

Verfahren zur Optischen Rauheitsmessung und Mikroprofilometrie

K. Leonhardt, K.-H. Rippert und H.-J. Tiziani
Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 7000 Stuttgart 80

Einleitung

An optischen Verfahren zur Messung der Oberflächenrauheit und Welligkeit werden seit Jahren zunehmend große Erwartungen gestellt. Das gilt besonders dann, wenn sie automatisierbar sind, Möglichkeiten schaffen, auch an Stellen der Produktionsprozesse Messungen durchzuführen, wo bisher aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht gemessen wurde, und wenn die Messungen eine quantitative Auswertung in bestehenden und genormten Kennwerten erlauben. Vereinfachte Sensoren, die diese Anforderungen nicht erfüllen, können trotzdem von Nutzen sein, falls sie auf große Abtastgeschwindigkeit optimiert zur Erkennung von Defekten geeignet sind.

In diesem Beitrag werden wegen der Kürze der Darstellung nur einige der bekannten Verfahren behandelt. Zwei Verfahren der Mikroprofilometrie, die im Institut für Technische Optik Stuttgart zur Zeit bearbeitet werden und ein Verfahren der integralen Rauheitsmessung, das in unserem Institut entwickelt wurde, werden ausführlicher beschrieben.

Definition und Zusammenhänge

Wir gehen vom Höhenprofil $h(x)$ der Oberfläche aus. *)
Von den genormten vertikalen Rauheitsparametern bildet der quadratische Mittenrauhwert R_q nach DIN 4762E,

$$R_q^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^2 = \sigma_h^2 \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

als Standardabweichung σ_h oder "rms-value" eine Brücke zwischen Experiment, Theorie und Normung. Für gaußförmige Höhenverteilungen gilt der Zusammenhang mit dem gebräuchlicheren arithmetischen Mittenrauhwert R_a

$$R_{a \text{ Gauß}} = \sqrt{2/\pi} R_{q \text{ Gauß}} \approx 0,8 R_{q \text{ Gauß}} \quad (2)$$

Für homogene Rauheitsprofile (wie z.B. durch Schleifen und Polieren) ist die Gaußverteilung erfahrungsgemäß eine sinnvolle Näherung, nicht jedoch für isolierte Defekte wie Kratzer.

Um dem Funktionsverhalten gerecht zu werden, sind weitere Parameter anzugeben. Sie sollten unabhängig von den Vertikalparametern sein und über die Statistik erster Ordnung hinausführen. Wir verwenden hier die Weite w_a der Autokorrelation des Oberflächenprofiles. Die Höhenwerte werden im Abstand Δx abgetastet. Dann wird

$$r(\Delta) = \frac{1}{R_q^2 (N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} h(x_i) h(x_i + \Delta), \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

$k = 0, 1, \dots, k_{\max},$
 $\Delta = k \cdot \Delta x,$
 $N \gg k.$

*) $h(x)$ sei als stationärer, ergodischer Zufallsprozess mit Mittelwert $h(x) = 0$ angenommen

Formal ergibt sich w_a als Äquivalenzweite von $r^*(\Delta)$

$$w_a = \int r^*(\Delta) d\Delta \quad (4)$$

wobei $r^*(\Delta)$ aus $r(\Delta)$ durch Mittelungen und Korrekturen wegen der endlichen Abtastlänge hervorgeht.**) Für gaußförmig verteilte Höhen läßt sich ein Zusammenhang zwischen der "mittleren quadratischen Wellenlänge" λ_q nach DIN 4762E und w_a finden:

$$\lambda_q = 2 \pi \frac{\sigma_h}{\sigma_h'} = \sqrt{2 \pi} w_a \quad (5)$$

σ_h^2 ist das quadratische Mittel der Profilsteigungen;
 w_a gibt den lateralen Abstand längs des Profilverlaufes an, innerhalb dessen Profilhöhen noch korreliert sind.
Somit ist w_a groß für glatte, langwellige Profile und klein für stark zerklüftete Profile.

**) Auf definitorische und meßtechnische Konsequenzen wird wegen der Kürze der Darstellung nicht eingegangen.

Optische Mikroprofilometrie

In der optischen Mikroprofilometrie wird die Oberfläche wie beim mechanischen Tastschnittgerät entlang einer Linie abgetastet. Die Spitze der Diamantnadel wird dabei durch einen möglichst kleinen Lichtfleck ersetzt (Abb.1). Zur Extraktion der Höheninformation eignen sich vor allem interferometrische Prinzipien, insbesondere Heterodynverfahren und das Verfahren des photometrischen Gleichgewichtes. Die Verarbeitung und Darstellung der Meßergebnisse und Kennwerte entspricht weitgehend dem mechanischen Tastschnittverfahren /1/.

Mikroprofilometrie nach dem Verfahren des photometrischen Gleichgewichtes

Dieses Verfahren wurde ursprünglich aus Fokussierverfahren entwickelt /2, 3, 4 u. andere/. Abb. 1 zeigt eine Realisation mit Laserlicht. Über einen Strahlenteiler ST1 wird der aufgeweitete Gaußsche Strahl des He Ne-Lasers mit einem Abtastobjektiv O3 auf die Oberfläche fokussiert. Abgenommen ein ebenes, achsenrechtes Flächenelement der Oberfläche befindet sich genau in der Strahl-taille des Fokus. Dann läuft der Strahl in sich zurück und kann über die Strahlenteile ST1 und ST2 auf die bildseitig extra- bzw. intrafokalen Detektoren DET1 und DET2 gelangen. Diese sind so justiert, daß in der Nullstellung gleiche Ströme zu dem Differenzverstärker fließen. Ändert sich im Laufe der Profilabtastung die örtliche Profilhöhe $h(x)$, so werden die Lichtströme durch die Detektoröffnungen ungleich, und der Differenzverstärker liefert ein vorzeichenrichtiges Signal $i=i_1-i_2$ für die Profilhöhe $h(x)$ (Lichtwaage). Durch eine Kalibrierkurve (Abb. 2), die im Auswerterechner oder Mikroprozessor in Form eines Polygons abgelegt ist, kann die Profilhöhe y für jeden Abtastpunkt errechnet werden.

$$y = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2 + a_3 \cdot i^3 \quad (6)$$

Stückweise glatte und wellige Oberflächen ohne große lokale Profilsteigungen lassen sich mit dem Verfahren verhältnismäßig einfach und zuverlässig profilometrieren. Für geschliffene Oberflächen, deren Profilsteigungen beträchtliche Werte annehmen können, treten Scheinauflösungen und Fehlmessungen auf, die sich z.B. dadurch zeigen, daß Kalibrierkurven, die an verschiedenen Stellen einer Oberfläche aufgenommen wurden unterschiedlich bezüglich den Koeffizienten a_i in Glg(6) ausfallen [5]. Unsere Messungen zeigen, daß durch Normierung des Differenzsignals

$$i_n = \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \quad (7)$$

dieser Effekt wesentlich verringert, jedoch nicht vollständig vermieden werden kann (Abb.2b). Das Prinzip der photometrischen Balance kann auch durch eine Foucaultsche Schneide und andere Prinzipien verwirklicht werden [6].

Einige Profilaufzeichnungen als Beispiel: Abb.3 zeigt das Profil eines mit dem Auge gerade noch feststellbaren Kratzers auf einem Oberflächenspiegel. Man erkennt außer den Vertiefungen auch starke Aufwertungen, die bei einer mechanischen Abtastung zumindest teilweise eingeebnet worden wären. Die laterale Auflösung liegt bei $0,5 \mu\text{m}$.

In Abb.4a ist der Profilverlauf eines Oberflächen-Vergleichsnormals (Ruoo 104N2) mit dem nominellen arithmetischen Mittenrauhwert $R_a = 0,050 \mu\text{m}$ gezeigt. Rauschen und Zufällige Änderungen durch Erschütterungen bleiben bei diesen Messungen kleiner als $\sim 10\text{nm}$, so daß von einer Auflösung von $\Delta h = 20\text{nm}$ ausgegangen werden kann. Aus den Kalibrierkurven der Abb.4b entnimmt man einen Meßbereich von

$$H_H \pm 2,5\text{nm}.$$

Die laterale Auflösung beträgt ca. 0,5 nm. Die aus dem Profilverlauf der Abb. 4b berechnete Autokorrelationsfunktion zeigt, daß die Weite w_a der Oberflächenautokorrelation von der Größenordnung der lateralen Auflösung ist. Damit nehmen die Verläufe den Charakter von "fractals" an /7/.

Die Lichtwaage kann auch auf höhere Empfindlichkeit ausgelegt werden. Für numerische Aperturen von $NA = 0,9$ werden Auflösungen bis ca. 1 nm angegeben. Das Verhältnis Meßbereich zu Auflösung kann dadurch verbessert werden, daß man die Lichtwaage zu einer Autofokusregelung für das Abtastobjektiv benutzt und die eingeregelterte Achsialposition des Abtastobjektives als Profilhöhe durch ein angeschlossenes Meßsystem abgreift (Nullmethode).

Heterodynprofilometrie

Das Prinzip der Heterodyninterferometrie kann auch für die Mikroprofilometrie angewendet werden, bisher jedoch nur für polierte und "superglatte Flächen", bei denen die Profilsteigungen genügend klein bleiben /8/, oder bei denen die mittleren Rauigkeiten sehr klein sind /9/. Ein phasenschiebendes Mirau-Profilometer wird in /10/ beschrieben. Am Institut für Technische Optik Stuttgart wird daran gearbeitet, den Anwendungsbereich zu größeren Steigungen hin zu erweitern.

Abb. 5 zeigt das Prinzip unseres Heterodynprofilometers. Der Zweifrequenz-Laserkopf und die Auswertelektronik stammen aus einem kommerziellen Laser-Meßsystem. Durch ein Magnetfeld um den Resonator des He Ne-Lasers (Zeemaneffekt) erhält man zwei zueinander orthogonal polarisierte Teilstrahlen mit den Frequenzen ν_1 und ν_2 . Detektor Det1 zeigt die Differenzfrequenz $\nu_1 - \nu_2 = 2$ MHz. Die Zählung durch Det2 wird vorzeichenrichtig immer dann um eine Periode geändert, wenn sich der Lichtweg im Meßstrahlengang um eine Wellenlänge geändert hat. Das Gerät interpoliert das in-

terferometrische Intervall bis zu einer inkrementalen Höhendifferenz von $\Delta h = 0,5 \text{ nm}$. Die numerische Apertur des Abtastobjektives beträgt $NA = 0,95$, die laterale Auflösung je nach Aperturausleuchtungsverhältnis $0,3 \text{ }\mu\text{m} \dots 1 \text{ }\mu\text{m}$.

Abb. 6 zeigt das Mikroprofil eines Oberflächenspiegels. Zu erkennen ist eine Welligkeit mit einer Wellenlänge von ca. $500 \text{ }\mu\text{m}$, nicht vollständig abgetragene Schleifspuren von ca. 25 nm Tiefe und die auspolierten Plateaus. Abb. 7 zeigt ein Profil eines Oberflächenvergleichsnormales des Bearbeitungsverfahrens "Handpolieren" mit einem nominalen arithmetischen Mittenrauhwert von $R_a = 0,05 \text{ }\mu\text{m}$. In diesem Profil treten schon verhältnismäßig große Profilsteigungen auf.

Abb. 8 zeigt die Möglichkeit unbeschichtete Glasoberflächen zu profilometrieren. Es handelt sich um eine Deckglas-Oberfläche eines Kleinbild-dias. In Abb. 8 sind die digitalen Auflösungsschritte deutlich zu sehen ($\Delta h = 1,0 \text{ nm}$, wegen geänderter Interferometer Konfiguration).

Lackoberflächen wurden ebenfalls profilometriert.

Abb. 9 zeigt einen Mikroprofilschrieb für eine Meßlänge $>1000 \text{ }\mu\text{m}$. Das Mikroprofil gibt Aufschluß über das Streuverhalten des Lackes.

Differentialprofilometer /8, 11, 12/ führen die Foki beider Teilstrahlen mit einer lateralen Aufspaltung gemeinsam über die Oberfläche und eliminieren dadurch Fehlauflösungen durch Erschütterungen, mechanischen Driften und Restfehler in den Führungen. Die laterale Aufspaltung läßt sich durch ein Wollastonprisma erreichen. Es ergeben sich jedoch starke Einschränkungen in der Anwendbarkeit.

In der Literatur /10/ werden Höhenauflösungen bis $0,1 \text{ nm}$ bei Lateralauflösungen von $2 \text{ }\mu\text{m}$ bzw. $3 \text{ }\mu\text{m}$ berichtet. Es ist jedoch schwierig, den Meßbereich nach oben bis hin zu den geschliffenen Metalloberflächen auszudehnen, wo die Autokorrelationsweiten nach Glg. 4 sehr klein und das

quadratische Mittel der Profilsteigungen groß wird (Vgl. Abb. 4b). Bemerkenswert sind die Werte für die laterale Auflösung unseres Verfahrens, das im Falle perfekter Fokussierung je nach Apertur-Ausleuchtungsverhältnis $\Delta x_1 = 0,3 \dots 1 \mu\text{m}$ beträgt.

Verfahren der integralen Rauheitsmessung

Im Gegensatz zu den profilerzeugenden Verfahren der Mikroprofilometrie werden bei den integralen Verfahren Werte angezeigt, die dadurch entstanden sind, daß das Licht über ein Oberflächengebiet mittelt.

Für sehr kleine Rauheiten $R_q \hat{=} \sigma_h = \lambda/30$ hat sich das Verfahren des "Total Integrated Scatter" oder TIS bewährt [13]. Dabei wird hochkohärentes Licht (z.B. He Ne-Laser) an einer Fläche von typischerweise 1 mm Durchmesser [10] der rauhen Prüflingsoberfläche reflektiert. Gemessen wird das Verhältnis der reflektierten Intensität ohne gerichteten Anteil zur reflektierten Intensität insgesamt. Dies kann im Prinzip in einer Ulbrichtschen Kugel erfolgen. Bei senkrechtem Einfall auf die Oberfläche wird der Streuwert TIS

$$\text{TIS} = 1 - \exp \left[-4 k^2 \sigma_h^2 \right] \approx 4 k^2 \sigma_h^2, \quad (8)$$

wobei $\sigma_h \hat{=} R_q$ der quadratische Mittenrauhwert nach (1) ist und $k = 2\pi/\lambda$ die Wellenzahl des Lichtes mit der Wellenlänge λ . Dies gilt für $\lambda = 633 \text{ nm}$ ungefähr bis $\sigma_h < 25 \text{ nm}$. Glg. (8) stellt eine Näherung dar, in der der TIS-Wert nur vom vertikalen Rauheitsparameter $\sigma_h \hat{=} R_q$ abhängt und zwar quadratisch:

$$R_q \hat{=} \sigma_h \sqrt{\frac{\text{TIS}}{4 k^2}} \quad (9)$$

Der Meßbereich bis ca. 25 nm für $\lambda = 633$ nm, erlaubt die Messung und Kontrolle vieler polierter Metall-, Glas- und Kristalloberflächen und kann durch Licht längerer Wellenlänge erweitert werden.

Glg. (8) gilt, falls die Autokorrelationsweite w_a der Oberfläche klein gegenüber dem ausgeleuchteten und zum Streulicht beitragenden Oberflächengebiet ist, und die Oberfläche als stationärer, ergodischer Zufallsprozeß aufgefaßt werden kann. Dies ist für einzelne Kratzer auf einer sonst glatten Oberfläche nicht erfüllt. Trotzdem kann eine entsprechende Streulichtmessung auch in Fällen eingesetzt werden, wo isolierte Defekte festzustellen sind, indem man einen bestimmten maximalen Streulichteffect zuläßt, ohne auf λ_h rückzuschließen. Mehr Informationen über die Oberfläche ergeben winkelauflösende Streulichtverfahren (Angle Resolved Scattering, ARS). Die theoretischen Zusammenhänge sind hier kompliziert und zum Teil noch Gegenstand aktiver Forschung.

Integrale Rauheitsmessung aus der kohärenten Streulichtindikatrix

Eine Konfiguration zur Streulichtmessung mit kohärentem Licht und senkrechtem Einfall und winkelauflösender Messung durch Diodenzellen in der Fourierebene hat in jüngster Zeit Bedeutung erlangt /14, 15/. Hier sollen einige wichtige, allgemeingültige, bisher nicht beachtete Eigenschaften aufgezeigt werden.

Abb. 10 zeigt das Prinzip der Messung. Monochromatisches Licht fällt kollimiert auf die zu untersuchende Oberfläche. Das rückgestreute Licht wird von der Diodenzeile DZ detektiert, die in der hinteren Brennebene des Objektivs angeordnet ist. Dadurch ist jedem Abstand x_j auf der Zeile ein Streuwinkel zugeordnet.

Als Maß für die Streuung hat sich das Quadrat des "Trägheitsradius" der Intensitätsbelegung der Detektorzeile bewährt.

$$S_N = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 I_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot 100 \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

Der Streuwert S_N ist jedoch nicht allein vom Mittenrauhwert der Oberfläche (Vertikalparameter z.B. R_q , R_a , R_z , usw.) bestimmt, sondern signifikant von Horizontalparametern, z.B. der Autokorrelationsweite w_a nach Glg (4), die bei einer zu messenden Probe ebenfalls unbekannt sind. Abb. 11 zeigt eine numerische Berechnung eines Intensitätsverlaufes auf der Detektorzeile für einen festen Wert des Vertikalparameters $R_q = 0,128 \mu\text{m}$; $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ und w_a als Kurvenparameter. Es ergeben sich daher sehr unterschiedliche Streuwerte S_N nach (10) für ein und dieselbe Rauigkeit. *

Verfahren nach dem Weißlicht-Zufallsphasenkontrast, WPC

(Weißlichtverfahren)

Bei diesem Verfahren wird eine voneinander unabhängige Bestimmung des Vertikal- und eines Horizontalparameters erstmals möglich /16, 17, 18, 19/.

Abb. 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau, der aus dem Weißlichtverfahren nach /20/ hervorgegangen ist. Licht mit breitem Spektrum (ungefiltertes Glühlampenlicht) fällt über den Kollimator K und den Teilerwürfel ST auf die zu messende Oberfläche. Die räumliche Kohärenz wurde durch die Größe der Kollimatorblende KB bestimmt.

* In Wirklichkeit gehen in optische Messungen noch weitere statistische Charakteristiken der Oberfläche ein.

Über den Strahlenteiler ST wird die Oberfläche durch das Objektiv AO in die Bildebene BE abgebildet. Der Detektor ist defokussiert in der Detektorebene DE angeordnet und tastet die niederkohärente Weißlicht-Speckleintensität ab. Die Abtastung erfolgt durch eine Relativbewegung zwischen Bild der Oberfläche und der Detektoröffnung oder durch eine Detektorzeile. In [16] werden ausführliche Details angegeben. Über einen Spiegel PS wird dieser Intensität inkohärent Gleichlicht überlagert. Der Zufallskontrast C wird in einem Minicomputer oder Mikroprozessor-Auswertegerät aus der Standardabweichung der Intensität σ_I und der mittleren Intensität $\langle I \rangle$ gebildet, indem eine genügend große Anzahl (ca. 2000) diskrete Intensitätswerte digitalisiert werden.

$$C = \sigma_I / \langle I \rangle \quad (11)$$

Wichtig zum Verständnis des Verfahrens ist der Verlauf von C nach (11) über dem Mittenrauhwert R_q . *)
Abb. 13 zeigt die Verläufe schematisch. Wir betrachten zunächst kohärentes Laserlicht (ausgezogene Kurve). Der Kontrast für Laserlicht steigt ausgehend von $R=0$ (idealer Spiegel) bis zu einem Sättigungswert $C=1$. Dieser liegt, unter der Voraussetzung, daß viele voneinander unabhängige Stellen innerhalb des ausgeleuchteten Fleckes der Oberfläche zur Interferenz im Detektor beitragen, bei $R_q \approx \lambda/4$.
Für Oberflächen der Metallverarbeitung liegt der interessierende Rauheitsbereich bei $R_q \gtrsim 0.1 \mu\text{m}$, also in der Sättigung, wo von C nicht mehr auf R geschlossen werden kann.
Für Weißlicht wurde angenommen [20], daß die Kontrastkurven nach Erreichen eines Maximums wieder abfallen, weil bei begrenzter Kohärenzlänge des Lichtes Teilamplituden aus Oberflächenstellen mit unterschiedlichen Profilhöhen $h(x)$ nur noch mit vermindertem Kontrast (gestrichelte Kurve Abb. 13) interferieren.

*) Für qualitative Aussagen kann statt R_q einer der genannten Rauheitsparameter R_q , R_a , R_z gesetzt werden.

In Wirklichkeit zeigen die Kurven C über R keinen zuverlässig monoton abfallenden Verlauf, weil der Kontrast noch von weiteren unbekanntem Parametern abhängt, insbesondere von der Autokorrelationsweite w_a nach Glg. (4). Durch die Gleichlichtüberlagerung über den Spiegel SP wird jedoch trotzdem eine monotone Kennlinie C über R ermöglicht /16, 17/.

Abb. 14 zeigt den Einfluß der Gleichlichtüberlagerung für 3 Meßkurven an derselben Oberfläche, wobei das Gleichlichtverhältnis

$$t = \frac{I_c}{I_s} \quad \gamma_n = 0 \quad (12)$$

geändert wird. Dabei ist I_c die Intensität durch den Spiegel SP in der Detektorebene und I_s die Intensität des Meßstrahlenganges für eine ideal glatte Oberfläche desselben Materials. Die Kurve ohne Gleichlichtüberlagerung ($t = 0$) ist als Kennlinie ungeeignet. In doppellogarithmischer Darstellung ergibt sich mit t eine zunehmende Aufsteigung der Kontrastkurven. Dies läßt sich auch theoretisch nachweisen /17/. Die in /16/ eingeführten Maßnahmen der Gleichlichtüberlagerung, des Überganges zu niedrigerer räumlicher Kohärenz und zu großen Aperturen des Abbildungsobjektives ergeben einen robusten, zuverlässigen und verhältnismäßig einfachen Sensor mit einem großen Meßbereich nach Abb. 15.

In einer weiterführenden Entwicklung konnten erstmals der Rauheitsparameter R_q (bzw. R_a) und der Horizontalparameter w_a eindeutig und unabhängig voneinander gemessen werden. In /16/ wird gezeigt, daß das Kontrastverhältnis c

$$c = \frac{C_o}{C_m} \quad (13)$$

im Rahmen einer analytischen Kontrastformel nur noch von w_a und nicht mehr von b_h abhängt.

Der Kontrast ohne Gleichlichtüberlagerung C_0 kann simultan mit dem Kontrast mit Gleichlichtüberlagerung C_t an derselben Stelle der Oberfläche gemessen werden. Für Rauheiten $\mathcal{G}_h \gtrsim 0,15\mu\text{m}$ ergibt sich

$$w_a = \frac{(2 w_b - w_c) w_c}{(c-1) w_b/t + w_b - w_c} \quad (14)$$

wobei w_b die Weite des Bereiches auf der Oberfläche ist, aus dem Streulichtamplituden sich in der Detektoröffnung überlagern, und w_c die Kohärenzweite des Lichtes. Mit dem nach (14) bestimmten w_a läßt sich die Kontrastformel eindeutig nach $\mathcal{G}_h \hat{=} R_q$ auflösen:

$$R_q \hat{=} \mathcal{G}_h = \frac{1}{4W} \left[\frac{v_1^2}{C_0^4 \left(\frac{w_b}{w_a}\right)^4} - 1 \right]^{1/2} \quad (15)$$

dabei ist $W = 2\pi/\Delta\lambda$ und $\Delta\lambda$ die spektrale Bandbreite des Lichtes. Der Verflechtungsparameter v_1 ergibt sich zu

$$v_1 = \left(2 \frac{w_b}{w_a} - \frac{w_c}{w_a} \right) \left(\frac{w_c}{w_a} - 1 \right) \quad (16)$$

Mit den von Gerät gemessenen Werten c und C_0 kann (14) und (15) in kürzester Zeit vom Rechner oder Mikroprozessor zur Datenaufnahme berechnet werden.

Im Rahmen der Genauigkeit der zugrundeliegenden Theorie ist somit eine eindeutige Bestimmung des wichtigsten Vertikalparameters der Rauheit $\mathcal{G}_h \hat{=} R_q$ und des wichtigsten Horizontalparameters der Autokorrelationsweite w_a möglich. Experimentell bestimmte Korrekturparameter können zur Verbesserung der Elimination eingeführt werden [18]. Abb. 16 zeigt erste Messungen zur Bestätigung der Glg. (15). Zur Zeit laufende Arbeiten an diesem Eliminationsprozess lassen eine beträchtliche Erweiterung des in Abb. 16 dargestellten Meßbereiches erwarten.

Zusammenfassung

Die Grundlagen der Verfahren zu optischen Rauheitsmessung und Mikroprofilometrie werden dargestellt. Zwei Verfahren der Mikroprofilometrie und ein integrales Rauheitsmeßverfahren werden ausführlicher behandelt und neue Meßmöglichkeiten und Erkenntnisse mitgeteilt. Die Grenzen der Verfahren, Konsequenzen für die Anwendung und Ausblicke auf zu erwartende Weiterentwicklungen werden diskutiert.

Stichworte: Oberflächenmessung, Optische Rauheitsmessung
Optische Mikroprofilometrie, Rauheitsmessung
Mikrorauheit von Oberflächen, Weißlicht Speckle,
Weißlicht Zufallsphasenkontrast.

Literatur

- [1] T.R.Thomas, Ed., Rough Surfaces, Longman, London, 1982.
- [2] O.Dupuy, Revue d'Optique, 43 (1964) 217-244, 282-306.
- [3] J.Simon, Appl. Optics, 9 (1970) 2337.
- [4] A.W.Hartmann et al., Opt. Engineering 12 (1973) 95.
- [5] K.Leonhardt, K.-H.Rippert, H.J.Tiziani, Comparison of two methods of optical surface measurement. Vortrag: Horizons de l'Optique, Besançon 29.5. bis 1.6.85
- [6] G.Bouwhuis and J.J.M.Braat, in Ed. R.R.Shannon and J.C.Wyant, Applied Optics and Optical Engineering Vol IX, 1983.
- [7] B.B.Mandelbrot, Fractals, San Francisco, 1976.
- [8] G.E.Sommargren, Appl. Optics 20(1981) 610...618.
- [9] G.M.Robinson et al., IEEE Transaction on Magnetics, Vol. Mag.20, 1983.
- [10] J.M.Bennett, Opt. Engineering, 24 (1985) 380.
- [11] G.Makosch, B.Solf, High Resolution Soft X-Ray Optics, SPIE Vol 316, 1981.
- [12] Z.F.Zhou, PTB Mitteilungen, 94 (1984) 15.
- [13] H.E.Bennett und J.O.Portens, Journ, Opt. Soc. Amer 51, 1961, 123
- [14] G.Thurn und Th.Gast, Feinwerktechnik und Meßtechnik, 91 (1983) 15.
- [15] R.Brodmann et al., Werkstatt und Betrieb, 117 (1984)
- [16] K.Leonhardt, B.Pfister, Optik 58(1981) 297.
- [17] K.Leonhardt, H.J.Tiziani, Optica Acta 29 (1982) 493.
- [18] K.Leonhardt, E.Kaufmann, H.J.Tiziani, Opt. Commun. 51 (1984) 363.
- [19] R.J.Ahlers, Opt. Engineering, 24 (1985) 423.
- [20] R.A.Sprague, Appl. Optics 11 (1972) 2811.

Diskussion und Ausblick

Die optische Rauheitsmessung und Mikroprofilometrie hat in den vergangenen Jahren bedeutende Fortschritte erzielt, die durch moderne elektronische Sensoren und ein besseres Verständnis der Optik an rauhen Oberflächen möglich wurde. Die Verfahren der Mikroprofilometrie, der automatisierten Interferenzmikroskopie und des Weißlicht - Zufallsphasenkontrastes - WPC - erlauben eine quantitative Auswertung, die mit den eingeführten Verfahren, insbesondere dem des Tastschrittgerätes in Einklang gebracht werden können und Meßwerte in den bestehenden Normen und den Definitionen der Statistik liefern. Dadurch wird eine wirkungsvolle und wirtschaftliche Festlegung von Toleranzgrenzen bei der Messung in der Fertigung mit optischen Sensoren dieser Art möglich, ohne daß spezielle Kennwerte für spezielle Verfahren genormt werden müßten.

Moderne optische Sensoren zu Profilometrie, integralen Rauheitsmessung und Fehlerdetektion stehen erst am Anfang ihrer Entwicklung. Bei den Mikroprofilometern kann die Lateralauflösung von den in /10/ angegebenen Werten $\Delta x_A \approx 2 \dots 3 \mu\text{m}$ auf die in dieser Arbeit angegebenen Werte gesteigert werden. Damit wird die Lateralauflösung der in /10/ beschriebenen mechanischen Tastschrittgeräte mit einem Spitzenradius von $1 \mu\text{m}$ erreicht (unter Beachtung der zu erwartenden Profilglättungen durch elastische oder plastische Verformungen sogar übertroffen.) Auch entfallen Einschränkungen der Vergleichbarkeit der Messungen durch unterschiedlichen Umfang der in die Messung eingehenden Raumfrequenzen.

Die Geschwindigkeit der Profilaufnahme wird nicht durch die Trägheit und Schwingungsempfindlichkeit mechanischer Aufnehmer beschränkt. Bei integralen Verfahren ist eine Vergrößerung des Meßbereiches und eine Verbesserung der Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit der Meßergebnisse bei gleicher oder noch gesteigerter Schnelligkeit der Messung zu erwarten.

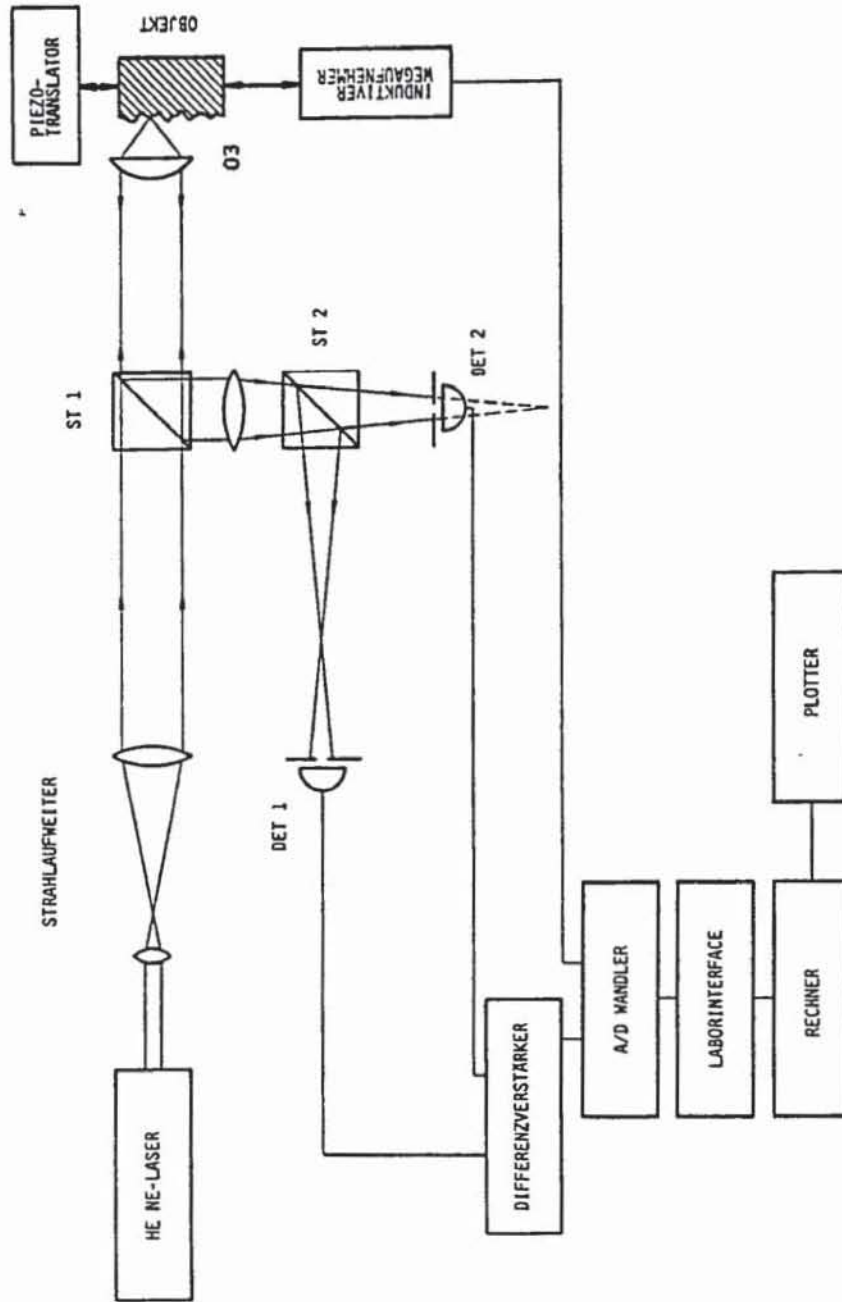


Abb. 1 Mikroprofilometrie nach dem Verfahren des photometrischen Gleichgewichtes

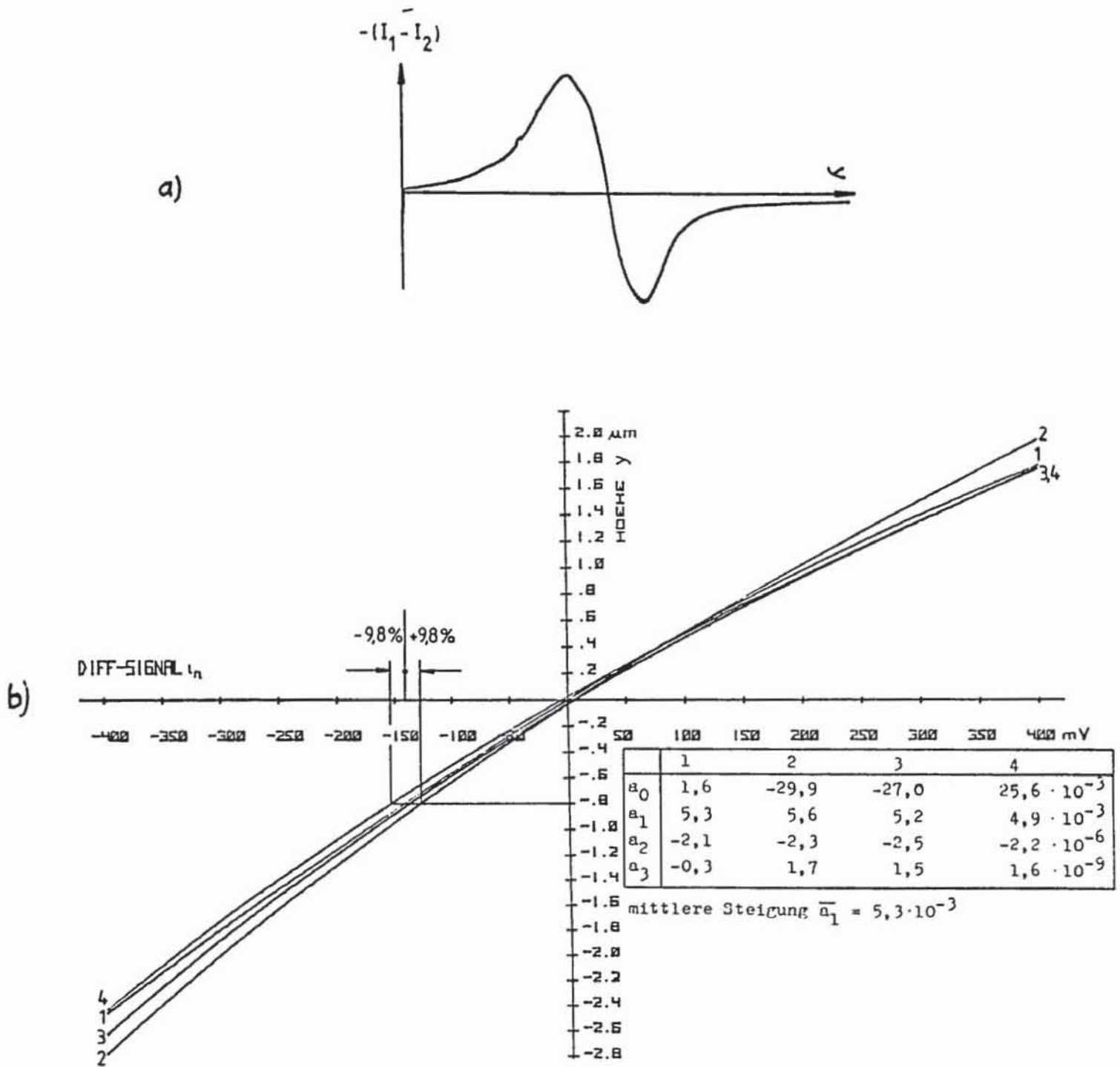


Abb.2

- a) Charakteristische Kurve beim Verschieben eines Planspiegels in Richtung der optischen Achse
- b) Kalibrierkurven, aufgenommen an einem Oberflächenvergleichsnorm mit dem arithmetischen Mittenrauhwert $R_a = 0,05 \mu\text{m}$. Interferometrisch gemessene Profilhöhe y über dem normierten Differenzsignal i_n nach (7); a_0, a_1, a_2, a_3 Koeffizienten nach Glg. (6)

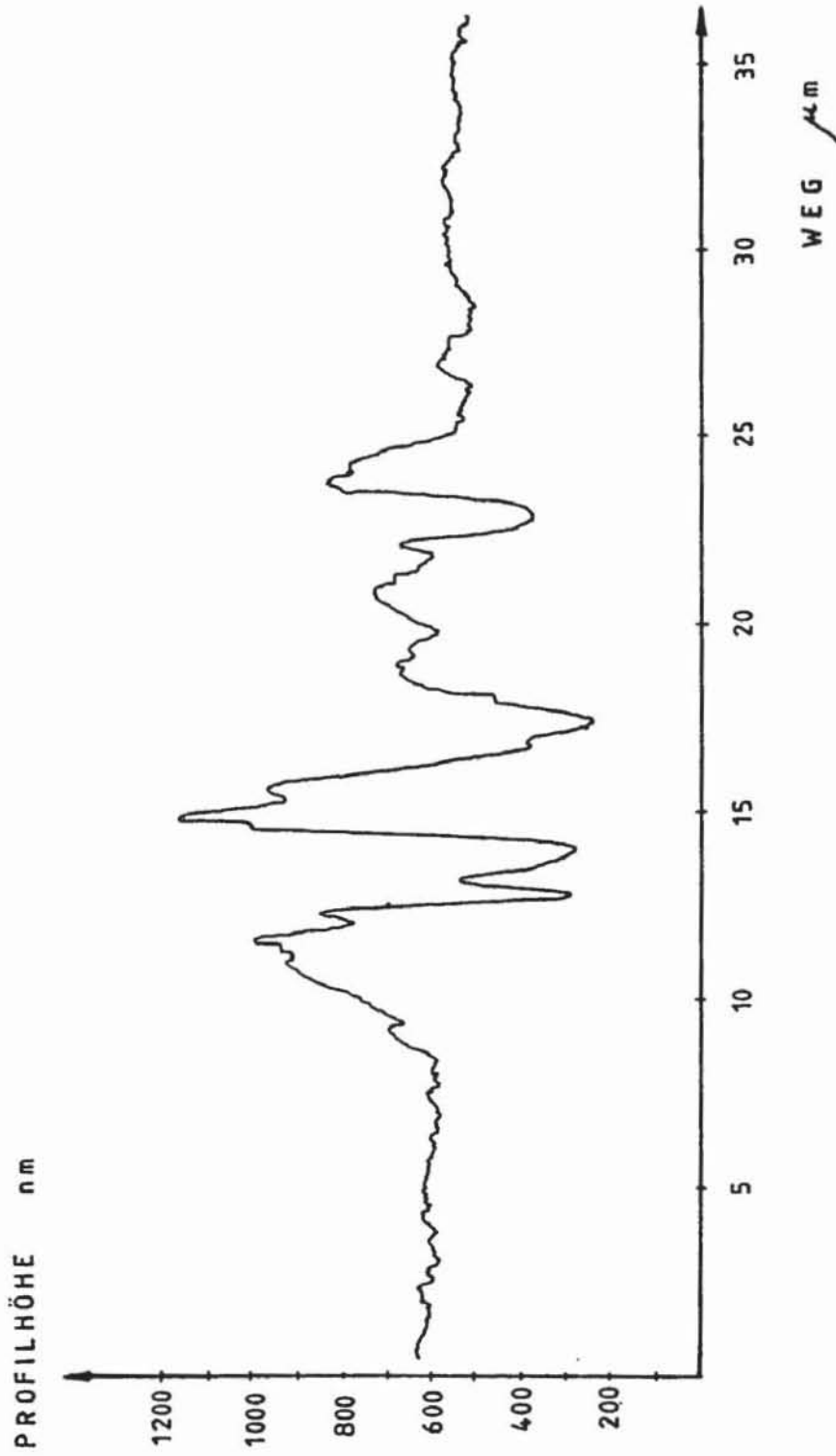
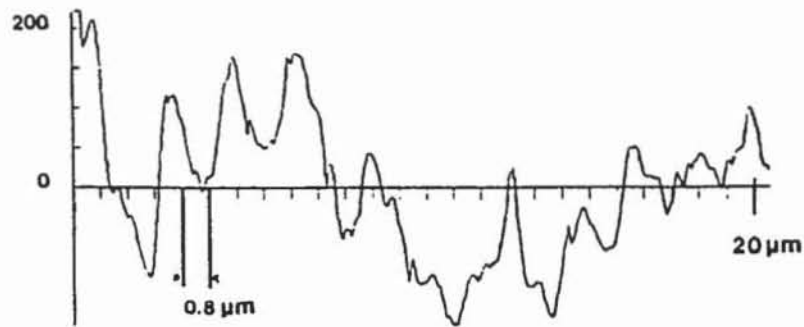
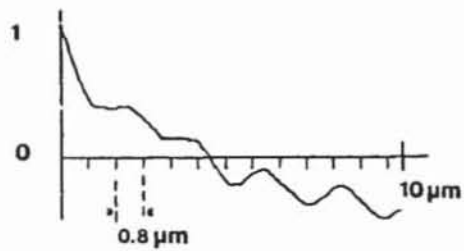


Abb. 3 Kratzer und Aufwerfungen in einem Oberflächen-
spiegel

GRINDED SURFACE $R_a = 0,025 \mu\text{m}$



a) SURFACE PROFILE



b) AUTOCORRELATION FUNCTION

Abb. 4 a) Mikroprofil eines Oberflächen-Vergleichsnormales mit dem nominellen arithmetischen Mittenrauhwert $R_a = 0,050 \mu\text{m}$
b) Autokorrelation des Profiles nach a)

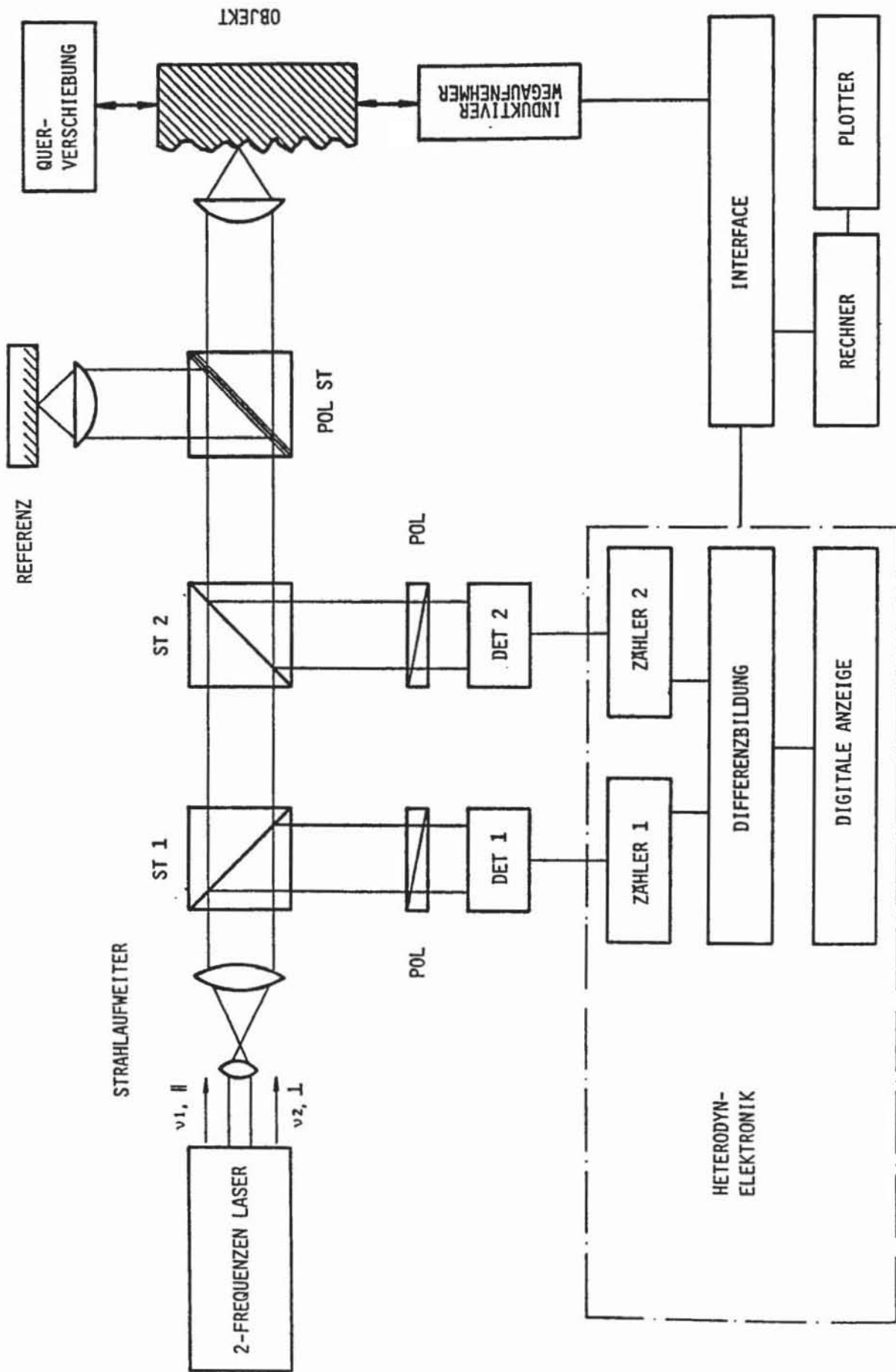


Abb.5 Mikroprofilometrie nach den Zweifrequenz-Heterodymverfahren

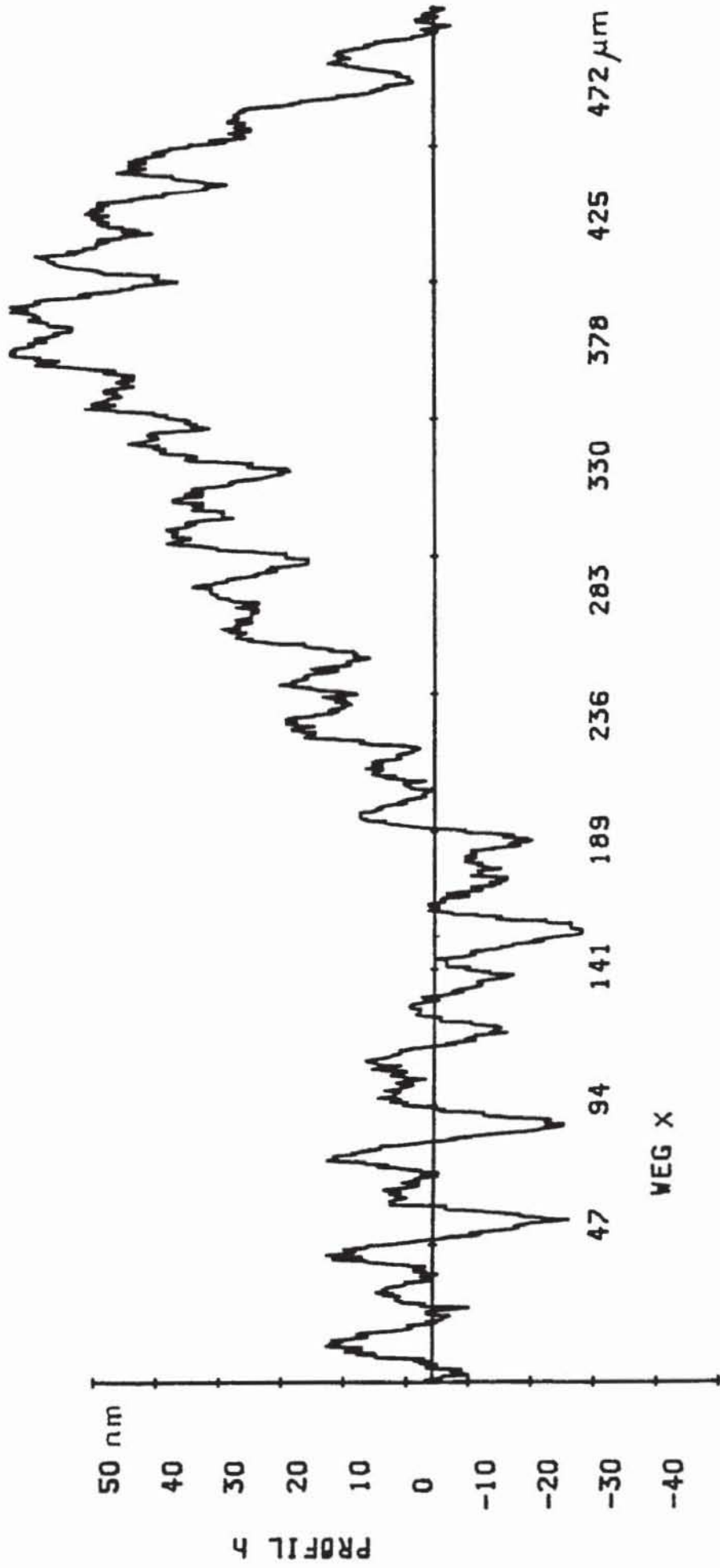


Abb.6 Mikroprofil eines Oberflächenspiegels

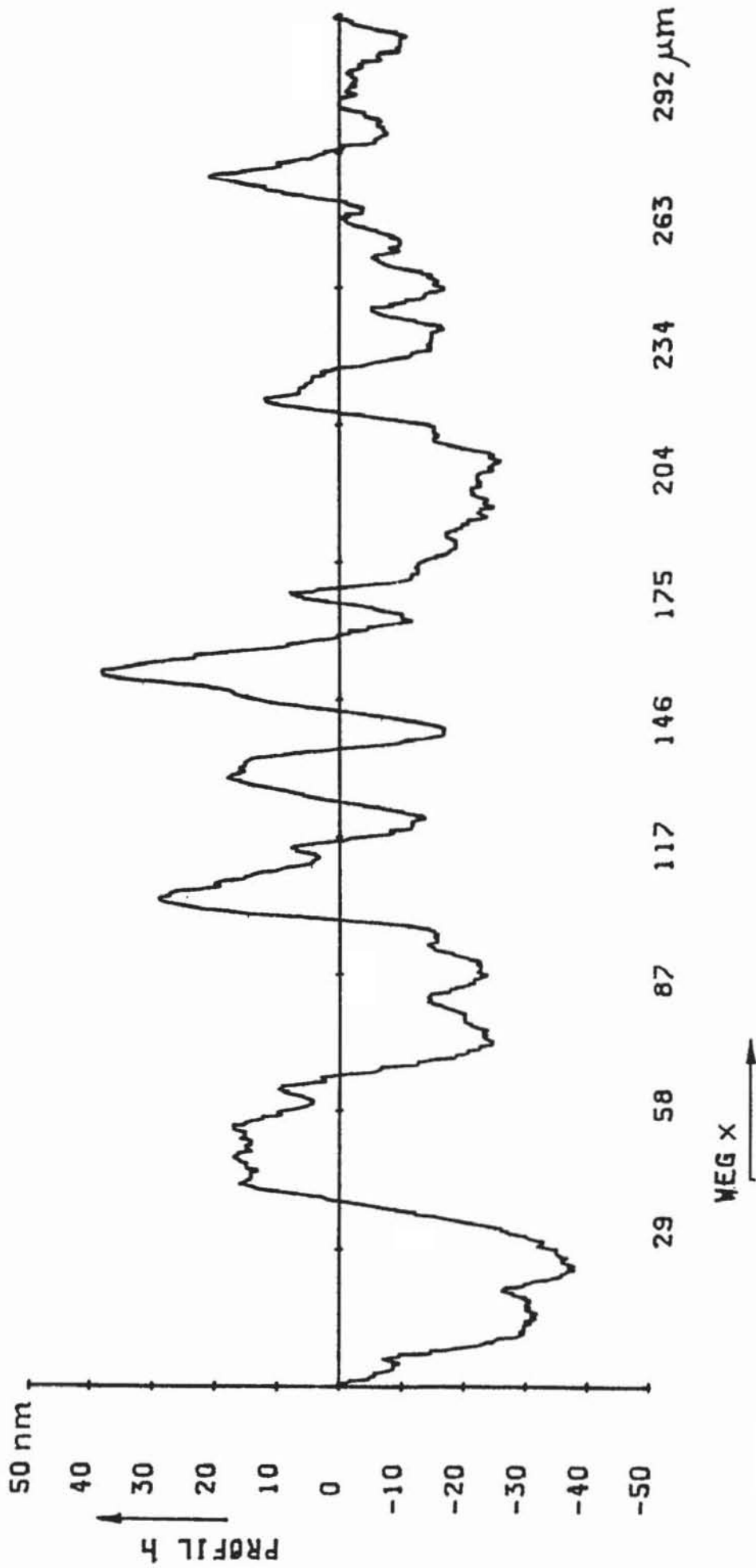


Abb. 7 Mikroprofil einer handpolierten Metalloberfläche.
Oberflächen-Vergleichsnormale RUGO 5/N2 mit dem
nominalen arithmetischen Mittenrauhwert $R_a = 0,05\mu\text{m}$

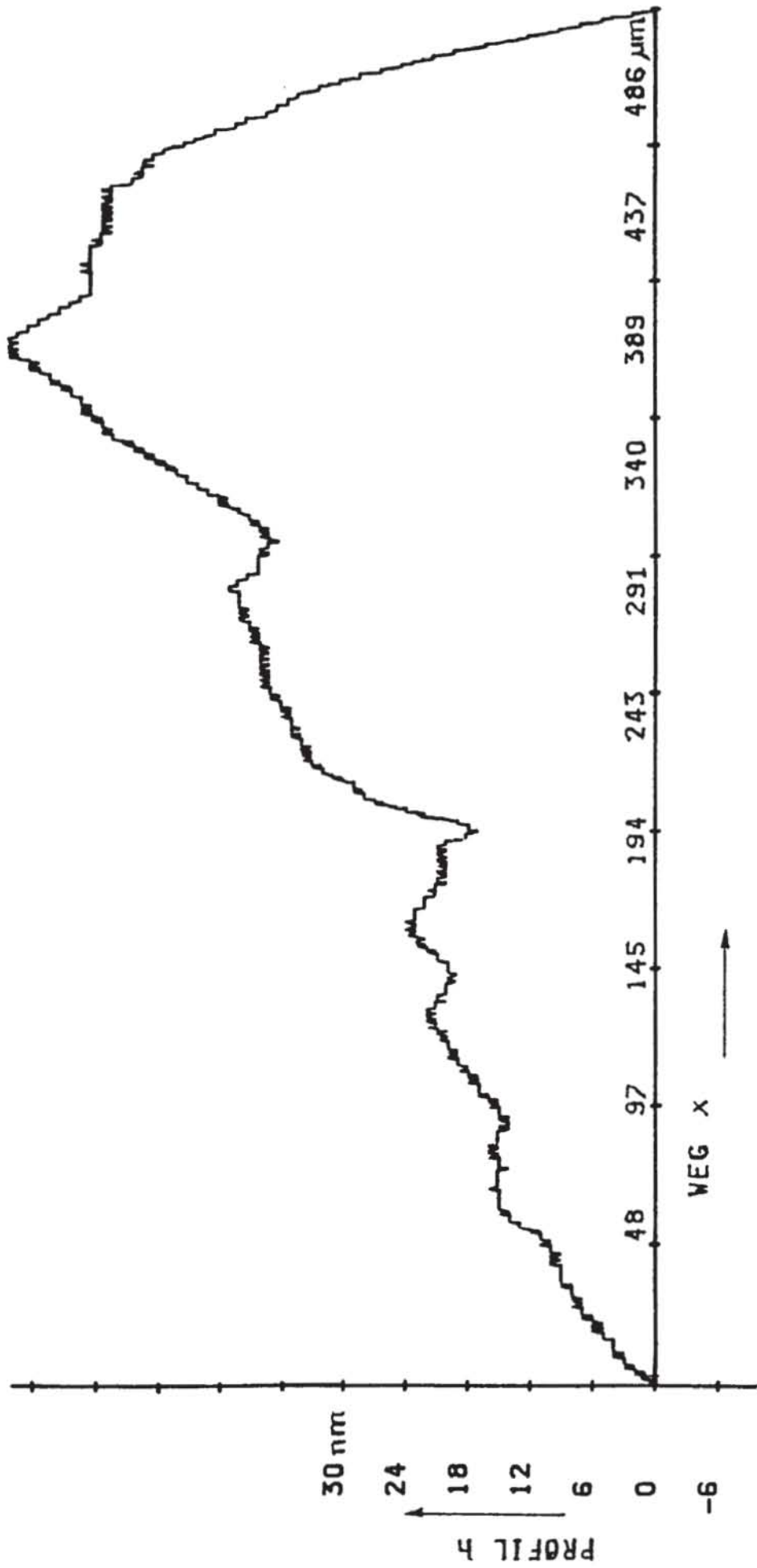


Abb. 8 Mikroprofil einer Glasoberfläche (Via-Deckglas)

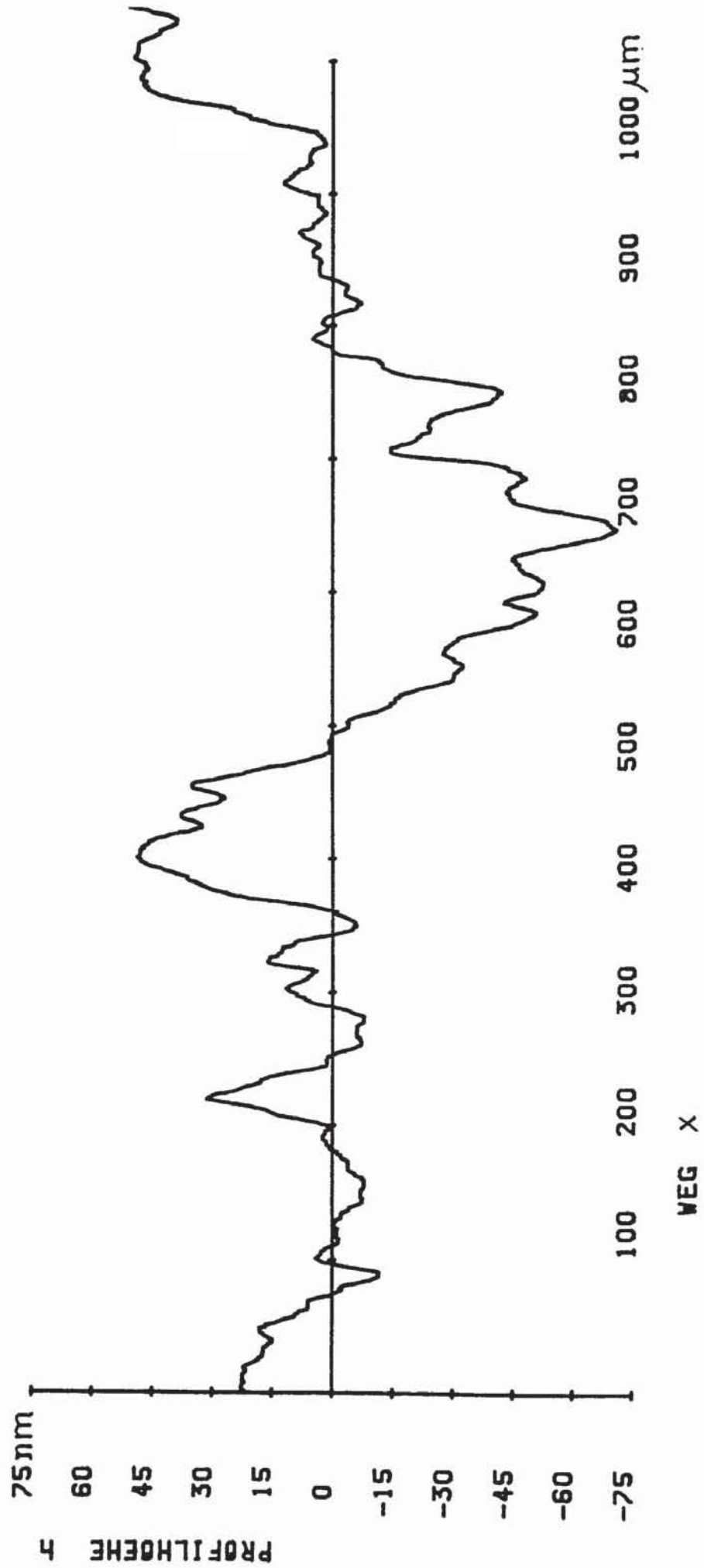


Abb. 9 Mikroprofil eines Automobil-Decklackes

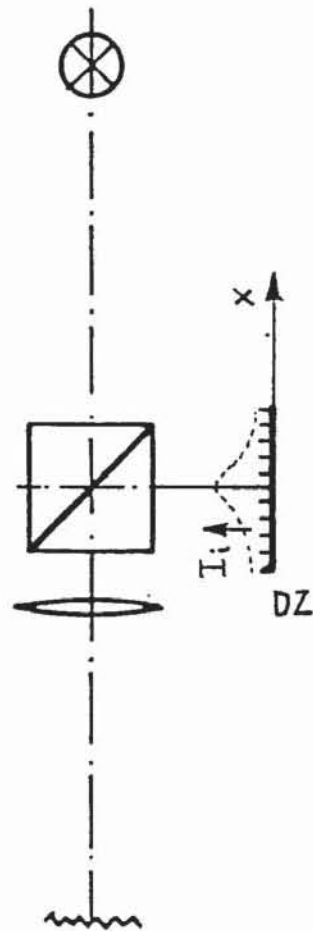


Abb. 10 Prinzipskizze der integralen Rauheitsmessung
aus der kohärenten Streulichtindikatrix

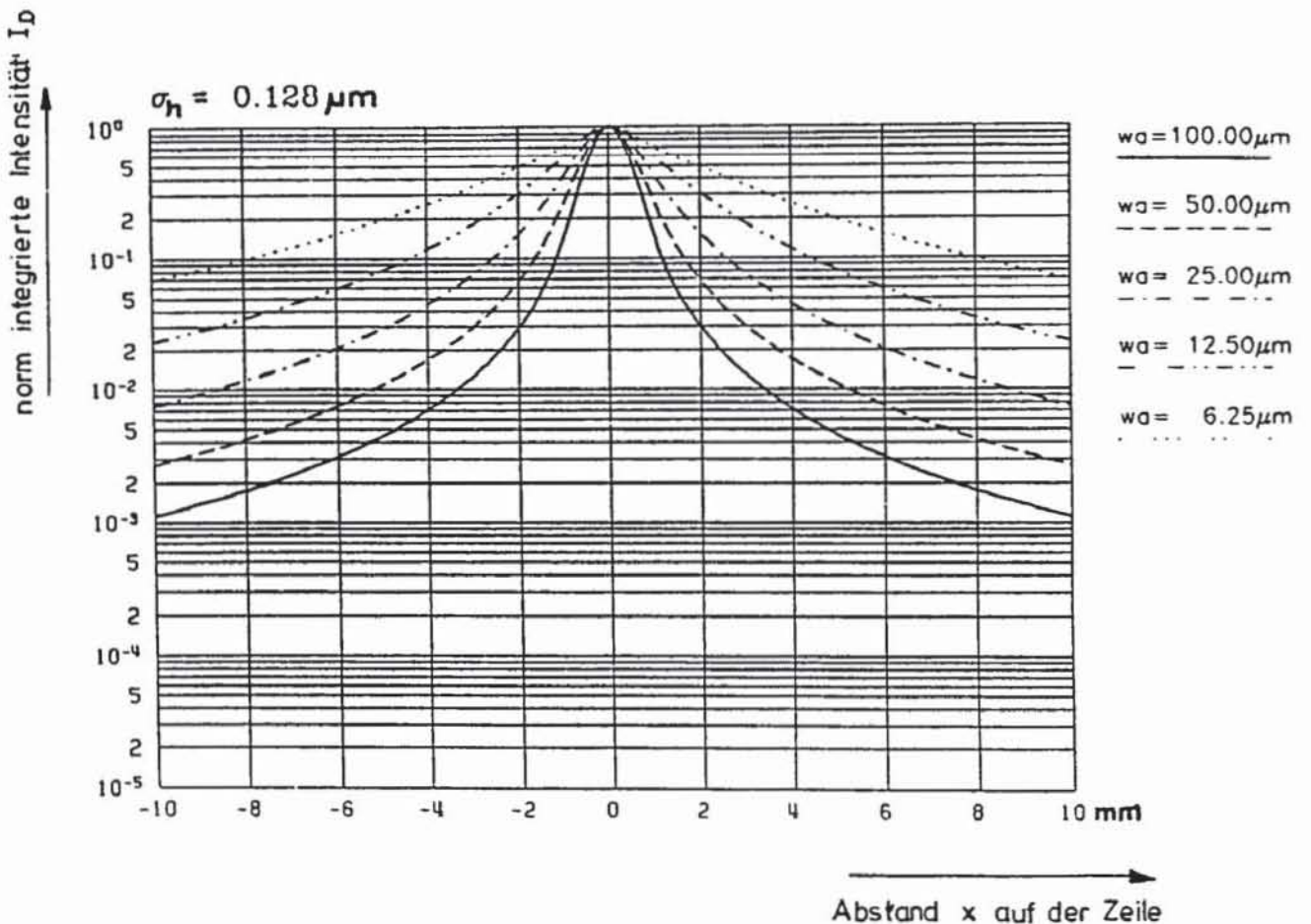


Abb. 11 Intensität der kohärenten Streulichtverteilung für eine Reflexion an einer rauhen Oberfläche mit $\hat{\mathcal{L}}_n \hat{=} R_q = 0,128 \mu\text{m}$ entsprechend $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Autokorrelationsweite w_a . Aufgetragen ist die über die Breite einer Einzeldiode gemittelte und auf den Zentralwert $x = 0$ normierte Intensität I_D . Man beachte die starke Abhängigkeit von dem Horizontalparameter w_a .

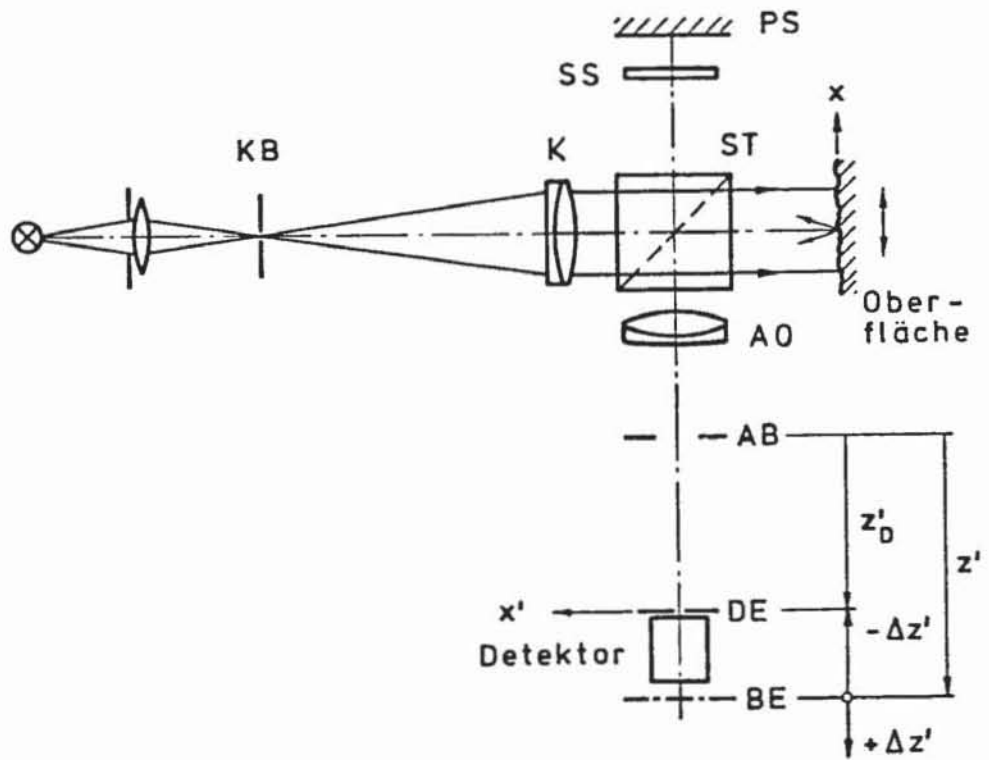


Abb. 12 Weißlicht - Zufallsphasenkontrastverfahren

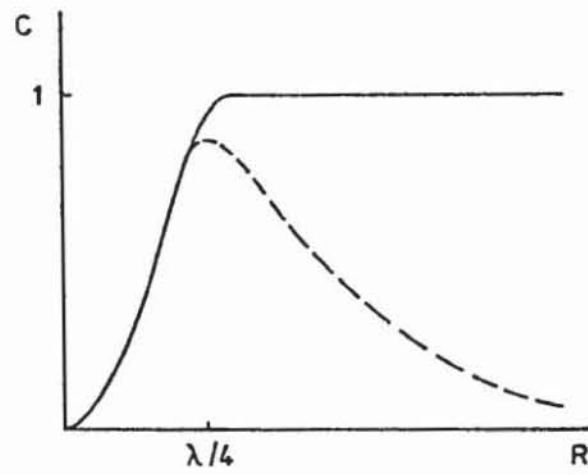


Abb. 13 Schematischer Verlauf des Kontrastes C über
dem Mittenrauhwert R
für kohärentes Gleichlicht ———
für Glühlicht - - - -

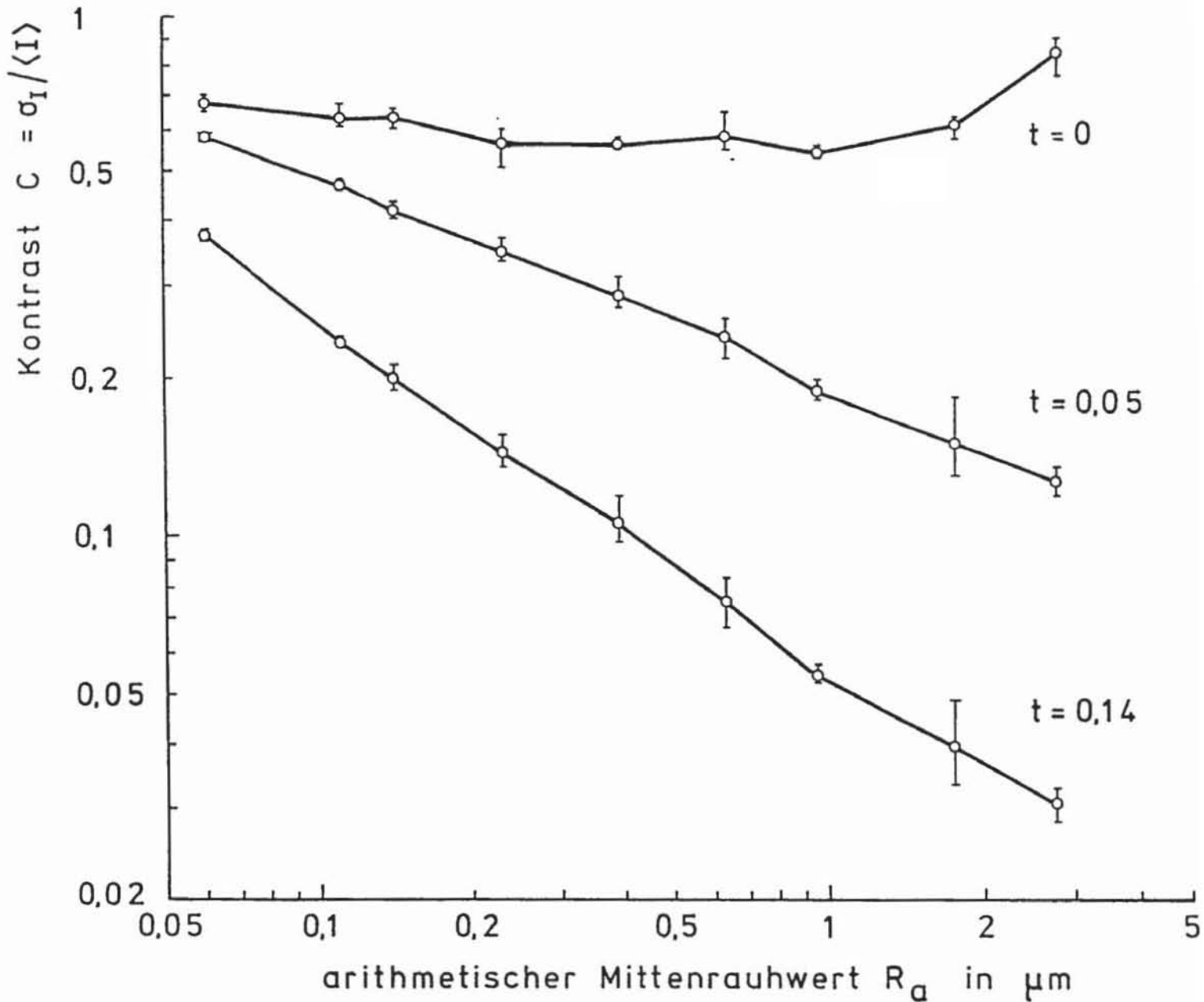


Abb. 14 Kontrastverlauf C über R_a mit dem Gleichlichtverhältnis t nach (12) als Kurvenparameter, gemessen an geschliffenen Oberflächenvergleichsnormalen. Gleichlichtüberlagerungen entstehen nicht nur durch den Planspiegel PS, sondern auch durch Flächen optischer Komponenten, insbesondere der Würfelaußenflächen des Strahlenteilerwürfels. Die Kurve mit $t=0,14$ entstand durch einen Teilerwürfel mit unbeschichteten Glas-Luft Grenzflächen; die Kurve mit $t = 0,05$ durch einen Würfel mit reflexmindender Einzelschicht. Die Kurve für $t = 0$ wurde durch abblocken dieser Reflexionen gemessen.

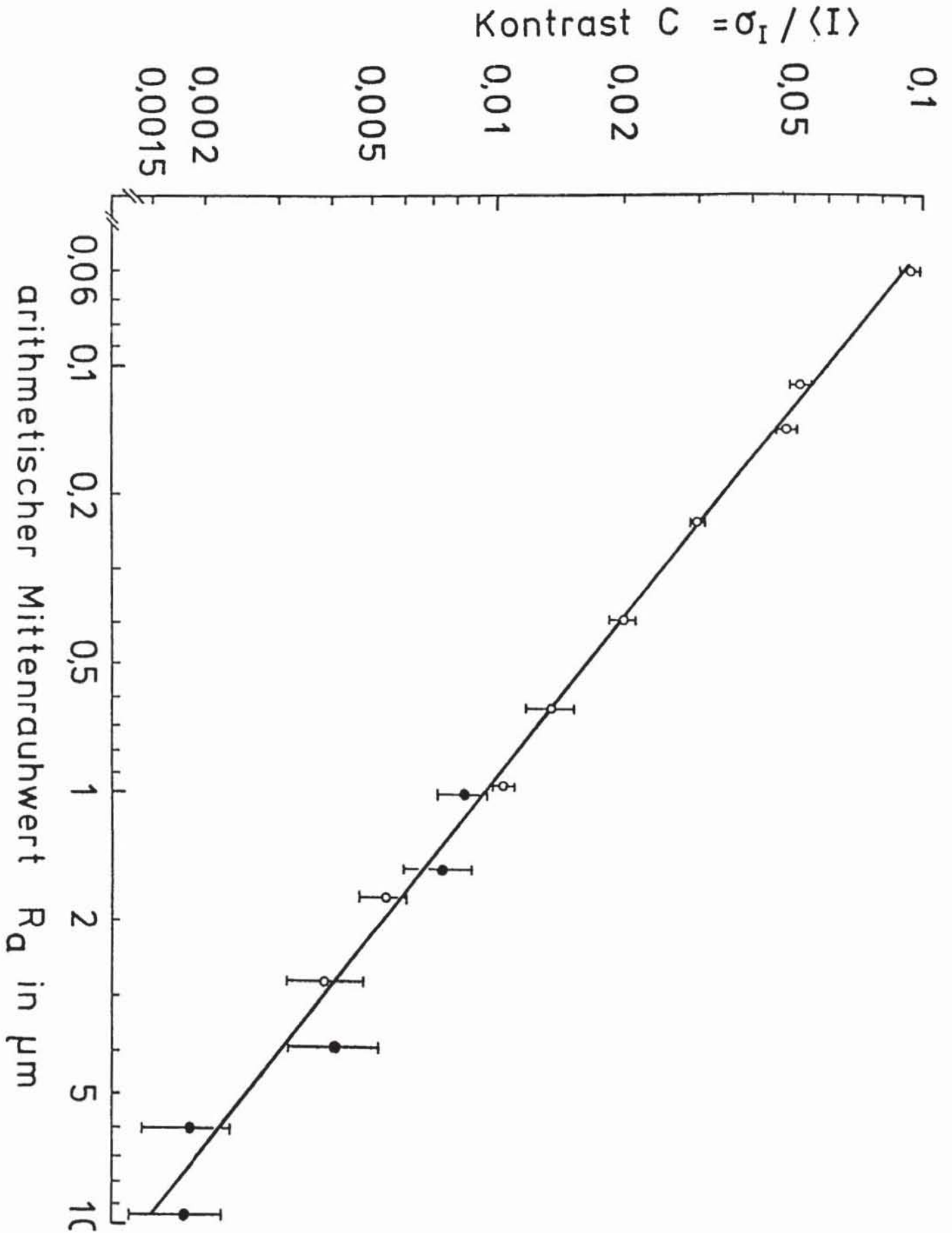


Abb. 15

Gemessener Kontrast C über dem arithmetischen Mittenrauhwert geschliffener und gehobelter Oberflächennormale nach [16].
Geschliffene Oberflächen ○
Gehobelte Oberflächen ●

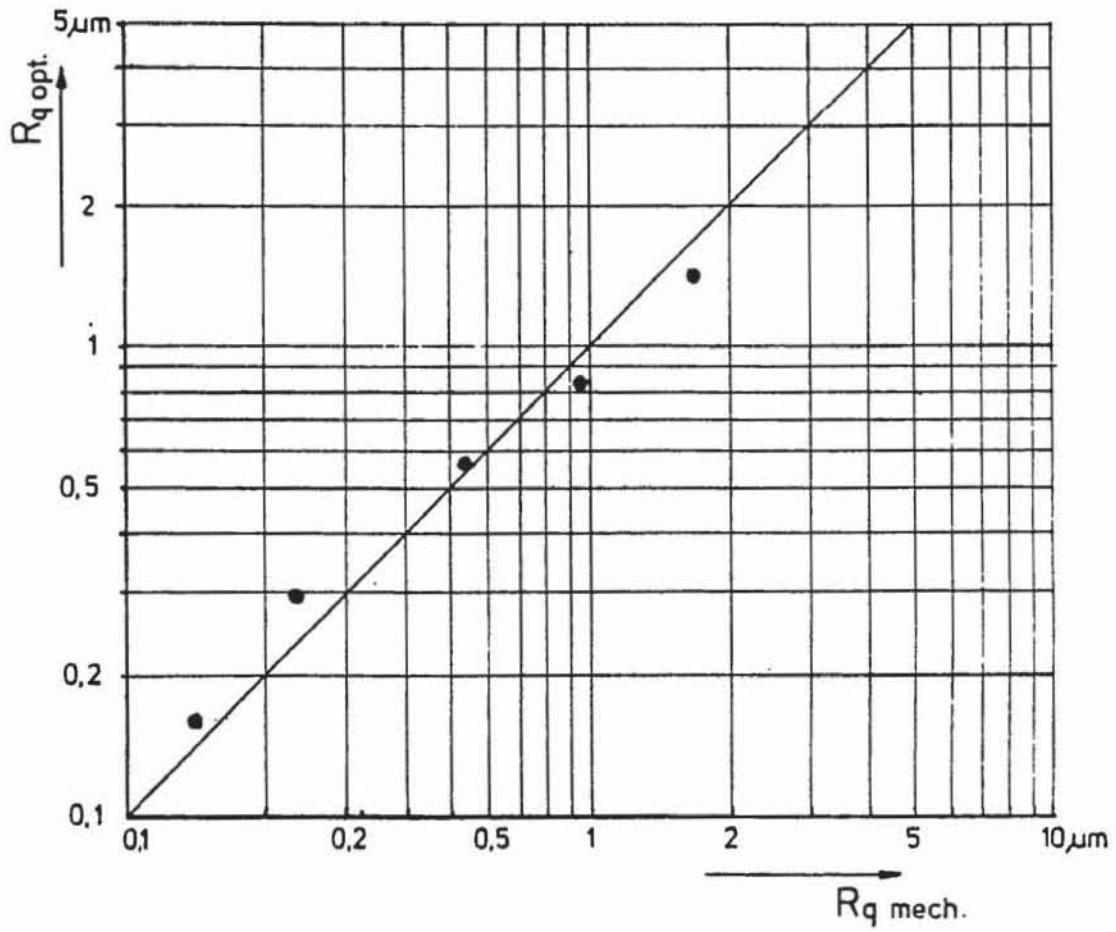


Abb. 16 Quadratische Mittenrauhwert $R_{q \text{ opt.}}$ berechnet nach (14), (15) und (16) ^{und} aufgetragen über dem mechanisch gemessenen $R_{q \text{ mech.}}$. Nähere Angaben siehe [18].