

# Erster CCL-Vergleich im Bereich der Nanometrologie

Die Arbeitsgruppe 7 des Comité Consultatif pour la Longueur (CCL) hatte 1998 beschlossen, eine Reihe von fünf internationalen Messvergleichen im Bereich der dimensionellen Nanometrologie durchzuführen. Beim ersten ging es darum, den mittleren Linienabstand von holographischen Gittern zu bestimmen. METAS war für diesen Vergleich Pilotlabor. Die zwölf teilnehmenden Metrologieinstitute aus ebenso vielen Ländern vertraten drei regionale Metrologieorganisationen.

FELIX MELI

Da auf dem Gebiet der Nanometrologie bisher noch kein internationaler Vergleich durchgeführt worden war, wurde entschieden, den Vergleich als Vorversuch für einen künftigen Schlüsselvergleich (Key Comparison) für die gegenseitige Anerkennung von Staatslaboratorien (NMI) zu gestalten. Es wurden daher die Richtlinien für die Durchführung von Key Comparisons berücksichtigt. Nachdem der Entwurf des Schlussberichts anfangs dieses Jahres von allen Teilnehmern akzeptiert wurde, können etliche Messmöglichkeiten verschiedenster NMI auf dem Gebiet der dimensionellen Nanometrologie sich für die gegenseitige Anerkennung auf diesem Vergleich abstützen.

## Die Normale

Als Transfornormale wurden zwei holographisch hergestellte Gitter mit nominellen Gitterkonstanten (Pitch) von 290 nm und 700 nm gewählt. Die Struktur besteht aus Polymerresist auf einem Siliziumeinkristallscheibchen (3 mm x 4 mm) und ist mit ca. 60 nm Wolfram bedampft. Die Rippen haben eine Höhe von ca. 200 nm und sind oben etwas abgerundet (siehe Bild oben rechts). Die in diesem Vergleich zu bestimmende Messgröße war definiert als der mittlere Linienabstand auf der zentralen Fläche von 1 mm x 1 mm bei 20 °C.

Ein erstes Set von zwei Gittern wurde leider schon bald so stark beschädigt, dass es ersetzt werden musste. METAS stellte bei Vergleichsmessungen fest, dass das zweite Set innerhalb

der Messunsicherheit die gleichen Gitterparameter hatte, da die Gitter vermutlich auf dem gleichen Wafer hergestellt wurden.

## Messmethoden

Die Teilnehmer verwendeten unterschiedlichste Methoden und Messgeräte: Neben der optischen Beugung (OD) wurden ein optisches Mikroskop (OM) und einige Rastersondenmikroskope (SPM) verwendet (Tabelle 1). Fast alle Instrumente sind Eigenkonstruktionen der jeweiligen Labors. NPL und METAS hatten je zwei Methoden angewendet, die beide in den Vergleich aufgenommen wurden.

| NMI / Land | Bez. | Methode   |
|------------|------|---|
| DFM/DK     | SPM  | Kommerzielles Metrologie-AFM. Bildgröße 50 µm x 6.5 µm  |
| PTB/DE     | OD   | Littrow-Beugung, Ar-Laser mit 3 Wellenlängen  |
| IMGC/IT    | OD   | Littrow-Beugung, roter und grüner He-Ne-Laser   |
| NIST/USA   | SPM  | NIST C-AFM mit heterodyn Laserinterferometer, Bildgröße 1.5 - 3.5 µm                              |
| NPL1/UK    | OD   | Littrow-Beugung, grüner He-Ne-Laser   |
| NPL2/UK    | OM   | Optisches Mikroskop, Verschiebetisch mit Laserinterferometer, nur für das 700 nm Gitter anwendbar |
| VNIM/RU    | OD   | Laser-Interferenz-Beugung mit Referenzmassstab  |
| NIM/CN     | OD   | Littrow-Beugung, grüner He-Ne-Laser   |
| NRLM/JP    | SPM  | NRLM AFM mit 3-Achsen-Laserinterferometer. Profile mit 10 - 17.5 µm Länge                         |
| CMS/TW     | SPM  | Kommerzielles Metrologie-AFM. Bildgröße 3 µm und 7 µm   |
| KRISS/KR   | OD   | Littrow-Beugung, Argon-Laser bei 487.986 nm   |
| METAS1/CH  | OD   | Littrow-Beugung, roter und grüner He-Ne-Laser, kalibrierter Präzisions-Winkel-encoder             |
| METAS2/CH  | SPM  | METAS AFM-Profilier mit Laserinterferometer, Profile mit 350 µm Länge<br>Metrologie-AFM-Kopf      |

1: Verwendete Messmethoden der Teilnehmer.

Bei der Beugungsmethode wurde häufig das Littrow-Prinzip angewendet. Ein Laserstrahl, der unter einem bestimmten Winkel auf ein Gitter trifft, wird genau in der Einfallrichtung zurück gestreut. Aus dem gemessenen Winkel und der bekannten Laserwellenlänge lässt sich der Linienabstand berechnen. Es ergibt sich direkt der Mittelwert über die beleuchtete Fläche.

Bei den Rastersondenmethoden wird das Gitter lokal mit einer feinen Spitze abgetastet. Der Linienabstand wird dann aus einem Profil oder aus einem ganzen Rasterbild berechnet. Um den mittleren Linienabstand auf der zentralen Fläche von 1 mm x 1 mm zu erhalten, mussten mehrere solche lokale Messungen auf der Messfläche verteilt werden.

**Resultate**

Die Vergleichsmessungen begannen im Februar 1999 und endeten im Juni 2000. Entsprechend den verschiedenartigen Messmethoden waren auch die Messunsicherheiten sehr unterschiedlich. Das Verhältnis der grössten zur kleinsten angegebenen Messunsicherheit beträgt 660. Als Referenzwert wurde daher das gewichtete Mittel gewählt, wobei als Gewichte die reziproken quadratischen Standard-Messunsicherheiten dienten. Alle Teilnehmer berechneten ihre Messunsicherheit gemäss dem «ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» und lieferten neben den Standard-Messunsicherheiten  $u_c$  auch deren Freiheitsgrade  $\nu_{eff}$ .

**Vergleich und Diskussion**

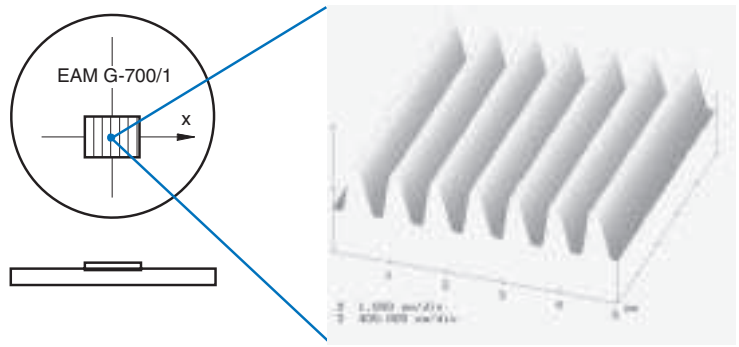
Für die Berechnung der Referenzwerte wurden nur Resultate berücksichtigt, die mit 95 %-iger Wahrscheinlichkeit mit dem Referenzwert vereinbar waren ( $En \leq 1$ ). Von insgesamt 29 Messresultaten wurden daher deren zwei von der Referenzwertbildung ausgeschlossen. Die Standardunsicherheit für die beiden Referenzwerte ist mit 1.1 pm und 2.3 pm sehr klein (Tabelle 3). Die gute Übereinstimmung fast aller Messresultate mit dem Referenzwert zeigt, dass alle Teilnehmer in der Lage waren, ihre Messunsicherheiten vernünftig genau abzuschätzen (Illustration 4).

Die optischen Beugungsmethoden waren sehr erfolgreich. Ihr Vorteil ist, dass sie direkt den mittleren Linienabstand auf der Messfläche bestimmen, während es bei den Rastersonden-Methoden wichtig ist, an verschiedenen Stellen innerhalb der Messfläche zu messen und zu mitteln. Die Rastersonden-Methoden können aber auch Information zu lokalen Abweichungen liefern.

Für die Kalibrierung von Mikroskop-Vergrösserungsnormalen genügen in der Praxis Messunsichertheite von ein paar ‰ vollauf. Die Beugungsmethoden erreichen relative Messunsicherheiten von weniger als  $10^{-5}$ , womit sich künftig noch andere Anwendungen erschliessen lassen.

**Referenz**

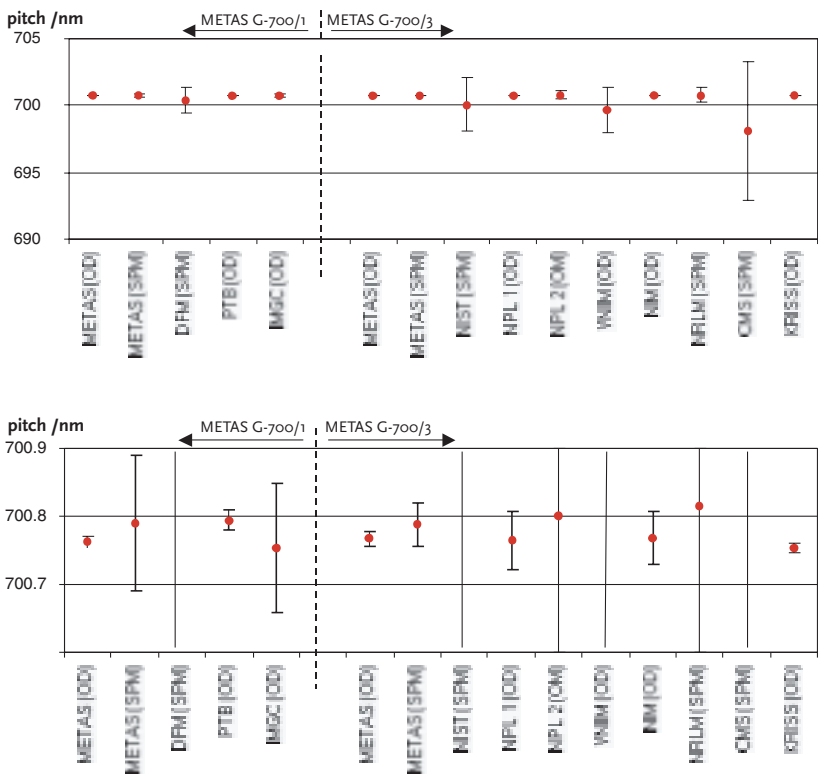
F. Meli, Proc. of the 2nd euspen Int. Conf., Turin, Italy, May 2001.



2: Skizze und Rasterkraftmikroskopmessung des Transferrnormals mit 700 nm nominalem Linienabstand.

| Gitter:     | G-300       | G-700       |
|-------------|-------------|-------------|
| $p_{ref}$   | 287.5961 nm | 700.7607 nm |
| $u_c$       | 0.0011 nm   | 0.0023 nm   |
| $\nu_{eff}$ | 146         | 159         |
| $U_{95}$    | 0.0021 nm   | 0.0046 nm   |

3: Die Referenzwerte  $p_{ref}$  sowie deren kombinierte Standard-Messunsicherheiten  $u_c$ , die effektiven Freiheitsgrade  $\nu_{eff}$  und die erweiterte Messunsicherheit  $U_{95}$  errechnet aus allen Resultaten mit  $En \leq 1$ .



4: Messresultate für den mittleren Strukturabstand (Pitch) der 700 nm Gitter. Das Normal G-700/1 wurde nach der Beschädigung durch das Normal G-700/3 ersetzt. Auf der Grafik oben sind alle Messunsicherheiten sichtbar, auf der unteren Grafik wird ein Ausschnitt gezeigt, um auch die Unterschiede bei den kleinen Messunsicherheiten aufzuzeigen.