

# Berührungslose Oberflächenanalyse mit monochromatischen Speckle-Methoden

Balazs Horvath, Albrecht Hertzsch

Innovent Technologieentwicklung e.V. Jena

<mailto:bh1@innovent-jena.de>

Speckle-Rauhigkeitsmessungen sind gute Alternativen zu konventionellen Streulichtmethoden wie TIS oder ARS. Die theoretischen Beziehungen und die Anwendbarkeit der Speckle-Methoden werden zusammengefasst. Eine einfache Sensoranordnung zum Rauhigkeitsprüfen von TiN und Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Werkzeugbeschichtungen wird vorgestellt.

## 1 Einführung

Seit Beginn der achtziger Jahre wurde mit der Anwendbarkeit des Speckle-Effektes zur Oberflächenanalyse experimentiert. Am Anfang wurden die Speckle-Intensitäten mit Photodioden partiell integrierend erfasst, damit konnten aber keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden. Mit dem Einsatz von CCD und CMOS Sensoren tritt die Methode wieder in den Vordergrund. Am Beispiel von TiN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Beschichtungen wird eine kompakte Sensoranordnung vorgestellt, die die Rauhigkeit im Bereich R<sub>q</sub>=0,03-0,24 μm schnell und berührungslos detektiert.

## 2 Prinzip der Speckle-Rauhigkeitsmessung

Eine wichtige Eigenschaft der Speckle-Bilder ist ihr Kontrast (Modulation), der als Quotient der Intensitätsstreuung und der Mittelintensität definiert wird:

$$K = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}}{\langle I \rangle}$$

Mit Annahme eines normalverteilten Oberflächenprofils lässt sich eine theoretische Beziehung zwischen dem Kontrast und der Standardabweichung der Profilhöhen – d.h. Parameter R<sub>q</sub> – ableiten [1]. Abbildung 1 zeigt diesen Zusammenhang für unterschiedliche Beleuchtungswellenlängen. Mit Zunahme der Rauhigkeit steigt der Kontrast monoton bis zu einem Extremwert von 1.

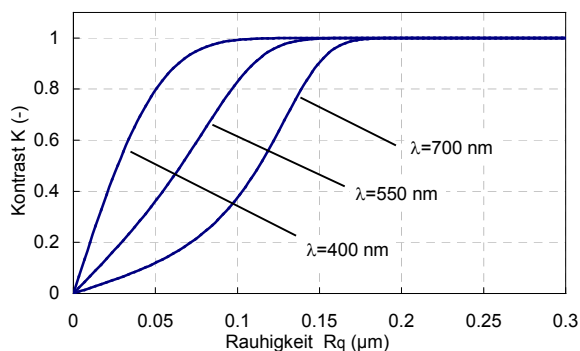


Abb. 1 Speckle-Kontrast in Abh. von R<sub>q</sub>

Dieser Effekt dient als Grundlage für die Speckle-Kontrast Methode, die für relativ niedrige Rauhigkeiten eine einfache Messstrategie ergibt. Der Anfangsgradient der Kennlinien hängt von der Wellenlänge ab, das Verfahren kann bis zu R<sub>q</sub><λ/4 verwendet werden. Eine andere Möglichkeit der Auswertung stellen die Korrelationstechniken dar. Dafür werden mehrere Speckle-Bilder erfasst, während einer der Beleuchtungsparameter variiert wird. Der aus diesen Verteilungen berechnete Korrelationskoeffizient liefert den optischen Rauhigkeitsparameter:

$$\rho_{12} = \frac{\langle (I_1 - \langle I_1 \rangle) \cdot (I_2 - \langle I_2 \rangle) \rangle}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

wobei σ<sub>1</sub> und σ<sub>2</sub> die aus I<sub>1</sub> und I<sub>2</sub> berechneten Intensitätsstreuungen sind. Je nachdem welcher Parameter geändert wird, unterscheidet man zwischen angularen, spektralen und örtlichen Korrelationen (Einfallswinkel, Wellenlänge, Position). Vorteil der Korrelationsmethoden ist der breitere Messbereich (R<sub>q</sub><3-5 μm), sie arbeiten allerdings nur bei voll ausgebildeten Speckle-Verteilungen (d.h. Kontrast=1) zuverlässig. Auch in diesem Fall sind analytische Beziehungen abzuleiten, Abbildung 2 zeigt die theoretische Rauhigkeitsabhängigkeit der spektralen Korrelation für unterschiedliche Δλ Wellenlängendifferenzen. Höhere Δφ/Δλ/Δx Werte führen zu einer stärkeren Dekorrelation.

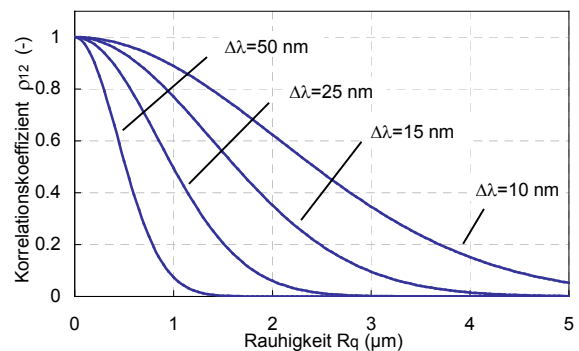


Abb. 2 Spektraler Korrelationskoeffizient in Abh. von R<sub>q</sub>

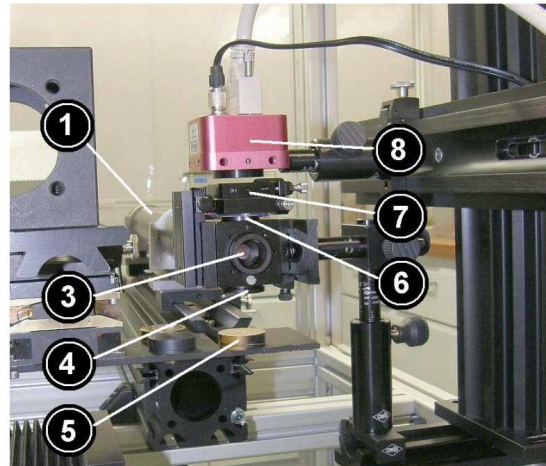
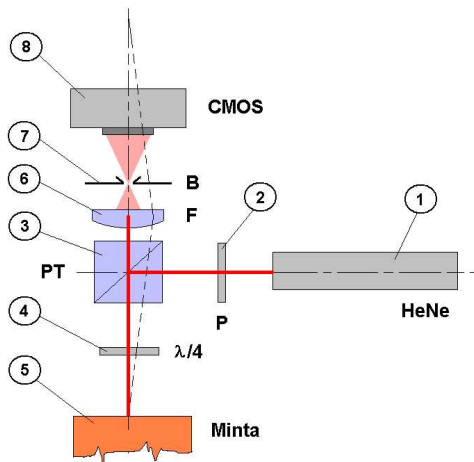


Abb. 3 Laboraufbau zum Rauigkeitsprüfen mit Speckle-Kontrast und mit Speckle-Ortskorrelation

### 3 Der Laboraufbau

Als Lichtquelle dient ein He-Ne Gaslaser (1) mit 15 mW Leistung und  $\lambda=633$  nm Wellenlänge. Zur Auskopplung der Speckle-Verteilungen wird ein polarisierender Strahlteiler verwendet (3). Die Polarisationssebene des Einfallstrahls wird mit dem Polarisator (2) so ausgerichtet, dass die gesamte Intensität auf die Probe gelenkt wird. Zwischen der Probe (5) und dem Strahlteiler ist eine  $\lambda/4$  Phasenplatte (4) positioniert, die der reflektierte Strahl zweimal durchläuft. Damit ist der einfallende und der reflektierte Strahl um  $90^\circ$  zueinander polarisiert und die Reflexion wird am Strahlteiler vollständig in Richtung des Detektors transmittiert. Die Linse  $F=8$  mm (6) bildet den zentralen Spot auf die Sensorfläche einer CMOS Kamera mit  $1024 \times 1024$  Pixel Auflösung und mit logarithmischer Charakteristik ab. Die Blende (7) steht in der Brennebene der Linse und eliminiert die Störreflexionen vom Strahlteiler und von der Phasenplatte. Der Probe-Sensor Abstand ist wegen dem senkrechten Einfall irrelevant.

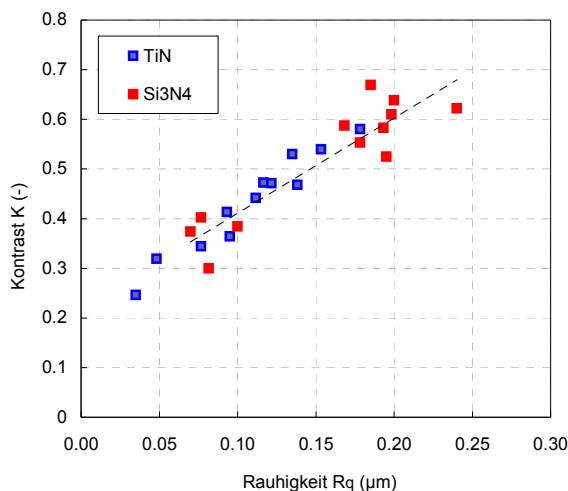


Abb. 4 Gemessener Kontrast in Abh. von  $R_q$

### 4 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Speckle-Kontrast Messungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Der Vorteil des Verfahrens ist eindeutig: da beim Kontrast die Modulation auf die Mittelintensität normiert ist, wird die Messung durch die optischen Eigenschaften der Probe nicht beeinflusst. Somit kann ein einheitliches Messmodell erzielt werden. Für die gegebene Wellenlänge liege die obere Grenze der Messung bei  $R_q=0,15$   $\mu\text{m}$  (siehe Abb. 1), die Methode hat allerdings in dem gesamten Rauigkeitsbereich befriedigende Ergebnisse geliefert. In der Literatur wird an mehreren Stellen erwähnt, dass die horizontalen Rauigkeitsparameter ( $\lambda_a, \Lambda_k$ ) keinen Einfluss auf den Speckle-Kontrast haben, was auch durch eigene Simulationsrechnungen bewiesen wurde [2]. Das Messmodell kann damit vor allem für vertikale Rauigkeitsparameter ( $R_a, R_q, R_z$ ) aufgestellt werden.

### 5 Zusammenfassung

Der Vorteil der Speckle-Rauigkeitsmessungen ist, dass die Messparameter nicht aus Intensitätswerten sondern aus der Struktur der Speckle-Bilder gerechnet werden, wodurch die optischen Eigenschaften der Oberfläche die Auswertung nicht beeinflussen. Bei niedrigeren Rauigkeiten bis  $R_q=0,15-0,25$   $\mu\text{m}$  (auch von der Wellenlänge abhängig) soll der Speckle-Kontrast und bei höheren  $R_q$ -Werten eine der Korrelationstechniken eingesetzt werden.

### 6 Literatur

- [1] Dainty J.C.: Laser speckle and related phenomena. Springer, 1984.
- [2] Horvath B.: Numerical simulation of multiple scattering for modeling speckle-roughness analyses on vertical surface regions of silicon wafers. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, Volume 117, Issue 4, 2006.