

VDI

VDE

VDI/VDE-Gesellschaft

Mess- und Automatisierungstechnik

Optische Messung technischer Ober- flächen in der Praxis

Bestimmung von Geometrie und Topographie



VDI-Berichte 1996

Konfokale Punktsensoren

Dr.-Ing. **Hans-Joachim Jordan**, DIGITAL SURF Deutschland GmbH,
Bühl (Baden)

Kurzfassung

Dieser Beitrag erläutert das Messprinzip konfokaler Punktsensoren im Allgemeinen und im speziellen die Untergruppe der passiven chromatisch konfokalen Punktsensoren. Der Vorteil der chromatisch konfokalen Punktsensoren ist deren einfache Skalierbarkeit und damit verbunden deren einfache Adaption an die Anforderungen der jeweiligen Applikation. Die Verwendung breitbandiger Weißlichtquellen mit sehr geringen Kohärenzlängen erweist sich dabei als vorteilhaft in der Vermeidung parasitärer und zu Messfehlern der Schichtdicken führenden Interferenzen.

1. Das Grundprinzip der konfokalen Abstandsmessung

Das Grundprinzip der (monochromatisch) konfokalen Abstandsmessung ist in Bild 1 dargestellt [1, 2]. Das von einer Punktlichtquelle emittierte Licht wird von einer beugungsbegrenzten Beleuchtungsoptik in einer idealerweise perfekten Fokus höchster Leuchtdichte abgebildet (erste Fokussierung = Beleuchtung). Befindet sich die im Abstand zu messende Oberfläche genau in diesem ersten Fokus, so wird dieser anschließend von einer zweiten beugungsbegrenzten Abbildungsoptik auf einen Punktdetektor abgebildet, welcher hierbei ein Intensitätsmaximum verzeichnet (zweite Fokussierung = Abbildung mit höchstem Lichtfluss durch ein Detektor - Pinhole). Man spricht daher auch vom Messprinzip der doppelten Fokussierung (obere Hälfte von Bild 1). Diese kann in Transmission, wie in Bild 1 dargestellt, oder auch in Reflexion erfolgen. In Reflexion wird dabei die beugungsbegrenzte Optik zweimal durchlaufen. Ist die im Abstand zu messende Oberfläche nun defokussiert (untere Hälfte von Bild 1), so wird der Lichtfluss durch das Detektor - Pinhole durch das Produkt zweier Effekte reduziert. Zum einen wird die im Abstand zu messende Oberfläche mit einer geringeren Dichte beleuchtet (Defokussierung in der Beleuchtung), andererseits ist die im Abstand zu messende Oberfläche aber auch gegenüber dem Punktdetektor defokussiert, was zu einer nochmaligen Reduzierung der Leuchtdichte am Ort des Punktdetektors führt. Als Resultat registriert der Punktdetektor einen mit dem Abstand der Defokussierung rapide abfallenden Gauss-förmigen Intensitätsverlauf. Dieser auch Tiefendiskriminierung genannte Effekt

[3, 4, 5] erlaubt über einen Scan entlang der z-Achse eine genaue Vermessung des Abstands.

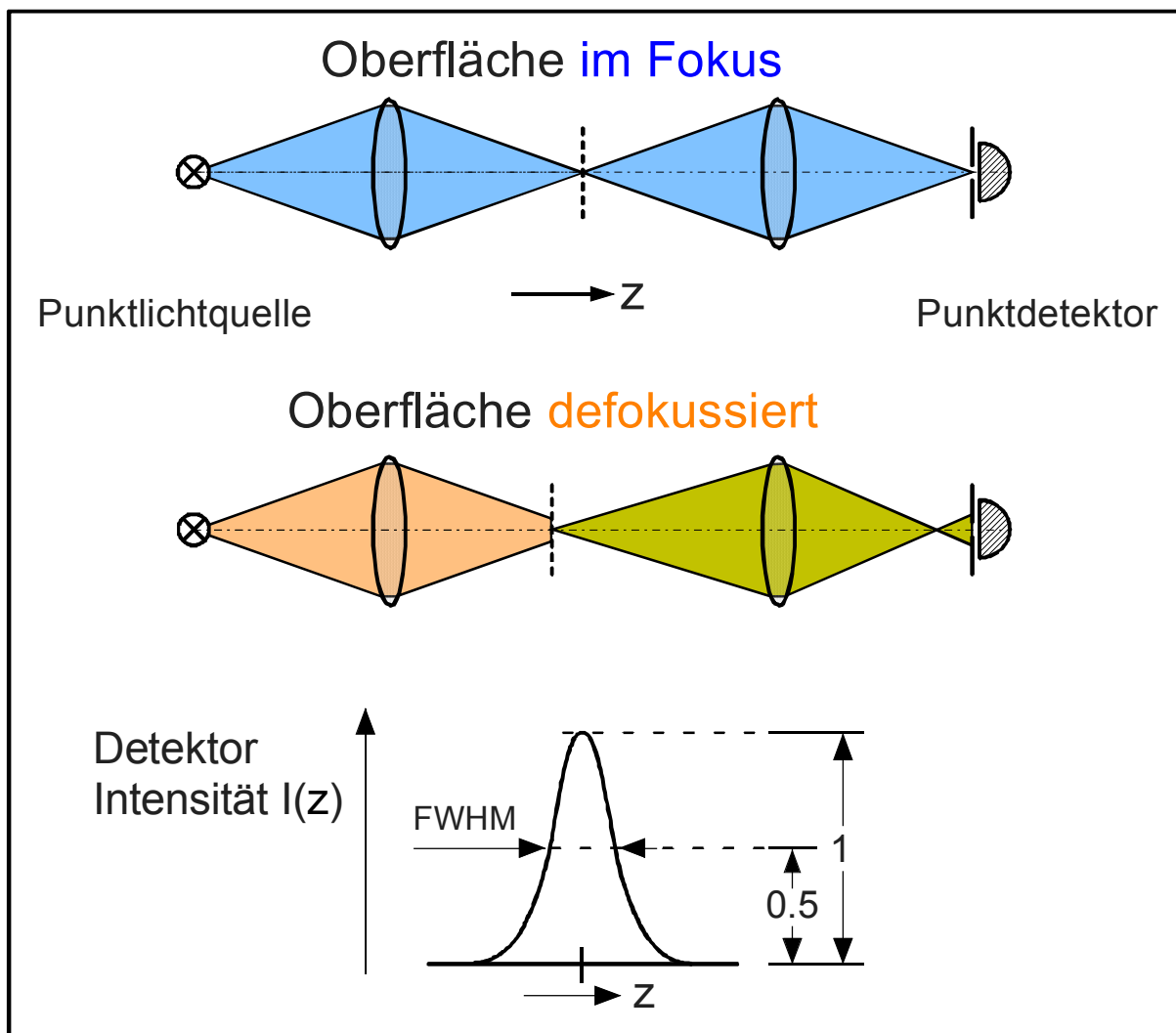


Bild 1: Prinzip der konfokalen Abstandsmessung

Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist die Unterdrückung von Streulicht aus defokussierten Objektbereichen, welche zu einer Kontrastanhebung führt.

Die Erweiterung dieses Grundprinzips der (monochromatisch) konfokalen Abstandsmessung mit einem synchronen xy-Scan sowohl der Punktlichtquelle als auch des Punktdetektors führt zur flächenhaft Topographiemessenden konfokalen Mikroskopie. Verschieden technische Ausführungen wurden erfolgreich in der 3D Charakterisierung technischer Oberflächen eingesetzt [6 – 12].

2. Das Messprinzip des chromatisch konfokalen Punktensors

In monochromatischen (oder axial farbkorrigierten konfokalen Weißlichtsystemen) sind alle Wellenlängen λ einer gemeinsamen z Koordinate zugeordnet. Die vom Abstand abhängige Intensität $I(z)$ ist Gauß-förmig, wobei der zu messende Abstand zur Oberfläche durch die Lage des Maximums des Gauß-förmigen Intensitätsverlaufs kodiert ist. Die Messaufgabe besteht also darin, zuerst den Intensitätsverlauf $I(z)$ zu scannen und daraus die Lage des Peaks zu bestimmen.

Chromatisch konfokale Abstandsmesssysteme [13] dagegen werden nicht axial farbkorrigiert, die axiale chromatische Dispersion wird in diesen Systemen vielmehr maximiert. Bezüglich der sonstigen Aberrationen werden diese Systeme jedoch korrigiert. Verschiedenen Wellenlängen werden also in verschiedene Abstände beugungsbegrenzt fokussiert, wodurch eine kontinuierliche chromatische Kodierung des zu messenden Abstands über dem breitbandigen Wellenlängenbereich der Weißlichtquelle des Messsystems erreicht wird (Bild 2).

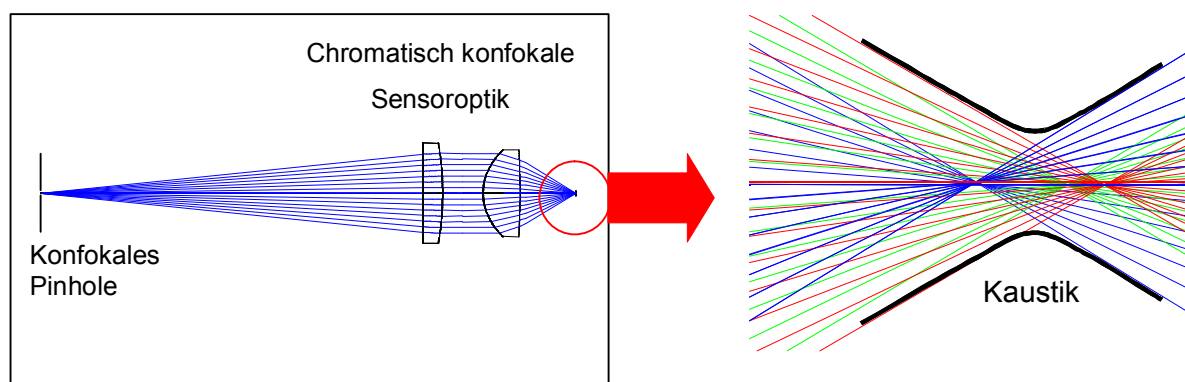


Bild 2: Prinzip der chromatisch konfokalen Sensoroptik

Die Intensitätsantwort $I(\lambda)$ ist ebenfalls Gauß-förmig, die Messaufgabe besteht also darin, zunächst mittels eines Spektrometers die Intensitätsantwort $I(\lambda)$ über eine Zeilen-CCD-Kamera aufzunehmen und aus dem Spektrum die Position des Peaks zu bestimmen. Chromatisch konfokale Abstandssensoren sind also rein passive Messsysteme, bei denen kein mechanischer z -Scan der Intensitätsantwort notwendig ist.

Aufgrund der kontinuierlichen chromatischen Fokusverschiebung hat die Einhüllende des gesamten Fokusbereichs eine große „Fleckbreite“ (die „Kauistik“), diese stellt jedoch nicht die Abtastfleckgröße dar (beugungsbegrenzte Foki des verwendeten Spektrums).

3. Systeme von chromatisch konfokalen Punktsensoren

Der Controller eines chromatisch konfokalen Punktsensors besteht im Wesentlichen aus einer breitbandigen Weißlichtquelle und einem Spektrometer mit Nachgeschaltetem DSP (Digitaler Signalprozessor) zur Signalverarbeitung (Bild 3). Der Messkopf mit integrierter Sensoroptik, wie in Bild 2 schematisch dargestellt, ist vom Controller abgekoppelt und über eine Multimode Lichtleitfaser von typischerweise 50 μm Kerndurchmesser mit diesem verbunden. Das Faserende vereinigt die damit die Funktion der Punktlichtquelle und des Punktdetektors.

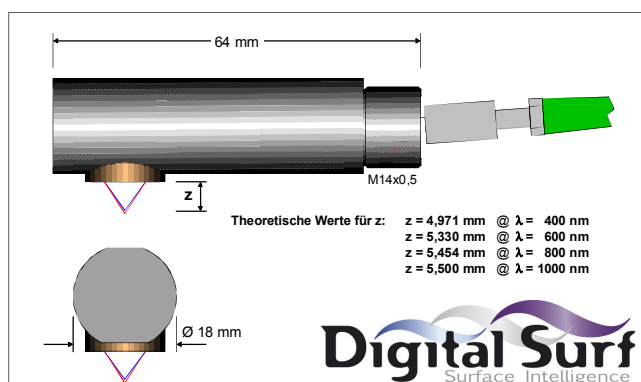


Bild 3: Chromatisch konfokaler Controller Bild 4: Abgewinkelter 400 μm Messkopf

Ein Vorteil des chromatisch konfokalen Punktsensors ist die Skalierbarkeit des Messkopfes. Dieser kann in seinen charakteristischen Größen wie Messbereich, Arbeitsabstand, Numerischer Apertur oder in sonstigen Designfragen an die Kundenbedürfnisse angepasst werden, wobei der Controller von diesen Modifikationen unberührt bleibt.

Es stehen mehrere Messkopfvarianten zur Verfügung [14] mit Messbereichen von 300 μm bis 4 mm. Bild 4 zeigt einen abgewinkelten Messkopf mit 400 μm Messbereich, einem mittleren Arbeitsabstand von 5 mm, einer numerischen Apertur von 0,5, einer Abtastfleckbreite von 5 μm , einer lateralen Auflösung von 1 μm und einer Wiederholgenauigkeit von 20 nm bei einer Linearität von $\pm 0,2 \%$.

4. Schichtdickenmessung mit dem chromatisch konfokalen Punktensor

Für die Schichtdickenmessung werden 2 Peaks, wie in Bild 5 dargestellt, detektiert. Die Schichtdicke ergibt sich dabei durch Multiplikation des Abstandsunterschiedes der beiden Peaks (Kalibrierung des Systems in Luft) mit dem Brechungsindex des Schichtmaterials.

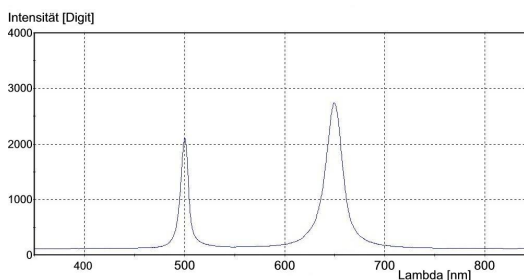


Bild 5: Doppelpicks eines Schichtsystems.

Bild 6 zeigt ein Beispiel, bei dem der Abstand des Filaments von zylindrischen Glaskolben eines Leuchtmittels durch die Glaswand hindurch gemessen wurde. An den beiden Profilrändern von Bild 6 ist das Niveau des Glaskolbens zu sehen, die Profilmitte zeigt die oberen und unteren Plateaus der Filamentstruktur.

Für diese Messung wurde ein Messkopf mit 3 mm Messbereich, einem mittleren Arbeitsabstand von 38 mm, einer numerischen Apertur von 0,3, einer Abtastfleckbreite von 20 µm, einer lateralen Auflösung von 4 µm und einer Wiederholgenauigkeit von 100 nm bei einer Linearität von ± 0,2 % verwendet.

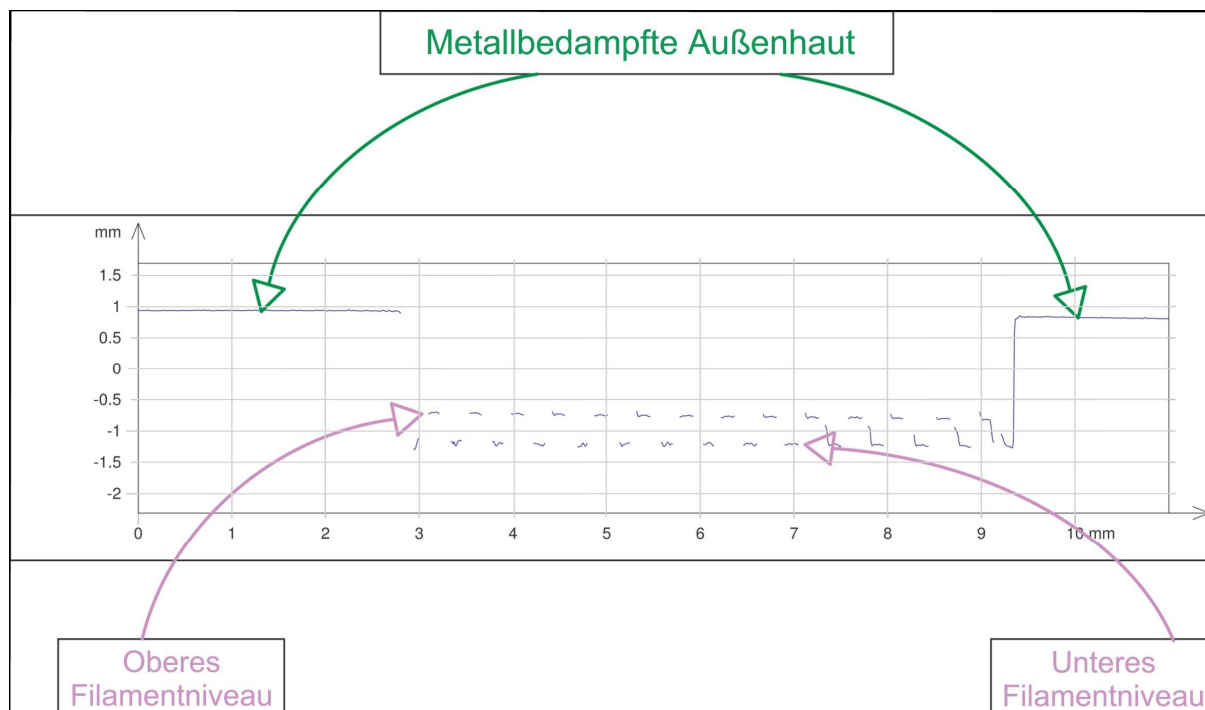


Bild 6: Messung der Filamentposition in einem Leuchtmittel.

5. Mögliche Fehlerquellen in der Schichtdickenmessung

Die Kohärenz monochromatisch konfokaler Sensoren kann zu Fehlern in der Schichtdickenmessung führen, welche durch parasitäre Interferenzen verursacht sein können. Bild 7 zeigt die Geometrie eines Messobjektes, welche zur Veranschaulichung dieses Problems verwendet wurde. Zwischen 2 Mikroskopieobjektträgern wurde ein keilförmiger Luftspalt eingebracht, dessen Dickenprofil vermessen wurde. Es wurden also die Abstandsdifferenz zwischen dem Reflex R1 von der Unterseite des oberen Objektträgers und dem Reflex R2 von der Oberseite des unteren Objektträgers vermessen. Der für diese Messung verwendete konfokale Punktsensor war mit einer Laserdiode der Wellenlänge $\lambda = 670 \text{ nm}$ als Lichtquelle ausgestattet, welche typischerweise eine Kohärenzlänge von nur einigen $10 \mu\text{m}$ hat. Bild 8 zeigt das Ergebnis der Schichtdickenprofilmessung. Dem keilförmigen Schichtdickenverlauf ist deutlich sichtbar eine durch Interferenz der beiden Reflexe R1 und R2 verursachte sinusförmige Modulation überlagert. Dem Dickenunterschied von ungefähr $\Delta h = 11.700 \text{ nm}$ sind $n = 35$ Interferenzmaxima überlagert, der Quotient $\Delta h / n$ ergibt $\approx 335 \text{ nm}$, also $\lambda / 2$ der Laserdiode des zu dieser Messung verwendeten monochromatisch konfokaler Punktsensors. Die Amplitude dieser parasitären Interferenz beträgt ca. $1 \mu\text{m}$ bei kleinen Schichtdicken am linken Rand des Dickenprofils in Bild 8 und nimmt zu größer werdenden Schichtdicken aufgrund der Annäherung an die Kohärenzlänge der Laserdiode hin ab.

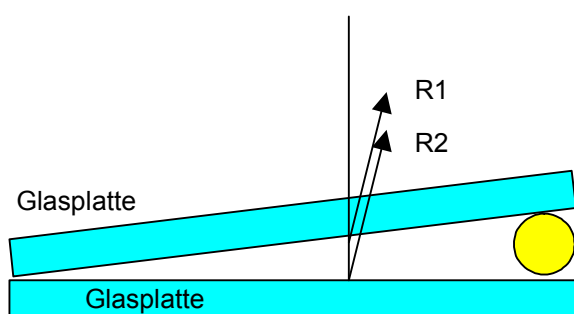


Bild 7: Messobjekt

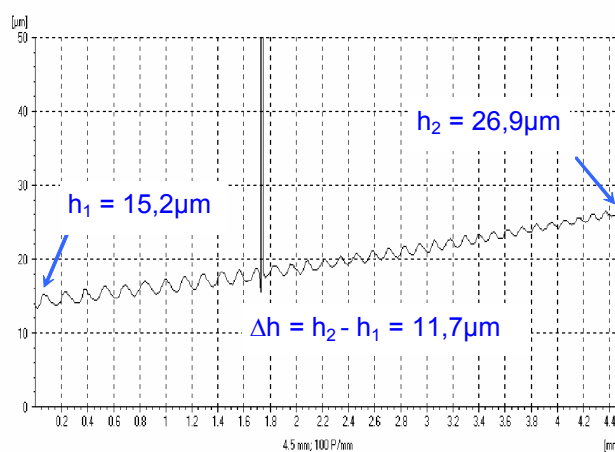


Bild 8: Messergebnis

Literatur

- [1] Minsky M., "Microscopy Apparatus", U.S. Patent 3013467 (19 Dec. 1961, filed 7 November 1957)
- [2] Minsky M., "Memoir on Inventing the Confocal Scanning Microscope", *Scanning* 10 No 4 (1988) 128
- [3] Hamilton D. K., Wilson T., and Sheppard C. J. R., "Experimental observation of the depth-discrimination properties of scanning microscopes", *Opt. Lett.* 6 No 12 (1981) 625
- [4] Wilson T., "Depth response of scanning microscopes", *Optik* 81 No 3 (1989) 113
- [5] Wilson T., *Confocal Microscopy*, Academic Press (1990)
- [6] Petran M., Hadravsky M., Egger M. D. and Galambos R., "Tandem-Scanning Reflected-Light Microscope", *J. Opt. Soc. Am.* 58 No 5 (1968) 661
- [7] Hamilton D. K. and Wilson T., "Three-dimensional Surface Measurement using the confocal scanning microscope", *Appl. Phys. B* 27 (1982) 211
- [8] Carlsson K. and Åslund N., "Confocal imaging for 3-D digital microscopy", *Appl. Opt.* 26 No 16 (1987) 3232
- [9] Jordan H.-J., Wegner M., and Tiziani H., "Optical topometry for roughness measurement and form analysis of engineering surfaces using confocal microscopy", in *Progress in Precision Engineering and Nanotechnology*, Proceedings of the 9th International Precision Engineering Seminar / 4th International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering, ISBN 3-9801433-9-2 (1997) 171
- [10] Jordan H.-J., Wegner M., and Tiziani H., "Highly accurate non-contact characterisation of engineering surfaces using confocal microscopy", *Meas. Sci. Technol.* 9 (1998) 1142
- [11] Jordan H.-J., Brodmann R., "Highly accurate surface measurement by means of white light confocal microscopy", X. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz University of Technology (2000) 296
- [12] Jordan, H.-J.; et al.: „Quality assurance of HARMS and MOEMS surface structures using confocal white light microscopy“, *SPIE Proceedings* 4400 (2001), 51,58
- [13] Molesini G., Pedrini G., Poggi P., and Quercioli F., "Focus-wavelength encoded optical profilometer", *Optics Comm.* 49 No 4 (1984) 229
- [14] www.digitalsurf.de