

Das Metrologie-Rasterkraftmikroskop

Felix Meli und Rudolf Thalmann

Die modernen Hochtechnologien erfordern immer kleinere Strukturgrößen. Die diesbezüglichen Fortschritte in der Mikro- und Nanotechnologie sind enorm. Heutige integrierte Schaltkreise haben Strukturen in der Grösse von 250-400 nm. In wenigen Jahren werden diese unter 150 nm liegen. Auch digitale Daten werden immer dichter gespeichert. Auf den neuen DVDs (Digital Versatile Disc) haben die Datenstrukturen nur noch eine Grösse von 400 nm. Aufgrund der rund 7 mal höheren Speicherdichte gegenüber herkömmlichen CDs werden die DVDs schon bald in riesigen Mengen gefertigt werden. Eine analoge Entwicklung zu immer kleineren Objekten findet auch in der Mikromechanik statt, wo kleinste Getriebe und Pumpen aus einkristallinem Silizium gefertigt werden. In der Optik ist es heute möglich, Linsen durch berechnete Beugungsstrukturen zu ersetzen, wobei deren kritische Abmessungen ebenfalls im Submikrometerbereich liegen.

Diese technologischen Entwicklungen gehen eng einher mit entsprechenden neuen Messtechnologien. Immer häufiger werden hochauflösende Mikroskope aller Art für dimensionelle Messungen an Mikroobjekten verwendet. Auch im Kleinen ist nicht nur höchste Auflösung gefordert, sondern auch eine hohe Genauigkeit, und damit die Rückführung der Messungen auf die Einheit Meter. Dazu dienen häufig Gitter- oder Oberflächentopographie-Normale.

In Zukunft wird der Bedarf an kalibrierten Normalen mit immer kleineren Strukturen zunehmen. Die messtechnische Kompetenz auf dem Gebiet der Mikro- und Nanotechnologie ist für die Schweizer Präzisions- und Halbleiterindustrie vital.

Auch die nationale Längen-Messbasis muss sich parallel zu diesen neuen Technologien entwickeln, um entsprechende Dienstleistungen anbieten zu können. Am EAM wurde 1995 damit begonnen, ein Nanometrologielabor aufzubauen.

Das Nanometrologie-Labor

Die Nanometrologie beschäftigt sich mit der Längenmessung an sehr kleinen Objekten aus der Mikro-, Halbleiter- und Nanotechnik. Die Messgrösse wird typischerweise in Nanometern ($1 \text{ nm} = 1/1000'000'000 \text{ m}$) angegeben und die Messunsicherheiten sind häufig kleiner als 1 nm. Alle dabei eingesetzten Methoden sind im Prinzip Mikroskopietechniken verbunden mit Nanopositionierungssystemen und hochgenauen Positionsmessungen.

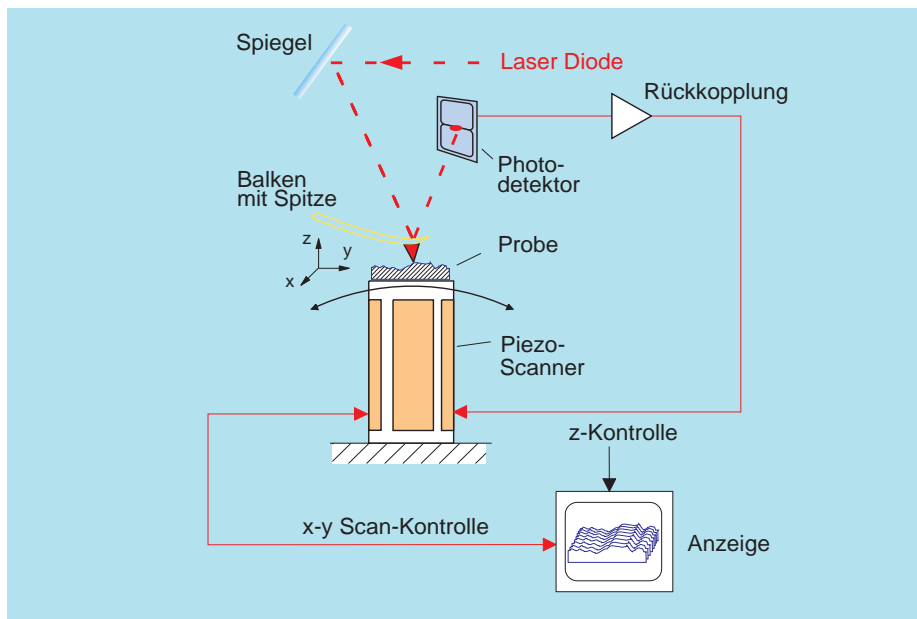
Im neu aufgebauten Nanometrologie-Labor des EAM stehen verschiedene Messplätze zur Verfügung, die zur Kalibrierung von periodischen Gittern und Topographienormalen dienen und mit dem auch Präzisionsmessungen an Kundenobjekten durchgeführt werden können. Die Messmöglichkeiten des Labors werden laufend ausgebaut. Zur Zeit setzt das EAM zur Kalibrierung solcher Normale hauptsächlich ein Rasterkraftmikroskop ein, welches speziell für metrologische Anwendungen konzipiert wurde.

Das Rasterkraftmikroskop

Rasterkraftmikroskope (Abkürzung: AFM = Atomic Force Microscope) tasten die Oberfläche mit einer sehr feinen Spitze ab. Die dabei gewonnenen Koordinaten ermöglichen es, die Oberfläche dreidimensional abzubilden. Die höchsten realisierten Auflösungen erlauben sogar, einzelne Atome zu „sehen“. Keine andere Mikroskopietechnik erlaubt eine so hohe Auflösung ohne spezielle Probenvorbereitung. Optische Mikroskope, auch die neueren Konfokalmikroskope, haben Auflösungen bis maximal 150 nm. Elektronenmikroskope (REM, TEM) arbeiten nicht zerstörungsfrei. In der Probenkammer ist ein Hochvakuum nötig. Wasserhaltige Proben dehydrieren und ändern dabei ihre Abmessungen. Da die Probenoberfläche gut leiten soll, um Aufladungen durch den Elektronenstrahl abzuleiten, wird die Oberfläche häufig mit Gold bedampft. Auch eine dünne Schicht von wenigen Nanometern verändert jedoch schon die Oberflächenstruktur. Obschon REM-Bilder einen starken 3D-Eindruck erwecken, sind sie keine echten 3D-Messungen. Ein Höhenprofil kann mit einem REM nur durch Zerschneiden der Probe und Seitenansicht bestimmt werden. Im Gegensatz dazu ergeben Messungen mit dem Rasterkraft-

mikroskop echte 3D-Bilder. Dabei können leitende und nichtleitende Proben an Luft und sogar in Flüssigkeiten untersucht werden.

Die Entwicklung des AFM geht auf das Rastertunnelmikroskop (STM = Scanning Tunneling Microscope) zurück. Es wurde von Heinrich Rohrer und Gerd Binnig 1981 am IBM-Forschungslabor in Rüslikon erfunden [1]. Sie erhielten dafür 1986 den Nobelpreis. Seither wurden etliche sogenannte Rastersondenmikroskope (SPM = Scanning Probe Microscope) entwickelt. Ihnen gemeinsam ist, dass eine feine, spitzige Messsonde eine Oberfläche abtastet. Die Spitze, oder eventuell auch die Probe, wird dabei mit einem Piezoscanner in allen drei Raumrichtungen bewegt. In der x-y Ebene ist die Bewegung rasterförmig vorgegeben, während sie in z-Richtung durch die unbekannte Topographie der Probenoberfläche bestimmt wird (Figur 1). Damit die Sonde beim Abtasten nicht mit der Oberfläche zusammenstösst und beschädigt wird, muss ein konstanter Abstand eingehalten werden können. Verschiedene Wechselwirkungen zwischen Spitze und Oberfläche werden dazu benutzt. Im Fall des STM ist dies der Tunnelstrom. Er nimmt exponentiell mit wachsendem Abstand zwischen Spitze und Oberfläche ab. Der Tunnelstrom kann aller-



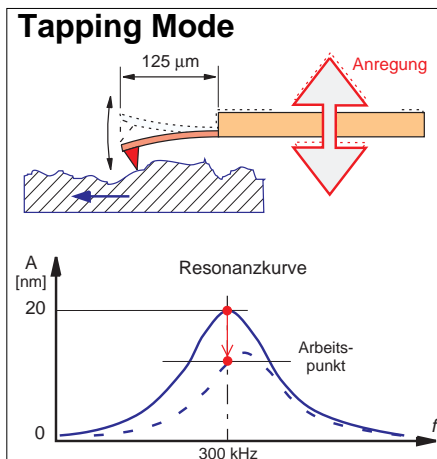
Figur 1: Prinzipschema eines Rasterkraftmikroskops.

dings nur bei leitenden Oberflächen verwendet werden. Für nicht leitende Proben hat es sich bewährt, atomare Kräfte zwischen Spitze und Oberfläche zu messen und diese konstant zu halten. Beim AFM [2] ist daher die Abtastspitze vorne an einem feinen Balken (Cantilever) befestigt, dessen Auslenkung gemessen wird (Figur 1). Ein Laserstrahl wird dazu auf die Rückseite des Balkens fokussiert. Eine differentielle Photodiode misst die Auslenkung des reflektierten Strahls und damit die Balkenverbiegung. Die Spitze ist mit dem Balken und einem Halteplättchen aus einem Stück reinem Silizium gefertigt. Der Balken ist ca. 125 μm lang und 20 μm breit. Die Spitze hat die Form einer spitzwinkligen Pyramide mit 8 μm Höhe und einer sehr scharfen vordersten Spitze. Der Spitzenradius ist typischerweise 5 nm. Die Kräfte zwischen Spitze und Oberfläche können, je nach Abstand, anziehend (Van der Waals Kraft) oder abstossend sein. Neben der Kraft senkrecht zur Oberfläche können auch die seitlichen Kräfte bestimmt werden (Reibungskräfte, LFM = Lateral Force Microscopy). Anstelle der atomaren werden auch magnetische Kräfte und viele weitere Wechselwirkungen zwischen Sonde und Oberfläche ausgenutzt, um Materialeigenschaften mit hoher Auflösung bildgebend zu bestimmen. Die erreichbare Auflösung hängt von der Sondengröße (im wesentlichen dem

Spitzenradius), der Reichweite der Wechselwirkung und von der Topografie der Oberfläche ab.

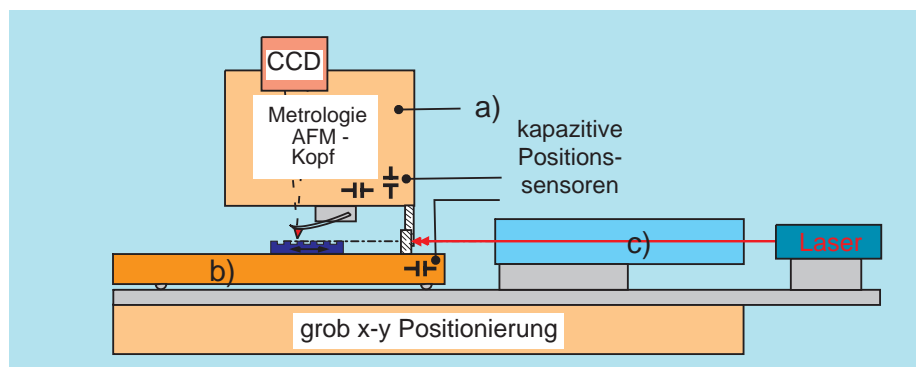
Das Metrologie-AFM des EAM

Rasterkraft-, Elektronen- oder optische Mikroskope erfordern das Einstellen von vielen Parametern, um eine optimale Bildgebung zu erhalten. Leider werden durch etliche dieser Parameter auch die Abbildungseigenschaften beeinflusst. Eine genaue dimensionelle Messung kann daher häufig nur durch direkten Vergleich mit einer bekannten Referenz erfolgen. Dabei sind möglichst alle einstellbaren Parameter unverändert zu lassen. Kommerzielle AFM und STM verwenden piezoelektrische Aktuatoren, um entweder die Probe oder die Sonde rasterförmig zu bewegen.



Für viele Anwendungen und insbesondere für dimensionelle Messungen hat es sich bewährt, eine Messart zu verwenden, bei der keine lateralen Kräfte an der Spitze auftreten und bei der auch die sonst auf die Probe wirkenden Kräfte minimal sind. Beim sogenannten "Tapping Mode", "Intermittent Contact Mode" oder "Noncontact Mode" wird der Balken mit der Spitze in Schwingung versetzt. Bei der Resonanzfrequenz (ca. 300kHz) wird die Dämpfung der Schwingungsamplitude gemessen. Durch das Regeln der Distanz zwischen Spitze und Oberfläche kann die Dämpfung konstant gehalten werden (Bild). Wird nun die Spitze über die Oberfläche geführt, berührt die Spitze die Oberfläche der Probe nur noch an einigen Stellen (tapping = klopfend).

Nichtlinearität, Hysterese und Kriechen dieser Aktuatoren ergeben eine schlechte Reproduzierbarkeit und erfordern komplexe Kalibrierverfahren. Die üblichen, röhrenförmigen Piezo-Scanner bewegen die Spitze oder die Probe auf einem Kreis-



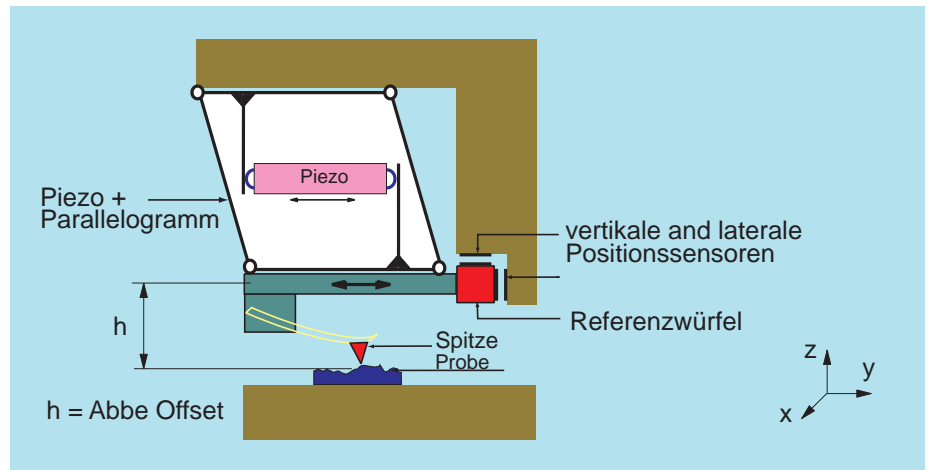
Figur 2: Prinzipschema des Metrologie-AFM. a) Mikroskopkopf mit Parallelgramm-Scanner und kapazitiven Positionssensoren, b) linearer Verschiebetisch und c) differentielles Planspiegel-Interferometer.

segment, wobei sich grosse Führungsfehler und starkes Übersprechen zwischen den Achsen ergeben.

Aus diesen Gründen wird am EAM ein AFM-Konzept verwendet, das sich stark von üblichen Geräten unterscheidet. Der Messplatz besteht im Wesentlichen aus einem kommerziellen Rasterkraftmikroskop (Digital Instruments, USA), welches speziell für metrologische Anwendungen konzipiert wurde, und einer zusätzlichen Objektverschiebeeinheit welche das exakte lineare Verschieben der Probe in einem Bereich von $400\ \mu\text{m}$ ermöglicht. Diese Verschiebung wird mit einem hochauflösenden Interferometer gemessen. Nominell hat dieser Aufbau keinen Abbe-Versatz (Figur 2). Der Messplatz ist in einer vibrationsarmen, ruhigen, temperaturstabilen und staubarmen Umgebung aufgebaut.

Der AFM-Kopf

Um die oben genannten Schwächen von konventionellen AFM-Scannern zu vermeiden, muss ein Metrologie-AFM-Kopf gute, geradlinige und rechtwinklige Rasterbewegungen der Spitze gewährleisten und weiter ein eigenständiges Positionsmess- und Regelsystem für jede Achse haben. Mit den drei Elementen Festkörperparallelogramme, kapazitive Sensoren und Referenzwürfel kann dies erreicht werden. Die Piezoaktuatoren bewegen die Abtastspitze indirekt über Parallelogramme. Dies bewirkt, dass die Winkelfehler der Bewegung minimal sind. Kleine Winkelfehler (Nicken, Gieren und Rollen) sind eine wichtige Voraussetzung für jede exakte Längenmessung. Zusammen mit dem Abbe-Versatz führen sie meist zum grössten Beitrag der Messunsicherheit. Für jede Achse ist ein unabhängiges Parallelogramm vorhanden (In Figur 3 ist zur Vereinfachung nur eine Achse gezeichnet). Kapazitive Sensoren messen mit hoher Auflösung die Position der Spitze. Durch Rückkopplung wird die laterale Position (x-y) immer auf dem Sollwert gehalten, während das Signal des z-Sensors aufgezeichnet wird. Die Auflösung der verwendeten kapazitiven Sensoren ist besser als $1\ \text{nm}$ bei einem maximalen lateralen Verschieberegion von $70\ \mu\text{m}$. In der



Figur 3: Prinzipschema des Metrologie-AFM-Kopfes. Zur Vereinfachung ist nur eine Achse gezeichnet.

vertikalen Richtung ist der Messbereich $7\ \mu\text{m}$ bei einer Auflösung $0.2\ \text{nm}$. Die Ebenheit, die Geradheit und die Rechtwinkligkeit der Bewegungen sind durch den Referenzwürfel bestimmt, der als Gegenelektrode für die kapazitiven Sensoren dient.

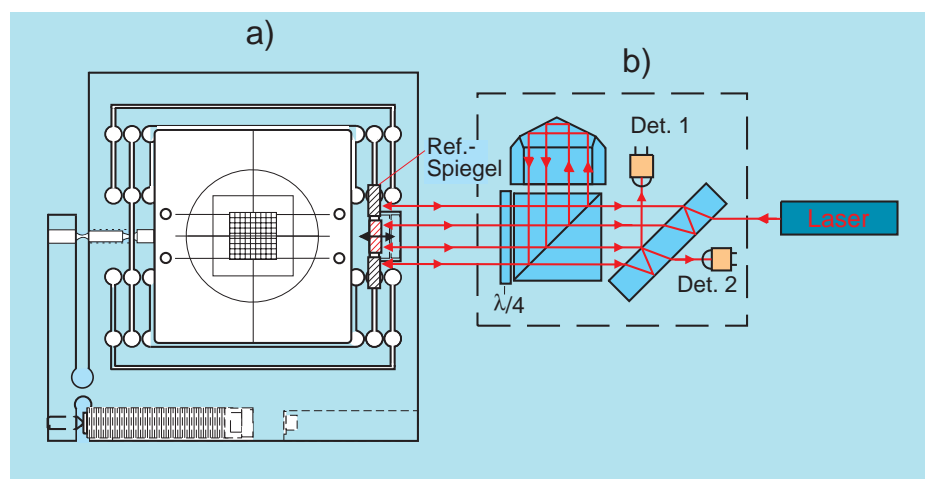
Eingebaut ist ferner ein optisches Videomikroskop, welches ein exaktes Positionieren der Probe unter der Abtastspitze erlaubt.

Objektverschiebeeinheit mit Interferometer

Um mit dem Metrologie AFM-Kopf genaue Messungen durchführen zu können, müssen die kapazitiven Sensoren kalibriert werden, d.h. das Sensorsignal muss auf die Längeneinheit Meter zurückgeführt werden.

Dazu wurde eine Objektverschiebeeinheit gebaut, welche ein exaktes Verschieben der Probe ermöglicht. Die Verschiebung wird mit einem hochauflösenden, differentiellen Planspiegel-Interferometer gemessen (Figur 4).

Der Doppelparallelfedertisch ist aus einem Stück hergestellt ($22\ \text{mm}$ dickes, gehärtetes Aluminium). Die Löcher, welche die kritischen Festkörpergelenke definieren, wurden durch Präzisionsschleifen gefertigt. Dank der genauen Fertigung werden kleinste Führungsfehler erreicht. Nicken und Gieren sind kleiner als 0.7 Bogensekunden über den ganzen Verschieberegion von $380\ \mu\text{m}$. Angetrieben wird der Tisch über einen Hebel mit einem Niederspannungspiezo. Die Position ist dynamisch geregelt. Dazu dienen ein in den Tisch eingebauter, kapazitiver Wegsensor



Figur 4: a) Objektverschiebeeinheit, ausgeführt als Doppelparallelfedertisch, und b) differentielles Planspiegel-Interferometer vom Jamin Typ.

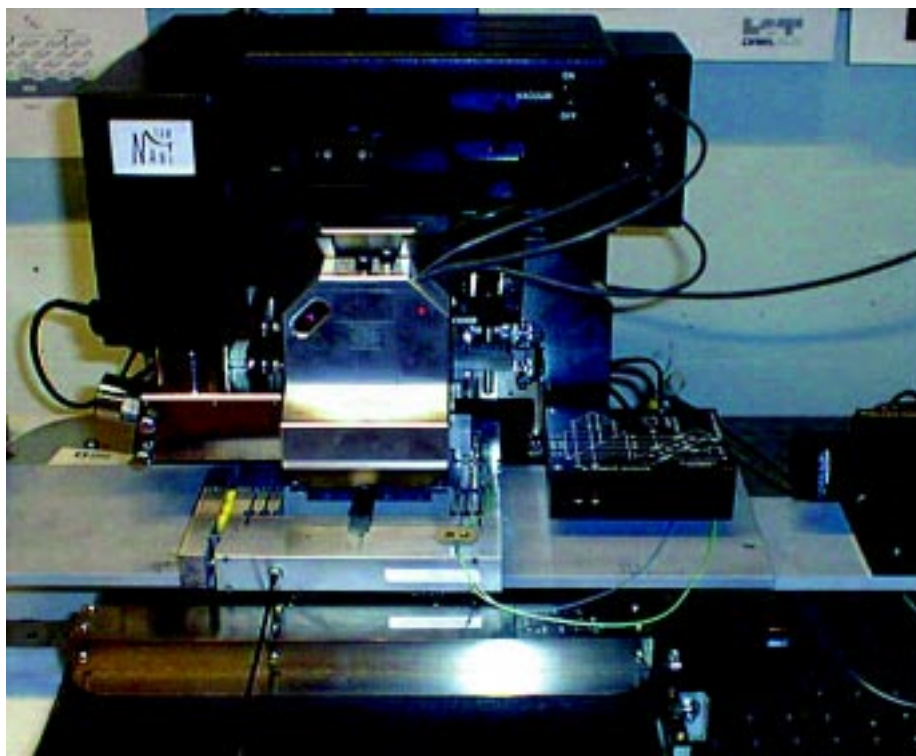
und eine 21 bit DSP-Steuerung (DSP = Digital Signal Processing). Die 21 bit ergeben eine theoretische Auflösung von 0.2 nm über 380 µm.

Die Optik des differentiellen 2-Weg Planspiegel-Interferometers wurde am National Physical Laboratory (NPL) in England gebaut. Das Interferometer wird mit einem He-Ne Laser bei 633 nm betrieben. Damit ist der Abstand zwischen den Interferenzmaxima $158 \text{ nm} = \lambda/4$. Durch Phaseninterpolation wird eine Subnanometer-Auflösung erreicht. Nichtlinearitäten, die durch Polarisationsmischen auftreten können, werden durch eine numerische Korrektur minimiert. Der Referenzspiegel ist direkt am AFM-Kopf befestigt. Relativbewegungen, z. B. durch Drift, zwischen AFM-Kopf und Verschiebetischrahmen werden dadurch kompensiert. Das Positionsruschen des ganzen Aufbaus bei aktiver Positionsregelung ist kleiner als 0.6 nm RMS bei 5 Hz. Die Interferometer-Software, die Steuerung der Objektverschiebeeinheit und die Erfassung der Messdaten vom AFM-Kopf wurden am EAM in LabView programmiert.

Der gesamte Aufbau (Figur 5) ermöglicht nicht nur das Kalibrieren der kapazitiven Sensoren im AFM-Kopf, sondern auch das direkte Messen von AFM-Oberflächenprofilen über eine Länge von 380 µm mit Nanometer-Auflösung.

Kalibrieren von periodischen Strukturen mit dem AFM-Profilometer

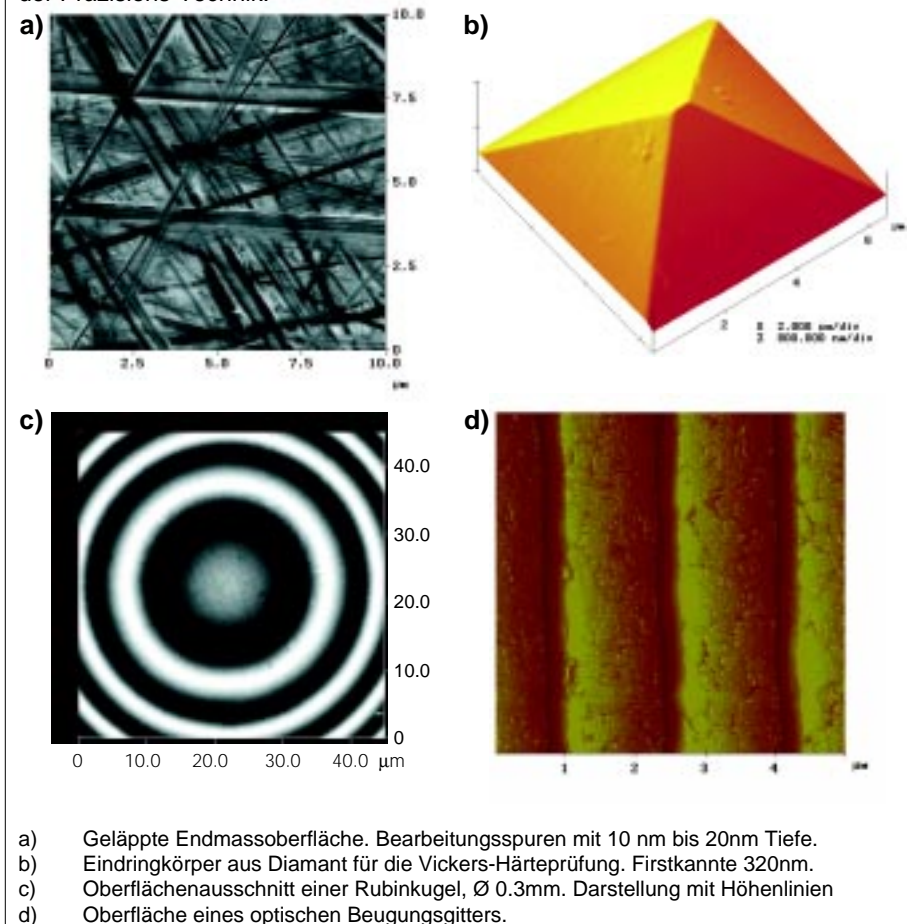
Um bei Kalibriergittern (Fig. 6) die mittleren Strukturabstände genau zu bestimmen, wird die Oberfläche entlang einer Linie abgetastet. Das Interferometer misst direkt die Positionswerte der Linearverschiebeeinheit und der AFM-Kopf liefert die dazugehörigen z-Werte (Fig. 7). Während bei einem zweidimensionalen konventionellen AFM-Bild wegen der grossen Datenmenge nur eine beschränkte Anzahl von Bildpunkten in einem Bildschnitt vorhanden ist (maximal 512), können auf einem Profil mit einer Länge von 380 µm problemlos 20'000 und mehr Punkte gemessen werden. Aus dem gemessenen Oberflächenprofil bestimmt man die Position der

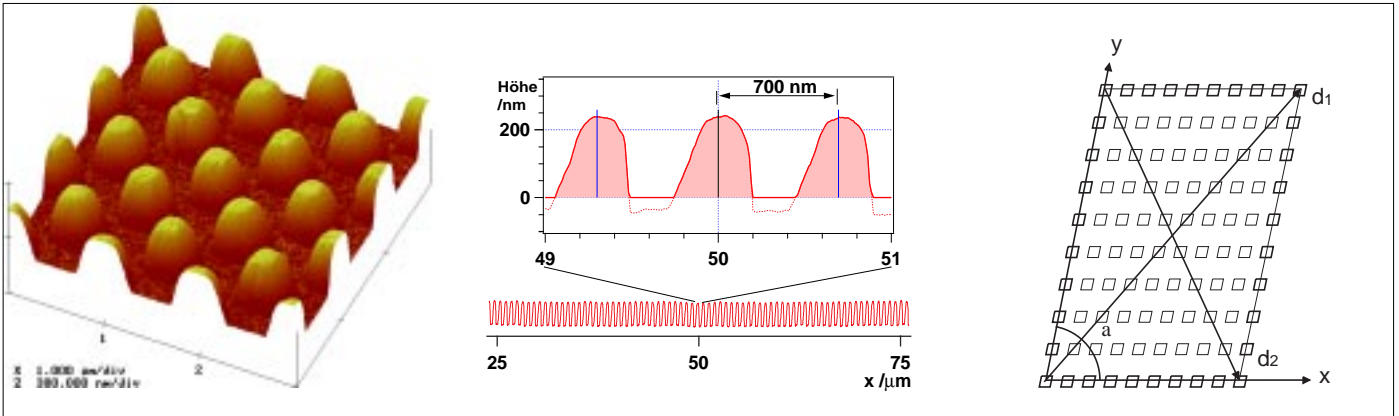


Figur 5: Ansicht des kompletten Metrologie AFM mit Objektverschiebeeinheit und Interferometer.

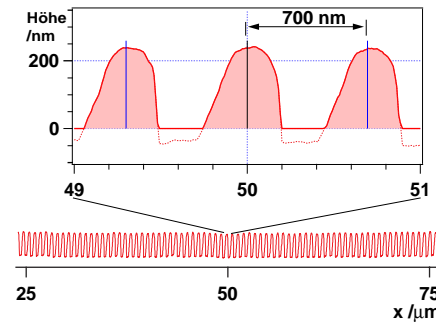
Technische Anwendungen des Metrologie AFM

Die folgenden Bilder zeigen einige AFM-Messungen an diversen Gegenständen der Präzisions-Technik.

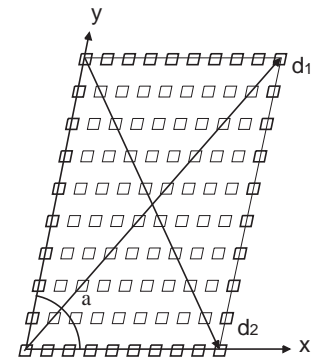




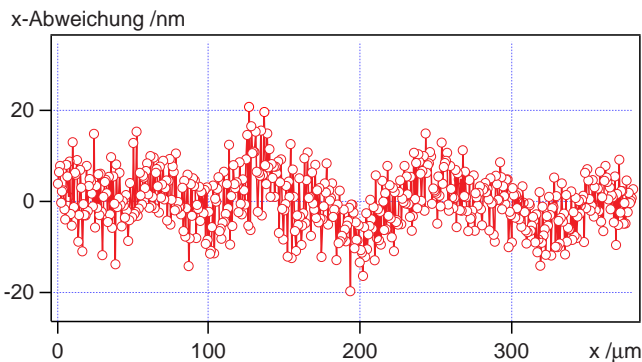
Figur 6: Holographisches Kalibriergitter (Moxtek). Photoresist auf Silizium mit 60nm Wolfram bedampft. Bildausschnitt 3µm x 3µm, Strukturabstände 700nm, Strukturhöhe 300nm.



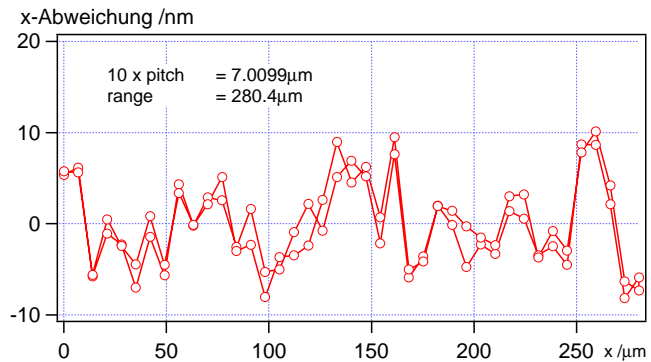
Figur 7: Gemessenes AFM-Profil. Der Ausschnitt illustriert die Evaluationsmethode für die Ermittlung der Linienzentren aus dem 100µm langen Profil (unten).



Figur 10: Prinzip für die Orthogonalitätsbestimmung bei zweidimensionalen Gittern.



Figur 8: Bestimmung des mittleren Linienabstandes eines holographischen Gitters aus einer direkten AFM-Profilmessung. Dargestellt sind die Positionsabweichungen von 542 Linien auf einer Länge von 380µm. Der mittlere Linienabstand beträgt (700.967±0.016)nm.



Figur 9: Bestimmung des mittleren Linienabstandes eines holographischen Gitters mit einer kombinierten Messung. Die Positionsabweichungen von 42 Linienzentren sind gezeigt (jede 10 Linie). Resultate von zwei Messungen (Verschiebung von links nach rechts und umgekehrt).

Linienzentren mit der Schwerpunktsmethode (Fig. 7 oben). Aus den so ermittelten Positionsdaten der Linienzentren wird anschliessend durch lineare Regression der mittlere Gitterabstand berechnet (Fig. 8). Solche direkten Profil-Messungen dauern mehrere Stunden.

Schneller und genauer kommt man mit einer kombinierten Methode zum Ziel. Dabei bewegt die Linearverschiebeeinheit die Probe jeweils um ein ganzzahliges Vielfaches des Strukturabstandes. An jeder solchen Stelle wird die lokale Positionsabweichung einer Struktur durch Abtasten mit dem Piezo-Scanner im AFM-Kopf bestimmt. Dazu wird aus dem lokalen AFM-Profil die Position des Linienzentrums ebenfalls durch Schwerpunktsbildung, jedoch online, berechnet. Da nicht mehr ein vollständiges Profil abgetastet wird, ist diese Methode schneller und der

Einfluss einer allfälligen Drift kleiner. Hohe Stabilität und kleine Drift sind wichtige Voraussetzungen für alle Messungen mit Nanometer-Auflösung. Bei der Messung in Figur 9 war die Drift nur 4 nm in zwei Stunden. Die Wiederholbarkeit der Position einzelner Linienzentren zwischen zwei Messungen war besser als 2 nm (1 s). Auch hier wird anschliessend durch eine Ausgleichsrechnung aus den ermittelten Linienzentren der mittlere Gitterabstand bestimmt. Bei zweidimensionalen Gittern kann auch die Orthogonalität bestimmt werden (Figur 10). Dazu misst man die mittleren Strukturabstände in mindestens drei Richtungen und benutzt den Cosinussatz (Triangulation).

Messresultate und Unsicherheiten von Profilmessungen

In der Tabelle 1 sind die Resultate von

| Messung | Struktur abst.nm | u_c rel. |
|-------------------------|------------------|------------|
| x-Richtung | 700.967 | 1.1E-5 |
| y-Richtung | 700.981 | 1.2E-5 |
| 1. Diagonale | 989.297 | 1.3E-5 |
| 2. Diagonale | 993.165 | 1.2E-5 |
| →Orthogonalität 90.229° | | 0.002° |

Tabelle 1: Erzielte Messresultate an einem zweidimensionalen holographischen Kalibriergitter. Angegeben sind die mittleren Strukturabstände in vier Richtungen und der daraus berechnete Wert für die Orthogonalität sowie die kombinierten Standardmessunsicherheiten (u_c).

Messungen an einem holographischen Gitter zusammengestellt. Die Messunsicherheit (u_c) für den mittleren Gitterabstand ist in der Grössenordnung von nur 8 pm (1 pm = 0.001 nm)! Diese Messunsicherheit

wurde aus 11 Einflussgrößen, in Übereinstimmung mit dem ISO-Guide [4], ermittelt. Der grösste Beitrag zur Messunsicherheit ergab sich aus den Unregelmässigkeiten der Linienzentren auf dem Kalibriergitter.

3D-Kalibrierung des AFM-Kopfes

Mit Hilfe des oben beschriebenen kalibrierten holographischen Gitters wurde der AFM-Kopf lateral, d.h. in der x-y-Ebene, charakterisiert. Die Nichtlinearitäten der x- und y-Sensoren waren kleiner als 0.05%. Es zeigte sich weiter, dass die Kalibrierkonstanten weitgehend unabhängig von den gewählten Scanparametern wie Scangeschwindigkeit und Scanlänge waren (<0.1%). Die Genauigkeit der AFM-Kopf-Kalibrierung ist damit besser als die maximale Bildauflösung. Die maximale Bildauflösung von 512 x 512 Punkten würde 0.2% Skalengenauigkeit und 0.1° für die Orthogonalität entsprechen.

Für die z-Kalibrierung von SPMs und Profilometern werden meistens Stufennormale eingesetzt. Eine direkte Rückführung ohne Normale ist jedoch ziemlich aufwendig. Bei dem Metrologie-AFM ist zwar der Messbereich des kapazitiven Sensors für die z-Richtung (Höhe) nur etwa 7 µm, entsprechend gross ist aber die geforderte Auflösung. Zwei Methoden wurden zur z-Kalibrierung angewendet. Neben einer direkten interferometrischen Kalibrierung wurde eine genauere mit einem Kipptisch entwickelt.

Ein kleiner Kipptisch mit 5 diskreten Winkelpositionen wurde auf der Linearverschiebeeinheit angebracht. Angetrieben wird die Kippbewegung mit einem Piezo und dem sog. „stick-slip“ Prinzip. Mit dem Kipptisch wird eine äusserst ebene Siliziumprobe in genau bekannte Schrägstellungen gebracht. Durch das interferometrisch genaue, horizontale Verschieben des Kipptisches mit der Lineareinheit wird bei geneigter Probenoberfläche eine exakt bekannte z-Bewegung an der Stelle der AFM-Spitze erzeugt. Diese Kalibriermethode erwies sich als sehr präzise. Die kombinierte Standard-Messunsicherheit bei Stufenhöhen im

Bereich von 10 nm bis 1000 nm liegt bei etwa 0.2 nm.

Vergleichsmessungen

Die Messunsicherheiten des oben beschriebenen AFM-Profilometers für die Kalibrierung von periodischen Strukturnormalen sind nach unserem Wissensstand bis heute auch international gesehen weitaus die kleinsten. Der Bedarf an hochpräzisen Vergleichsmessungen konnte durch den Aufbau eines Beugungsmessplatzes am EAM weitgehend befriedigt werden. Die Beugungsmessung beruht auf folgendem Prinzip: Ein auf das zu kalibrierende Gitter einfallender Laserstrahl wird durch die periodische Struktur in verschiedene Beugungsordnungen aufgefächert und abgelenkt. Der mittlere Strukturabstand ergibt sich dabei aus dem Beugungswinkel und der Wellenlänge des verwendeten Laserlichts. Für die Kalibrierung wird das Gitter in der Drehachse des Normal-Winkelmesssystems des EAM montiert. Die zu messenden Beugungswinkel ergeben sich aus den Differenzen der Drehlagen des Gitters, für die der gebeugte Laserstrahl in die einfallende Strahlrichtung zurückfällt. Dank der hohen Genauigkeit des Drehwinkels (0.15") und der genau bekannten Wellenlänge des benutzten Laserlichts können mittlere Strukturabstände mit Messunsicherheiten, die etwa gleich klein wie bei der AFM-Methode sind, bestimmt werden. Allerdings wird keine Information über die lokale Qualität eines Kalibriergitters gewonnen. Der ermittelte Wert ist ein Mittel über eine relative grosse Fläche von 1 mm² - 4 mm². Die beiden Verfahren sind vollständig unabhängig und zeigen eine gute Übereinstimmung.

Das Gebiet der Nanometrologie ist relativ neu. In vielen Ländern ist die Infrastruktur noch im Aufbau bzw. im Ausbau. Internationale Messvergleiche sind daher bis jetzt noch nicht so etabliert wie in anderen Bereichen der Metrologie. Für das EAM erfolgten bisher nur einige wenige bilaterale Messvergleiche mit der PTB (Deutschland), dem BIPM (Frankreich) sowie dem KRISS (Korea). Alle Messwerte stimmten innerhalb der Messunsicherheiten überein.

Im September 1997 hat das Consultative Committee for Length (CCL) sieben wichtige Gebiete der Längenmessung, darunter die Nanometrologie, bestimmt, in denen sogenannte „Key Comparisons“ (Schlüsselvergleiche) durchgeführt werden sollen. Die Key Comparisons sollen die Äquivalenz der Staatslabors aufzeigen und quantifizieren. Da noch praktisch keine internationalen Vergleiche in der Nanometrologie stattgefunden haben, werden zunächst Vorvergleiche nach den Regeln der Key Comparisons durchgeführt. Der erste von fünf weltweiten Vergleichen in der Nanometrologie wurde Anfang 1999 begonnen. Das EAM ist Pilotlabor in diesem Vergleich, an dem 12 nationale Metrologieinstitute teilnehmen. Gegenstand des Vergleichs sind periodische Strukturnormale, wie sie oben beschrieben wurden. ■

(e-mail: felix.meli@eam.admin.ch;
Tel. +41 (0)31 323 33 46)

Referenzen

- [1] G. Binnig and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta*, 55 (1982) 571.
- [2] G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber, *Phys. Rev. Lett.*, 56 (1986) 930.
- [3] Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller and V.B. Elings, *Surf. Sci. Lett.*, 290 (1993) L688. „Tapping Mode“ and „Dimension“ sind eingetragene Warenzeichen von Digital Instruments Inc., Santa Barbara, CA, USA.
- [4] Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, Genf (1995), ISBN 92-67-10188-9.

Publikationen

F. Meli, *Long range scans with an atomic force microscope*, Progress in Precision Engineering and Nanotechnology, Proc. of the 9th Int. Precision Engineering Seminar and 4th Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering, V2 437-439 (1997).

F. Meli and R. Thalmann, *Pitch measurements of calibration grids using a metrology AFM and a linear displacement stage*, Proc. of the 2nd Seminar on Quantitative Microscopy, K. Hasche, W. Mirandé, G. Wilkening (Eds.), PTB-Bericht, PTB-F-30, p.177-183, Braunschweig, Nov. 1997.

F. Meli and R. Thalmann, *Long range AFM profiler used for accurate pitch measurements*, Measurement Science and Technology, Special Issue on Dimensional Metrology, 9(7), 1087-1092 (1998).

F. Meli and R. Thalmann, *Z-calibration of a metrology AFM scanner using an interferometer and a tilting device together with a linear displacement stage*, Proc. of the 3rd Seminar on Quantitative Microscopy, K. Hasche, W. Mirandé, G. Wilkening (Eds.), PTB-Bericht, F-34 p.61-67 (1998).

Kurzfassung

In Zukunft wird der Bedarf an kalibrierten Normalen mit immer kleineren Strukturen zunehmen. Die messtechnische Kompetenz auf dem Gebiet der Mikro- und Nanotechnologie ist für die Schweizer Präzisions- und Halbleiterindustrie von grosser Bedeutung. Auch die nationale Längenmessbasis muss sich parallel zu diesen neuen Technologien entwickeln, um entsprechende Dienstleistungen anbieten zu können. 1995 wurde am EAM damit begonnen, ein Nanometrologielabor aufzubauen.

Zur Zeit setzt das EAM zur Kalibrierung von Nanostrukturen hauptsächlich ein Rasterkraftmikroskop ein, welches speziell für metrologische Anwendungen konzipiert wurde. Der Messplatz besteht im Wesentlichen aus einem kommerziellen Rasterkraftmikroskop und einer zusätzlichen Objektverschiebeeinheit, welche das exakte lineare Verschieben einer Probe in einem Bereich von 400 μm ermöglicht. Diese Verschiebung wird mit einem hochauflösenden Interferometer gemessen. Der Messplatz ist in einer vibrationsarmen, ruhigen, temperaturstabilen und staubarmen Umgebung aufgebaut. Der gesamte Aufbau ermöglicht nicht nur die direkte Aufnahme von 3D-Abbildungen mit dem AFM-Kopf, sondern auch das exakte Messen von AFM-Oberflächenprofilen über eine Länge von 380 μm mit Nanometer-Auflösung.

Mit diesem neuen Aufbau kann beispielsweise der mittlere Strukturabstand eines holographischen Gitters von 700 nm mit einer Messunsicherheit von nur 0.008 nm bestimmt werden.

Die Genauigkeit des AFM-Profilometers wird durch Messvergleiche bestätigt. Ein interner Vergleich mit einem ebenfalls im Nanometrologielabor des EAM aufgebauten Beugungsmessplatz führte zu sehr guter Übereinstimmung. Internationale Vergleichsmessungen wurden bilateral mit einigen Metrologieinstituten durchgeführt. In einem jüngst gestarteten Messvergleich, an dem 12 nationale Metrologieinstitute teilnehmen, ist das EAM Pilotlabor.

Résumé

Dans le futur, le besoin d'étalons ayant des structures toujours plus fines va augmenter. De ce fait, la compétence métrologique de la micro- et de la nano-technologie est d'une grande importance pour l'industrie suisse de précision ainsi que pour le domaine des semi-conducteurs. Aussi, la base métrologique nationale doit se développer parallèlement à ces nouvelles technologies, afin de pouvoir offrir des services adéquats. En 1995 déjà, l'OFMET a commencé de mettre sur pied un nouveau laboratoire pour la nanométrie.

Pour l'étalonnage de structures nanométriques, l'OFMET utilise principalement un microscope à force atomique, qui est spécialement conçu pour les applications métrologiques. L'instrument consiste essentiellement, en un microscope à force atomique commerciale et en une unité supplémentaire de déplacement linéaire, qui permet le déplacement précis d'un échantillon dans une plage de 400 μm . Ce déplacement est mesuré à l'aide d'un interféromètre à haute résolution. La place de travail est située dans une salle blanche, calme, sans vibrations, et stabilisée en température. L'équipement permet non seulement la mesure directe d'images tridimensionnelles, mais aussi l'enregistrement de profils linéaires sur une longueur de 380 μm avec résolution nanométrique.

À l'aide de ce nouvel instrument nous pouvons, par exemple, mesurer l'intervalle moyen de 700 nm d'une structure périodique avec une incertitude infime de 0.008 nm.

L'exactitude du profilomètre à force atomique est confirmée par des comparaisons de mesure. Une comparaison interne avec un instrument de mesure par diffraction laser, qui a aussi été développé à l'OFMET, a démontré un excellent accord. Des comparaisons internationales ont été exécutées, sur une base bilatérale, avec plusieurs instituts nationaux de métrologie. Récemment, une comparaison internationale à plus grande échelle a été mise en oeuvre. Elle recense la participation de 12 instituts nationaux de métrologie et l'OFMET y est représentée en tant que laboratoire pilote.

Riassunto

In futuro ci sarà maggior bisogno di unità di misura tarate con strutture sempre più piccole. La competenza metrologica nel campo di micro e nanotecnologia è di grande importanza per l'industria svizzera di precisione e dei semiconduttori. Anche la base metrologica nazionale deve progredire di pari passo con queste nuove tecnologie, per poter offrire i corrispettivi servizi. Nel 1995 si è iniziato, presso l'OFMET, a allestire un laboratorio per la nanometrologia.

Per tarare nanostrutture l'OFMET impiega attualmente in prevalenza un microscopio a forza atomica (AFM) ideato in modo particolare per impieghi in metrologia. Il dispositivo di misurazione consiste essenzialmente di un microscopio a forza atomica commerciale e di un'unità di spostamento lineare che permette di spostare l'oggetto in un campo di 400 μm . Tale spostamento è misurato con un interferometro ad alta risoluzione. Il dispositivo di misurazione è situato in un locale protetto dalle vibrazioni, calmo, a temperatura stabile e con un minimo di polvere. Il dispositivo permette non solo la registrazione diretta di raffigurazioni tridimensionali, bensì anche l'esatta misura di profili lineari su una lunghezza di 380 μm con una risoluzione nanometrica.

Con questo nuovo strumento è possibile determinare la distanza strutturale media di un reticolo olografico di 700 nm con un margine d'incertezza di solo 0.008 nm.

L'esattezza del profilometro a forza atomica è confermata da paragoni di misura. Un paragone interno con uno strumento di misurazione per mezzo di diffrazione laser, anche questo installato nel laboratorio di nanometrologia dell'OFMET, ha mostrato un'ottima concordanza. Su basi bilaterali sono state effettuate misure comparative internazionali con alcuni istituti di metrologia. Di recente è stata varata una ricerca comparativa internazionale su più vasta scala; vi partecipano 12 laboratori nazionali di metrologia e l'OFMET fa figura di laboratorio pilota.

Summary

In the near future there will be an increasing demand for calibrated standards with smaller and smaller structures. The metrological know-how in the field of micro- and nano-technologies is of great importance for the Swiss industry. To offer adequate calibration services, the national measurement basis has to develop itself in parallel with these new technologies. In 1995 the OFMET started to build up a new nanometrology laboratory.

At present, the OFMET uses for the calibration of nanostructures mainly an atomic force microscope (AFM), which was specially designed for metrological purposes. This measurement set-up is based on a commercial metrology-AFM and an additional sample stage, which allows the accurate linear displacement of a sample within a range of 400 μm . This displacement is measured with a high resolution interferometer. The whole measurement set-up is in a low vibration, quiet, temperature stable and clean environment. The set-up enables not only the acquiring of 3D surface images but also the accurate measurement of AFM-profiles over a total length of 380 μm with nanometer resolution.

With this new measurement set-up it is possible to determine the average pitch of a holographic grating of 700 nm with an uncertainty of only 0.008 nm.

The accuracy of the AFM-profiler is verified through comparisons. An internal comparison at the OFMET using a laser diffraction experiment showed a good agreement. International comparisons were performed with a few metrology institutes on a bilateral basis. The OFMET acts as the pilot lab for a just recently started comparison among 12 national metrology institutes.