

Ferngesteuertes Rasterkraftmikroskop mit LabView

Automatisierte Verfahren zur Qualitätskontrolle im industriellen Umfeld verlangen zuverlässige, programmierbare und fernwartbare Instrumente. Hier wird ein fernsteuerbares und programmierbares Rasterkraft-Mikroskop (RAFM) vorgestellt.

(ae) Das Instrument besteht aus einer 4-Achsen-Robotik und einem kommerziellen *easyscan*-Rasterkraftmikroskop der Liestaler Firma NanoSurf AG (siehe Mailbox). Die Robotik erlaubt eine schnelle und kontrollierte Positionierung beliebiger Proben mit einer Präzision, die besser ist als $2\mu\text{m}$. Zu überprüfende Objekte können in Serie und vollständig ohne Operateur untersucht werden. Doch zuerst zu den Hintergründen.

Ein griechischer Zwerg

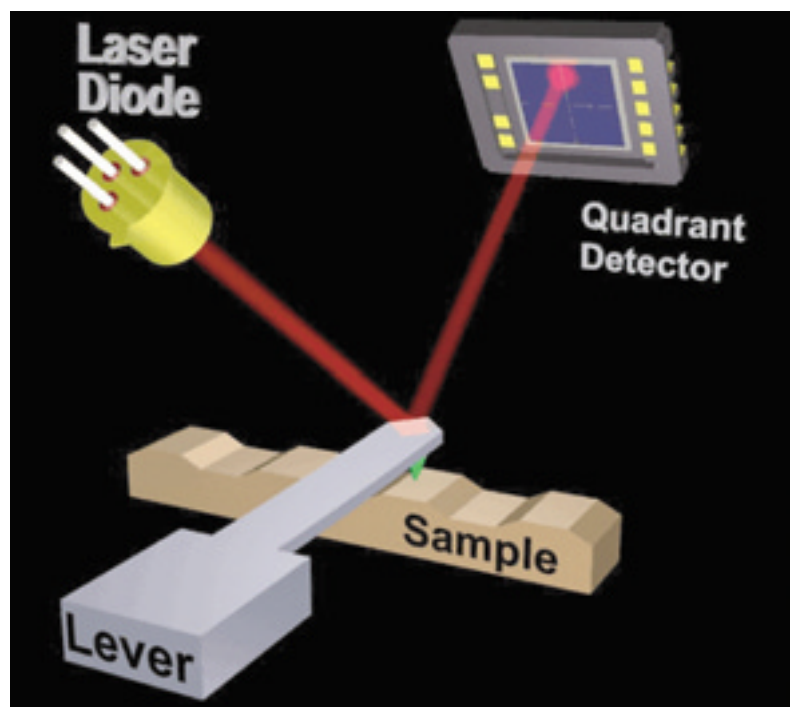
Das griechische Wort «nanos» bedeutet Zwerg. Nanowissenschaften und Nanotechnologie befassen sich somit mit der Welt einzelner Moleküle und Atome, den elementaren Bausteinen der Natur. Klassische Messinstrumente wie das Lichtmikroskop können nicht bis zu diesen winzigen Strukturen vordringen. Erst die neuen Rasterkraftmikroskope der Nanowissenschaften ermöglichen eine Visualisierung individueller Atome und Moleküle. Die Nanowissenschaften entwickelten sich in den letzten zehn Jahren zu einem der erfolgreichsten Zweige der Schweizer Forschung. Viele faszinierende experimentelle Erfolge brachten die Forschung schnell voran, wohingegen die Lehre und Ausbildung auf diesem hoch komplexen Gebiet noch kaum Fortschritte machte. Aus diesem Grund gibt es bis heute kein eigentliches Unterrichtsmate-

rial für dieses neue und umfangreiche Gebiet. An der Universität Basel wurde ein virtuelles Labor zur Ausbildung von Studierenden entwickelt. Das Labor ermöglicht, Strukturen von Oberflächen bis hinunter zu einzelnen Atomen und Molekülen zu messen und zu visualisieren.

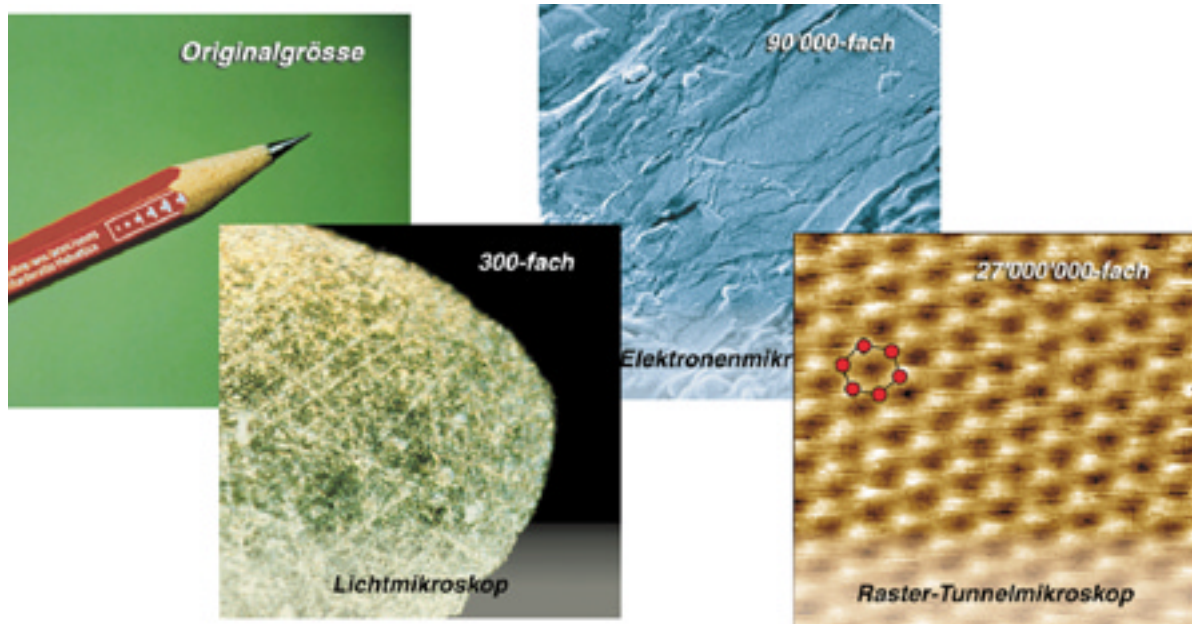
Einfaches, aber effektives Messprinzip

Das Rasterkraftmikroskop ist eines der wichtigsten Instrumente

der Nanowissenschaften. Es arbeitet nicht wie herkömmliche Mikroskope als riesige Lupe, sondern vielmehr wie ein miniaturisierter Zeigefinger, mit dem man eine Oberfläche spüren kann. Der Sensor besteht aus einem mikrofabrizierten Federbalken mit einer extrem scharfen Spitze am äusseren Ende. Eine hoch präzise Mechanik rastert die Oberfläche Zeile für Zeile ab und misst die Topografie. Dieses Messprinzip ist vergleichbar mit einer Nadel eines Plattenspielers, die



Prinzip des Rasterkraftmikroskops: Es arbeitet nicht wie herkömmliche Mikroskope als riesige Lupe, sondern vielmehr wie ein miniaturisierter Zeigefinger, mit dem man eine Oberfläche spüren kann.



Die Spitze eines Bleistifts (Graphit) ist in verschiedenen Vergrößerungen dargestellt. Das obere linke Bild zeigt den Bleistift in normaler Grösse. Das Bild darunter zeigt die Bleistiftspitze unter einem Lichtmikroskop mit einem Vergrößerungsfaktor von 300. Das nächste Bild wurde mit einem Elektronenmikroskop aufgenommen und vergrössert die Struktur mit einem Faktor 300 x 300. Mit einem modernen Rasterkraftmikroskop (Bild unten rechts) können einzelne Atome sichtbar gemacht werden, und es kann eine Vergrößerung von 300 x 300 x 300 erreicht werden. (Bilder: ZVG)

aus der Geometrie der Rillen auf einer Schallplatte eine Sinfonie erklingen lässt. Das Rasterkraftmikroskop kann mit seiner feinen Spitze eine atomare Struktur ertasten. Beim Abtasten der Oberfläche wirken Kräfte in der Grössenordnung von wenigen Nanonewton auf die Spitze. Die so auftretenden Kräfte sind ungefähr eine Mio mal kleiner als bei einem Plattenspieler. Diese unvorstellbar kleinen Kräfte reichen bereits aus, um den Federbalken zu verbiegen. Ein vom Federbalken reflektierter Laserstrahl erzeugt auf einer Fotodiodenmatrix ein elektrisches Differenzsignal. Aus diesem Signal kann die abgetastete Struktur Zeile für Zeile als digitales Bild rekonstruiert werden.

Fernsteuerung

Zwei Dekaden nach der Erfindung von zwei wegweisenden Instrumenten der Nanowissenschaften, dem Rastertunnelmikroskop und dem Rasterkraftmikroskop, erlaubt das RAFM ferngesteuerte und vollständig automatisierte Messungen von unterschiedlichen Ober-

flächen. Das Gerät eignet sich im Besonderen zum Einsatz im interdisziplinären Bereich, wo eine effiziente und direkt einsetzbare Technologie zur Charakterisierung von neuen Materialien benötigt wird.

Ursprünglich wurde das RAFM als letzte Ausbildungsstufe der virtuellen Lernumgebung NanoWorld entwickelt. Nachdem die im Rahmen dieses virtuellen Lehrangebots eingeschriebenen Studierenden zwei Ausbildungsstufen erfolgreich abgeschlossen haben, können Sie in die Rolle eines Forschers schlüpfen und mit einem realen Rasterkraftmikroskop des Typs *easy-scan* eigene Experimente durch-

führen. Die Studierenden können überall und jederzeit kollaborativ von verschiedenen Arbeitsstationen das RAFM steuern. Zusätzlich zu den gewohnten Mikroskopiefunktionen erlaubt das RAFM die automatisierte ferngesteuerte Positionierung des Messensors auf bis zu 20 verschiedenen Oberflächen. Damit kann mit einem einzigen Gerät eine Vielzahl an Experimenten ohne zusätzliches technisches Personal durchgeführt werden.

Individualisierung der Benutzerschnittstelle

Das RAFM basiert auf modernen Internettechnologien und ei-

Mail-box

Institut für Physik, Universität Basel, Klingelbergstrasse 82
4056 Basel, peter.fornaro@unibas.ch www.unibas.ch

Hersteller Rasterkraft-Mikroskop, Nanosurf AG, Grammetstrasse 14
4410 Liestal, Tel. 061 927 56 46, Fax 061 927 56 47, www.nanosurf.com

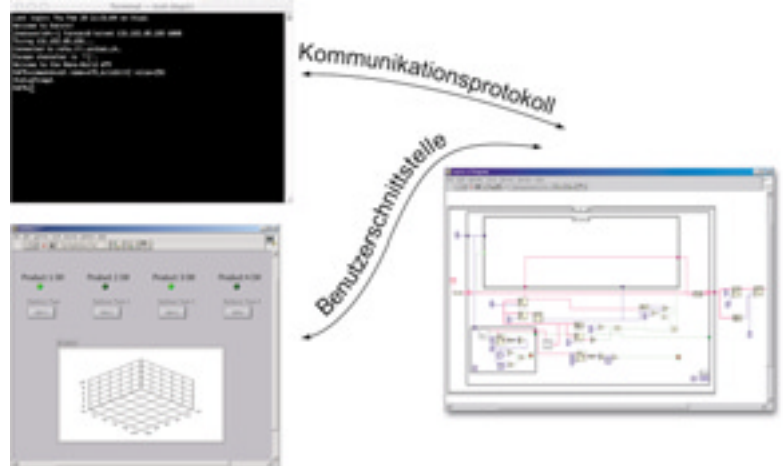
LabView-Support, National Instruments, Sonnenbergstrasse 53
5408 Ennetbaden, Tel. 056 200 51 51, Fax 056 200 51 55
ni.switzerland@ni.com, ni.com/switzerland

ner robusten, präzisen und einfach zu steuernden Positionsrobotik. Das Gerät wird vollständig durch einen LabView Server, welcher die Robotik, das Mikroskop wie auch die Remote-Zugänge kontrolliert und steuert, betrieben. Das RAFM kommuniziert bidirektional mit einem einfachen Protokoll und tauscht so Daten und Befehle mit den weltweit verteilten Arbeitsstationen aus. Durch die Abkapselung der Kommunikation in eine tiefere Schicht kann die Benutzerschnittstelle mit geringem Aufwand individualisiert werden. Dank LabView kann die Benutzerschnittstelle schnell den Wünschen der einzelnen Benutzer angepasst werden.

Software

Die Steuerung des RAFM, sowohl Robotik als auch Mikroskop, wurde vollständig in LabView programmiert. Die Architektur des Servers ist modular gehalten und besteht aus vier getrennten Schichten. Jede Schicht läuft als eigenständiger Prozess:

1. Die Hardwareschicht ist die unterste und kapselt die Mikroskopsteuerung und die Ansteuerung der Robotik.
2. In der zweiten Schicht ist die eigentliche Funktionalität des



Der LabView Server kann direkt via Kommandozeile in einem Terminalfenster oder über eine individuell erstellte Benutzerschnittstelle angesprochen werden. Das einfache Kommunikationsprotokoll basiert auf einzelnen Kommandos, welche Steueraktionen auslösen. Der ferngesteuerte Probenwechsel kann durch eine einfache Kommandozeile ausgelöst werden.

RAFM abgebildet. Das Kommunikationsprotokoll wie auch die entsprechenden Befehlsabläufe sind in dieser Schicht implementiert. Das Sicherheitsmanagement garantiert, dass nur zulässige Abläufe an die Hardwareschicht weitergegeben werden. So wird beispielsweise ein Probenwechsel nur dann erlaubt, wenn die feine Spitze weit genug von der Oberfläche entfernt ist und durch den Vorgang keinen Schaden nehmen kann.

3. Die Kommunikationsschicht unterstützt die Anbindung mehrerer Arbeitsstationen parallel via TCP/IP.

4. Die Benutzerschnittstelle schliesslich übersetzt die Aktionen der Nutzer in einfache Befehle des Kommunikationsprotokolls und schickt diese an die Kommunikationsschicht.

Die modulare Software-Architektur erlaubt eine schnelle Weiterentwicklung der Software und die spezifische Anpassung an unterschiedliche Benutzerwünsche. Zusätzlich bietet LabView eine umfangreiche Bibliothek von vordefinierten Modulen zur Visualisierung und Verarbeitung der Daten. Damit lassen sich schnell und einfach neue Funktionalitäten für das RAFM realisieren.

Zur Ausführung einer RAFM-Aktion kann ein einfaches Kommando an die zweite Schicht des RAFM-Servers geschickt werden. Die Steuerkommandos zwischen den Arbeitsstationen und dem Server werden als einzelne ASCII Kommandozeilen verschickt wie:

– *command= approach*

Kontrollierte Annäherung des Kraftsensors an die Probe ($d < 3 \mu\text{m}$). Dank diesem Kommunika-



Das RAFM kann vollständig ferngesteuert werden. Ein zentraler Server überwacht die Verbindung zu den verschiedenen Arbeitsstationen. Jede Arbeitsstation sendet mittels eines einfachen Protokolls Steuersignale an den Server und empfängt den Messdatenstrom vom RAFM.

tionsprotokoll können RAFM-Funktionen von allen Geräten mit Netzwerkanbindung aufgerufen werden. Erste Tests wurden mit Notebooks, PDAs und sogar Mobiltelefonen durchgeführt.

Die vom RAFM erhaltenen Messwerte können mit verschiedenen LabView-Komponenten analysiert und visualisiert werden. Die aktuelle Benutzerschnittstelle ermöglicht einen Anfänger- und einen Expertenmodus. Im Anfängermodus können die einfachen Grundfunktionen des RAFM unter hohen sicherheitsbedingten Einschränkungen genutzt werden, um das Gerät vor allfälligen Fehlmanipulationen zu schützen. Der Expertenmodus erlaubt die vollständige Kontrolle des RAFM mit allen betriebsbedingten Risiken.

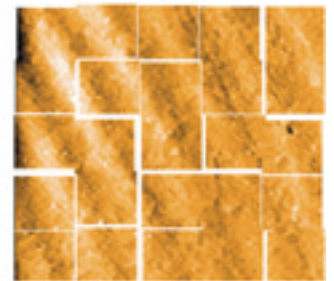
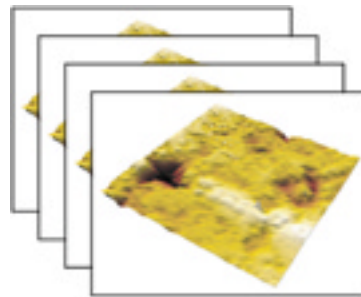
Komplexe Abläufe

Die freie Programmierbarkeit des Instruments ermöglicht das Abarbeiten frei definierbarer Stapelverarbeitungssequenzen. In einer Langzeitmessung wird dieselbe Oberfläche während mehrerer Wochen ohne Unterbruch abgebildet. Das RAFM kann bis zu 48 Stunden am Stück eine Oberfläche abtasten, ohne dass sichtbare Qualitätsänderungen der Messung auftreten. Nach mehreren Tagen können Veränderungen der Oberfläche, welche von externen Einflüssen oder aber vom Messprozess selbst herrühren, zeitkritisch abgebildet werden. Dank der präzisen Positionierungs-Robotik können Bereiche mit höchster Präzision abgebildet werden, die den eigentlichen Umfang des Messbereichs des Mikroskops

Im Anfängermodus können die einfachen Grundfunktionen des RAFM unter hohen sicherheitsbedingten Einschränkungen genutzt werden, um das Gerät vor allfälligen Fehlmanipulationen zu schützen. Der Expertenmodus erlaubt die vollständige Kontrolle des RAFM mit allen betriebsbedingten Risiken.



Links: Wiederholtes Messen der gleichen Stelle einer Oberfläche über eine lange Zeit kann in einer Sequenz von Einzelbildern oder in einem Film dargestellt werden. Kleine Veränderungen der Oberfläche können so sichtbar gemacht werden. Rechts: Das Zusammensetzen von überlappenden Einzelbildern erlaubt, einen grösseren Bereich mit hoher Auflösung darzustellen.



bei weitem übersteigen. Die systematische Verschiebung des Messbereichs erzeugt ein Puzzle-Bild der Oberfläche. Überlappende Bereiche werden Quadrant um Quadrant aufgenommen und am Schluss zu einem vollständigen, hoch auflösenden Bild zusammengefügt.

Erweiterungspotenzial

Das RAFM besitzt durch die flexible Steuer-Software ein enormes Erweiterungspotenzial. Dank seiner einfachen Bedienung hat es für die Ausbildung im Bereich der Nanowissenschaften bahnbrechende Vorteile. Studierenden wird auf diese Art ermöglicht, sich vom persönlichen Studienplatz Expertenwissen aus realen Experimenten anzueignen. Mit der kollaborativen Schnittstelle arbeiten die Studierenden als Team an derselben Stufe des experimentellen Ablaufs.

Industrieanwendungen

RAFM ist zudem für den Einsatz im industriellen Betrieb hervorragend geeignet. Speziell die nahezu unbeschränkte Flexibilität des Systems, welche durch die Möglichkeit der zusätzlichen Programmierung gegeben ist, birgt entscheidende Vorteile. Eine Verbesserung bei der Automatisierung von Messsequenzen zum Einsatz in der Qualitätsprüfung von Oberflächen im industriellen Umfeld ist geplant. In weiteren Schritten wird versucht, den mikroskopischen Bildausschnitt einer Messung mit den makroskopischen Informationen der Videoinformation zu verbinden. Durch diese Kombination sollen interessante Strukturen auf Proben selbstständig gefunden, gemessen und die Daten autonom analysiert werden. ■

Quelle:

Originalartikel von:
P. Fornaro, M. Guggisberg,
T. Gyalog, C. Wattinger,
H. Burkhart, E. Meyer and
H.-J. Güntherodt
Universität Basel