

DISS. ETH No. 15449

Model-Based Control of Atomic Force Microscopes

Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF
TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Georg Schitter
Dipl.-Ing.
born April 28, 1974
citizen of Austria

accepted on recommendation of
Prof. Dr. Andreas Stemmer (examiner)
Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer (co-examiner)

Zurich, 2004

Abstract

The atomic force microscope (AFM) is one of the most important systems to address the nanometer scale. The applications of this system span the entire range from imaging with sub-nanometer resolution, over mechanical and chemical characterization of the sample surface, up to the handling of smallest particles that are just a few nanometer in size. Therefore, this instrument is used in biology as well as in physical research and in the semiconductor industry. But the broad field of AFM applications cannot hide the fact that the main limitation of these systems is given by the slow imaging speed.

Since the scanning of the sample has to be performed line by line, acquisition of one image usually takes a few minutes. Beside of drift problems that complicate the imaging of the sample, the range of applications is also restricted by the limited imaging speed. An imaging period of about one minute per frame impedes mapping of dynamic biological processes. The poor time resolution disables observation of most biological and chemical processes in real-time. In industrial applications the limited speed reduces the throughput of the AFM system, i.e. in the quality engineering process only a low number of samples can be taken or, alternatively, more AFM systems have to be used in parallel.

The imaging speed of the AFM is limited by the dynamic behavior of the moving parts. This thesis deals with the modeling and analysis of the AFM system's dynamics in all three spatial directions and presents improved controllers to enable high-speed AFM imaging.

Due to the lateral dynamics the scan rate is limited to about 1 per-

cent of the fundamental resonance frequency of the scanning system. When scanning faster the tracking accuracy of the lateral positioning unit drops and severe imaging artifacts occur due to the system dynamics and the coupling between the different axis of motion. By implementing a filter that is based on a model of the lateral AFM dynamics the achievable scanning rate can be increased by a factor of 15.

When measuring the sample topography the tip-sample interaction force is held constant in a feedback operation. To speed up this mode of operation and to reduce the residual measurement error a new control strategy is applied. The bandwidth of the feedback operated AFM is increased by utilizing modern model-based control methods. Additionally, one can make use of the fact that normally two adjacent scan-lines are quite similar. The actual scan line can thus be taken as an approximation of the next one and can be used to compensate the expected topography in advance. To this end a model-based feedforward controller tracks the positioner in the vertical direction to the topography of the last recorded scan line, while the model-based feedback-controller simultaneously performs the improved feedback-operation. The model-based feedback and the new feedforward controller are combined to a two-degrees-of-freedom controller which considerably reduces the residual control error.

By implementing these new controllers the system dynamics gets compensated in all three spatial directions increasing the performance as well as the time-resolution of the AFM.

These new schemes can also be adapted to other operation modes of the AFM and even to other scanning probe microscopes. The achieved improvement is an important step towards real-time-imaging with the atomic force microscope.

Kurzfassung

(german abstract)

Das Rasterkraftmikroskop (AFM) ist eines der wichtigsten Werkzeuge um in den Bereich von wenigen Nanometern vordringen zu können. Die Anwendungsmöglichkeiten dieses Systems reichen dabei vom Abbilden von Oberflächen mit Sub-Nanometer-Auflösung über chemische und mechanische Charakterisierung der Probenoberfläche bis hin zur Handhabung kleinster Partikel von nur wenigen Nanometern Durchmesser. Dieses Mikroskop kommt dabei in der Biologie ebenso zum Einsatz wie in der physikalischen Forschung und Halbleiterindustrie. Der breite Anwendungsbereich dieser Systeme täuscht jedoch nicht über den Hauptnachteil dieser Geräte hinweg: die limitierte Messgeschwindigkeit.

Da das Abrastern der Probenoberfläche ein iterativer Prozess ist, dauert die Aufnahme eines Bildes normalerweise mehrere Minuten. Abgesehen von Drift-Problemen, die das Abbilden der Probe bei langer Messdauer erschweren, schränkt die limitierte Geschwindigkeit auch den Anwendungsbereich des AFMs ein. So ist beispielsweise das Abbilden dynamischer biologischer Prozesse nur äusserst eingeschränkt möglich. Die schlechte zeitliche Auflösung erlaubt es nicht, chemische und biologische Prozesse in Echtzeit zu beobachten. In der industriellen Anwendung vermindert die langsame Messgeschwindigkeit den Durchsatz des Gerätes, was in der Qualitätssicherung beispielsweise bedeutet, dass nicht so viele Proben genommen werden können oder mehrere Geräte parallel eingesetzt werden müssen.

Die Messgeschwindigkeit des Rasterkraftmikroskopes ist durch die Dynamik der beweglichen Teile beschränkt. Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Modellierung und Analyse der Dynamik des AFMs in allen Bewegungsachsen und einer verbesserten Regelung, um schnellere Messungen zu ermöglichen.

Durch die laterale Dynamik der AFMs ist die maximale Scan-Rate auf circa 1 Prozent der ersten Resonanzfrequenz der Scan-Einrichtung limitiert. Bei schnelleren Messungen stimmt die Positionierung mit dem gewünschten Scan-Signal nicht mehr überein und es kommt durch die Dynamik und die Koppelung innerhalb der verschiedenen Bewegungsachsen des AFMs zu Abbildungsartefakten. Durch Einsatz eines Filters, das auf dem Modell der Dynamik in Scan-Richtung basiert, kann die Scan-Rate des Systems circa um einen Faktor 15 gesteigert werden.

In der vertikalen Positionierichtung wird zur Topographiemessung der Abstand zwischen der Probe und der Messsonde durch einen Feedback-Regler konstant gehalten. Um diesen Messmodus zu beschleunigen, respektive den Messfehler zu verringern, kommt ein neues Regelschema zum Einsatz. Zum Einen wird die Bandbreite des Regelkreises durch den Einsatz eines modellbasierten Feedback-Reglers erhöht. Zum Anderen macht man sich die Tatsache zu Nutze, dass zwei benachbarte Scan-Zeilen normalerweise eine sehr ähnliche Topographie aufweisen. Somit kann die letzte Scan-Zeile als Schätzung der aktuellen Topographie verwendet und mittels einer modellbasierten Vorsteuerung bereits im Vorhinein kompensiert werden. Diese beiden Regler, Vorsteuerung und Feedback, werden zu einem Regler mit zwei Freiheitsgraden kombiniert und reduzieren den verbleibenden Messfehler beträchtlich.

Durch den Einsatz dieser modellbasieren Regler wird die Dynamik des Mikroskopes in allen drei Positionierachsen kompensiert und die Performance und zeitliche Auflösung des AFMs gesteigert.

Diese Schemata lassen sich auch auf weitere Messmoden des AFMs und andere Scanning Probe Systeme erweitern und sind ein wichtiger Schritt in Richtung Real-Time-Imaging mit dem Rasterkraftmikroskop.