

# **Charakterisierung und Kalibrierung eines Rasterkraftmikroskops zur Bearbeitung metrologischer Aufgaben**

**Prof. Dr. H. Lenz - Strauch, H. Schütte, Prof. Dr. D. Windisch**

**Fachbereich Ingenieurwissenschaften**

**Standort: Wilhelmshaven**

**E - Mail:**

**h.lenz@fbf.fh-wilhelmshaven.de    schuette-h@fbf.fh-wilhelmshaven.de**

**windisch@fbf.fh-wilhelmshaven.de**

1	Einführung.....	1
2	Bilderzeugung bei der Rasterkraftmikroskopie.....	3
3	Charakterisierung und Kalibrierung des Rasterkraftmikroskops.....	4
4	Zusammenfassung.....	6

## **1 Einführung**

Im Labor für technische Optik und Mikrotechnik wird ein Rasterkraftmikroskop der Firma SIS eingesetzt für Zwecke der Lehre und für die Qualitätsprüfung der im Labor hergestellten Mikrostrukturen. Das Rasterkraftmikroskop ist wie das ebenfalls im Labor verfügbare Rasterelektronenmikroskop gut geeignet, die Studierenden in die Problematik der Messung extrem kleiner Strukturen einzuführen. Abbildung 1 zeigt das Gerät an seinem Standort im Labor.

Die Abmessungen der im Labor hergestellten Mikrostrukturen liegen im Bereich von wenigen nm bis einigen  $\mu\text{m}$ . Das Labor ist nicht ausgestattet für die Herstellung von Strukturen im sub nm- Bereich. Abbildung 2 zeigt eine Struktur mit Höhenunterschieden im 100nm Bereich, die im Labor hergestellt und vermessen wurde als 3D – Darstellung und eine Profillinie der Struktur. Vor der Durchführung der hier beschriebenen Arbeiten konnten Strukturen nur im Bereich von 100nm bis  $\mu\text{m}$  vermessen werden. Bei Strukturen mit Abmessungen im Bereich kleiner 100nm waren lediglich qualitative Aussagen möglich.

Bei der Rasterkraftmikroskopie beeinflussen sowohl die Steuerung des Messvorganges als auch die Auswertung des Messsignals die Ergebnisse der Messung und verfälschen diese unter Umständen. Diese Effekte wirken sich umso stärker aus, je kleiner die betrachteten Strukturen sind. Grundsätzlich ist eine sorgfältige Charakterisierung und Kalibrierung des Rasterkraftmikroskops in allen drei Raumachsen erforderlich, um zuverlässige und aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten./1/, /2/. Die Kalibrierung ist in den verschiedenen Messbereichen durchzuführen, in denen das Gerät eingesetzt wird, d. h. hier sowohl im Bereich von kleiner 10nm bis zu einigen 100nm.



Abb. 1: Rasterkraftmikroskop im Labor für Mikrotechnik

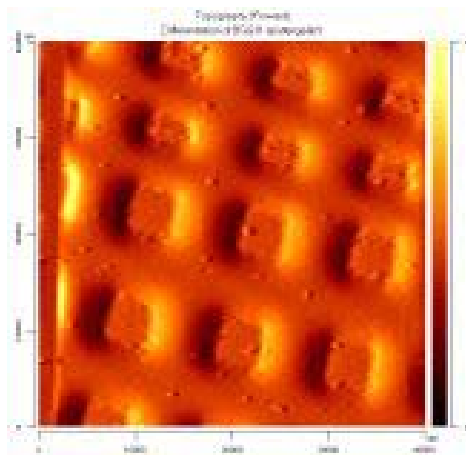
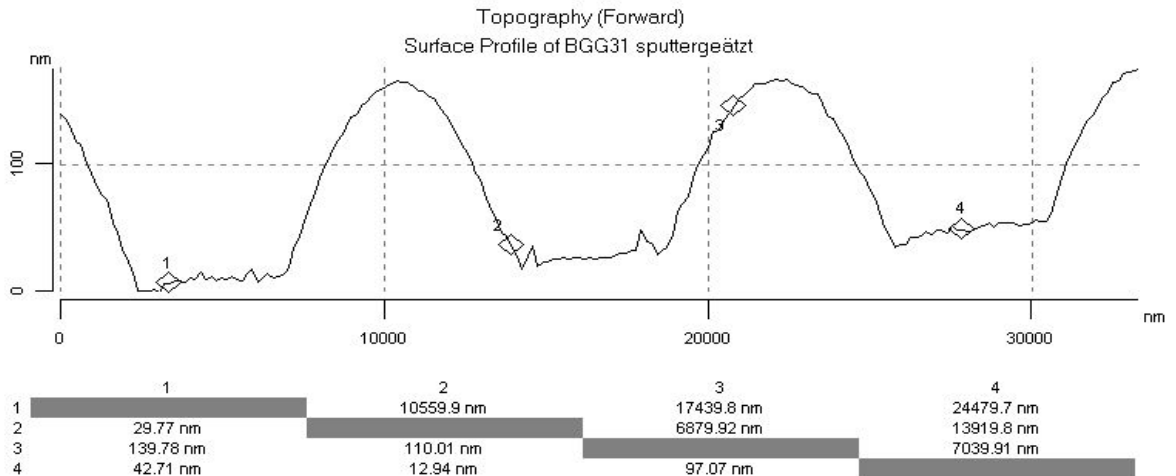


Abb. 2: Struktur, die im Labor für Mikrotechnik durch Sputterätzen hergestellt wurde als 3D Bild und als Profilschnitt (unten).



Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurden das Rasterkraftmikroskop charakterisiert, es wurden daraufhin Standort und Umgebungsbedingungen verändert, Parameter für einen optimalen Einsatz ermittelt und eine Kalibrierung in verschiedenen Messbereichen durchgeführt. Bei den Messungen wurden studentische Hilfskräfte eingesetzt.

## 2 Bilderzeugung bei der Rasterkraftmikroskopie

Bei der Rasterkraftmikroskopie rastert eine Tastspitze, die einen Krümmungsradius von wenigen nm hat, den Beobachtungsbereich ab. Die Tastspitze ist auf einer Biegefeder montiert. Ändert sich die Topografie der Probenoberfläche, wird die Tastspitze angehoben oder abgesenkt, so dass die vorher eingestellte Auflagekraft von wenigen nN konstant bleibt (Abb. 3). Diese Bewegung führt ein Piezoaktor durch, der von einer Regelschleife gesteuert wird. Die Rasterbewegung wird ebenfalls mit Piezoelementen ausgeführt. Als Ergebnis des Messvorganges liegen zu jedem Punkt der abgerasterten Probenfläche ( $x/y$  – Koordinate) ein Höhenwert ( $z$  – Koordinate) vor, der durch die Gerätesoftware weiterverarbeitet wird. Die Ergebnisse werden als Falschfarbendarstellung und als 3D – Bild dargestellt. Zusätzlich können Profillinien durch den Datenbereich gelegt und die Höhenwerte als Histogramm dargestellt werden.

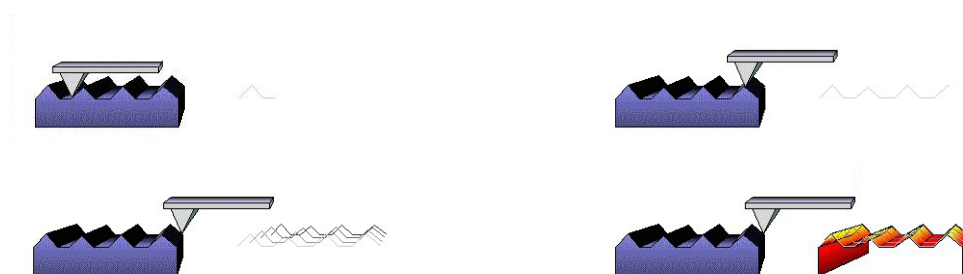


Abb. 3: Bilderzeugung bei der Rasterkraftmikroskopie  
(mit freundlicher Genehmigung der Fa. SIS)

Piezoelemente weisen Nichtlinearitäten bei der Ansteuerung und Hystereseverhalten auf, was sich hier sowohl auf die Rasterbewegung als auch auf den Höhenwert ( $z$ -Koordinate) auswirkt. Darüber hinaus beeinflussen Eigenschaften und Einstellung

der Regelschleife (PI-Regler) die Messwerte. Die Linearität der Rasterbewegung wird bei diesem Gerät durch eine Regelung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen sichergestellt.

### 3 Charakterisierung und Kalibrierung des Rasterkraftmikroskops

Um die Charakterisierung und Kalibrierung in den im Labor für Mikrotechnik häufig verwendeten Messbereichen durchzuführen, wurden geeignete Kalibrierstandards ausgewählt /3/. Die Vergleichbarkeit unserer Ergebnisse mit denen anderer Labors wurde durch die Auswahl nur häufig verwendeten Standards sichergestellt. Folgende Standards wurden beschafft:

- Ein Ebenheitsstandard mit einer Fläche von  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ , der über diese Fläche eine maximale Unebenheit von 10nm (peak to valley distance) aufweist.
- Ein Standard zur Kalibrierung der Abstände in der x/y-Ebene, der auf einer Fläche von  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  ein periodisches Muster aus pyramidenförmigen Vertiefungen aufweist. Die ca. 70nm tiefen Pyramiden haben einen Abstand von 200nm.
- Drei Standards zur Kalibrierung von Stufen (z-Achse), die aus regelmäßig angeordneten quadratischen Vertiefungen bestehen (Waffelmuster) mit Stufenhöhen von 8nm (Abstand  $8 \mu\text{m}$ ), 90nm (Abstand  $10 \mu\text{m}$ ) und 180nm (Abstand  $3 \mu\text{m}$ ).

Erste Messungen zeigten, dass unter den bisherigen Bedingungen das Signal/Rausch-Verhältnis für Messungen von Strukturen unter 100nm zu schlecht war. Eine der ersten Maßnahmen zur Verbesserung der Ergebnisse war die Reduktion des Rauschens durch eine Veränderung des Gerätestandortes und eine geänderte Kabelverlegung.

Anschließend wurden systematisch die Einflüsse der Rastergeschwindigkeit und der Einstellung des Reglers untersucht. Als Ergebnis wurde ein Fenster für die Rastergeschwindigkeit und geeignete Reglereinstellungen für verschiedenen Arbeitsbedingungen festgelegt.

Bei der Analyse der Probenbilder fallen systematische Phänomene auf, die mit der Darstellung und Erzeugung der Messwerte zusammenhängen und die die Messergebnisse in allen drei Koordinaten, insbesondere aber bei der z-Koordinate (Stufenhöhe) verfälschen. Zunächst fällt eine Schiefe und Biegung der Probenoberfläche auf, deren mögliche Ursache in Hystereseeffekten, Nichtlinearitäten und im Kriechverhalten der Piezoelemente liegt /4/. Abbildung 4 zeigt einen weiteren typischen Effekt bei der Untersuchung von Proben mit Waffelmuster. Das Bild weist Streifen in Richtung der Rasterbewegung auf, die von dem Probenmuster abhängen. Hier liegt die mögliche Ursache in der Art, wie die Kraft auf die Biegefeder bzw. deren Durchbiegung gemessen wird /4/. Die Darstellung des Probenprofils zeigt ein Überschwingen an den Kanten der Struktur. Hier ist die Ursache im Kriechverhalten der Piezoelemente zu finden. Da alle diese Einflüsse im Bereich von einigen 10nm liegen, ist es erforderlich, diese zu beseitigen um zuverlässige Messergebnisse in diesem Messbereich und insbesondere im Bereich unter 10nm zu erzielen.

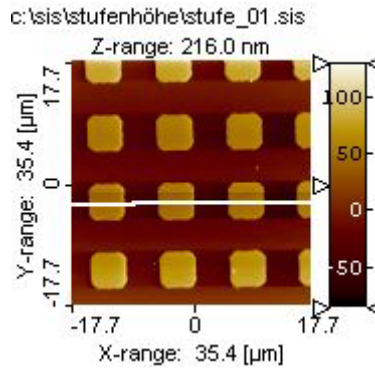
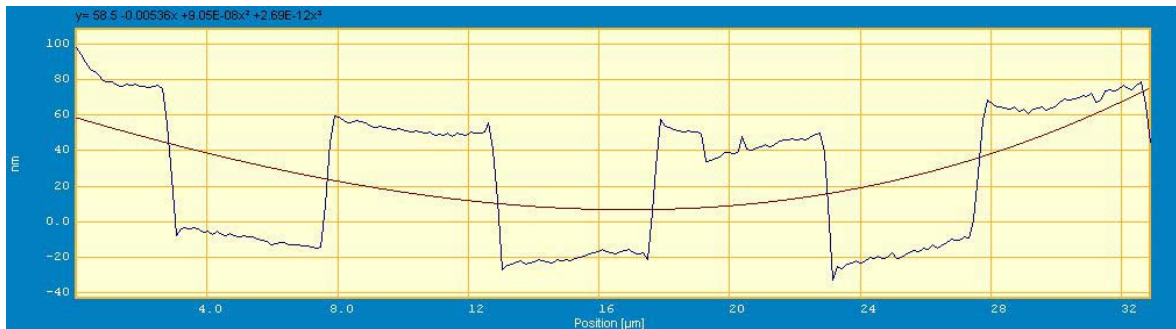


Abb. 4: Waffelstruktur mit Stufenhöhe von 90nm als Falschfarbenbild und eine Profillinie (unbearbeitet). Die durchgezogene gebogene Linie stellt den kumulierten Mittelwert dar.



Zu diesem Zweck wurde eine Software „The scanning probe image processor“ (SPIP) der Firma „Image Metrology“ beschafft, die es ermöglicht, die Rohdaten hinsichtlich Verfälschungen zu analysieren und diese zu korrigieren. Darüber hinaus unterstützt diese Software die Kalibrierung eines Rasterkraftmikroskops in lateraler Ebene und in der z-Koordinate.

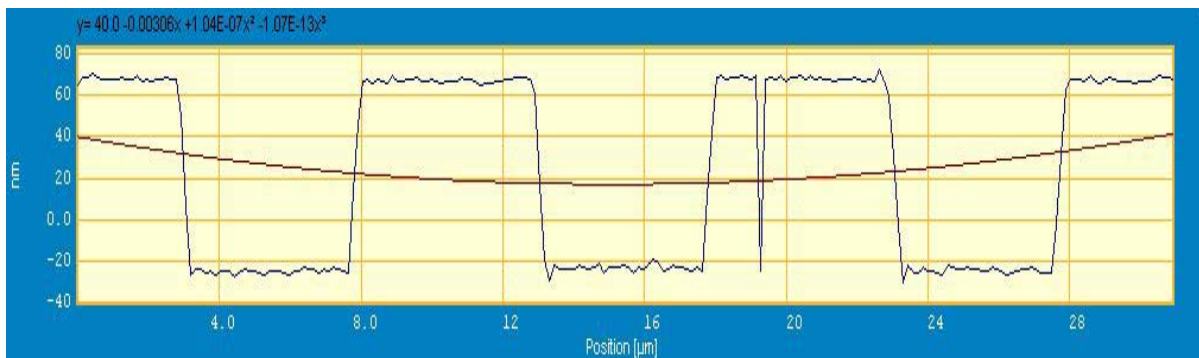


Abb. 5: Profil durch die Struktur nach der Bildbearbeitung

Abbildung 5 zeigt ein Bild und ein Profil der Struktur in Abbildung 4 nach Bearbeitung der Rohdaten mit Hilfe der Software SPIP. Durch deren Einsatz wurde es auch möglich, Strukturen mit Stufen kleiner 10nm zu vermessen. Abbildung 6 zeigt ein Profil einer Struktur mit einer Stufenhöhe unter 10nm.

Mit Hilfe der verschiedenen Standards wurde die z-Achse des Rasterkraftmikroskops für Stufen von 8nm, 90nm und 180 nm kalibriert. Die x/y-Achsen wurden mit Hilfe periodischer, rechteckiger Strukturen mit Abständen von 3μm und 8μm kalibriert.<sup>5/</sup> Es ergaben sich jeweils verschiedene Kalibrierfaktoren. Da sich sowohl die Geräteigenschaften als auch Umgebungseinflüsse im Laufe der Zeit ändern, ist eine

Kalibrierung mit dem entsprechenden Standard vor den Messungen von Proben notwendig.

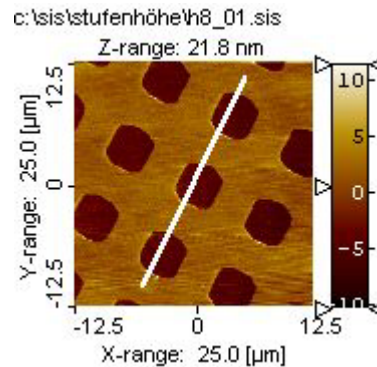


Abb. 6: Waffelstruktur mit Stufenhöhe unter 10nm als Falschfarnebild und eine Profilinie (unbearbeitet).



#### 4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Rasterkraftmikroskop im Labor für Mikrotechnik systematisch mit Hilfe von Kalibrierstandards charakterisiert. Es wurden Änderungen zur Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses vorgenommen, optimale Betriebsparameter ermittelt und ein Kalibrierverfahren für verschiedene Messbereiche festgelegt. Damit ist das Gerät geeignet für die Qualitätsprüfung der im Labor hergestellten Mikrostrukturen sowie in der Lehre für die Darstellung der Problematik, die bei der Messung von extrem kleinen Strukturen auftritt.

Mit Hilfe studentischer Projekte oder Diplomarbeiten lassen sich weitere Untersuchungen hinsichtlich der mittel- und langfristigen Stabilität des Gerätes und des Einflusses der Tastspitzenform auf die Messergebnisse anschließen. Diese Fragestellungen blieben bisher unberücksichtigt.

Eine weitere interessante Anwendung, die auf den Ergebnissen dieses Projektes aufbaut, ist die Untersuchung von Mikrorauigkeiten auf Oberflächen, die zusammen mit dem Labor für Messtechnik durchgeführt werden sollten.

#### Literatur:

- /2/ J. E. Griffith, D. A. Grigg: Dimensional metrology with scanning probe microscopes, J. App. Phys. 74(9), 01.11.1993
- /3/ L. Koenders, G. Wilkening: „Review on available calibration artefacts“ in: Proceedings of the 5th Seminar on Quantitative Microscopy and 1st Seminar on Nanoscale Calibration Standards and Methods. Nanoscale 2001, Bergisch Gladbach 2001
- /4/ Edwards et al. : “Influence of data analysis and other factors on the short-term stability of vertical scanning-probe microscope calibration measurements”, J. Vac. Sci. Technol. B 16(2), Mar/Apr 1998
- /5/ N. Kofold, J. Garnaes, J. F. Jorgensen: „Method for lateral calibration of Scanning Probe Microscopes based on two dimensional transfer standards”, PTB F-39 (2000), S. 36 - 43