

Kalibrierung der Gitterkonstante ein- und zweidimensionaler Gitter mit optischer Beugung

Egbert Buhr, Winfried Michaelis, Alexander Diener

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

<mailto:egbert.buhr@ptb.de>

In der PTB wurde ein Messplatz zur rückgeführten Messung der Gitterkonstante von ein- und zweidimensionalen Gittern im Bereich von 300 nm bis 3 µm realisiert. Das Messprinzip nutzt die optische Beugung von Laserstrahlung. Es sind Messunsicherheiten (95%-Vertrauensintervall) von weniger als 20 pm erreichbar.

1 Einführung

Gitterstrukturen im Mikrometer- und Submikrometerbereich sind gut geeignete „Maßstäbe“ zur Kalibrierung von Messeinrichtungen für die quantitative Mikroskopie. Ein- oder zweidimensionale Gitterstrukturen können mit hoher Präzision z.B. aus Silizium hergestellt werden. Zur genauen Messung der Gitterkonstante wird häufig die optische Beugung von Laserstrahlung genutzt. In der PTB ist ein derartiger Messplatz realisiert worden, mit dem Gitterkonstanten im Bereich von 300 nm bis 3 µm mit erweiterten Unsicherheiten unter 20 pm gemessen werden können.

2 Messaufbau

Es wird die bekannte Littrow-Geometrie verwendet, bei der der einlaufende und der gebeugte Laserstrahl kollinear sind. Um ohne Strahlenteiler auszukommen, wird der Laserstrahl unter einem kleinen Winkel von oben auf die Probe eingestrahlt (Abb. 1). Das Profil der gebeugten Laserstrahlung wird mit einer Diodenzeile aufgezeichnet, optionale Graufilter dienen der Signalanpassung.

Abb. 2 zeigt eine Skizze des Messplatzes. Bei der Messung wird die Probe so gedreht, dass nacheinander die verschiedenen Ordnungen der gebeugten Laserstrahlung registriert werden.

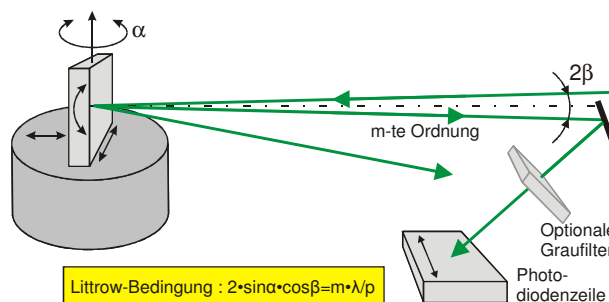


Abb.1: Modifizierte Littrow-Anordnung

Die Drehwinkel α werden mit einem kalibrierten Winkelmesssystem gemessen. Das Gitter selbst ist auf einem 5-Achsen-Probenhalter montiert, der eine genaue Justierung des Gitters relativ zum einlaufenden Strahl ermöglicht. Bei zweidimensionalen Gittern kann durch Drehung der Probe um die Normalenachse die Gitterkonstante in x-, y- und in den diagonalen Richtungen gemessen werden. Daraus lässt sich auch der Winkel zwischen den beiden Gitter-Haupttrichtungen bestimmen.

Als Lichtquellen stehen ein He-Ne-Laser und ein Ar-Ionen-Laser (mit jeweils drei Wellenlängen) sowie ein 266 nm-UV-Laser zur Verfügung. Die Laserwellenlängen werden für die aktuell vorliegenden Umgebungsbedingungen (Luftdruck, Temperatur) korrigiert.

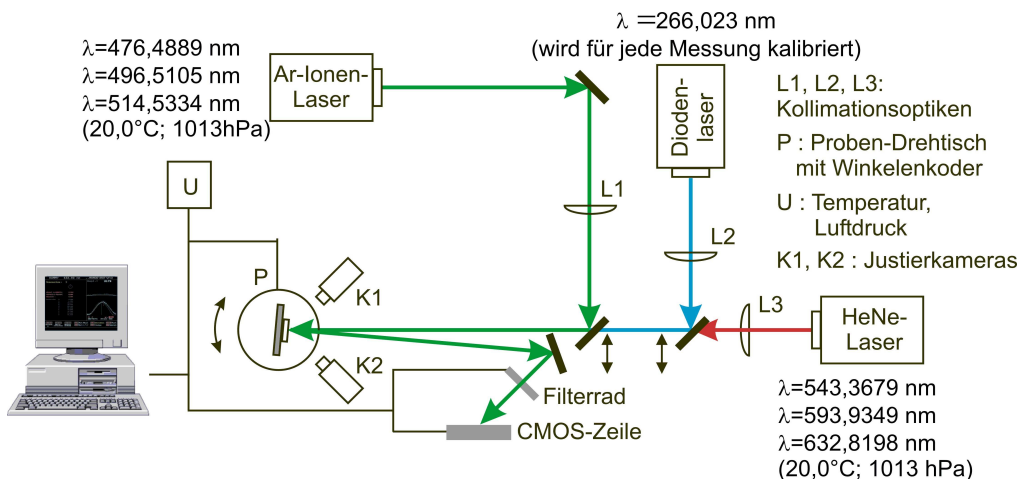


Abb.2 Skizze des Messplatzes

3 Messbeispiel

Abb.3 zeigt als Beispiel ein gemessenes (gaußförmiges) Profil des gebeugten Laserstrahls. Der dazugehörige Beugungswinkel wird durch Korrelation des gemessenen Profils mit dem gemessenen Profil der nullten Beugungsordnung ermittelt. Abb. 4 zeigt den Peak-Bereich des Korrelationssignals zusammen mit einem angepassten Gaußprofil (die Korrelation zweier Gaußprofile ergibt wieder ein Gaußprofil). Die Position des Korrelations-Maximums liefert den Beugungswinkel.

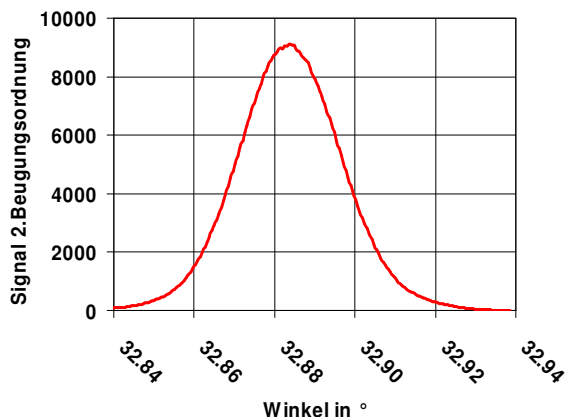


Abb.3 Beispiel eines gemessenen Beugungsprofils

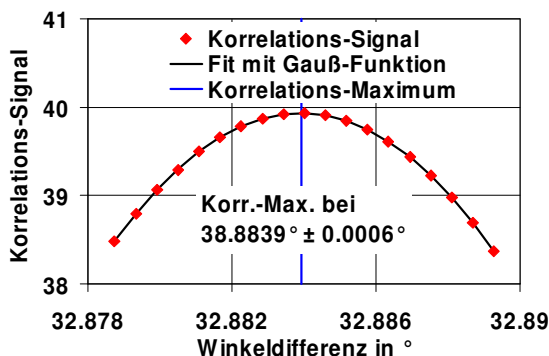


Abb.4 Beispiel eines Korrelationssignals zur Bestimmung des Beugungswinkels

Trägt man den Sinus der Beugungswinkel über die Beugungsordnung auf, so erwartet man nach der Littrow-Gleichung, siehe Abb. 1, einen linearen Zusammenhang.

Abb. 5 zeigt typische Messdaten für ein Gitter mit einer Gitterkonstante von nominell 1000 nm bei Messung mit dem HeNe-Laser bei 543 nm. Aufgetragen ist der Sinus der Beugungswinkel gegen die Beugungsordnung. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden und dem Wert der Laserwellenlänge ergibt sich eine Gitterkonstante von 1000,083 nm. Es gibt eine geringe Streuung der Messdaten um die Ausgleichsgerade (vgl. Korrelationskoeffizient in Abb.5), was in diesem Beispiel zu einer (statistischen) Unsicherheit von 0,006 nm für die Gitterkonstante führt.

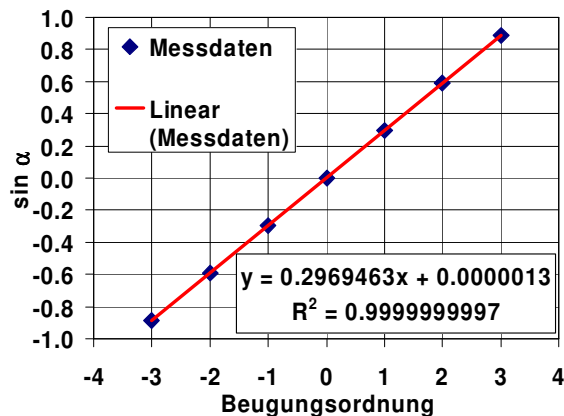


Abb.5 Beispiel einer Einzelmessung für ein 1000 nm-Gitter, aufgetragen ist der Sinus der Beugungswinkel gegen die Beugungsordnung.

4 Messunsicherheit

Eine Messunsicherheitsanalyse zeigt, dass die Unsicherheit der Laserwellenlänge nur in geringem Maß zur Gesamtunsicherheit beiträgt; der dominierende Anteil ist die Unsicherheit der Winkelbestimmung. Hierbei spielt die Unsicherheit des Winkelencoders nur eine kleine Rolle, ausschlaggebend ist die Unsicherheit bei der Bestimmung der Positionen der Maxima in den Beugungsprofilen. Bei der vollständigen Unsicherheitsanalyse werden zusätzlich die Beiträge berücksichtigt, die von der Probe selbst herrühren. Hier sind u.a. mögliche laterale Inhomogenitäten der Gitterkonstante zu nennen, denn aufgrund des schrägen Lichteinfalls werden je nach Beugungswinkel unterschiedlich große Bereiche der Probe beleuchtet.

5 Vergleichsmessungen

Es wurden Messungen an 2D-Gittern mit Perioden von nominell 300 nm bzw. 1000 nm mit dem hier vorgestellten Beugungsmessplatz und mit einem metrologischen Rasterkraftmikroskop (AFM) durchgeführt [1]. Die Tabelle 1 zeigt die gemessenen Gitterperioden in der x- und y-Richtung mitsamt den erweiterten Messunsicherheiten (95% Vertrauensintervall): Die Messergebnisse stimmen innerhalb der Messunsicherheiten sehr gut überein.

Gitter	Periode p_x in nm		Periode p_y in nm	
	Beugung	AFM	Beugung	AFM
2D300	299,97 $\pm 0,04$	299,981 $\pm 0,043$	299,95 $\pm 0,04$	299,915 $\pm 0,043$
2D1000	1000,40 $\pm 0,02$	1000,395 $\pm 0,015$	1000,83 $\pm 0,04$	1000,839 $\pm 0,014$

Tabelle 1 Vergleich mit AFM-Ergebnissen

Literatur

[1] G. Dai et al.: „Calibration of micro and nanoscale lateral standards using metrological SFM“, Nanoscale 2006, eingereicht bei MST