problem der Mehrdeutigkeit gelöst. Bild 8 zeigt beispielhaft Konturlinien

eines Werkstücks mit 1 mm Auflösung bei 2 m Arbeitsabstand. Die Auswertung erfolgte mit einem statischen Verfahren in weniger als 10 sec. Als Alternative können auch Gitter mit unterschiedlicher Periode 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.

Streifenprojektionstechniken

Verschiedenartige Streifenprojektionstechniken sind verwandt mit dem schon lange bekannten Lichtschnittverfahren nach Schmaltz. Verglichen mit Video-Techniken haben diese Verfahren sehr hohe lokale Intensität und sind deshalb widerstandsfähiger gegen Umweltstörungen. In der Bildverarbeitung wird bisher meistens die 2-D-Verarbeitung verwendet. In Zukunft wird vermehrt die Vorverarbeitung erfolgen. Die Form des registrierten Lichtbalkens ermöglicht die Tiefeninformation in quasi Echtzeit über die ganze Länge des Lichtstreifens, ohne daß bewegte Teile nötig wer-

den. Wird an Stelle von einem Lichtbalken eine ganze Reihe von Mustern generiert, wird die Auswertung wesentlich schneller. Darüber wird Herr Malz in diesem Band berichten.

Bildebenen-Lokalisierungssysteme

Tunnelmikroskop

Das abtastende Tunnelmikroskop ermöglicht eine Ortsauflösung im Bereich der Atomstruktur. Allerdings sollte das Objekt elektrisch leitend sein /14/. Das relativ einfache Prinzip wird anhand von Bild 9 kurz erläutert. Eine feine, leitende Spitze wird auf einem mit piezoelektrischen Elementen verstellbaren x-y-z-Tisch in der Art und Weise verschoben, daß die Spitze in einem Abstand in der Gegend von 0,1 nm über der Oberfläche abfährt, so daß der gleiche Tunnelstrom zwischen Oberfläche und Spitze fließt. Der Tunnelstrom ändert um einen Faktor 2 bei einer Abstandsänderung von 0,1 nm. Die Tiefenauflösung des Tunnelmikroskops kann mit interferometrischen Verfahren erreicht werden, die Ortsauflösung aber keineswegs.

Optisches Bildebenen-Lokalisierungssystem

Interferometrische Profilmeßgeräte sind im wesentlichen noch Laborgeräte. Der Einsatz ist vorerst noch beschränkt. Zur Rauheitsmessung in der Produktion eignen sich z.B. Streuverfahren oder geometrisch-optische Anordnungen. In Bild 10 wird ein in unserem Labor entwickeltes Verfahren näher erläutert. Ein Laserpunkt wird auf der 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 den Objektpunkt abgebildet, zusätzlich wird der Autokollimationsspot auf der Blende breiter, der 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., bietet es sich an, 2 Blenden symmetrisch zum Autokollimationspunkt zu plazieren, die eine intra-, die andere extrafokal. 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 Intensität, aufzutragen. Für größere Meßbereiche wird das Objektiv jeweils mit einem Piezo-Element nachfokussiert. Darüber hinaus ist im Bild 10 noch eine Kalibrierkurve aufgetragen. Auflösungen in der Gegend von 20 nm wurden erreicht. Der Arbeitsbereich kann wesentlich erweitert werden auf mehrere μm . Bild 11 zeigt eine Topografie eines Tiefziehbleches mit Vertiefungen, die als Schmiertaschen dienen. Das Tiefziehblech wurde mit dem beschriebenen Fokusedetektor nach dem Prinzip der Lichtwaage vermessen. Die Höhenauflösung kann weniger als 20 nm betragen.

Konfokales Mikroskop

Die konfokale Mikroskopie ist eine interessante Entwicklung der letzten Jahre für hochgenaue Topografien. Das Prinzip, das wir bei uns entwickeln, 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 sind zur Lochblende, ergeben bei idealen Abbildungsverhältnissen ein beugungsbegrenztes Punktbild. Bei Autokollimation passiert ein maximaler Lichtfluß die Blende, der anschließend detektiert wird. Der entsprechende Bildpunkt erscheint hell. Im Gegensatz dazu werden defokussierte Objektpunkte dunkel, da ein schwächeres und breiteres Punktbild die Lochblende passiert. Zur Vermeidung der Punktabtastung, bzw. der Objektbewegung, haben wir ein Punktmuster benutzt, das durch gegeneinander rotierende, peri-

odische Gitter entsteht, wie dies in Bild 12 angedeutet wird. Wird ein piezo-elektrischer Transducer zur Bewegung des Objektivs benutzt, so kann mit Hilfe der Verfahren der Bildverarbeitung ein 3-dimensionales 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 3-dimensionales Bild aufgebaut und anschließend stereoskopisch beobachtet oder entsprechend ausgewertet und dargestellt werden. Bild 13 zeigt ein Ergebnis der Vermessung von einem Mikro-Chip in pseudo 3-D-Darstellung. Die Höhenauflösung liegt bei 20 nm. Als Alternative zu unserem Laboraufbau kann das Objekt auch punktweise abgetastet werden /12/.

4. Kohärente 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 und die Genauigkeit werden gesteigert.

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:

Die Überlagerung von 2 Wellenfeldern $a_1 \cos(\omega t - \phi_1(x))$

und $a_2 \cos(\omega t - \phi_2(x))$

führen zu der Intensität

$$I(x) = I_0 [1 + m \cos \phi(x)] \quad 2)$$

wobei $\phi(x) = \phi_1(x) - \phi_2(x)$

und $I_0 = |a_1|^2 + |a_2|^2$

der Kontrast $m = \frac{2|a_1| \cdot |a_2|}{|a_1|^2 + |a_2|^2}$

In der Gleichung 2) sind drei Unbekannte, nämlich die gesuchte Phase ϕ , sowie I_0 und m , die mit drei Gleichungen aufgelöst werden können. Werden 2 Phasenschiebungen von jeweils 90° eingeführt, können 3 Gleichungen im Rechner gespeichert und entsprechend voneinander subtrahiert werden. Daraus folgt die gesuchte Phase ϕ , bzw. die Wellenfront, welche zu Konturlinien führt /11/.

Werden mehr als 3 Interferogramme zur Auswertung benutzt, reduzieren sich die Auswirkungen von Fehlern bei den Phasenschiebungen. 4 und 5 Interferogramme werden häufig eingesetzt. Ein typisches Beispiel der Streifenanalyse mit unserem umgebauten Linnik-Interferenzmikroskop ist in Bild 14 dargestellt. Es zeigt die Topografie eines CD-Disks in pseudo 3-D-Darstellung. Die Ortsauflösung ist $\leq 1 \mu\text{m}$, die Höhenauflösung 1 nm.

Vielfach sind interferometrische Verfahren, speziell bei rauhen Oberflächen, zu empfindlich. Der Einsatz interferometrischer Verfahren zur Topografie rauherer Oberflächen wird ermöglicht, wenn Lichtquellen mit längeren Wellenlängen, z.B. $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (CO_2 -Laser) eingesetzt werden. Alternativen sind 2 Wellenlängenverfahren oder schräger Lichteinfall, wie dies schematisch in Bild 15 gezeigt wird. Die Empfindlichkeit wird abhängig vom Einfallswinkel. Zur automatischen Streifenanalyse wird in unserem Fall die Objekthalterung mit Piezoelementen verschoben; die Phasenschiebung wird dem jeweiligen Neigungswinkel angepaßt.

Bild 16 zeigt das Ergebnis der Vermessung einer rauhen phosphatbeschichteten Metalloberfläche, mit Höhenabweichungen von 8 μm .

Zur Konturlinienaufzeichnung kann auch die Holografie herangezogen werden /15/. Über Shearing-Interferometrie zur Abstandsmessung wird Prof. Häusler in diesem Sammelband berichten.

Heterodyn-Verfahren

In der Interferometrie werden Phasendifferenzen von optischen Feldern als Intensitätsvariation detektiert. In der Heterodyn-Interferometrie wird die zeitabhängige Phasenvariation im Frequenzbereich analysiert. Vergleichbar mit Gleichung 2) werden die 2 Wellenfelder geschrieben als

$$A_1 = a_1 \cos[\omega t + \phi_1(x, y)]$$

$$A_2 = a_2 \cos[\omega t + \Delta\omega t \pm \phi(x, y, t) + \phi_2(x, y)] \quad 3)$$

Dabei ist $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ mit der Frequenzverschiebung $\Delta f = f_2 - f_1$, wobei f_2 bzw. f_1 die Frequenzen des Lichtes im Referenz- und Prüfstrahl sind und $\phi(x, y, t)$ ist die zeitlich variierende Phase.

Die Intensität des Interferenzbildes ergibt sich nach Überlagerung von A_1 und A_2

$$I(x, y, t) = I_0 \left\{ 1 + m(x, y) \cos[\Delta\omega t \pm \phi(x, y, t) + \phi_2(x, y) - \phi_1(x, y)] \right\} \quad 4)$$

Die zeitlich variierende Phase ist

$$\phi(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda} 2 vt \quad \left(v = \frac{dz}{dt} \right)$$

Aus der Messung der Doppler-shift-Frequenz

$$\delta f = \Delta f \pm \frac{2v}{\lambda} \quad \text{folgt die Profilhöhe } \Delta z$$

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2} \int_0^T (\delta f - \Delta f) dt.$$

Dabei ist die Verschiebung z in die Beleuchtungsrichtung projiziert.

Bild 17 zeigt schematisch ein Zweistrahl-Heterodyn-Interferometer. Ein polarisierender Strahlteiler PBS teilt den Laserstrahl mit der Frequenz f_1 in den Objekt- und Referenzstrahl. Der Referenzstrahl ist frequenzverschoben. Die Frequenzverschiebung erfolgt mit einem akustooptischen Modulator OAM. Nach dem Strahlteiler BS sind die zwei Strahlen wieder vereinigt und das Objektprofil ergibt sich aus der Analyse des Detektorsignals $i(t)$. Dies ist im Einklang mit Gleichung 4).

Das Bild 18 zeigt ein typisches Resultat der Abtastung einer handpolierten Metalloberfläche mit $rms = 20$ nm. Die Gerätekonfiguration, die wir einsetzten, war ähnlich der beschriebenen. Tiefenauflösungen in Bruchteilen von nm und Lateralaufösungen von $1\mu m$ 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. Weitere Verbesserungen in bezug auf Robustheit, aber auch auf Bereichserweiterung, sind für den industriellen Einsatz erforderlich.

4. Zweiwellenlängen-Heterodyn-Interferometer

Um die Mehrdeutigkeit von Einwellenlängen-Verfahren zu umgehen, werden zwei oder mehr Wellenlängen herangezogen. Das Prinzip

eines Zweiwellenlängen-Heterodyn-Verfahrens, das z.Zt. untersucht wird, ist im Bild 19 schematisch angedeutet. Es sollte zu höherer Auflösung in der Größenordnung von 0,1 mm führen, bei einem Arbeitsabstand von 10 m. Zwei Konzepte werden z.Zt. noch untersucht. Im ersten Konzept sind zwei Halbleiter-Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen im Einsatz. Sie werden in eine Glasfaser eingekoppelt. Bild 19 zeigt einen prinzipiellen Aufbau. Es werden zwei Heterodyn-Signale überlagert und detektiert. Über die Ergebnisse wird in einem nächsten Beitrag berichtet werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Optische Methoden zur 3-D-Meßtechnik und Bildverarbeitung werden zukünftig immer wichtiger. Sie eignen sich zur schnellen, berührungslosen Erfassung der 3-D-Objektdaten, die nachher mit Methoden der Bildverarbeitung weiterverarbeitet werden können. Die Verbindung der optischen Sensoren mit der Datenverarbeitung zu einem Sensorsystem ist sehr zukunftssträftig.

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

References

- 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 vance 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 (1955), 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) Zumbrunn, 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.

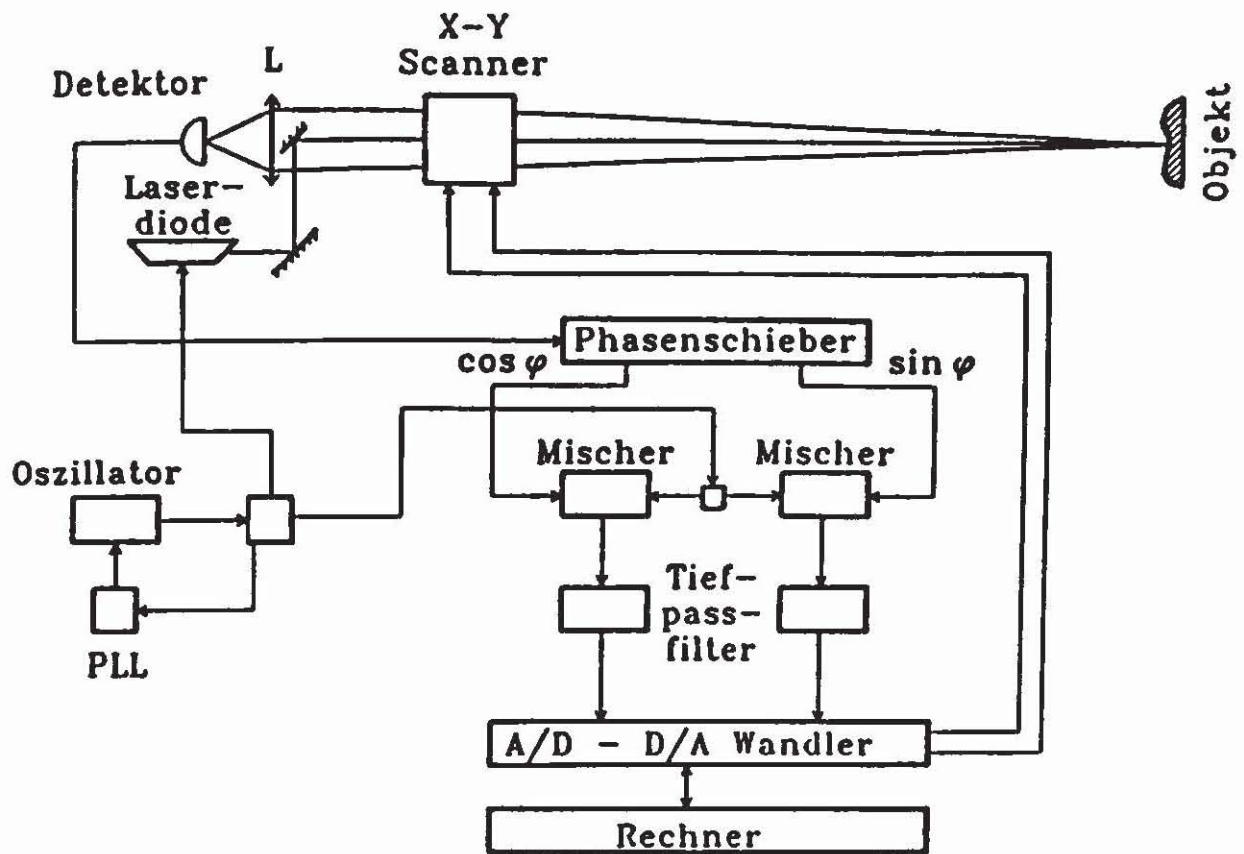


Bild 1: Schematischer Aufbau zur Profilmessung, basierend auf der Phasenmessung und dem x-y-Scanner

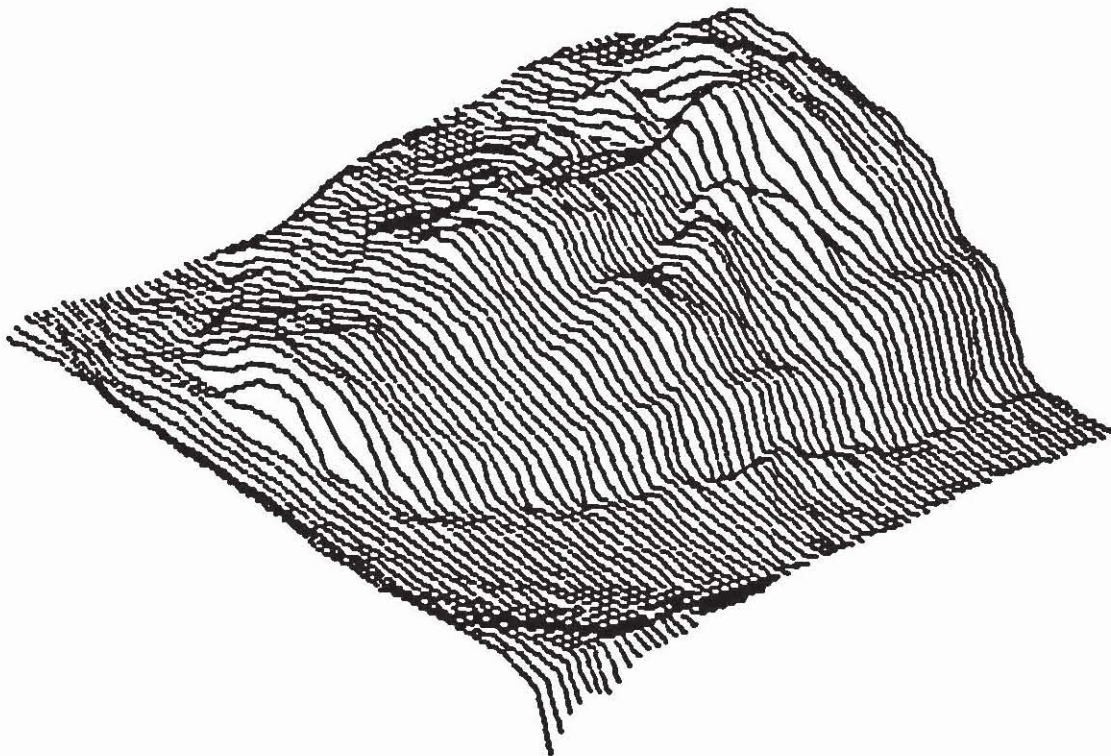


Bild 2: Ergebnis der Profilmessung durch abtastende Phasenmessung bei einem Arbeitsabstand von 4 m, Auflösung 1 mm

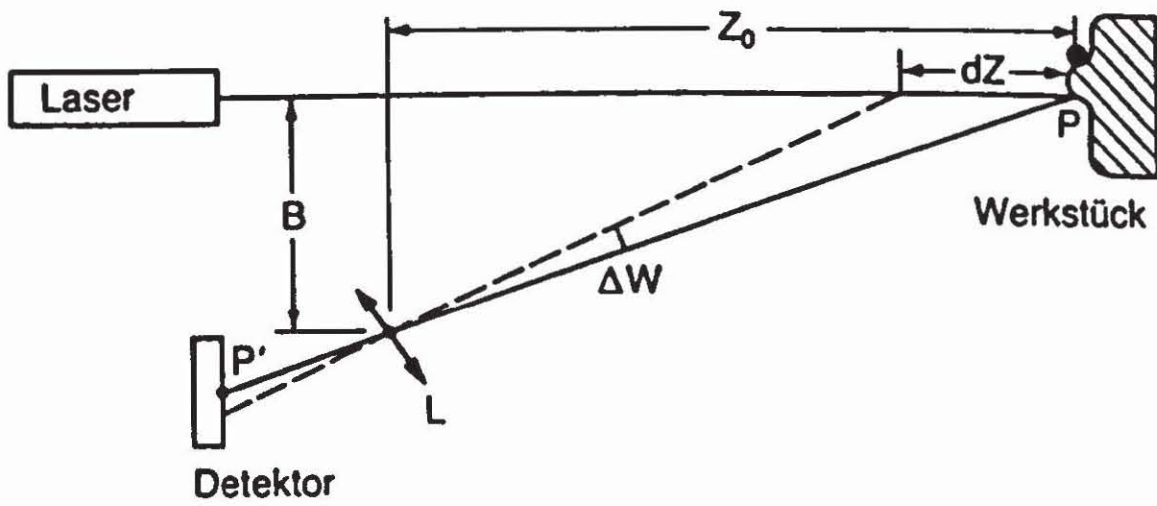


Bild 3: Prinzip der Triangulation

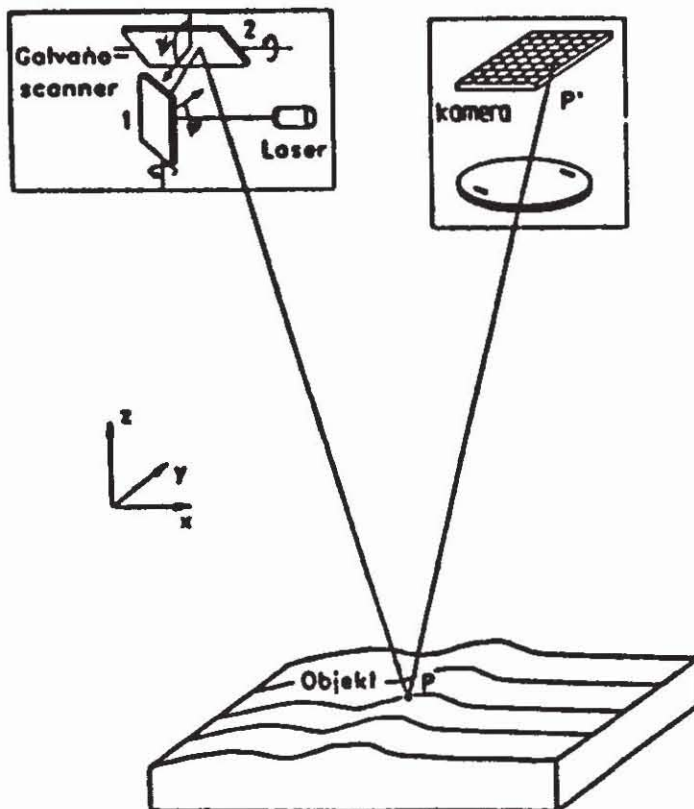


Bild 4: Prinzip des Laserscanners auf der Basis der Triangulation

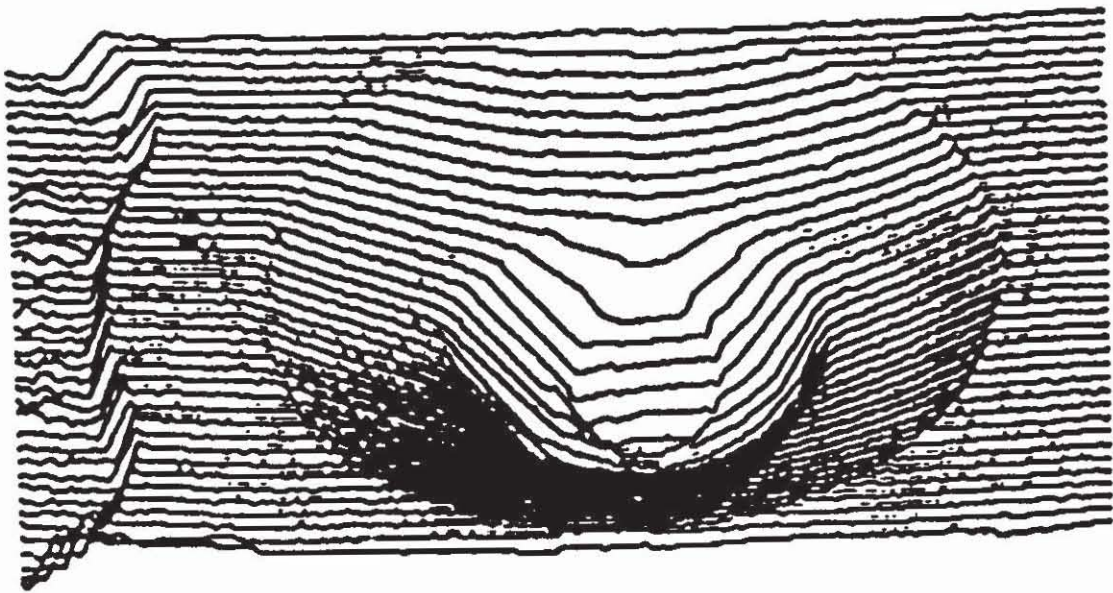


Bild 5: Typisches Beispiel einer 3-D-Abtastung eines Zylinderkopfes, Arbeitsabstand 0,8 m, Auflösung 0,1 mm

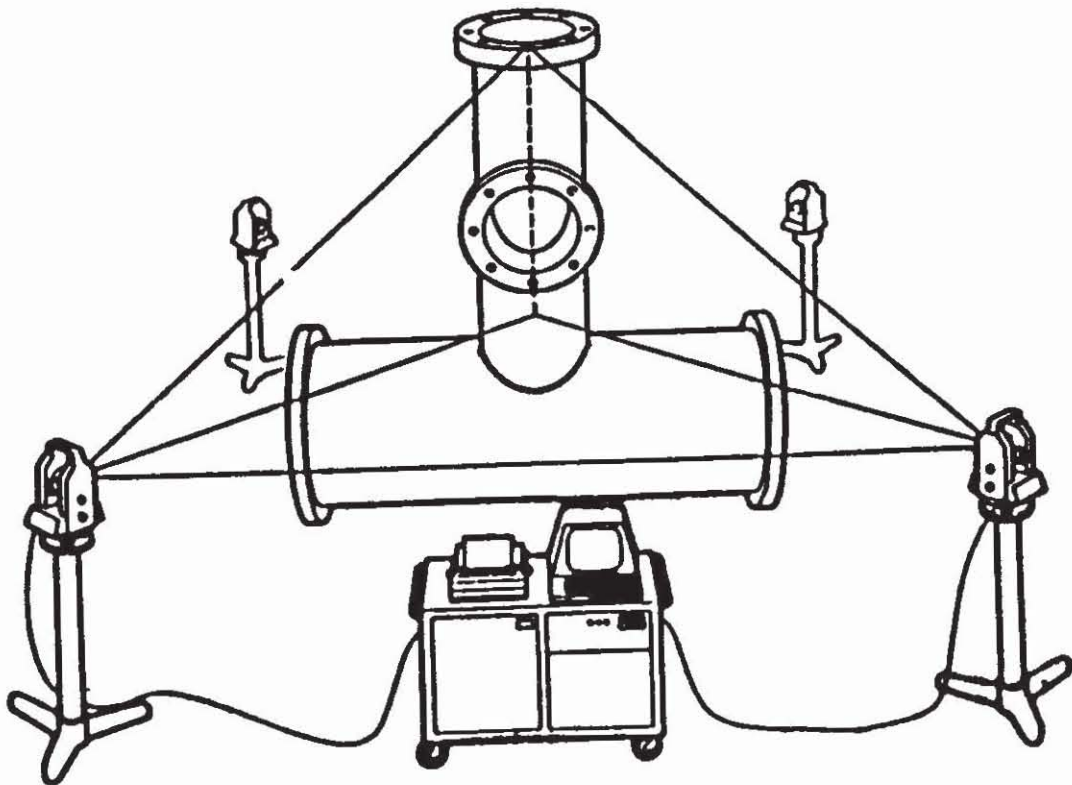


Bild 6: Anwendung der Triangulation mittels Theodoliten (Wild T 2000)

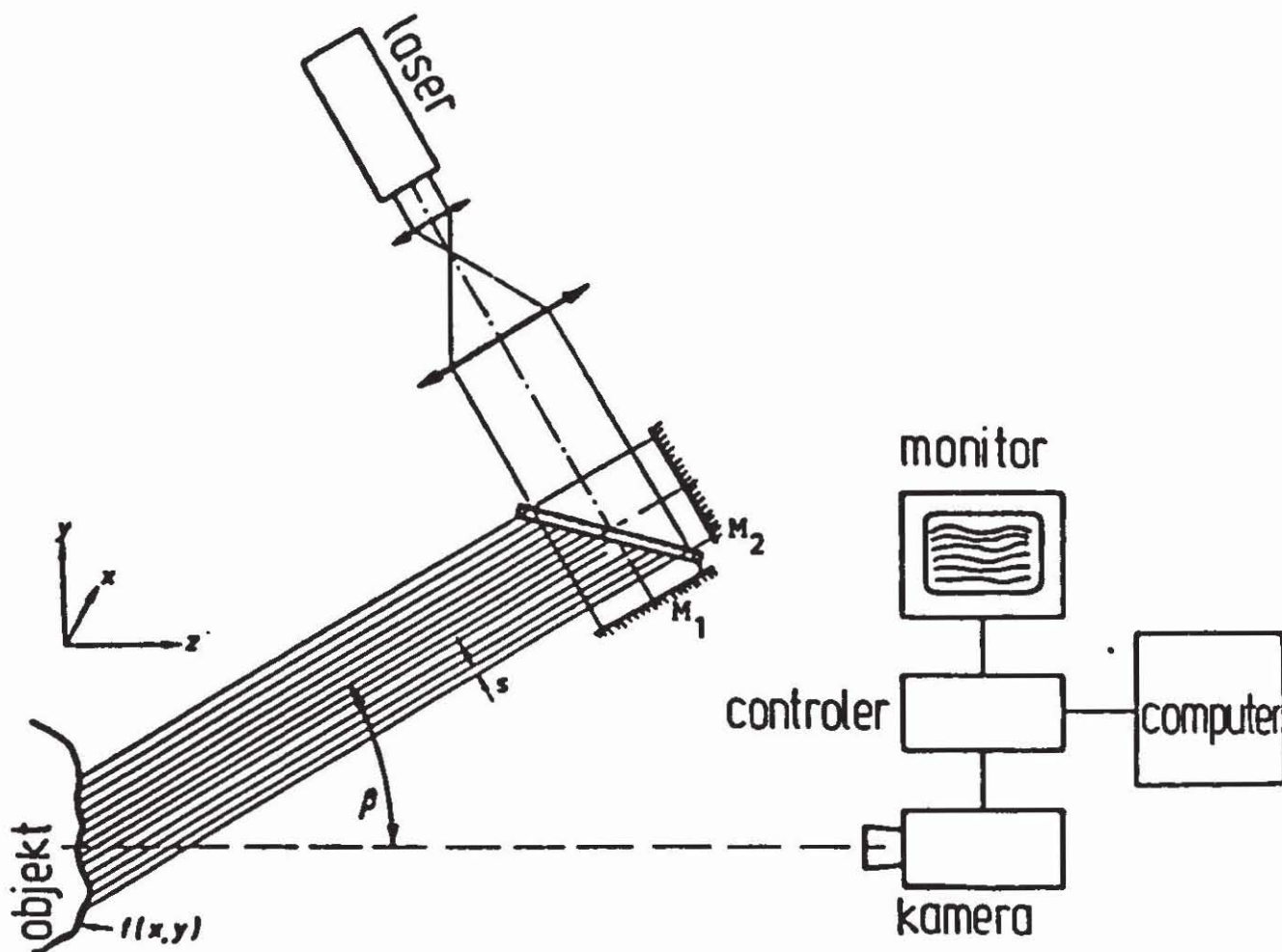


Bild 7: Prinzipskizze der Streifenprojektion mit variabler Periode und Phasenschiebung zur automatischen Auswertung

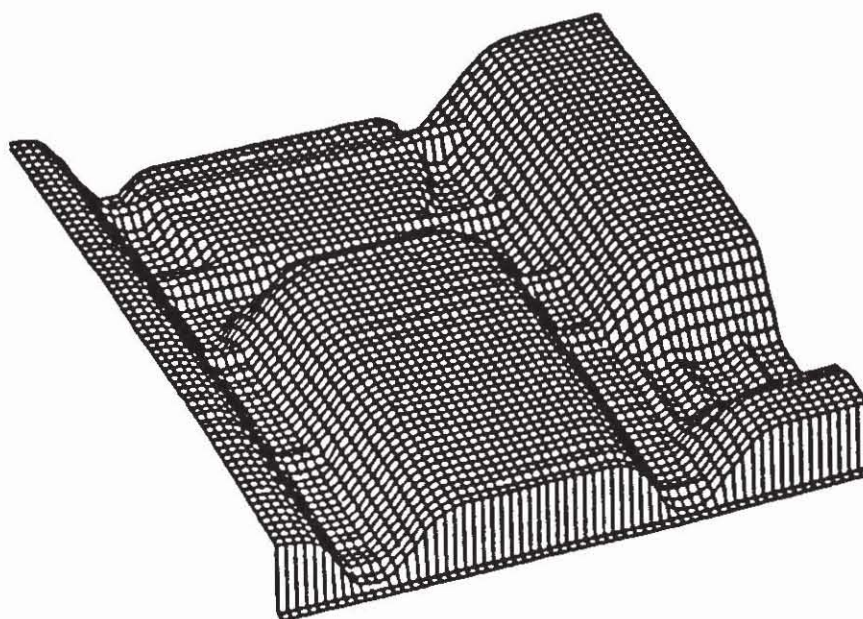


Bild 8: Konturlinien eines Werkstückes mit 1 mm Auflösung bei einem Arbeitsabstand von 2 m

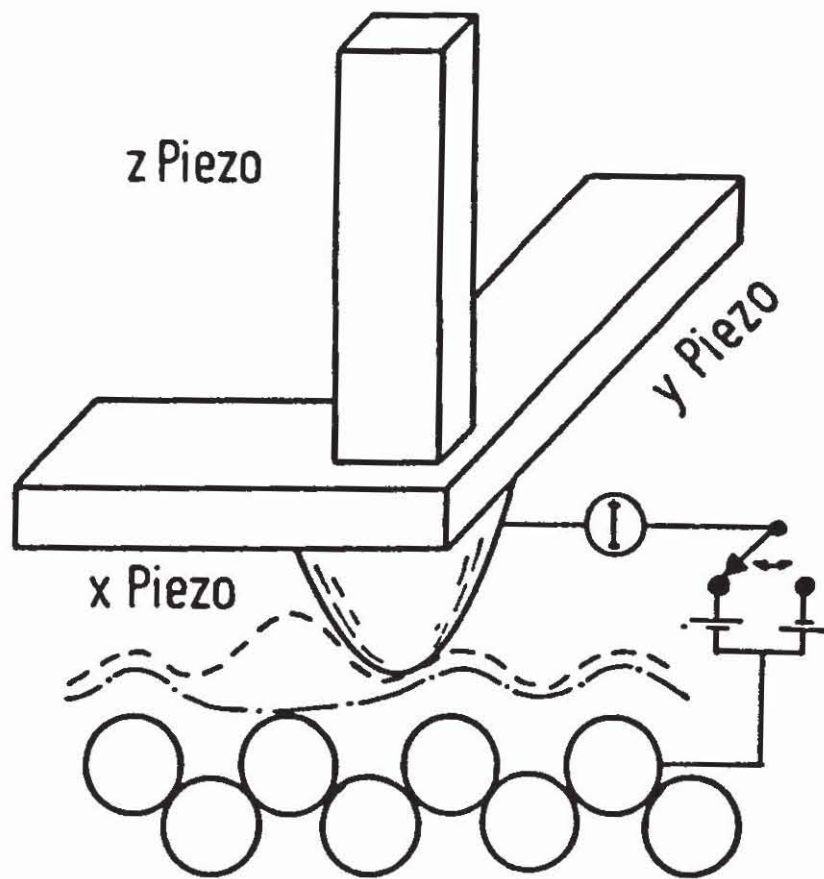


Bild 9: Prinzipskizze des Tunnelmikroskops

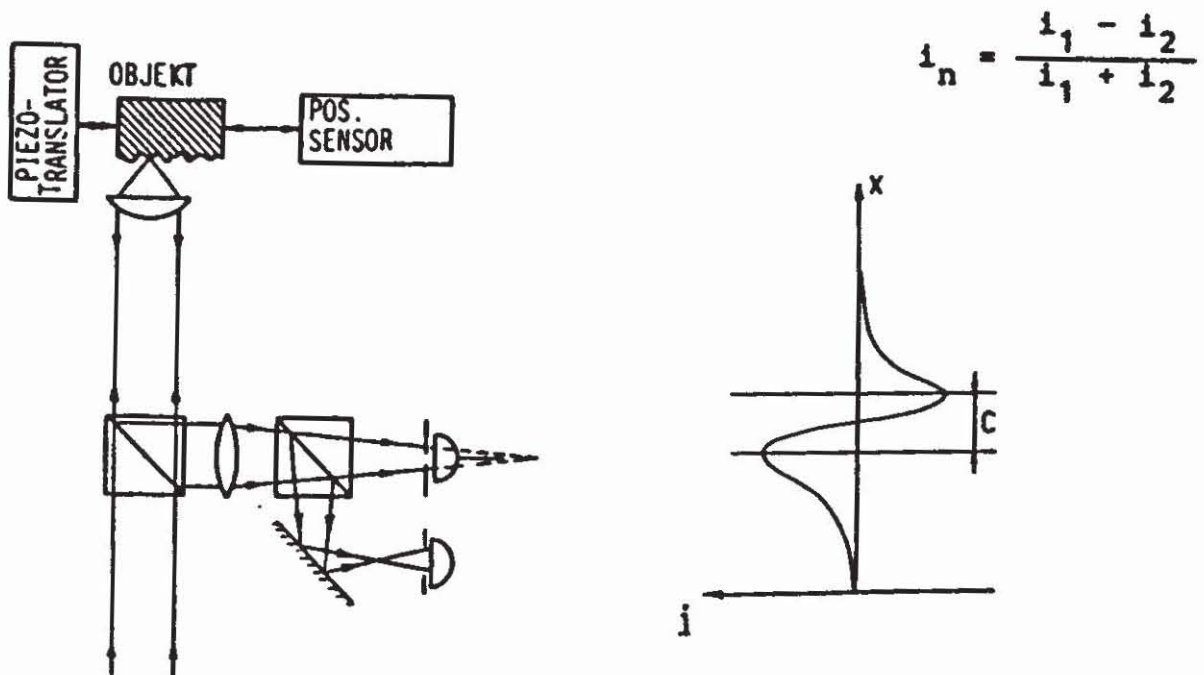


Bild 10: Prinzipskizze eines Fokusdetektors nach dem fotometrischen Gleichgewicht-Verfahren (Lichtwaage) mit Kalibrierkurve

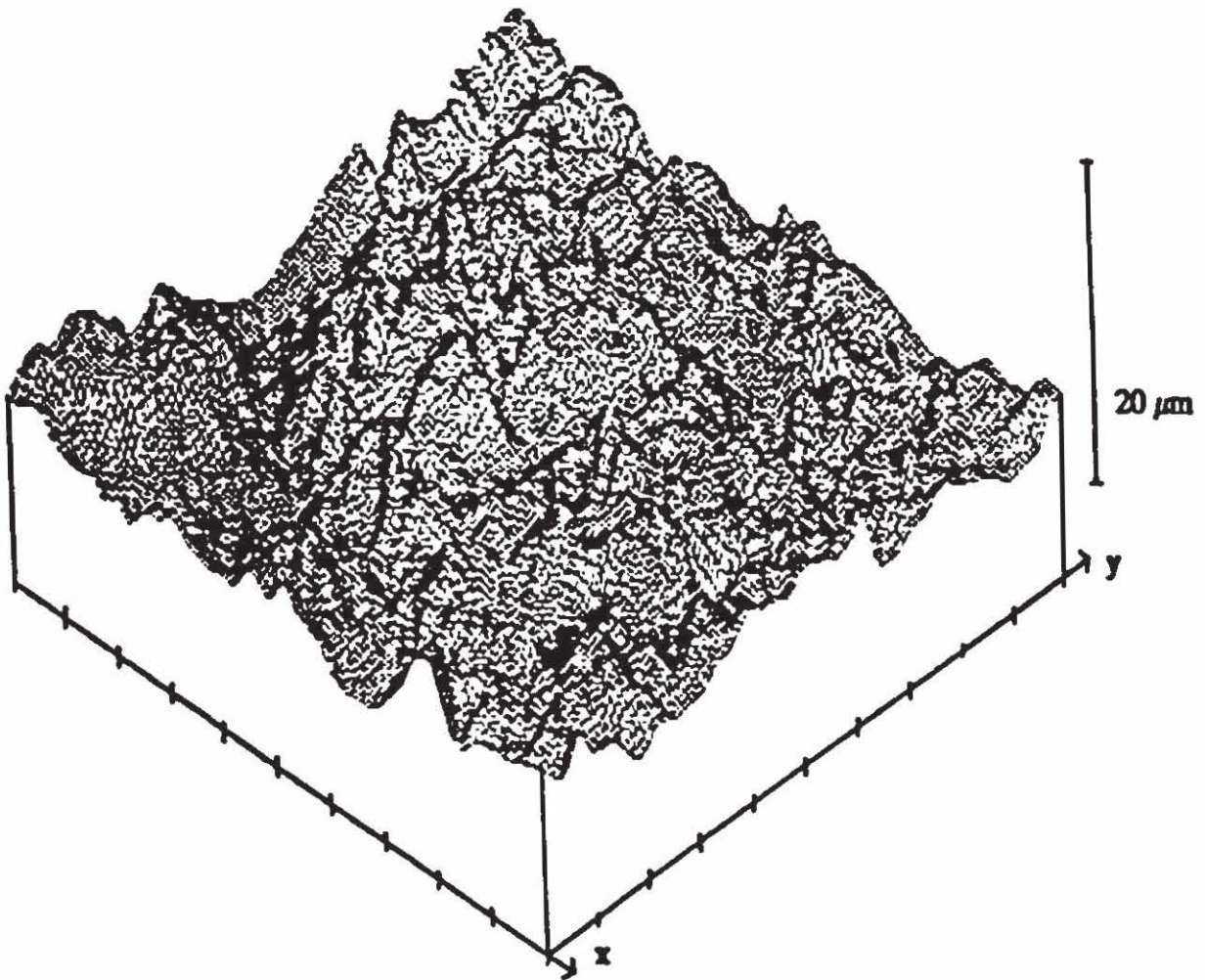


Bild 11: Abtastung eines Tiefziehbleches mit dem Fokusedetektor nach dem Prinzip der Lichtwaage

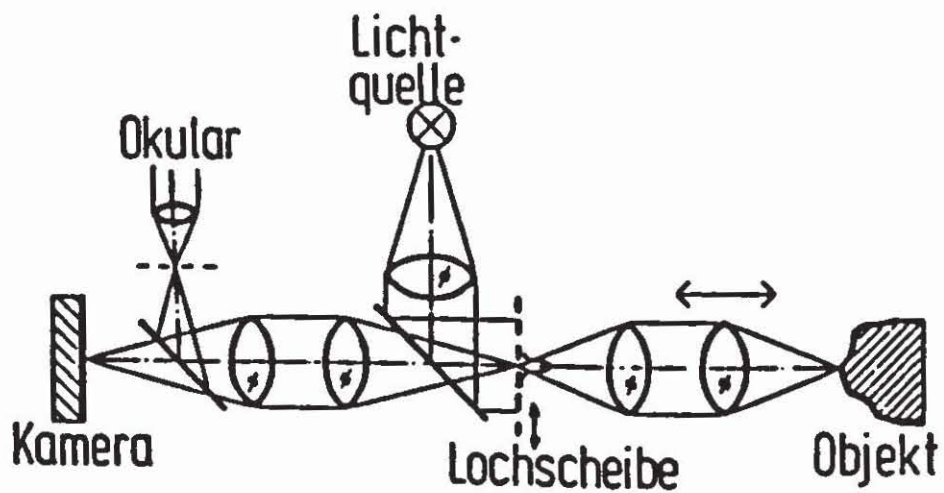


Bild 12: Prinzip des konfokalen Mikroskops

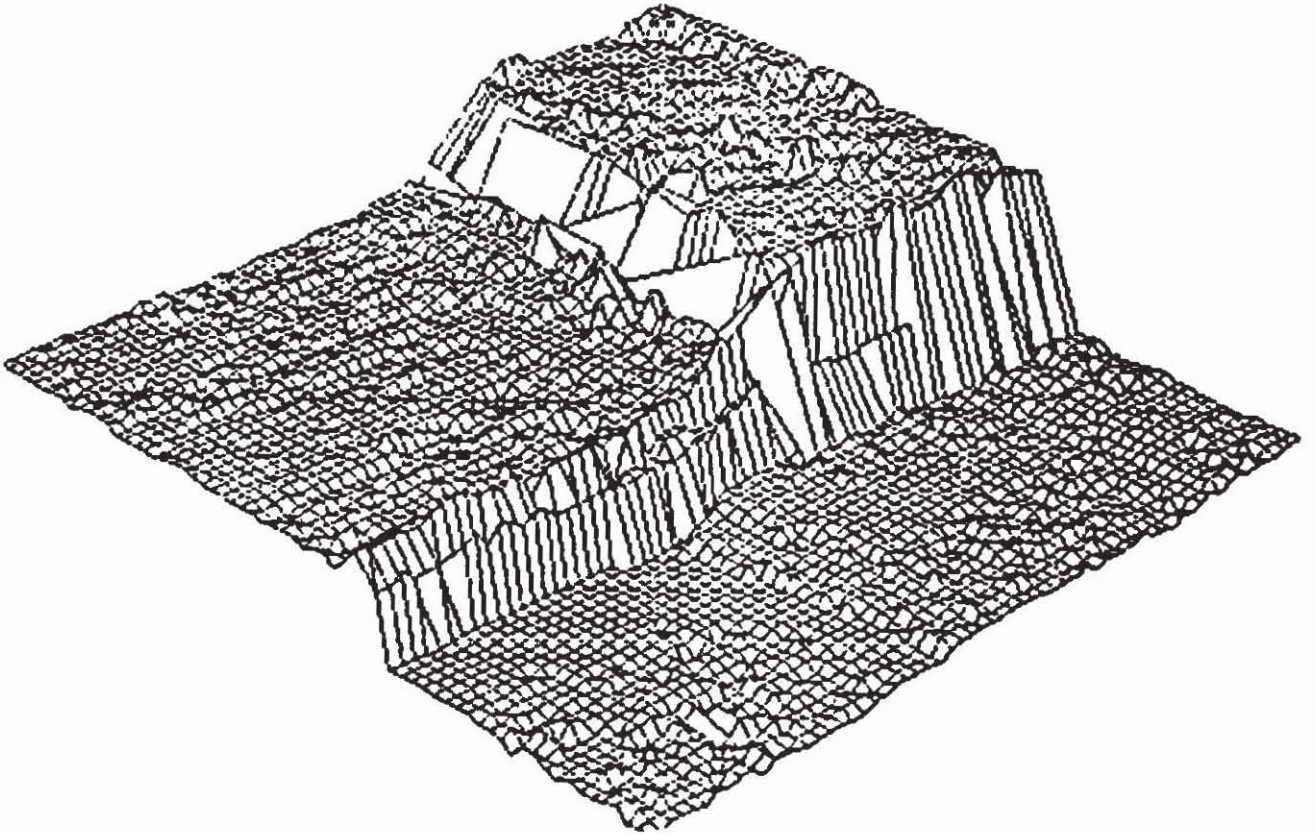


Bild 13: Ergebnis der Vermessung eines Mikro-Chips in pseudo 3-D-Darstellung

Min = 0,0 nm
 Max = 128,0 nm

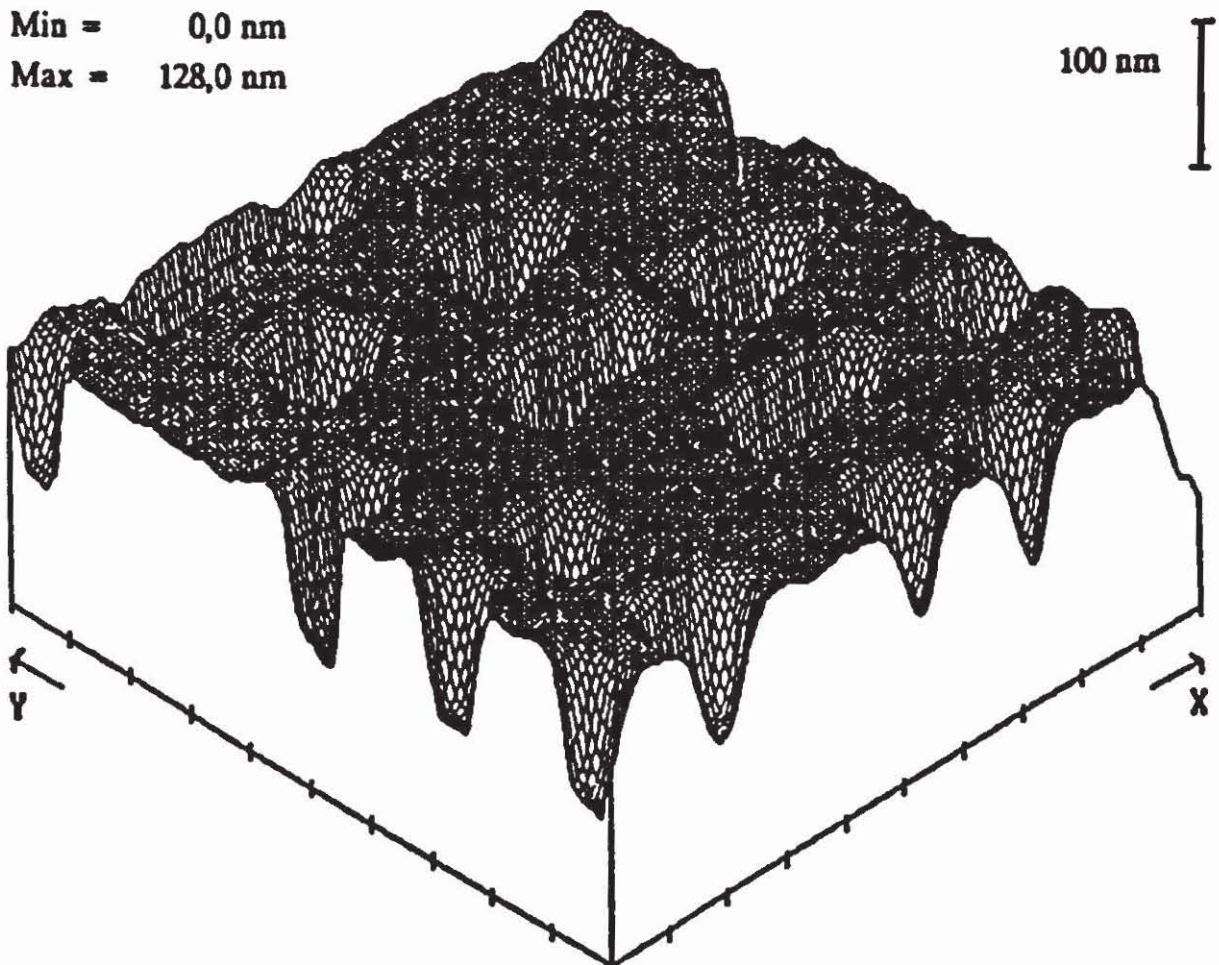


Bild 14: Auswertung eines CD-Disks mit modifiziertem Interferenzmikroskop mit automatischer Streifenbewertung

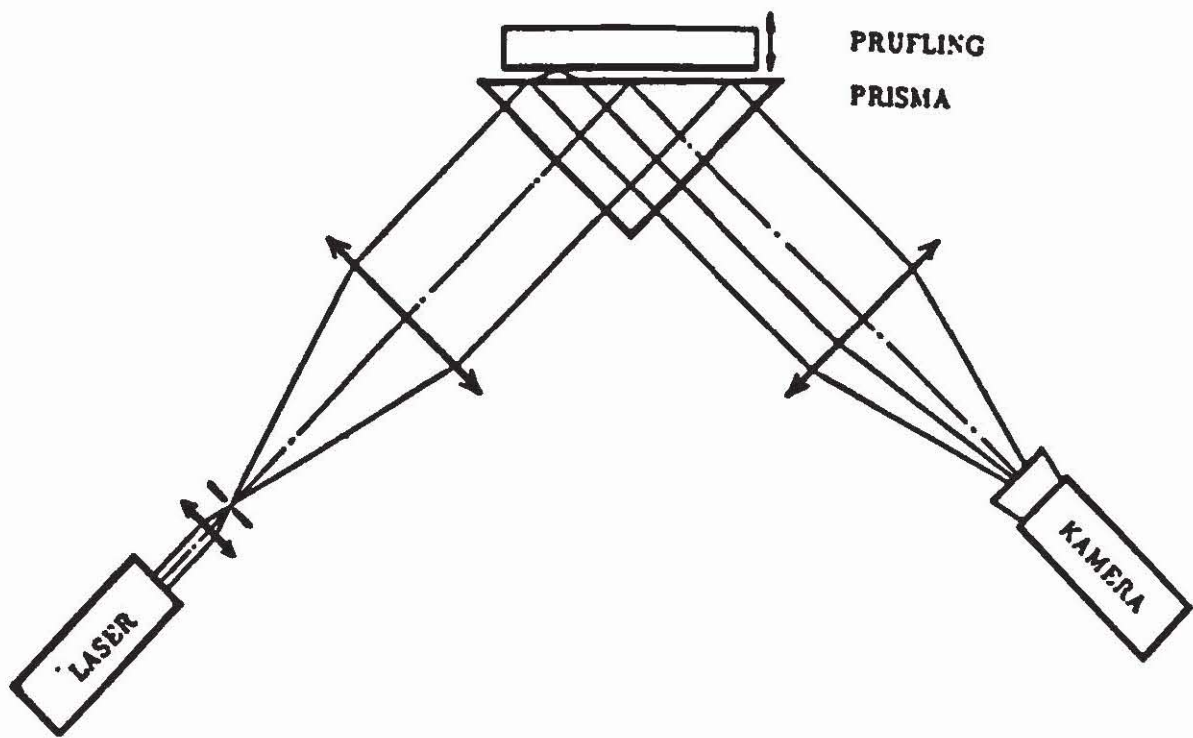


Bild 15: Prinzipskizze zur Interferometrie mit schrägem Lichteinfall

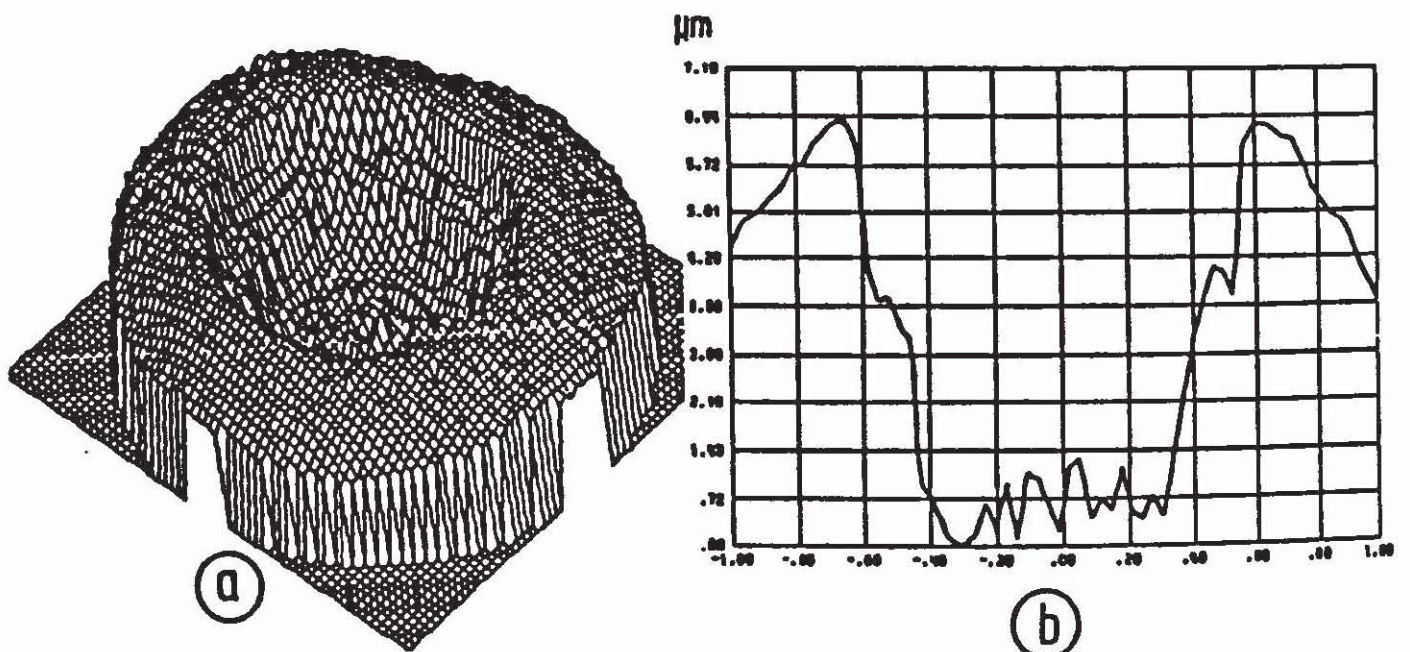


Bild 16: Oberflächenmessung einer rauhen, phosphatbeschichteten Metalloberfläche mit Höhenabweichungen von 8 μm
 in 16a: als pseudo 3-D-Darstellung
 und in 16b: als Schnittbild

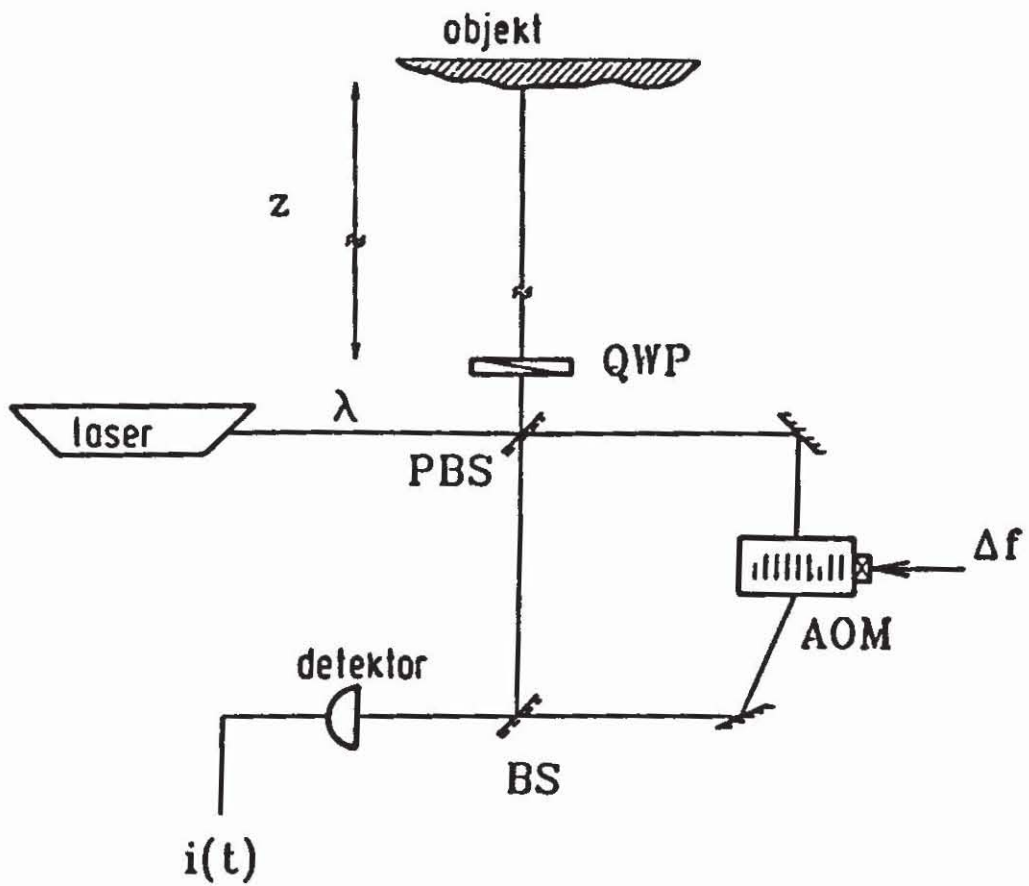


Bild 17: Prinzip des Zweistrahl-Heterodyn-Interferometers

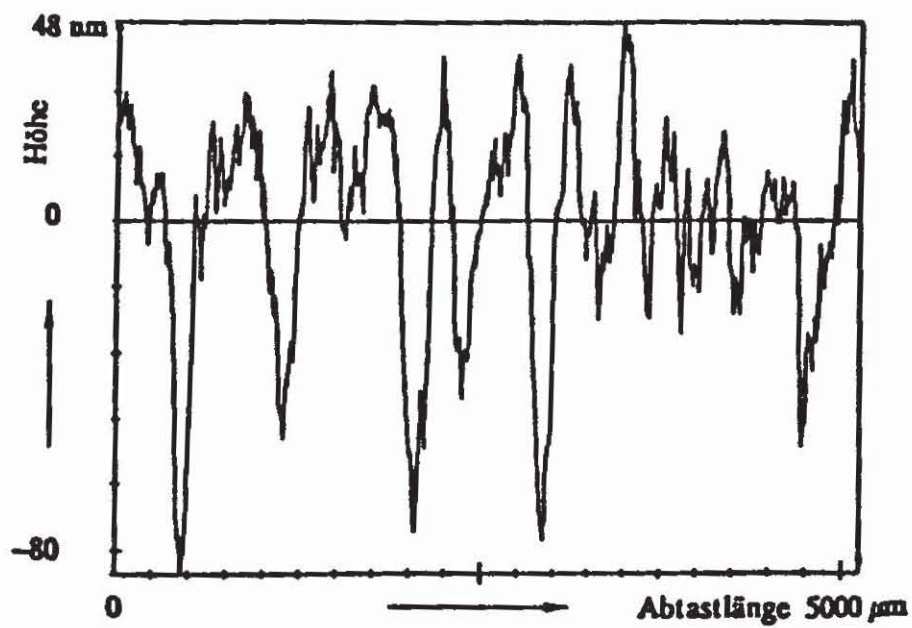


Bild 18: Mikroprofil einer handpolierten Metalloberfläche mit $\text{rms} = 20 \text{ nm}$

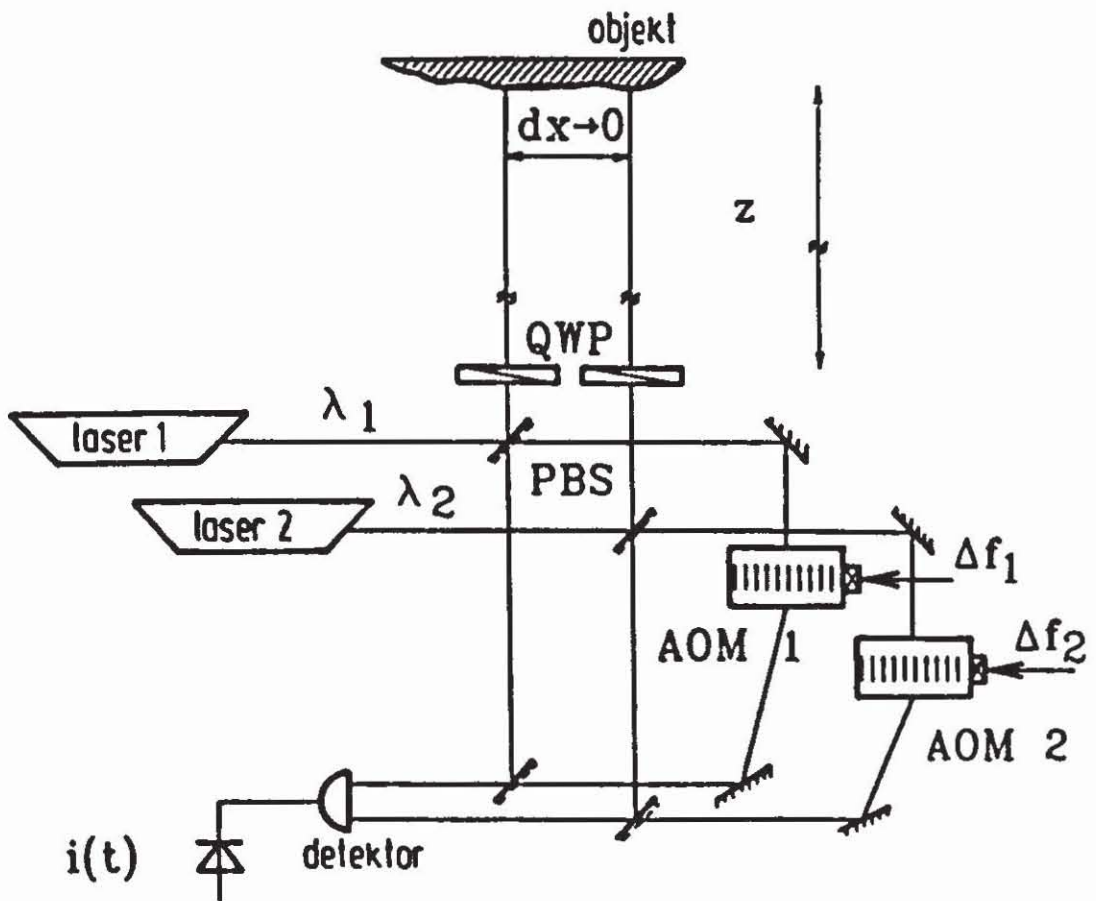


Bild 19: Prinzip des zweiwellenlängen-Interferometers