

Mikro-Profilometrie zur Bestimmung der Topographie und Rauheit technischer Oberflächen mittels Heterodyn-Laserinterferometrie

Heterodyn Microprofilometry for Industrial Surface Measurements

Dr.-Ing. habil. **K. Leonhardt**, Dipl.-Ing. **K.-H. Rippert** und
Prof. Dr. phil. **H. Tiziani**, Stuttgart

Zusammenfassung

Ein Heterodyn-Profilometer zur Messung der Rauheit polierter und feingeschliffener Oberflächen und zur Formmessung wird beschrieben. Die Vertikal- oder Höhenauflösung liegt bei 0,5 nm, der Meßbereich für Formmessungen an glatten Oberflächen bei 40 μm bei einer maximalen Abtastlänge von 300 mm. Die Lateralauflösung kann je nach Apertur- ausleuchtung bis zu 0,5 μm eingestellt werden. Anwendungen und Grenzen werden gezeigt. Formeln zur Lateralauflösung und zur Erfassung von Phasensprüngen sowie Profilhöhen-Übertragungsfunktionen werden diskutiert.

Abstract

A heterodyne profilometer for measuring the roughness of polished and fine grinded surfaces and for shape measurements on smooth surfaces is described. The vertical resolution is 0.5nm, the measuring range for shape measurements is 40 μm , and scanlength is up to 300 mm. Lateral resolution is 0.5 μm , depending on the aperture ratio. Applications and limits of the profilometer are shown and expressions for lateral resolution, phase changes on the surface, and profile height transfer functions are discussed.

1. Einleitung

Die Messung der Rauheit und geometrisch vorgegebener rauher Mikroprofile ist eine wichtige Aufgabe in der Fertigung metallischer Teile. In noch stärkerem Maße ist die Fertigung optischer Präzisionsbauteile auf zuverlässige

Meßmöglichkeiten angewiesen. Hier haben sich für flachenhafte Messungen vor allem interferometrische Verfahren bewährt, die jedoch glatte Oberflächen mit verschwindender Rauheit voraussetzen und im Regelfall eine geringe laterale Auflösung erlauben. Berührungslose optische Profilometer, die auch an rauhen Oberflächen messen können, sind daher von großem Interesse.

In der optischen Mikroprofilometrie wird die Oberfläche mit einem beugungsbegrenzten Abtastfokus eines Laserstrahles abgetastet. Der Abtastfokus entspricht der Tastspitze des mechanischen Tastschnittgerätes, wobei alle Vorteile einer berührungsfreien Messung gewahrt bleiben. Die Bildung der gewünschten Höheninformation geschieht entweder über interferometrische Prinzipien, wie im Falle des Heterodyn-Profilometers /1/, oder über höhenempfindliche Lichtstromvergleiche wie im Falle photometrischer Profilometer nach dem Prinzip der Foucaultschen Schneide, des astigmatischen Fokus, der photometrischen Balance /1/ oder käuflicher Sensoren auf der Grundlage der Compact-Disk-Technologie. Interferometrische Prinzipien erlauben sehr hohe Auflösungen bis zu Bruchteilen von Nanometern, wobei jedoch bisher sehr glatte Oberflächen (polierte Gläser, Kristalle und sorgfältig polierte Metalle) vorausgesetzt werden müssen. Wir berichten hier über ein Heterodyn-Profilometer mit einem großen Meßbereich von 40 μm (Formmessungen auf polierten Oberflächen) und der Möglichkeit der Messung von Rauheiten polierter oder feingeschliffener Metalloberflächen mit einer Auflösung von 0,5 nm.

2. Heterodyn-Profilometer

Bild 1 zeigt schematisch den optischen Aufbau des Heterodyn-Profilometers. Ein Laserkopf (HP Typ 5500C) eines kommerziellen Laserinterferometers liefert zwei orthogonal zueinander linear polarisierte Moden der He-Ne Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$ mit einem Frequenzunterschied von 2 MHz. Der in der Zeichenebene polarisierte Mode wird durch den polarisierenden Strahlenteiler ST_{pol} und das Abtastob-

ektiv O3 auf die Oberfläche fokussiert. Der dazu senkrecht polarisierte Mode wird durch den polarisierenden Strahlenteiler in den Referenzarm reflektiert. Der eigentliche Interferenzmeßkopf ist in Bild 1 strichpunktiert umrandet.

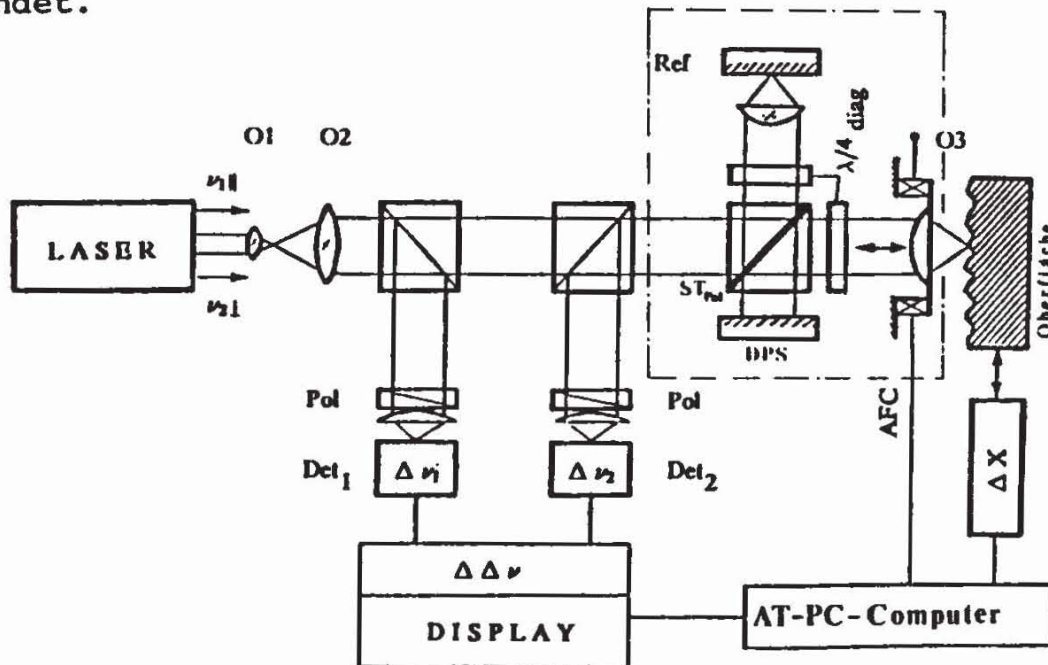


Bild 1 Heterodyn-Profilometer

Dieses Interferometer enthält zusätzlich eine Doppelpaß-Strahlenführung zur Kompensation lokaler Profilsteigungen, die aus den beiden $\lambda/4$ -Platten und dem Spiegel DPS besteht und in /1/ ausführlich beschrieben wird. Ohne Doppelpaß verlaufen die an geneigten Oberflächenelementen reflektierten Abtaststrahlen im Raum der Parallelstrahlen versetzt zur Strahlachse und im Raum vor dem Heterodyndetektor Det_2 geneigt, was zu einer Verschlechterung der Interferenz und damit der Heterodynmodulation führt.

Mit Doppelpaß wird der versetzte Strahl wieder genau in sich zurückreflektiert und interferiert am Detektor ohne Modulationsverlust. Die $\lambda/4$ -Platten dienen dazu, die Polarisation der Teilstrahlen nach zweimaligem Durchlauf um 90° zu drehen, so daß am polarisierenden Strahlenteiler eine Reflexion statt einer Transmission stattfindet und umgekehrt. Dreht man die $\lambda/4$ -Platten um 45° , so werden sie unwirksam und die reflektierten Teilstrahlen laufen direkt

zum Heterodyndetektor Det₂ zurück (Einfach-Paß). Dies ist besonders an Oberflächen mit kleinem Reflexionsgrad von Vorteil.

Die Heterodyn-Auswertung mit dem Referenzdetektor Det₁, der nur die konstante Differenzfrequenz des Lasers "sieht" funktioniert nach den bekannten Prinzipien der Heterodyninterferometrie. Translatiert man daher die Prüflingsoberfläche quer zur optischen Achse, so erhält man ein vorzeichenrichtiges Höhenprofil der rauhen Oberfläche.

Ein hochauflösendes Mikroskopobjektiv mit der numerischen Apertur $NA = 0,95$ dient als Abtastobjektiv O3. Es wird durch eine automatische Fokuspachführung AFC über eine Federband-Parallelführung und einen geregelten Piezotranslator in konstantem Abstand zur Oberfläche gehalten. Die interferometrische Höhenmessung wird bei kleinen Änderungen der Fokussierung nicht beeinflusst. Es wird jedoch verhindert, daß sich die Lateralauflösung feiner Oberflächendetails verschlechtert.

3. Luftlager-Meßanlage

Um sowohl ebene Oberflächen mit einer Meßlänge bis zu 300 mm als auch Abtastungen an sphärischen und asphärischen Flächen der Optikfertigung durchführen zu können, wurde der Heterodyn-Meßkopf in einer Luftlager-Meßanlage installiert. Von den drei NC-gesteuerten Verstelleinheiten ist der Horizontalschlitten zur linearen Meßverschiebung ebener Prüflinge geeignet. Ebene Oberflächen bis zu 300 mm Meßlänge können abgefahren, und mit dem Meßkopf, der an einer Vier-Säulen-Traverse aufgehängt ist, abgetastet werden.

Außerdem ist noch eine kontrollierte Drehung dieses Linearschlittens um eine Achse senkrecht zur Tischebene möglich, und ein Luftlager-Spindelstock zur Aufnahme von Rotationskörpern kann auf den Schlitten aufgesetzt werden. Damit können Meridian- und Sagittalschnitte an Linsenflächen und an Mantel- und Umfangslinien zylindrischer Werkstücke abgefahren werden. Zusammen mit der Luftlagermeßanlage arbeitet unser Profilometer als Freitastsystem.

Es sind auch Differentialprofilometer bekannt /5//6/, die beide Arme des Interferometers durch eine Reflexion an der Oberfläche abschließen und daher unempfindlich gegen Relativbewegungen zwischen Prüfling und Meßkopfaufhängung werden. Sie haben jedoch den Nachteil, daß das Meßergebnis systematisch verfälscht oder die Abtastgeometrie eingeschränkt wird.

4. Typische Messungen und Höhengauflösung

Bild 2a zeigt eine hochgenaue Messung eines PTB-Tiefeneinstellnormales. Alle sechs Einstellrillen wurden in einem einzigen Meßlauf profilometriert. Die gemessenen Rillentiefen stimmen bis auf ca. 1% mit den von der PTB angegebenen Werten überein, wobei die Hauptunsicherheit durch die Definition der Rillenränder als Bezugslinien für die Messung gegeben war.

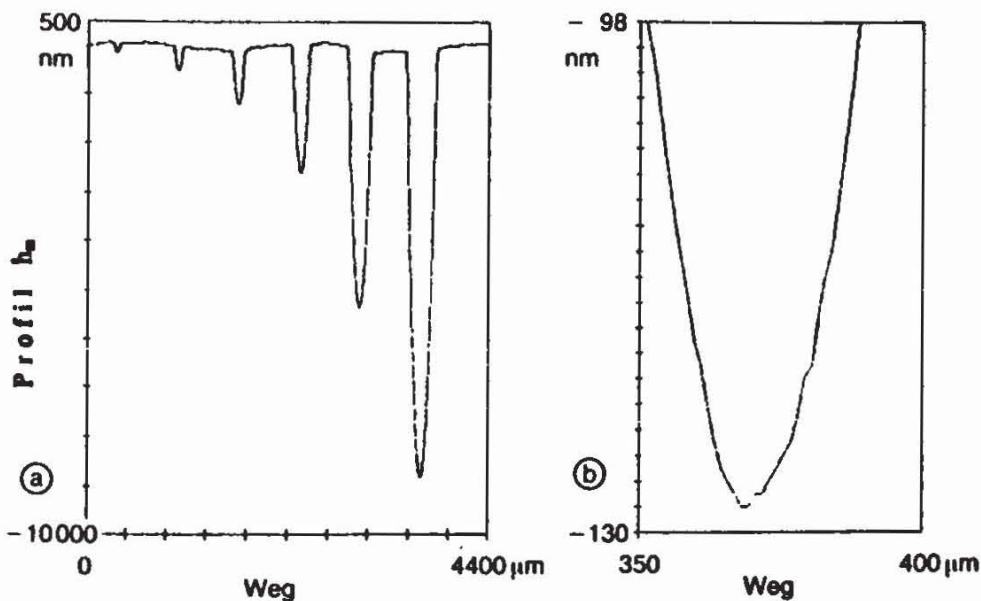


Bild 2 Tiefeneinstellnormal

Bild 2b zeigt aus demselben Meßdatensatz eine Ausschnittsvergrößerung des Rillengrundes der kleinsten Rille. Damit wird der hohe Dynamikbereich des Verfahrens belegt: der Fokusbereich der Objektivnachführung beträgt 40 µm, der digitale Auflösungsschritt beträgt beim Singlepaß-Strahlengang 1nm, beim Doppelpaß 0,5 nm. Dies ergibt ein Verhältnis von 1:40000 (Singlepaß) bzw 1:80000 (Doppel-

paß) ohne Bereichsumschaltung. Die scheinbare Welligkeit in der Oberfläche des Normals ist zum Teil durch die Luftlagerführung bedingt. Die Wellenlänge des periodischen Formfehlers durch die Führung beträgt $2500 \mu\text{m}$ und kann für Meßlängen, die kürzer als ca. $1000 \mu\text{m}$ sind durch digitale Hochpaßfilterung weitgehend eliminiert werden.

Bild 3 zeigt die Auflösungsgrenzen für die Messung feinsten Rauheiten. Es handelt sich um eine hochgenau polierte Zerodur-Glaskeramik.

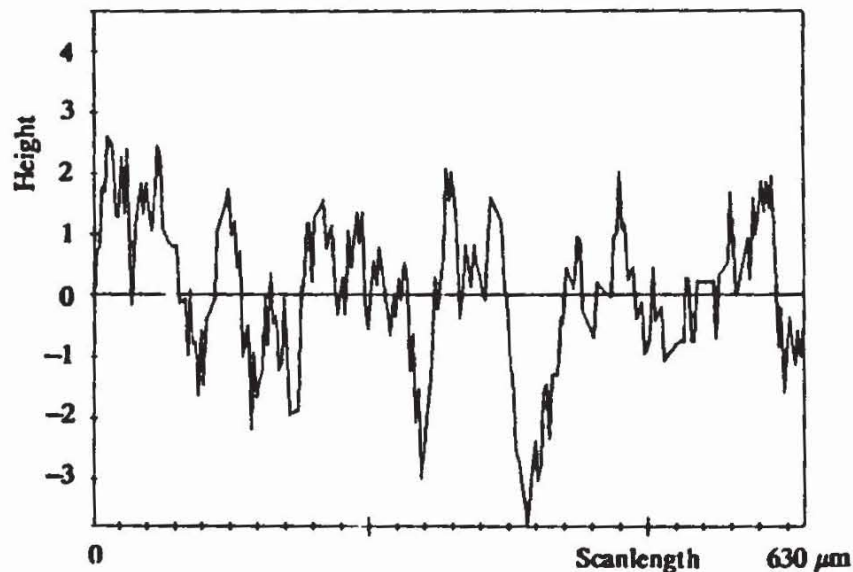


Bild 3 Zerodur Glaskeramik

Der digitale Auflösungsschritt für die Profilhöhe ist hier $0,5\text{nm}$ und die Reproduzierbarkeit nach einer digitalen Hochpaßfilterung mit einer "Cut off-Wellenlänge von $100 \mu\text{m}$ besser als 1nm .

6. Lateralauflösung

Bild 4 zeigt schematisch den fokussierten Gaußschen Strahl /2/ durch ein aberrationsfreies Objektiv. In jedem Querschnitt x' ist der Verlauf des Amplitudenbetrages $|a(x')|$ und der Intensität $I(x')$ gaußförmig:

$$|a(x')| = A \exp\left(-\pi \frac{x'^2}{w_x'^2}\right) \quad (1)$$

Dabei ist w_x die Fleckbreite der Gaußfunktion (gemessen als Breite des flächengleichen Rechtecks, also als Äquivalenzbreite /3/).

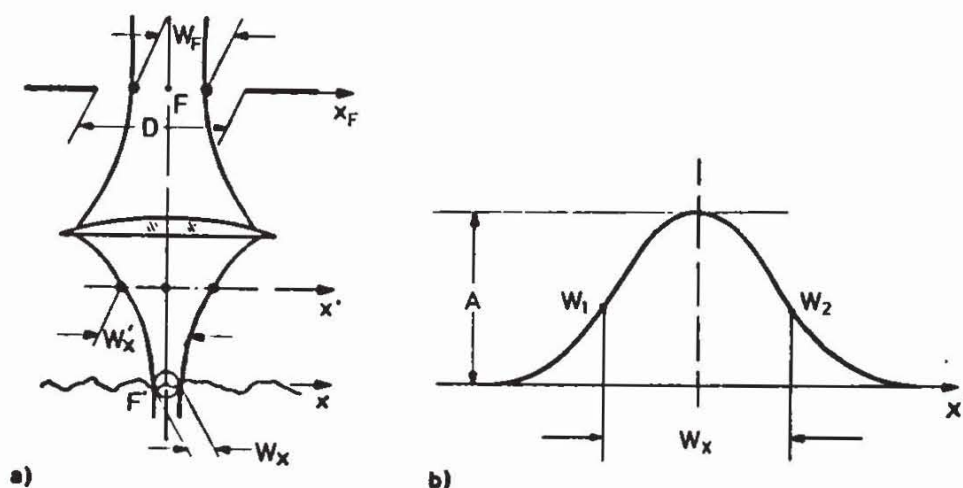


Bild 4 Gaußscher Abtaststrahl

Innerhalb von $w'_x/2$ fällt die Amplitude auf 45,6% des Zentralwertes, die Intensität auf 0,208. Die gekrümmten Linien stellen die Verbindungslinien der Fleckbreiten längs der optischen Achse dar. Die Fleckbreiten nehmen in der Strahltaile einen kleinsten Wert an. Mit einer breiten Taille in der Blendenebene x_F (dies ist die vordere Brennebene) des Abtastobjektives ergibt sich in der hinteren Brennebene (der Objektebene) eine Abtasttaile mit dem Durchmesser w_x

$$w_x = \frac{\lambda f'}{w_F} \quad (w_F < D) \quad (2)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Lichtes und f' die Brennweite des Abtastobjektives. Die numerische Apertur ist durch den Durchmesser D der Blende gegeben:

$$NA = D / (2 \cdot f') \quad (3)$$

Wichtig ist nun die Tatsache, daß sich die Lateralauf-
lösung je nach dem Aperturausleuchtverhältnis V ändert,

$$V = \frac{D}{w_F} \quad (4)$$

und daher Angaben über die Lateralauf-
lösung ohne Berücksichtigung dieses Aperturausleuchtverhältnisses V nicht aus der Numerischen Apertur abgeleitet werden können. Um eine Vignettierung des reflektierten Strahles bei geneigten

Oberflächenelementen zu vermeiden, sollte $V > 1$ sein, also D größer als die Strahltaile w_F . Wir schlagen für eine einfache Näherungsbetrachtung den Durchmesser dieses Abtastfleckes als Lateralauflösung x_{lat} vor. Dann wird

$$\Delta x_{lat} = w_x = \frac{\lambda V}{2 NA} \quad (V > 1) \quad (5)$$

Der Vorteil dieser Definition ist, daß sie für $V < 1$, in die Formeln der klassischen Beugungstheorie der mikroskopischen Auflösung übergehen:

$$\Delta x_{lat} = \frac{\lambda}{2NA} \quad (V \leq 1) \quad (6)$$

Für $V < 1$ ist die Apertur nahezu gleichmäßig ausgeleuchtet und die Auflösung wird unabhängig von V . In (6) ist eine Sinc^2 -Verteilung der Intensität im Fokus zugrundegelegt (entsprechend einer eindimensionalen Betrachtung; bei einer zweidimensionalen Betrachtung ergibt sich die Airy-Verteilung, die einen unwesentlichen Faktor 1,22 im Zähler von (6) bewirken würde). Δx_{lat} ist dann einerseits der Abstand vom Zentrum bis zum ersten Minimum, andererseits wiederum die Äquivalenzbreite dieser Verteilung.

In /7/ wird die Definition $\exp(-x^2/w_0^2)$ mit dem Fleckradius w_0 verwendet. Es gilt $2 w_0 = 2 w_x / \sqrt{\pi} = 1.128 w_x$. Daher ist bei Angaben der Lateralauflösung immer die zugrundeliegende Definition anzugeben. Eine weniger willkürliche Beschreibung der Lateralauflösung stellt die Übertragungsfunktion der Profilhöhen dar.

7. Profil- Übertragungsfunktion

In Bild 5a ist der Übertragungsfaktor sinusförmiger Höhen-Strukturen über der Ortsfrequenz f_x in Perioden pro mm aufgetragen. Da die Übertragung nichtlinear in den Höhen ist, gilt die Kurve nur für den Fall kleiner Amplituden dieser Höhen, $a_h \ll \lambda$. Es wurden gaußförmige Strahlen vorausgesetzt die von der Blende sowohl beim Hin- als auch beim Rücklauf beschnitten werden. Die hier gezeichneten

Kurven gelten für einen Detektor, der groß gegenüber dem fokussierten Strahl in der Detektorebene ist.

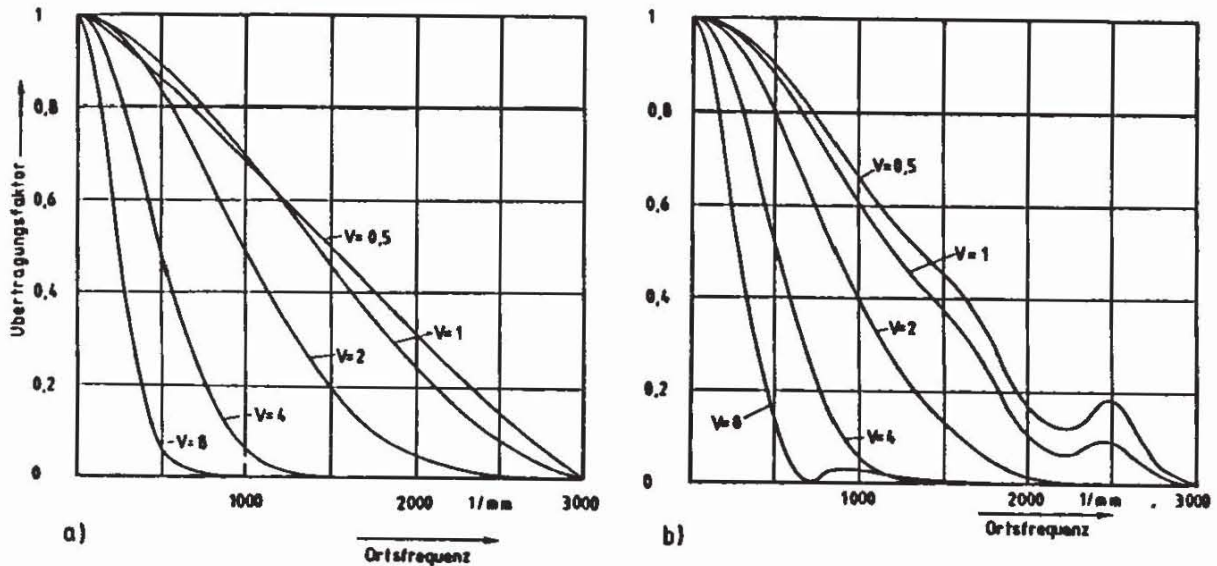


Bild 5 Profilhöhen Übertragungsfunktion. a) aberrationsfreies Abtastobjektiv, b) spärliche Aberration von einer Wellenlänge am Pupillenrand.

Jeder Profilverlauf kann durch eine Fourier-Zerlegung in sinusförmige Elementarstrukturen zerlegt werden. Breite Strukturen mit einer großen Periodenlänge $p = 1/f_x$ werden nahezu unvermindert übertragen, $H(f_x) \approx 1$. Je feiner die Struktur ist, je größer also f_x ist, desto kleiner wird der Übertragungsfaktor. Feine Details werden dadurch im gemessenen Profil nur geschwächt wiedergegeben. Bild 5a macht deutlich, daß diese Tiefpaßfilterung kontinuierlich über einen sehr großen Frequenzbereich stattfindet und daß die Übertragung bei der Grenzfrequenz $f_g = 2 NA/\lambda$ aufhört. Man beachte, daß der Kehrwert der Grenzfrequenz mit der Lateralauflösung nach (6) übereinstimmt.

Da in Wirklichkeit das Abtastobjektiv nicht völlig frei von Aberrationen ist, wird in Bild 5b eine numerische Berechnung der Übertragungsfunktionen für ein Objektiv mit sphärischer Aberration (eine Wellenlänge am Pupillenrand) gezeigt. Die Übertragungskurven werden ungünstiger, jedoch zeigt sich eine wesentliche Verschlechterung vor allem bei

Apertur-Ausleuchtverhältnissen $V < 1$ und bei hohen Ortsfrequenzen. Eine wesentliche Verschlechterung wird durch grobe Defokussierungen bewirkt. Daher wurde eine automatische Fokussachführung vorgesehen (AFC in Bild 1).

8. Abhängigkeit von den optischen Konstanten der Oberfläche -Phasensprünge

Es ist bekannt daß die Phase einer reflektierten Welle von den optischen Konstanten der Oberfläche abhängt. Würde man z.B. eine Stufe profilometrieren, die nach Bild 6 aus einer Grundplatte aus Glas und einer aufgedampften Metallschicht der (geometrischen) Dicke D besteht, so würde das Profilometer an beiden Oberflächen eine unterschiedliche Phase detektieren und die Messung der Kantenhöhe D wäre verfälscht. (Um D trotzdem richtig zu messen, kann man über beide Grenzflächen eine gleichmäßige Metallschicht aufdampfen).

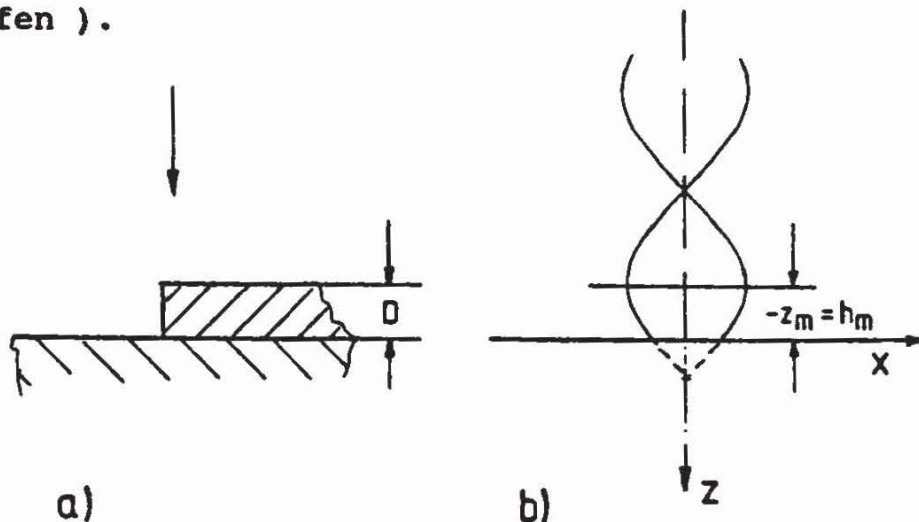


Bild 6 Phasen bei der Reflexion

In /4/ Seite 150 ff wird dieses Phänomen in großer Allgemeingültigkeit behandelt. Die einfallende und die reflektierte Welle bilden über der Oberfläche Schichten gleicher Energiedichte parallel zur Oberfläche, die bei senkrechtem Einfall untereinander den Abstand $\lambda / 2$ haben. Für die Messung der Entfernung ergibt die Lage des Energiedichtemaximums, das der geometrischen Oberfläche am nächsten liegt, einen eindeutigen Bezugspunkt. Der Abstand

des Energiedichtemaximums kann nach /4/ aus den komplexen Reflexionskoeffizienten der Grenzfläche oder allgemeiner des Schichtsystems berechnet werden. Mit Bild 6b ist zunächst

$$h_m = -z_m = \frac{-\alpha_m \lambda}{4 \pi \cos \varphi_0} \quad (7)$$

mit α_m der Phase des Energiedichtemaximums gemessen entlang der z-Achse, die hier mit der optischen Achse zusammenfällt; φ_0 ist der Einfallswinkel der Welle. Es ist nun

$$\alpha_m = \arg \left\{ \frac{2 \bar{E}_0^* W R \bar{E}_0}{\bar{E}_0^* (I + R^* R) \bar{E}_0} \right\} \quad , \quad (8)$$

wobei der Jonesvektor \bar{E}_0 nach /4/ Seite 35 die Polarisationsform des Lichtes, W die Matrix für die Beschreibung eines schrägen Einfalls des Lichtes, R die nichtnormierte, Matrix der Reflexion an der Oberfläche oder an dem Schichtsystem bedeuten, wie sie in /4/ definiert werden; I ist die Einheitsmatrix. Für senkrechtem Einfall, $\varphi_0 = 0^\circ$, ist

$$\alpha_m = \arg (R_{\perp}) = \arg (R_{\parallel}) - \pi \quad , \quad (9)$$

wobei R_{\perp} und R_{\parallel} die Matrizenelemente der Reflexion für senkrechte und waagrechte Schwingungsrichtung des Lichtes sind. Für eine einfache Grenzfläche sind dies die Fresnelschen Koeffizienten der Reflexion. Damit wird der scheinbare Stufensprung Δh bei einem Materialwechsel für einen senkrecht einfallenden Abtaststrahl mit einer ebenen Fläche gleicher Phase in der Taille und einer Abtastfleckbreite, die größer als einige Wellenlängen ist, berechnet:

$$\begin{aligned} \Delta h &= h_{m1} - h_{m2} \\ &= (\arg \{ R_{\perp 2} \} - \arg \{ R_{\perp 1} \}) \lambda / 4\pi \\ &= (\arg \{ R_{\parallel 2} \} - \arg \{ R_{\parallel 1} \}) \lambda / 4\pi \end{aligned} \quad (10)$$

Um diesen Sprung muß der Wert einer Stufenmessung nach Bild 6a korrigiert werden, wenn ein Materialwechsel mit der Stufe verbunden ist.

Grenzen der Profilmessung und Ausblick

Kanten mit einer Höhe $> \text{ca. } \lambda/16$ und große lokale Profilsteigungen, wie sie durch die Riefen geschliffener Metalloberflächen gegeben sind, oder starke Profilunregelmäßigkeiten innerhalb des Abtastfleckes führen zu einer Verschlechterung der optischen Signale an dem Heterodyn-detektor und damit zu einem Abbruch der Heterodyn-Phasenmessung. Die Profilmessung wird dann abrupt abgebrochen. Nach unseren Erfahrungen ist dies der Fall für geschliffene Oberflächen mit einem Mittenrauhwert von $\text{ca. } R_a > 50 \text{ nm}$. Oberflächen dieser Art sind auch mit photometrischen Profilometern durch nachträgliche Profilverarbeitung nicht mehr korrigierbar. Dagegen kann man nach unseren bisherigen Erfahrungen davon ausgehen, daß beim Heterodynprofilometer die Messung vertrauenswürdig ist, falls sie ohne Abbruch aufgenommen werden kann.

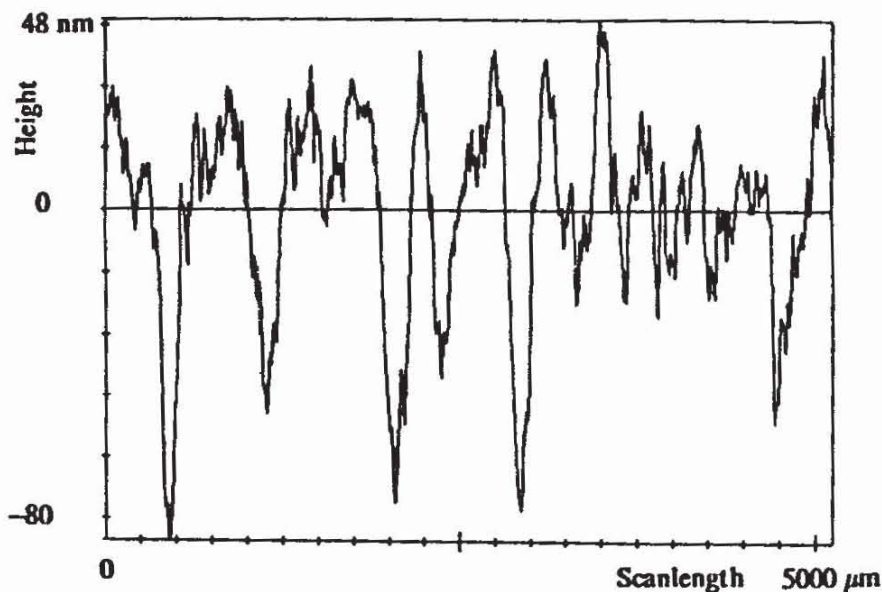


Bild 7 Metalloberfläche

Stärkere Laser und eine verbesserte Heterodynelektronik können im Verbund mit einer Neigungskompensation zur Überwindung dieser Grenze beitragen. An glatten Oberflächen mit Rauheiten $R_a < 20 \text{ nm}$ können jedoch schon heute große Höhenbereiche an geometrischen Formen bis zu $40 \mu\text{m}$

aufgenommen werden, wobei der Bereich nur durch den Verstellbereich des Piezotranslators zur automatischen Fokussierung begrenzt ist und daher verhältnismäßig leicht erweitert werden kann.

Eine erfolgreiche Messung im Grenzbereich zeigt Bild 7. Es ist eine handpolierte Metalloberfläche mit einem Mittenrauhwert von $R_a = 25 \text{ nm}$. Deutlich ist hier zu sehen, daß der Poliervorgang vorwiegend an den Profilkuppen stattgefunden hat, und tiefe Täler von der vorausgehenden gröberen Bearbeitungsstufe noch vorhanden sind.

Bild 8 zeigt das Profil eines hartmetallbestückten Kipphebels, wobei Bild 8a das Ergebnis unmittelbar nach Abrichten der Schleifscheibe wiedergibt und Bild 8b das Profil eines Kipphebels, der mit einer abgenutzten Scheibe geschliffen wurde.

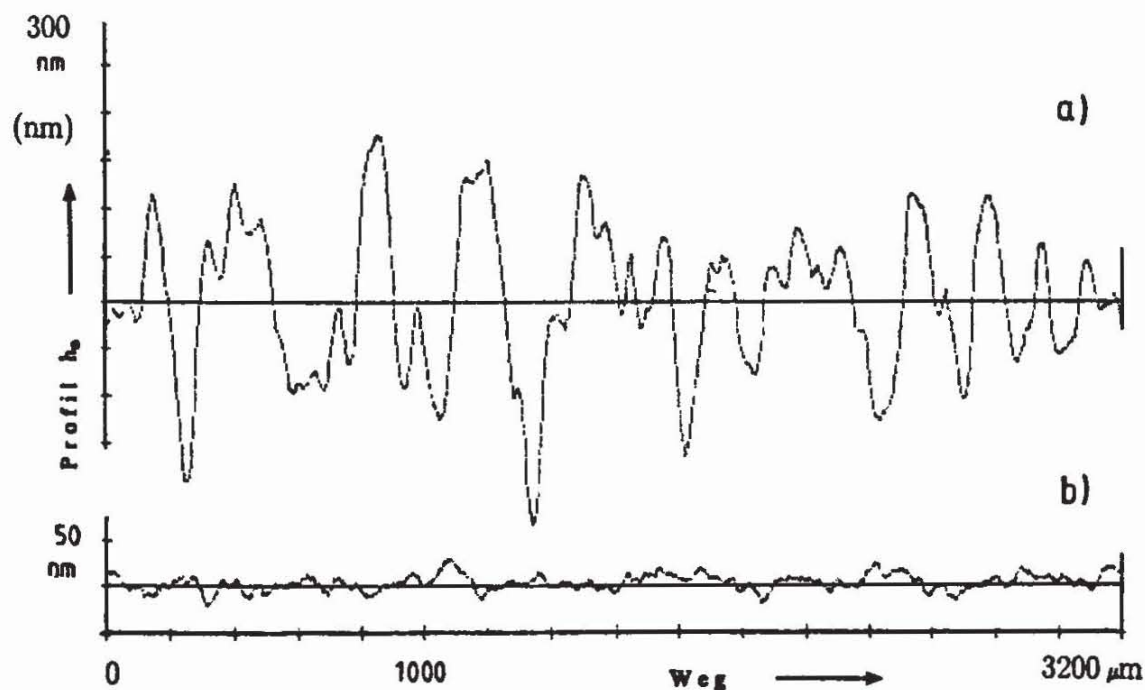


Bild 8 Hartmetall-Kipphebel feingeschliffen, cutoff=250 μm

Heterodyn-Profilometer sind für höchste Vertikal- und Lateralauflösungen geeignet. Die Grenzfrequenz der Profilhöhen-Übertragungsfunktion liegt für die Wellenlänge des He-Ne Lasers bei 3000 1/mm. Es zeichnet sich somit für die

Zukunft des Heterodyn-Profilometers die Anwendung als hochgenaues Laborgerät ab, geeignet zur Messung von Metall-Glas und Halbleiteroberflächen. Weitere Anwendungsgebiete ergeben sich bei der Untersuchung von Kunststoffen, Lacken und Beschichtungen. Der Meßbereich von derzeit 40 µm kann noch erweitert und die Höhengauflösung für spezielle Auslegungen noch unter 0,5 nm gesenkt werden.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieser Arbeit.

Literatur

- /1/ G.E.Sommargren: Applied Optics 20 (1981) S 610/618.
- /2/ K.Leonhardt, K.-H.Rippert und H.J.Tiziani:
Technisches Messen tm, 54 (1987) S 243/252.
- /3/ R.Bracewell: The Fourier Transform and its Applications,
Mc.Graw Hill, New York 1965.
- /4/ K.Leonhardt: Optische Interferenzen,
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1981.
- /5/ G.Makosch, B.Solf: SPIE Proc. Vol.316 (1981) S 42/53.
- /6/ Z.F.Zhou: PTB-Mitteilungen 94 (1984) S 15/21.
- /7/ H.Kogelnik and T.Li: Appl.Optics 5(1966) S.1550-1567.