

DIGITALE HOLOGRAPHISCHE MIKROSKOPIE

3D-Echtzeitaufnahmen mit nm-Genauigkeit

YVES EMERY

Die digitale holographische Mikroskopie, DHM, ermöglicht 3-dimensionale Messungen mit einer Auflösung von 1 nm. Das Besondere des Messverfahrens ist jedoch die äußerst kurze Messzeit. Dank der sehr hohen Messgeschwindigkeit von wenigen μs lassen sich auch dynamische Prozesse erfassen, beispielsweise an Mikropumpen oder Beschleunigungssensoren.

Die Holographie wurde 1948 vom ungarisch-britischen Physiker Dennis Gabor entdeckt [1]. Anfang der 60er Jahre schaffte die Holographie einen Aufschwung, als Laser das notwendige monochromatische Licht erzeugen konnten. Gabor erhielt 1971 schließlich den Nobelpreis für Physik. Den endgültigen Durchbruch schaffte die digitale holographische Mikroskopie jedoch erst mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Kameras und Computer.

Ein Objekt zu sehen ist nur möglich, weil das Objekt das empfangene Licht modifiziert, bevor es das Licht zu den Augen des Betrachters zurückreflektiert. Diese Änderung basiert auf zwei physikalischen Eigenschaften der Lichtquelle: der Intensität und der Phase. Gabor hat die Phasenveränderung des Lichts als Funktion der Intensitätsveränderung systematisch erfasst. Diese Intensitätsveränderung wird zunächst aufgenommen und kann anschließend wieder gelesen werden. Eine solche Aufnahme wird als Hologramm bezeichnet. Die digitale Holographie ersetzt nun das klassische Wiederbeleuchtungsverfahren des Hologramms durch eine rein numerische Prozedur mithilfe eines Computers. Auf diese Weise lassen sich die Phasenbilder der analysierten Objekte darstellen und in einer 3-dimensionalen Information quantitativ wiedergeben (Bild 1).

Nach umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es gelungen, die digitale holographische Mikroskopie als Messverfahren in einem praxisgerechten und

Aufnahmeprinzip eines Off-Axis -Hologramms

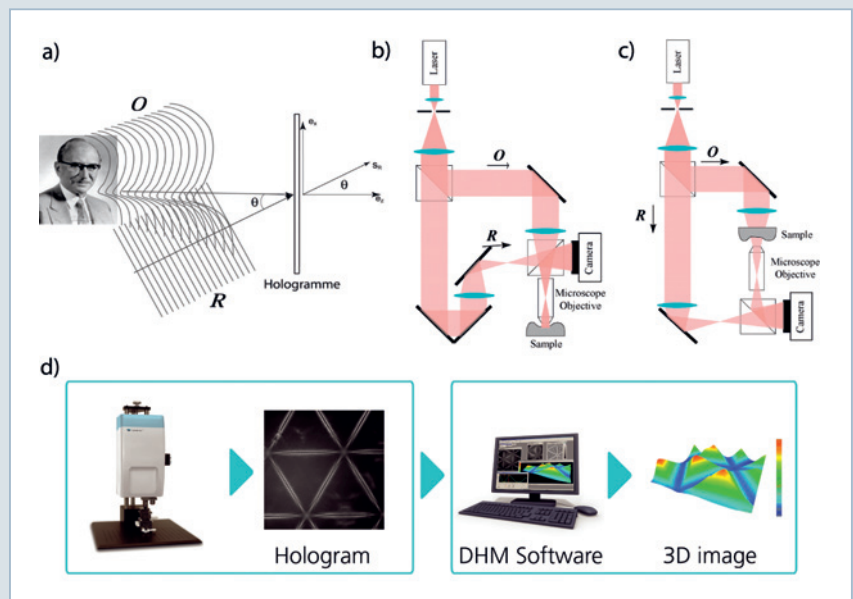


BILD 1A. Der Winkel zwischen dem Referenzstrahl (R) und dem Objektstrahl (O) beträgt nur wenige Grad (Winkel θ). Dies ermöglicht die Rekonstruktion der kompletten 3D-Information aus einem einzigen Hologramm. Das Bild zeigt Dennis Gabor, Nobelpreisträger für Physik und Entdecker der Holographie

BILD 1B. Optischer Aufbau des DHM für Auflichtmessungen: Der Lichtstrahl wird in zwei Strahlteile aufgeteilt, in einen Referenzstrahl und einen Objektstrahl. Der Objektstrahl erleuchtet die Probe. Das von der Probe modifizierte Licht wird vom Mikroskop-Objektiv aufgenommen und anschließend mit dem Referenzstrahl kombiniert, um ein Hologramm in der Kamera zu erzeugen

BILD 1C. Optischer Aufbau für eine Durchlichtmessung mit Hilfe des DHM: Der Ausgangslichtstrahl wird zuerst in zwei Strahlteile aufgeteilt, wiederum in den Referenzstrahl und den Objektstrahl. Der Objektstrahl erleuchtet die Probe. Das von der Probe gestreute Licht wird vom Mikroskop-Objektiv aufgenommen und danach wiederum mit dem Referenzstrahl kombiniert, um ein Hologramm in der Kamera zu bilden

BILD 1D. DHM-Prinzip: Ist ein Hologramm vom Mikroskop aufgenommen, wird es rechnerisch aufbereitet, um sowohl die Phasen- als auch die Intensitätsinformation der aufgenommenen Probe zu erhalten

robusten Messgerät nutzbar zu machen (Bild 2). Dabei liefert das so entstandene DHM-Gerät auf dem Bildschirm eine topografische Abbildung der Probenoberfläche mit sehr hoher axialer Auflösung im nm-Bereich.

Bis zu einer vertikalen Auflösung von 1 nm

Die laterale Auflösung ist beim DHM vergleichbar mit derjenigen eines üblichen Lichtmikroskops: Je nach Objektiv kann die Auflösung bis 300 nm in Öl betragen. Der Bildausschnitt reicht von $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ bis $4 \times 4 \text{mm}^2$, wobei die Höhenauflösung immer nm-genau bleibt. Die laterale Auflösung variiert jedoch wie beim herkömmlichen Lichtmikroskop. Genauso wie das Lichtmikroskop arbeitet das DHM berührungslos und benötigt keine Vorbehandlung der Proben.

DHM-Messungen können sowohl im Durchlicht (Transmission) als auch im Auflicht (Reflexion) erfolgen, wobei in einem Gerät nicht beide Modi verfügbar sind. Im Auflicht können auch sehr schwach reflektierende Proben aufgenommen werden,

beispielsweise Glas mit einer Reflektivität von weniger als 1 Prozent. Schwierig zu messen sind jedoch diffuse Oberflächen mit Rauheiten R_a von mehr als $0,3 \mu\text{m}$.

Die Stärke des DHM liegt vor allem in der so genannten Off-Axis-Konfiguration, welche das Erfassen der kompletten 3D-Information aus einem einzigen Hologramm erlaubt (Bild 1). Dabei lässt sich ein derartiges Hologramm in einer sehr kurzen Zeit von nur wenigen μs erstellen. Außerdem ist kein Scannen erforderlich, weder längs der optischen Achse – wie beim Weißlichtinterferometer – noch quer dazu. Eine Ausnahme bildet das sogenannte Stiching für großflächige Aufnahmen. Diese Eigenschaften wirken sich positiv auf die Lebensdauer der Geräts aus und machen es damit nur wenig störungsanfällig.

Robust und stabil

Dank der sehr schnellen Bildgenerierung ist das Gerät auch weitgehend unempfindlich gegen Erschütterungen und kann dadurch trotz der nm-Auflösung wie ein gewöhnliches Lichtmikroskop auf einem Tisch betrieben



BILD 2. DHM-Gerät für Auflichtmessungen: 3-dimensionale Echtzeitaufnahmen mit nm-Auflösungen sind möglich

Oberflächenprofilmessung an Mikrostrukturen optisch und taktil

Abstand, Rauheit, Fläche, Stufenhöhe, Oberflächenstrukturkennzahlen

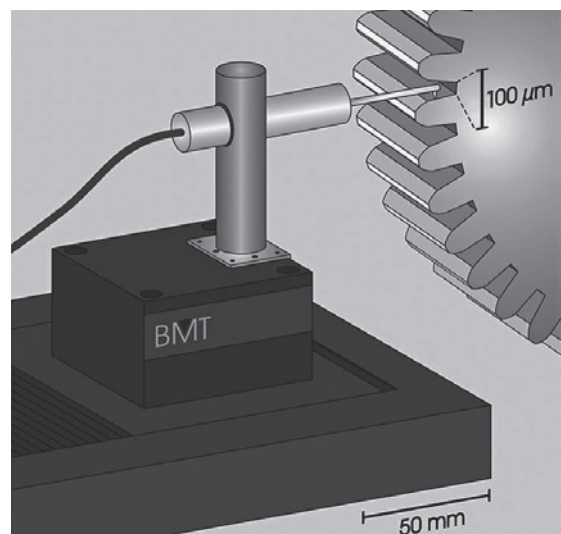
Weißlichtinterferometer, konfokale Mikroskopie, Streifenprojektion
Punktsensoren, Mikrotaster, Zubehör, kundenspezifische Software

Strukturmessung auf Zahnflanken von Mikrozahnradern

- Profil-, Tragbild- u. Rauheitsmessung
- Automatisierte Tasterpositionierung u. Messung

BMT

Breitmeier Messtechnik GmbH
Englerstr. 24
76275 Ettlingen
Tel. 07243-60573
meisel@breitmeier.de
www.breitmeier.de



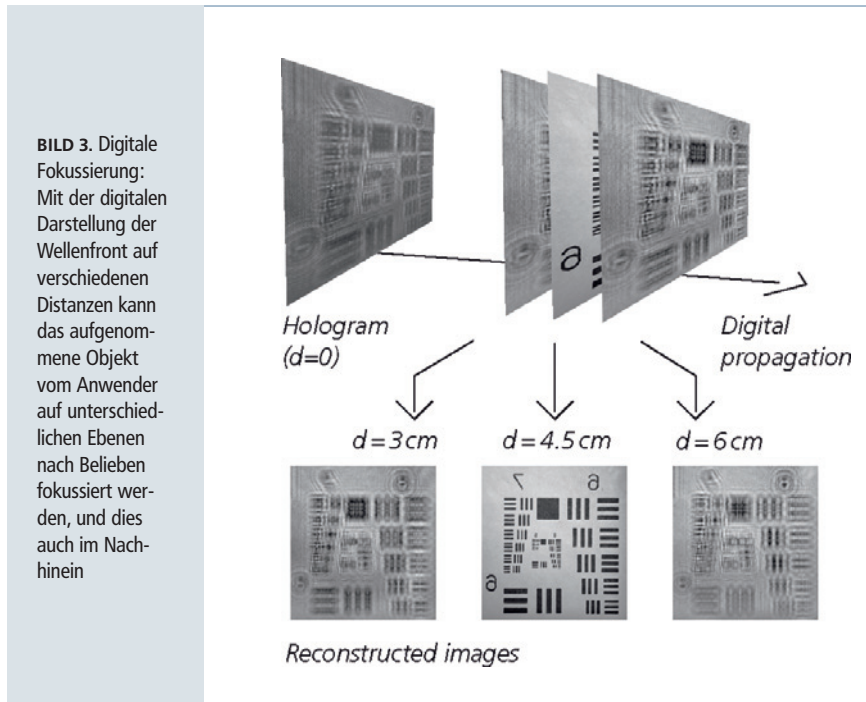
werden. Außerdem werden auf diese Weise auch sehr schnelle Aufnahmen von bewegten Teilen möglich.

Echtzeitmessung: Die vierte Dimension

Mit einer Kamera, die über 512×512 Pixel verfügt, kann das DHM-Gerät auf dem Bildschirm etwa 15 Bilder pro Sekunde wiedergeben. Die Wiedergabegeschwindigkeit ist das Ergebnis der benötigten Rechen-

schirm mit voller 3D-Information betrachten. Diese Vorgehensweise macht es sehr einfach, die zu untersuchenden Regionen auf Unregelmäßigkeiten zu untersuchen oder auch einfach und schnell den Flächenrauhheitswert zu ermitteln (Bild 3).

Einzigartig ist das DHM in der Möglichkeit, dynamische Prozesse sowohl über ganz kurze als auch über lange Zeitintervalle zu beobachten und diese als Filmsequenz zu erfassen. Interessant ist dies beispielsweise



zeit für die Rekonstruktion der in μs aufgenommenen Bilder. Dabei nutzt das DHM einen Standard-PC.

Beim Messvorgang bewegt der Anwender die Probe auf dem Probentisch und kann die Oberfläche in Echtzeit auf dem Bild-

schirm bei der Beobachtung elektrischer, magnetischer, thermischer, chemischer oder gar flüssiger Interaktionen.

Die besonderen Eigenschaften des Messverfahrens macht das DHM besonders für Anwendungen in der Mikrotechnik interes-

LITERATUR

- 1 Gabor, D.: A new microscopic principle. Nature, 1948
- 2 Cuhe, E.; Marquet, P.; Depeursinge, Ch.: Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms. Appl. Opt. 38, 1999, S. 6994-7001
- 3 Emery, Y.; Marquet, F.; Cuhe, E. et al: Digital Holographic Microscopy for metrology and dynamical characterization of MEMS and MOEMS. Proc. SPIE Vol. 6186, 61860N, 2006
- 4 Charrière, F.; Kühn, J.; Colomb, T. et al.: Characterization of microlenses by digital holographic microscopy. Applied Optics, 45, 2006, 829-35
- 5 Kuhn, J.; Cuhe, E.; Emery, Y. et al.: Measurements of corner cubes microstructures by high magnification digital holographic microscopy. Proc. SPIE Vol. 6188, 618804, 2006

sant (Bild 4). In der Mikrooptik wird beispielsweise eine effiziente Qualitätssicherung ermöglicht, indem Defekte an mikrooptischen Komponenten wie optischen Gittern oder Mikroprismen frühzeitig festgestellt werden können. Die Prüfung einer Mikrolinse, also die Messung der Krümmung der Linse und die Kontrolle von deren Oberfläche, lässt sich zum Beispiel in 0,1 s durchführen. Diese Messgeschwindigkeit ermöglicht sogar die Prüfung von Wafern, auf denen eine große Anzahl mikrooptischer Komponenten aufgebracht sind.

Messen mit höchster Geschwindigkeit

Prädestiniert ist das DHM für die Echtzeitprüfung beweglicher Teile an MEMS und MOEMS. Zu nennen wären beispielsweise Mikropumpen, Beschleunigungssensoren,

Litke
PROJEKTMANAGEMENT
Handbuch für die Praxis
NEU
Konzepte Instrumente Umsetzung

Litke (Hrsg.)
Projektmanagement -
Handbuch für die Praxis
946 Seiten mit CD
€ 149,- · ISBN 3-446-22907-8

Den Projekterfolg im Blick...

Alles zu diesem Buch unter
www.hanser.de/wirtschaft

HANSER

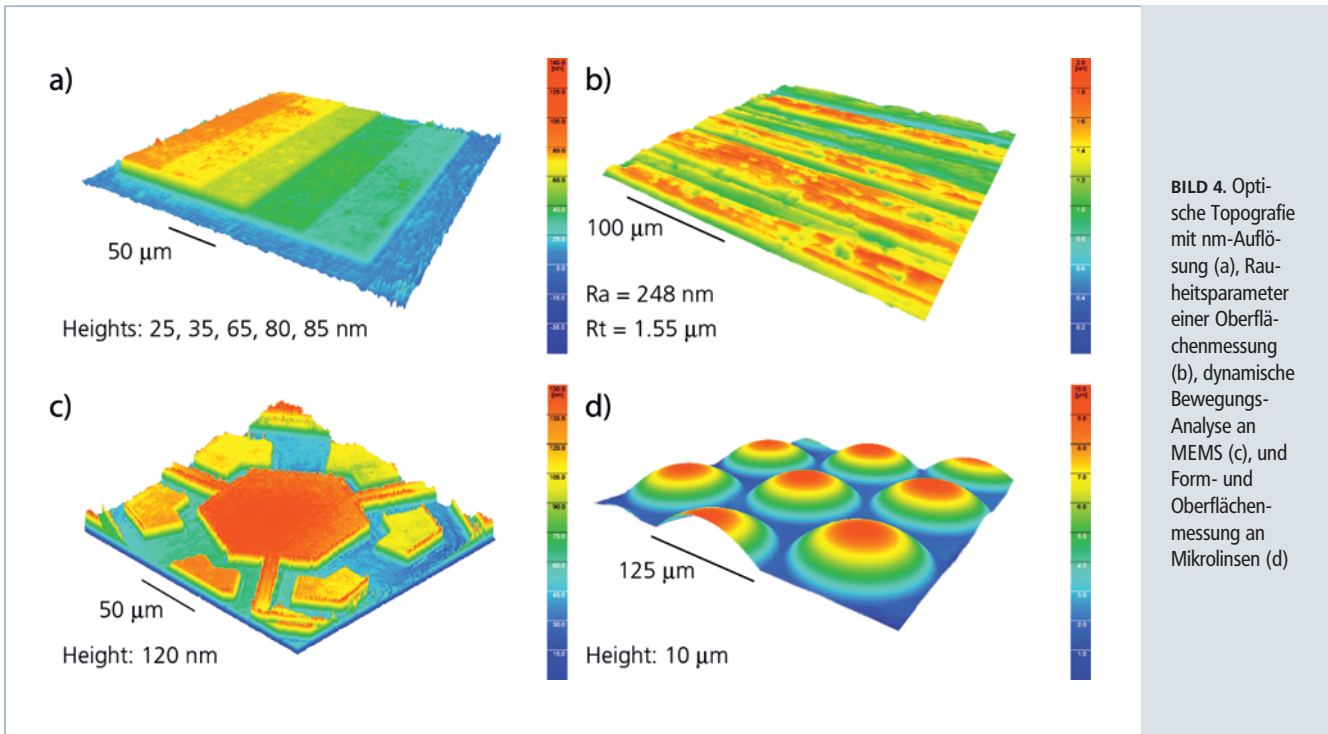


BILD 4. Optische Topografie mit nm-Auflösung (a), Rauheitsparameter einer Oberflächenmessung (b), dynamische Bewegungsanalyse an MEMS (c), und Form- und Oberflächenmessung an Mikrolinsen (d)

Druckerdüsen und Gyroskope. Werden die Messgeräte zudem mit Hochgeschwindigkeitskameras ausgerüstet oder im sogenannten Stroboskop-Mode genutzt, ist das Messverfahren besonders für Anwendungen im Prozess-Engineering interessant. Auf diese Weise lassen sich Erkenntnisse über das dynamische Verhalten von Mikrosystemen gewinnen und für die Weiterentwicklung der Mikrosysteme nutzen.

Auch Merkmale wie Rauheit und Ebenheit oder generell die Topografie einer Oberfläche können dank der hohen axialen Auflösung des DHM mit hoher Präzision untersucht werden. Die Messungen können auch großflächig erfolgen, und zwar sowohl bei organischen als auch bei anorganischen Materialien.

Für Anwendungen in den Materialwissenschaften ist das Messverfahren interessant, weil dank der hohen Z-Auflösung auch geringe Änderungen des Brechungsindex, die von Defekten im Kristallgitter durchsichtiger Proben hervorgerufen werden, detektiert werden können.

Fehlerhafte Mikroinjektionskomponenten, zum Beispiel in der Medizintechnik, können das ganze System unbrauchbar machen. Da solche Systeme oft sehr teuer sind, ist für Systeme für die Mikroinjektion eine 100-prozentige Qualitätskontrolle erforderlich. Auch bei derartigen Anwendungen hat sich das DHM als eine effiziente Möglichkeit zur schnellen Qualitätsprüfung erwiesen.

Automatisiertes Messen für die industrielle Produktion

Aufgrund der hohen Bilderrate und der Digitalisierung lässt sich die DHM-Techno-

logie auch in der industriellen Produktion verwenden. Geeignet ist das Messverfahren insbesondere für automatisierte Qualitätskontrollen für Ebenheit, Dimension und der Oberflächenbeschaffenheit sowohl von durchsichtigen als auch von reflektierenden Bauteilen.

Besondere Vorzüge zeigt das DHM in den Biowissenschaften in der Untersuchung biologischer Proben. Das Verfahren erfordert weder eine Färbung der Probe noch ein Kontrastmittel und benötigt gegenüber konfokalen Mikroskopen nur eine 100 000-mal geringere Lichtintensität. Auf diese Weise werden zahlreiche Anwendungen in der Zellbiologie, der Diagnostik, der Genomik, der Proteomik sowie in der Lebensmittelindustrie erschlossen.

HERSTELLER

Lyncée Tec SA
 CH-1015 Lausanne
 Tel. +41/21/6 93 02 20
 Fax +41/21/6 93 02 29
 www.lynceetec.com

Dr. Yves Emery
 ist Geschäftsführer von Lyncée Tec
 in Lausanne/Schweiz;
 yves.emery@lynceetec.com

MICOS
 MECHANISCHE INSTRUMENTE
 OPTISCHE SYSTEME GMBH GERMANY

- Turn-Key solution
- Microtechnology
- Inhouse competence

Phone: +49(0)7634-50 57-0 www.micos.ws / info@micos.ws

CONTROL