

Beiträge

Klaus Leonhardt und Ulrich Breitmeier*

Ellipso-Höhentopometrie

Ein neues Verfahren zur Messung von Oberflächentopografien samt Überschichtungen und zur lokalen Materialerkennung

Ellipso-Height-Topometry

A new method for measuring surface topography, layer thickness, and for material recognition

DOI 10.1515/teme-2015-0070

Eingang 20. August 2015; überarbeitet 21. Oktober 2015;
angenommen 28. Oktober 2015

Zusammenfassung: Die Ellipso-Höhentopometrie misst zusätzlich zum topometrischen Höhenprofil die örtliche Verteilung des Materials an der Oberfläche, so dass eine hochaufgelöste Materialidentifizierung und Kartierung und eine Korrektur der Messfehler möglich wird.

Alle kommerziell verfügbaren optischen Profilmessgeräte zeigen Artefakte an Übergängen verschiedener Materialien einer Werkstückoberfläche. Beispielsweise wird ein Ölfilm auf einem Metalluntergrund mit nichtlinear invertierter Profilamplitude wiedergegeben, so dass er als Vertiefung anstatt als Erhebung gemessen wird [4, 5]. Die Höhe einer Leiterbahn auf einer mikroelektronischen Struktur wird gleichermaßen falsch gemessen. Große, nichtkalibrierbare Fehler können bei Schichtstrukturen auftreten. Mit einem neuartigen Ellipso-Höhentopometer können diese Messfehler und Artefakte durch Korrektur des Phasensprungs bei der Lichtreflexion für quasioplanare Oberflächen kompensiert werden. Dazu wird aus denselben Datensätzen, die zur Berechnung der Höhentopografie $H(x, y)$ aufgenommen wurden, die lokale Verteilung der Materialien und ihrer optischen Parameter ermittelt und daraus die Material- und Schicht-Resonanzphasen zur Korrektur berechnet.

Die Ellipso-Höhentopometrie kann erstmals strukturierte Profile im nm-Bereich mit hoher räumlicher Auflösung op-

tisch richtig messen und zusätzlich lassen sich Informationen über Materialien, Schichten und Verschmutzungen auf der Oberfläche gewinnen.

Schlüsselwörter: Oberflächen, Mikrotopometrie, Profilometrie, Ellipsometrie, Materialerkennung, Oberflächenschichten, Schichtdicken, Korrektur von Oberflächenfehlern durch Materialphasen- und Schichtresonanzphasen.

Abstract: The new concept of an Ellipso-Height Topometer provides the measurement of both the surface profile and locally distributed material areas which results in a laterally highly resolved material map which in turn contributes to a much more effective correction of measurement errors.

All currently available optical profilometers produce artefacts at the boundaries of different materials. As an example an oil film on top of a metal surface will be measured with a non-linearly inverted profile amplitude and will therefore be seen as an indentation instead an elevated feature [3, 4]. The height of a conductor strip of a microelectronic structure will be measured equally wrong. Relatively large non-calibratable errors can occur when measuring layered structures. With this new Ellipso-Height Topometer these measurement errors and artefacts can be compensated by correcting for the phase jump of the reflected light of quasi-plane surfaces. To this end the local material distribution and their optical parameters will be calculated from the same data sets $H(x, y)$ as used for the profile measurement and from these the material and layer resonance phases are calculated and the correction coefficients determined.

*Korrespondenzautor: Ulrich Breitmeier, Tevob, Englerstr. 24,
76275 Ettlingen, E-Mail: ulrich@breitmeier.de

Klaus Leonhardt: Leoptik, Haldenstr. 78, 71254 Ditzingen

This new optical method allows to measure correctly and with high spatial resolution structured surface profiles in the nm range and in addition provides more information about materials, layers and contaminated areas on the surface.

Keywords: Surface measurement, micro topometry, profilometry, ellipsometry, material recognition, material and film resonance phase error correction.

1 Einleitung

Verfahren zur Messung und Darstellung von Mikro-Höhentopografien von Oberflächen haben in den vergangenen Jahren eine weite Verbreitung gefunden und werden ständig weiterentwickelt. Ein erstes Verfahren zur simultanen Ellipso-Höhentopografie misst die ellipsometrischen Parameter mit einem elektrooptischen Modulator und die Höheninformation aus demselben Abtastpunkt mit einem Mikrotriangulations- oder Mikrodeflexionsverfahren [10]. Dabei wird in einem telezentrischen Strahlengang ein Bild der Eintrittspupille in die hintere Brennebene (Fourierebene) des Mikroskopobjektives mit einem lateralen Versatz abgebildet und damit ein Schräglichteinfall auf dem Objekt erzeugt. Weitere punktförmig abtastende Verfahren arbeiten mit einem Autofokussystem [11].

Ein erstes flächenhaft auswertendes Verfahren mit einem CCD-Flächensensor und Mikrostreifenprojektion [12] ergab 3D-Topografien der Höhe $H(x, y)$, der ellipsometrischen Winkel $\Delta(x, y)$ und $\Psi(x, y)$ sowie der Brechzahl unbeschichteter Oberflächen $n(x, y)$ zur Materialbestimmung und wurde zur Messung weiterer Oberflächengrößen weiterentwickelt. Wir beschreiben in dieser Arbeit ein interferometrisch arbeitendes Verfahren und zeigen wichtige Anwendungen.

2 Prinzip der Ellipso-Höhentopometrie

Abbildung 2 zeigt das Prinzip eines Ellipso-Höhentopometers [3–5]. Unterhalb des interferometrischen Strahlteilers NBS wird ein Bild **S** der Eintrittspupille aus dem Beleuchtungsstrahlengang von **B** kommend um den Abstand d seitlich versetzt in die Austrittspupille **AP** eines Mikroskopobjektives **MO** mit hoher numerischer Apertur abgebildet. Vor dem Objekt **Obj** ergibt sich dadurch ein einheitlicher Schrägeinfallswinkel ϕ_0 für alle Objektpunkte x, y des Objektfeldes. Die Einfallsebene wird durch die y, z -Ebene nach Abbildung 2 gebildet mit z entlang der op-



Abbildung 1: BMT Ellipso-Höhentopometer EHT.

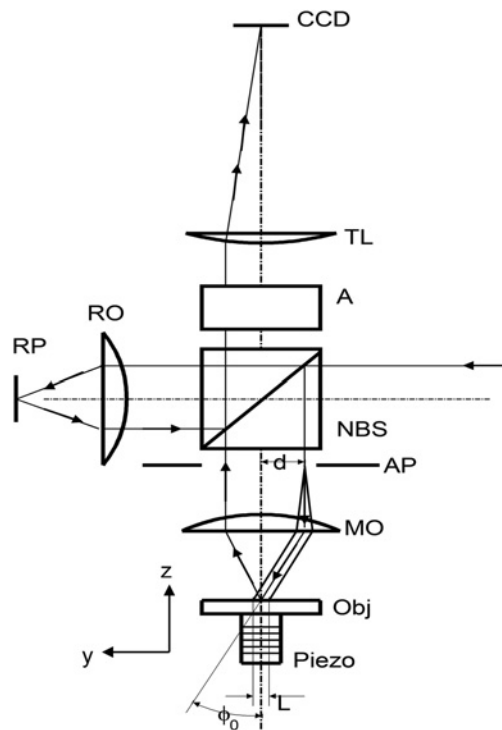


Abbildung 2: Aufbau des Ellipso-Höhentopometers.

tischen Achse. Somit wird eine Messung der aus der Ellipsometrie bekannten ellipsometrischen Parameter, nämlich der Winkel $\Delta(x, y)$ und $\Psi(x, y)$, für alle Objektpunkte möglich [3]. Der Referenzstrahlengang über den neutralen Strahlteiler **NBS** mit dem Referenzspiegel **RP** und dem Referenzobjektiv **RO** weist genau denselben Strahlengang auf mit dem Einfallswinkel ϕ_0 auf dem Referenzspiegel.

Objekt- und Referenzebene werden durch die Tubuslinse **TL** telezentrisch auf den Bildsensor **CCD** abgebildet. Die Winkeleinstellungen der polarisationsformenden Komponenten **A** oder **A'** und der Messablauf erfolgen rechnergesteuert automatisch. Jedes einzelne Pixel des Bildsensors wird auf diese Art gesondert ausgewertet [3]. Es ergibt sich somit ein Multikanal – Ellipsometer. Eine aktuelle Ausführung nach Abbildung 1 verfügt über einen 2/3'' Bildsensor mit 1384×1036 Pixeln und einem Pixelabstand von $6,45 \mu\text{m}$. Reduziert auf die Objektebene beträgt die Pixelfläche $0,024 \mu\text{m}^2$ und die Fläche eines Beugungsscheibchens $0,97 \mu\text{m}^2$. Mit 36 Pixeln pro Beugungsscheibchen ergibt sich im Idealfall einer aberrations- und rauschfreien Übertragung ohne sonstige Fehlereinflüsse eine maximale Anzahl $Z_u \approx 34\,000$ unabhängig messbarer Werte für die Höhentopografie und ebenso für die ellipsometrischen Parameter.

In einer aktuellen Ausführung des Ellipso-Höhentopometers für isotrope (nicht doppelbrechende) Materialien werden dazu Z-Scans wie in der Kohärenz-Scanning Interferometrie durchgeführt. In [7] wird gezeigt, dass dies auch mit spektral schmalbandigen LED-Lichtquellen durch die Wirkung der räumlichen (spatial) Kohärenz sehr effektiv möglich wird. Der Aspektfehler [4] durch die Schrägprojektion mit Einfallswinkeln $\phi_0 \approx 45^\circ$ bis 50° (je nach Anwendung) wird durch die Messung mit entgegengesetztem Einfallswinkel $\phi_{opp} = -\phi_0$ kompensiert [4].

Das in der Ellipsometrie gebräuchliche komplexe Verhältnis ρ ergibt sich aus den komplexen Reflexionskoeffizienten der wirksamen Oberfläche eines isotropen Materialaufbaues mit r_p für parallel zur Einfallsebene schwingendes Licht und r_s für senkrecht schwingendes Licht. Dies gilt in unserem Falle für jeden Punkt x, y der Oberfläche:

$$\rho(x, y) = \frac{r_p(x, y)}{r_s(x, y)}. \quad (1)$$

Aus dem Interferenzterm (Term 3) der Fouriertransformation des Z-Stapels der Interferenzen erhält man nach den Prinzipien der Kohärenz scannenden Interferometrie [5] für die zentrale Fourierfrequenz in Vektor-Matrix Schreibweise für jeden Objektpunkt [3, 4]:

$$\tilde{I}(x, y) = \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (2z - 2h(x, y) \cos \phi_0) \right\} \times \gamma^* \operatorname{tr} [\mathbf{J} \mathbf{D} \mathbf{S}(x, y)] \quad (2)$$

mit der mittleren Lichtwellenlänge λ , der lokalen Topografiehöhe $h(x, y)$, dem globalen Einfallswinkel des Lichtes ϕ_0 , der allgemeinen Kohärenzfunktion $\gamma(z)$ und dem die vektoriellen Eigenschaften beschreibenden Spuroperator $\operatorname{tr}[\]$, der Kohärenzmatrix **J**, die als dyadisches

Produkt des Feldstärkevektors [8] die Polarisation und die Intensität I des eintretenden Lichtes einführt, der Produktmatrix aller polarisationsformenden Bauelemente **D** des Interferometers und der Oberflächenmatrix **S**(x, y), die für isotrope (nicht doppelbrechende) Oberflächen als Diagonalmatrix ihrer komplexen Reflexionskoeffizienten $r_p(x, y)$ und $r_s(x, y)$ nach Gleichung (1) eingeht:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} (r_p/x, y) & 0 \\ 0 & r_s(x, y) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Die im Instrument eingesetzten, qualitativ hochwertigen Bauelemente (ohne optische Anisotropien wie z. B. Doppelbrechung) des Interferometers lassen sich ebenfalls durch Diagonalmatrizen beschreiben und sind so justiert, dass das Gesamtmatrizenprodukt **D** in (Gleichung 2) ebenfalls als diagonal mit den Hauptdiagonalelementen $D_{11} = D_p$ und $D_{22} = D_s$ für parallel und senkrecht zur jeweiligen Einfallsebene angenommen werden kann:

Es werden zwei Z-Scans $\tilde{I}_p(x, y)$ und $\tilde{I}_s(x, y)$ nach Gleichung (2) mit Polarisatorstellung parallel und senkrecht durchgeführt:

$$\begin{aligned} p\text{-Pol: mit } \mathbf{J} &= I \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \operatorname{tr} [\mathbf{J} \mathbf{D} \mathbf{S}(x, y)] &= I D_{11} r_p(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} s\text{-Pol. mit } \mathbf{J} &= I \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \operatorname{tr} [\mathbf{J} \mathbf{D} \mathbf{S}(x, y)] &= I D_{22} r_s(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

Nach Quotientenbildung der aus den Messdaten ermittelten \tilde{I} -Werte für p - und s -Polarisation,

$$R(x, y) = \tilde{I}_p(x, y) / \tilde{I}_s(x, y) \quad (6)$$

ergibt sich nach Kürzen sämtlicher skalarer Faktoren schließlich das komplexe ellipsometrische Verhältnis $\rho(x, y)$:

$$\rho(x, y) = R(x, y) \frac{D_{22}}{D_{11}}. \quad (7)$$

Die Matrizenelemente der Interferometerkomponenten (Strahlteiler, Objektive, Referenzspiegel) lassen sich aus ihren Konstruktionsdaten berechnen. Außerdem lässt sich D_{22}/D_{11} als Kalibrierfaktor mit einem bekannten Kalibrierobjekt bestimmen [3]. Die gebräuchlichen ellipsometrischen Winkel Ψ und Δ ergeben sich aus ρ nach Definition zu

$$\Psi(x, y) = a \tan(\operatorname{abs}(\rho(x, y))), \quad (8)$$

$$\Delta(x, y) = \arg(\rho(x, y)). \quad (9)$$

Damit kann an quasiplanaren Oberflächen nicht nur die herkömmliche Höhentopografie $H(x, y)$ der Mikrorauheit und Mikroform samt Profilschnitten fehlerarm mit einer Auflösung im unteren nm-Bereich gemessen werden, sondern auch die lokale Materialbelegung. Diese kann in Materialkarten (vgl. Abbildungen 7 und 15) dargestellt werden. Topografien weiterer Objekteigenschaften, zum Beispiel die örtliche Dicke $t(x, y)$ von aufgebrachtene Über-schichtungen, Oxidationen oder Ablagerungen im Nano-meterbereich, können gemessen werden. Streuungen der lokalen ellipsometrischen Parameter durch lokale Varia-tionen des Einfallswinkels durch die Neigungswinkelva-riation aufgrund der Mikroform des Objektes können mit der Kenntnis von $H(x, y)$ für nicht zu große Winkel rech-nerisch auf die Werte der glatten, nichtgeneigten Ober-fläche reduziert werden [4]. Während die konventionelle Ellipsometrie mit einem ausgedehnten Messfleck eine Einzel-messung auf unstrukturiertem Material durchführt und dazu eine einheitliche ebene Oberfläche mit sehr geringer Oberflächenrauheit voraussetzt, kann die Mikro-Ellipso-Höhentopometrie auch bei Rauheiten technischer Oberflä-chen durchgeführt werden. Zur Gewinnung weiterer Pa-rameter komplexer Oberflächen wie Materialbrechzahlen können Methoden der Ellipsometrie angewendet werden. Eine Erweiterung für anisotrope Oberflächenstrukturen ist in Arbeit.

3 Ein Anwendungsbeispiel: Siliziumkristalle in einer Aluminiummatrix

Abbildung 3 zeigt das mikroskopische Kamerabild einer Lauffläche eines Motorzylinders. Man erkennt dunkle Siliziumkristalle in einer Matrix einer Aluminiumlegierung.

Durch einen Freilegungsprozess bei der Fertigung wird erreicht, dass die harten, tragenden Siliziumkristalle um einen bestimmten Betrag aus der Matrixoberfläche herausragen und damit Ölrückhaltevolumina gebildet werden. Das untersuchte Probenstück ist durch Oxidationen, Kühlmittelreste und aufgetragenes Öl als Korrosionsschutz auf unbekannte Art unregelmäßig überschichtet.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die auf demselben Pixelraster gemessenen ellipsometrischen Winkel $\Delta(x, y)$ und $\Psi(x, y)$ für die Lichtwellenlänge $\lambda \approx 620$ nm und dem globalem Einfallswinkel $\phi_0 = 48^\circ$, die für isotrope oder nahezu isotrope Materialien die notwendige ellipsometrische Information enthalten.

Zur Auswertung wird das Δ, Ψ -Diagramm gemäß Ab-bildung 6 eingeführt. Es zeigt die berechneten Orte für

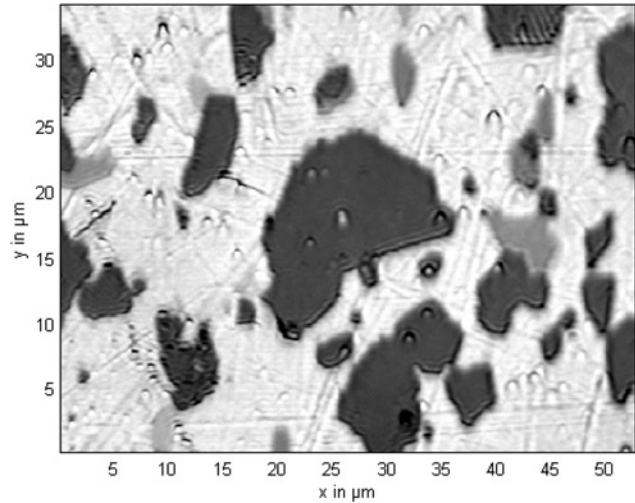


Abbildung 3: Kamerabild der relativen Intensitäten $I(x, y)$ der ausgewerteten Fläche.

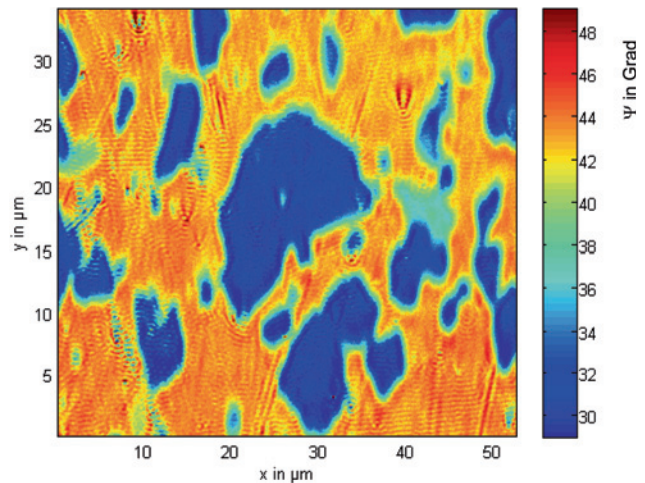


Abbildung 4: Topografie des Ellipsometrischen Winkels $\Psi(x, y)$ in Grad.

reines, unbeschichtetes Silizium bzw. Aluminium für die Wellenlänge einer roten LED als Lichtquelle durch Kreis-markierungen. Außerdem sind Kurven für dünne Schichten von Öl eingezeichnet (braune Kreismarkierungen) mit dem laufenden Parameter Schichtdicke t , wobei die Dicke der Schicht von Kreismarkierung zu Kreismarkierung um 1 nm zunimmt. Da für die Materialmatrix von einer Aluminiumlegierung auszugehen ist, wurden entsprechende Kurven nach EMT-Theorien [1] berechnet.

Für jedes Pixel x, y im Objektfeld wird der jeweilige Δ - und der zugehörige Ψ -Wert als Punkt in das Diagramm eingetragen. Es ergeben sich Punktekonzentrationen um Schwerpunkte als spezifische Materialdomänen. Silizium zeigt sich unterhalb des theoretischen Si-Punktes als Punktelwolke, weil auf der realen Oberfläche

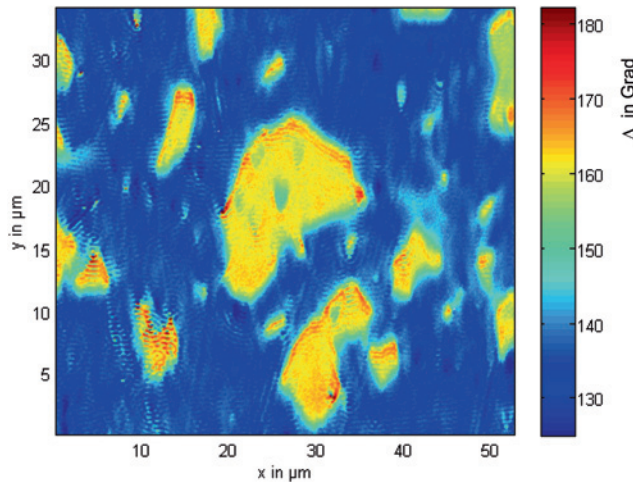


Abbildung 5: Topografie des ellipsometrischen Winkels $\Delta(x, y)$ in Grad.

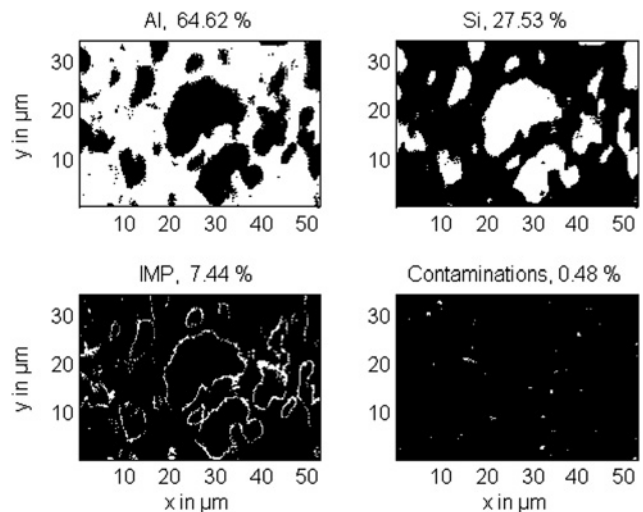


Abbildung 7: Materialkarten.

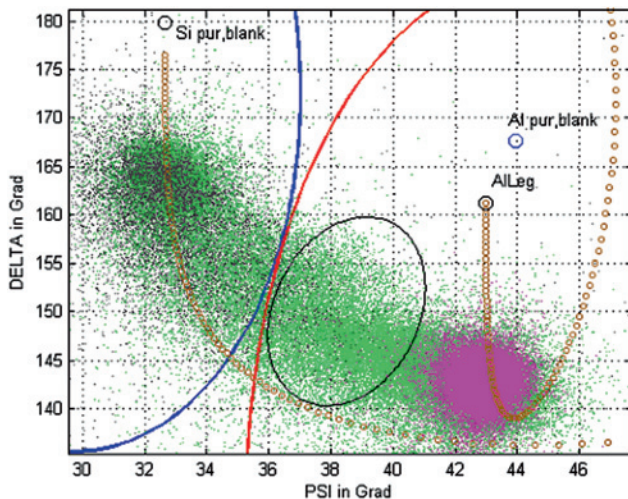


Abbildung 6: Δ, Ψ -Diagramm.

noch Oxidschichten und Überschichtungen von Öl und von Verschmutzungen im Dickenbereich von einigen Nanometern vorliegen. Entsprechend zeigt sich eine weitere Materialdomäne für die Aluminiumlegierung. Eine weitere schwache Materialkonzentration, die durch die Säume um die Kristalle gebildet wird, deutet sich im Δ, Ψ -Diagramm mit dem Schwerpunkt bei $\Delta \approx 150^\circ$ und $\Psi \approx 38^\circ$ an. Als Hilfe für die Analyse des Δ, Ψ -Diagramms werden dunkle Pixel schwarz, sehr helle Pixel purpurfarben und Pixel mittlerer Helligkeit grün dargestellt.

Die Streuung der Punkte (Punktwolken) ist durch die Oberflächenrauheit und die Inhomogenität der Oberflächen und der Verschmutzung bedingt. Festzuhalten ist, dass die Punktedichte nahe der Schwerpunkte sehr groß ist, was bei einer Darstellung auf Papier nicht wiedergegeben wird. Weiter abliegende Punkte stellen nur einen klei-

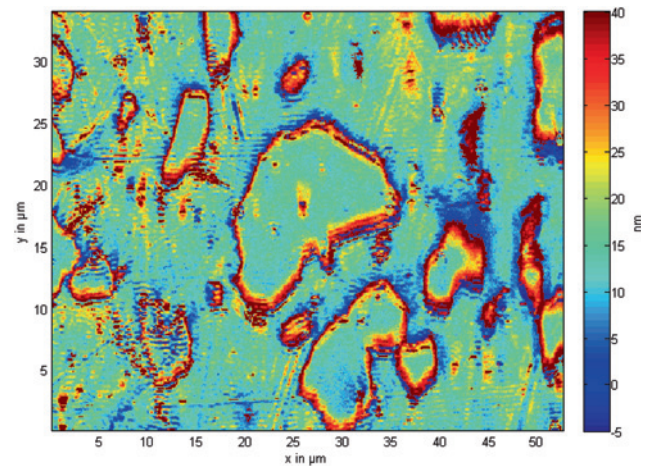


Abbildung 8: Dicke der lokalen Überschichtung $t(x, y)$.

nen Anteil dar und sind hauptsächlich auf Kratzer, Kanten und Verunreinigungen zurückzuführen.

Zur Materialsegmentation wurden im Δ, Ψ -Diagramm in Abbildung 6 elliptische Grenzen eingeführt. Alle Punkte innerhalb der schwarzen Grenzellipse in der Mitte werden dem Saummaterial in den Abbildungen 4 und 5 zugeordnet. Von den verbleibenden Punkten werden alle Punkte links der blauen Grenzlinie der Materialdomäne Silizium zugeordnet, alle Punkte rechts der roten Domänengrenze der Aluminiummatrix. Dadurch ergeben sich die Materialkarten (Abbildung 7) mit der Angabe der prozentualen Flächenbelegung des jeweiligen Materials.

Mit den Materialzuordnungen lassen sich die lokale Dicke $t(x, y)$ der Überschichtung durch Inversion der Schichtgleichungen für entsprechende ellipsometrische

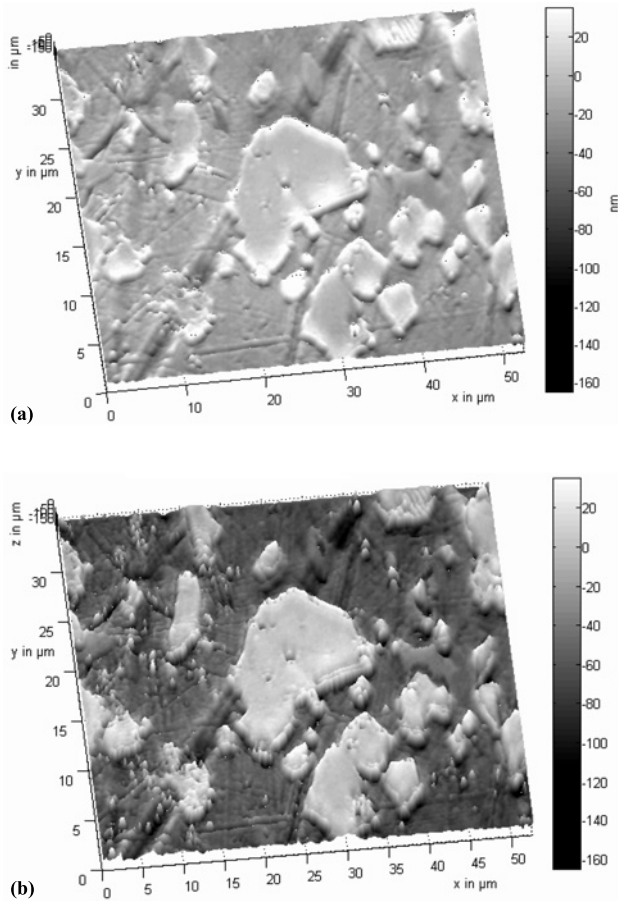


Abbildung 9: (a) Höhentopografie unkorrigiert. (b) Korrigierte Höhentopografie nach Abzug der Dicke der Überschichtung.

Schichtmodelle berechnen. Die lokale Schichtdicke ist in Abbildung 8 dargestellt.

Man erkennt die unterschiedliche Dicke der durch den Entstehungsprozess und die nachträgliche Verschmutzung bedingten Überschichtung im nm-Bereich. Mit den

somit gegebenen lokalen Schichtdicken $t(x, y)$ und den zugrundeliegenden komplexen Brechungsindizes der Materialien können schließlich die Höhentopografien von Fehlern durch Material- und Schichtresonanzphasen korrigiert werden [5].

Abbildung 9a zeigt die grauwertkodierte Höhentopografie der direkten Interferenzauswertung nach Ausgleich durch Abzug einer bestangepassten Ebene; Abbildung 9b die entsprechende korrigierte Topografie, von der außerdem noch die lokale Überschichtung $t(x, y)$ abgezogen ist.

In den Profilschnitten (Abbildung 10) erkennt man, dass außer einer Korrektur der Profilhöhen auch Kantenüberschwinger reduziert werden.

4 Beispiel aus der Mineralogie

Gezeigt wird hier ein Topografiesatz des Schmucksteins Lapislazuli, der hier aus mikrokristallinen Körnern von blauem Lasurit und goldgelbem Pyrit zusammengesetzt ist. Die Höhentopografie (Abbildung 11) zeigt Verschleißspuren und eine beträchtliche Mikrorauheit. Ein Teil des Lichtes dringt in das Material ein und wird zur Oberfläche zurückgestreut (Volumenstreuung). Trotzdem lassen sich aus den Topografien der ellipsometrischen Winkel (Abbildungen 12 und 13) und aus dem Δ, Ψ -Diagramm diese beiden Materialien klar unterscheiden und segmentieren.

Wir gehen hier nur kurz auf das Δ, Ψ -Diagramm ein, für das im Wesentlichen die Ausführungen zu Abbildung 6 gelten. Zuerst werden alle Pixel links der blauen Domänenellipse dem Material Lasurit zugeordnet, Abbildung 14. Von den verbleibenden Pixeln werden dann alle rechts der roten Domänenellipse dem Material Pyrit zugeordnet. Es verbleiben Mikroporen im Pyrit und ein kleiner Rest Pi-

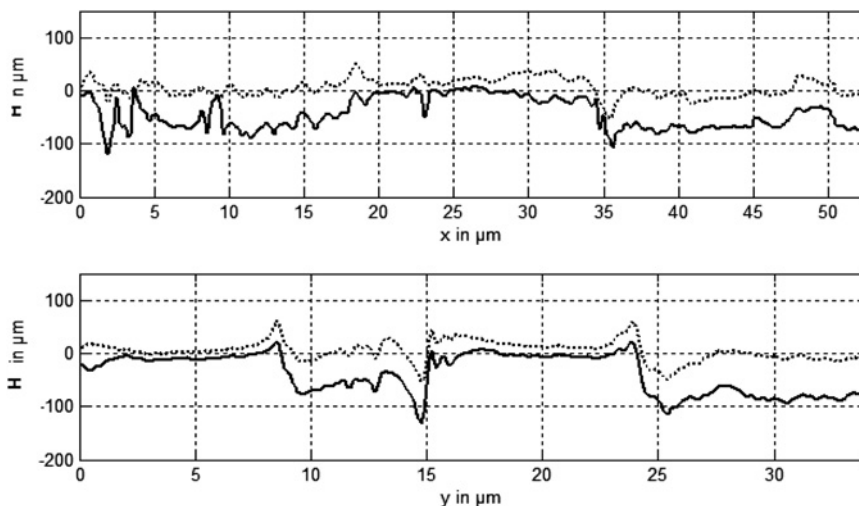


Abbildung 10: Profilschnitte der Topografiehöhe H . Gepunktet: direkt gemessen; durchgehende Linien: korrigiert von Material- und Schichtresonanzfehlern. Der Profilschnitt entlang x ergibt sich bei halber Feldhöhe in Abbildung 9; entsprechend der untere für die halbe Feldbreite.

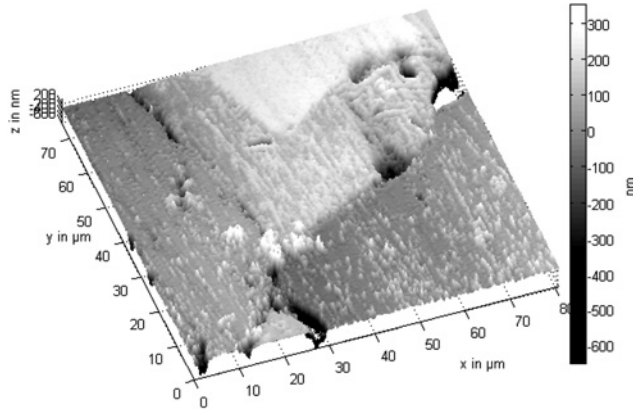


Abbildung 11: Phasenkorrigierte Höhentopografie einer Lapislazuli Oberfläche.

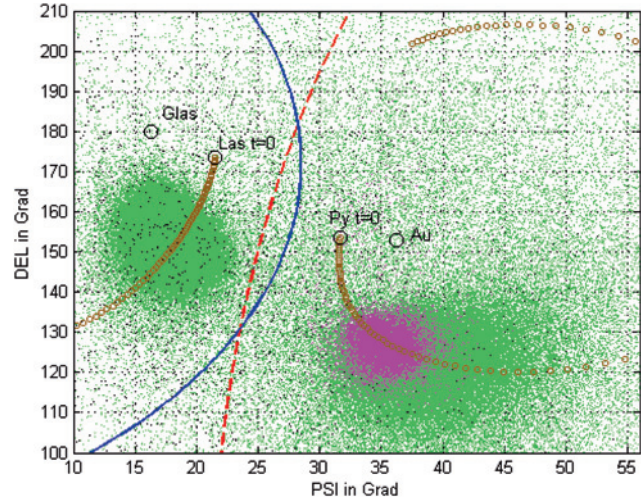


Abbildung 14: Δ, Ψ -Diagramm des Minerals Lapislazuli.

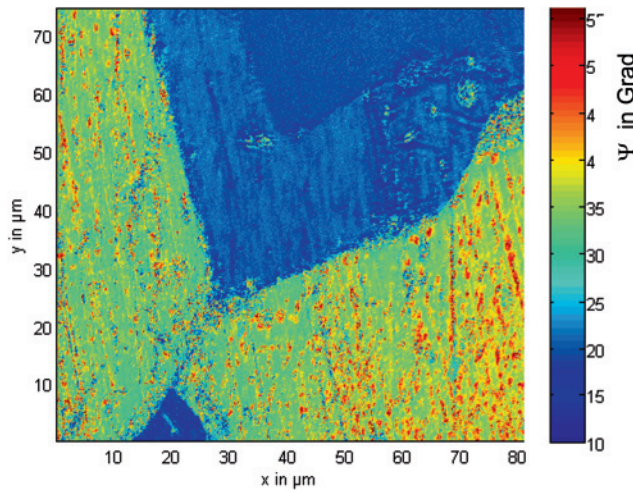


Abbildung 12: Topografie des ellipsometrischen Winkels $\Psi(x, y)$ in Grad.

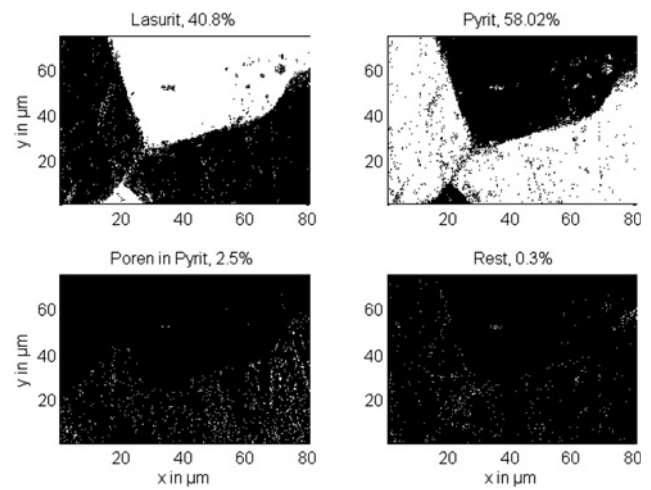


Abbildung 15: Materialkarten: links oben, weiß: Lasurit mit Flächenanteil 40,8%; rechts oben: Pyrit, mit 58%; links unten Poren und rechts unten Rest durch Kanten und Diskontinuitäten.

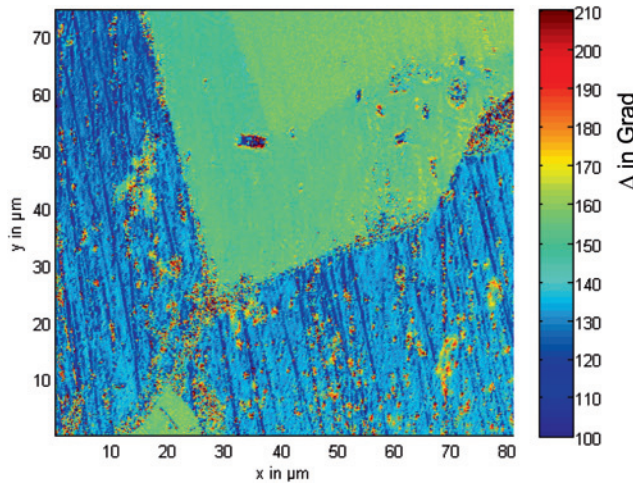


Abbildung 13: Topografie des ellipsometrischen Winkels $\Delta(x, y)$ in Grad.

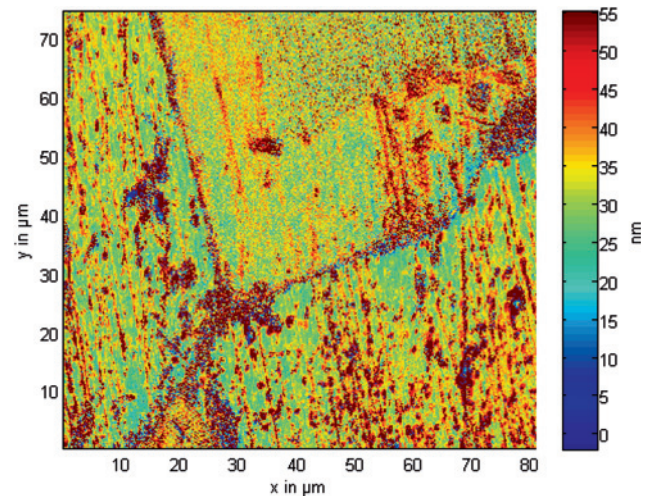


Abbildung 16: Lokale Dicke der Übersichtung $t(x, y)$.

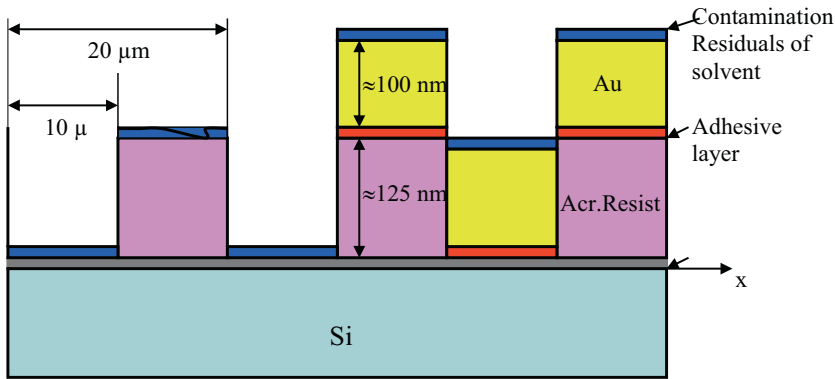


Abbildung 17: Schematischer Materialaufbau des Testobjektes.

xel, der hauptsächlich von Kanten, Störungen und Verunreinigungen stammt. Die Messungen für dieses Objekt wurden mit Einfallswinkel $\phi_0 = 45^\circ$ und Lichtwellenlänge $\lambda = 477 \text{ nm}$ durchgeführt.

Die daraus entstandenen Materialkarten sind in Abbildung 15 dargestellt. Weitere Materialunterscheidungen sind möglich, z. B. Unterscheidungen innerhalb der Lasurregionen. Diese können hier jedoch nicht weiterverfolgt werden.

Abbildung 16 zeigt die lokale Dicke der über den Grundmaterialien liegenden Übersichtung hauptsächlich durch Handfett und Schmutz.

5 Drittes Beispiel: Mikrostrukturiertes Testobjekt

Auf einem Siliziumsubstrat wurde eine Gitterlinienstruktur aus Stegen aus Acryl Photoresist der Breite 10 nm und Höhe ca. 125 nm nach Abbildung 15 aufgebracht [9]. Die Lichtwellenlänge war $\lambda = 459 \text{ nm}$ und der globale Einfallswinkel $\phi_0 = 47^\circ$.

In Erwartung großer Phasen- und Schichtresonanzfehler durch die Acrylstege wurde ein Teil der Objektfläche mit einer gleichmäßigen Goldschicht der Dicke $\approx 100 \text{ nm}$ bedampft (gelb). Die Goldgrenze liegt in den Abbildungen 18 und 19 bei $x \approx 30 \text{ }\mu\text{m}$. Diese nahezu lichtundurchlässige Schicht zeigt einheitliche Materialphasen der Reflexion, so dass dort die Steghöhen der Gitterlinien interferometrisch eindeutig gemessen werden können.

Tatsächlich zeigt an den unbedeckten Stellen die direkt interferometrisch gemessene Höhentopografie (Abbildung 18) vorhandene Material- und Schichtphasenfehler in eindeutiger Weise. Der mit Gold überschichtete Teil der Topografie beginnt bei $x \approx 30$ auf der X-Achse und ist in sich stimmig. Der nicht überschichtete Teil zeigt grobe Höhenfehler in Relation zu den Goldflächen und ist zu-

dem in sich selbst unstimmtig. Die Steghöhendifferenz zwischen Substratoberfläche und oberster Goldfläche ist nicht gleich der Summe aus Acrylsteghöhe und Goldschichtdicke (Materialphasenfehler). Der Acrylstege zwischen $x = 11 \text{ }\mu\text{m}$ und $x = 21 \text{ }\mu\text{m}$ auf der X-Achse bei $y = 0$ wird sogar grob falsch als Vertiefung in das Substrat gemessen (Schichtresonanzfehler). Es lässt sich zeigen, dass die Fehler nichtlinear von den Schichtdicken abhängig sind und

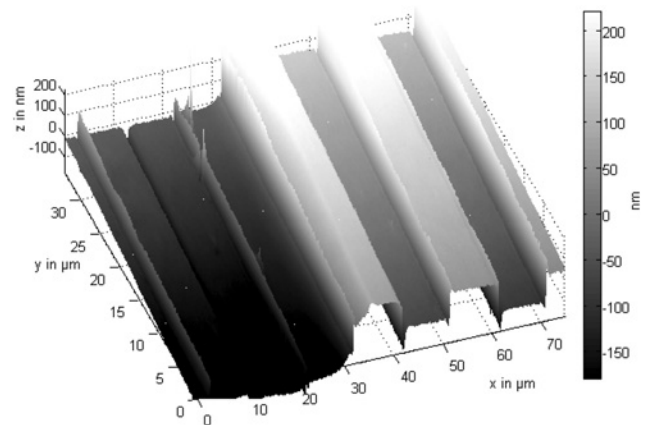


Abbildung 18: Direkte gemessene Interferenztopografie.

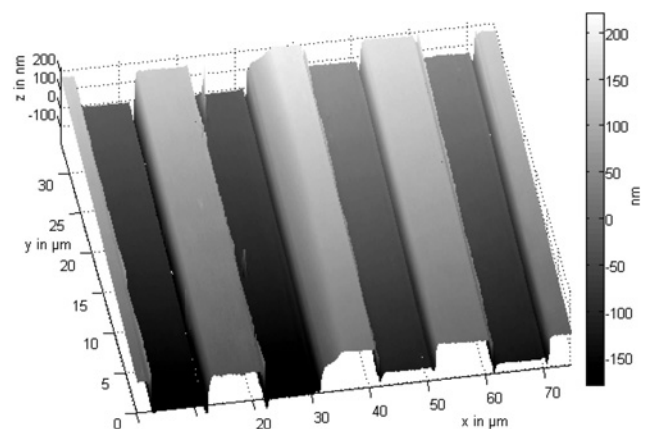


Abbildung 19: Korrigierte Interferenztopografie, gleiche Messstelle.

auch nicht monoton zu- oder abnehmen [5]. Eine Korrektur dieser Fehler durch herkömmliche Kalibrierverfahren ist selbst in einfachen Fällen unmöglich.

Mit den ellipsometrischen Daten und den optischen Konstanten der vorgegebenen Materialien [6] gemäß Abbildung 17 gelingt die Korrektur der Fehler der Originaldaten [4]. Dies wird in Abbildung 19 gezeigt. Es lassen sich sogar die Schichtdicken der Acrylstege und der Goldschicht bestimmen. Die Steghöhe der Acryl Gitterlinien ergibt sich zu 128 nm, die Dicke der Goldschicht zu 103 nm.

6 Zusammenfassung

Da das neue Verfahren sowohl die höhentopografische Information als auch die ellipsometrische Information aus denselben Datensätzen derselben Sensorpixel ermittelt, sind Berechnungen weiterer Oberflächenkenngrößen und -statistiken möglich. Durch Inversion der Schichtgleichungen kann die Dicke einer Überschichtung der Oberfläche durch Oxidationen oder durch Ablagerungen von Kühl- und Schmiermitteln oder auch die Dicke aufgebrachtener Funktionsschichten eindeutig berechnet werden. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu den bisher eingesetzten Varianzmethoden, bei denen multidimensional Modellparameter solange variiert werden bis eine Minimalabweichung der Modellprofilform zu den Messdaten erreicht ist. Ist das physikalische Modell unzureichend, dann gilt dies auch für das Ergebnis. Bei der Ellipso-Höhentopografie basiert die Korrektur der Originaldaten demgegenüber auf Messwerten.

Die Fehlerbehaftung von Originalmessdaten ist unabhängig vom Messverfahren. Ob Konfokalmikroskopie, Interferometrie, Autofokus, Triangulation oder Chromat. Aberration, alle bekannten Verfahren messen naturgesetzbedingt beim Vorhandensein verschiedener Materialphasen die Oberflächentopografie im nm-Bereich falsch. Sind Beschichtungen oder Überschichtungen mit im Spiel, dann können die Fehler durch Schichtresonanzphasen in die Mikrometer gehen. Aber selbst bei nur einem Grundmaterial ergeben sich Messfehler an Profildiskontinuitäten sowie durch die faktisch unvermeidlichen Schichten von Oxiden und anderen Verbindungen. Je feiner die Oberflächenstruktur, desto bedeutender die relativen Messfehler. Wir stellen hier ein Verfahren vor, welches eine physikalisch fundierte pixelaufgelöste Korrektur der Messdaten anbietet.

Vielfältige Einsatzmöglichkeiten sehen wir in der industriellen Messtechnik, den Materialwissenschaften, der Mineralogie, der Mikroelektronik, der Mikromechanik, der

Medizin, der Biologie, der Umweltforschung, bei forensischen Analyseverfahren und in weiteren Einsatzgebieten.

Literatur

1. R. M. A. Assam, N. M. Basher, *Ellipsometry and Polarized Light*, North Holland, Amsterdam, 1987.
2. H. G. Tompkins and E. A. Irene, Eds. *Handbook of Ellipsometry*, Springer, 2005.
3. K. Leonhardt, *Interferometry for Ellipso-Height-Topometry*, Part 2, *Optik*, 121, 623–632, 2010.
4. K. Leonhardt, *Interferometry for Ellipso-Height-Topometry*, Part 3, *Optik*, 125, 5286–5294, 2014.
5. K. Leonhardt, H. J. Tiziani, *Optical topometry of surfaces with locally changing materials ... Part 1*, *Journal of Modern Optics*, 46, 101–114, 1999.
6. E. D. Pallik, Ed., *Handbook of optical constants of solids*, Academic Press, Vol. I, III, 1985–1998.
7. K. Leonhardt, U. Droste, H. J. Tiziani, *Interferometry for Ellipso-Height-Topometry*, Part 1, *Optik*, 112, 12, 513–518, 2003.
8. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 1970.
9. Hersteller: U. Köhler, D. Maas, Institut für Mikrostrukturtechnik, KIT Karlsruhe.
10. K. Leonhardt, H.-J. Jordan, H. J. Tiziani, *Micro-Ellipso-Height-Profilometry*, *Optics Communications*, 80, 205–209, 1991.
11. W. Holzappel, U. Neuschäfer-Rube, Doberitzsch, *J. XIV IMEKO World- Congress*, Vol. 7, 153–158, 1997.
12. K. Leonhardt, U. Droste, H. J. Tiziani, *Topometry for locally changing materials*, *Optics Letters*, 23, 1772–1774, 1998.

Autoreninformationen



Klaus Leonhardt

Leoptik, Haldenstr. 78, 71254 Ditzingen
klaus.e.leonhardt@t-online.de



Ulrich Breitmeier

Tevob, Englerstr. 24, 76275 Ettlingen,
www.tevob.de
ulrich@breitmeier.de