

Kapitel 1

Rasterkraftmikroskopie und -spektroskopie

Die Rasterkraftmikroskopie (RKM) gehört zu den ortsauflösenden Raster-sondenmethoden zur Oberflächenanalyse und wurde von Binnig, Quate und Gerber 1986 [8] entwickelt. Anders als die kurz zuvor von Binnig und Rohrer entwickelte Rastertunnelmikroskopie [9] (RTM) ist sie jedoch nicht auf leitfähige Proben limitiert und somit sehr geeignet für das Studium der lokalen Eigenschaften von Molekülen auf isolierenden Substraten. Die RKM basiert auf dem Prinzip, dass eine Messspitze zeilenweise über die Probenoberfläche gerastert wird und die Kräfte zwischen Probe und Messspitze gemessen werden. In der überwiegenden Zahl von Rasterkraftmikroskopen wird die Messspitze dazu an dem freien Ende eines einseitig befestigten Federbalkens integriert, dessen Auslenkung detektiert wird. Im statischen Modus ist diese Auslenkung proportional zur Kraft zwischen Messspitze und Probenoberfläche. Im dynamischen Modus oszilliert der Federbalken. In diesem Fall kann die Änderung der Frequenz, der Amplitude oder der Phasenlage der Oszillation auf Grund der Messspitze-Probe-Wechselwirkung detektiert werden. Die Rasterbewegung in der (x,y) -Ebene und die Feineinstellung des Abstandes in z -Richtung zwischen Probe und Messspitze, die je nach Anwendungsfall von wenigen nm bis zu einigen μm reichen, wird dabei durch piezoelektrische Stillelemente ermöglicht. In den hier verwendeten Rasterkraftmikroskopen kommen dazu Röhrenpiezos mit 4 Segmenten zum Einsatz, die Bewegungen in den Richtungen x , y und z ermöglichen.

1.1 Nicht-Kontakt-Rasterkraftmikroskopie

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich mit der frequenzmodulierten Nichtkontakt-Rasterkraftmikroskopie [25] gearbeitet. Dabei wird der Federbalken, an dessen freiem Ende die Messspitze befestigt ist, über ein piezoelektrisches Stellglied (Anregungspiezo) an der Basis des Federbalkens zu Schwingungen mit der Frequenz f_0 und einer Amplitude A angeregt. Wie in Abbildung 1.1 gezeigt, schwingt der Federbalken zuerst als harmonischer Oszillator mit einer Frequenz f_0 . Wird jetzt die Probe an die Messspitze angenähert, wirken verschiedene Kräfte auf die Messspitze, infolge dessen die Oszillation eine Änderung erfährt. Zum parabolischen Potential des harmonischen Oszillators E_{FB} addiert sich das Wechselwirkungspotential von Messspitze und Probe E_{SP} , wodurch sich ein effektives Potential $E_{\text{eff}} = E_{\text{FB}} + E_{\text{SP}}$ ergibt. Um eine Vorstellung davon zu geben wie stark diese Änderung ist, sei gesagt, dass bei typischen Messparametern die Potentiale E_{SP} und E_{FB} in etwa im Verhältnis von 1 : 1000 stehen ($E_{\text{SP}} \approx 1 \text{ eV}$, $E_{\text{FB}} \approx 1 \text{ keV}$). Als Folge dessen ergibt sich eine Verschiebung der Resonanzfrequenz f_0 um Δf zur aktuellen Resonanzfrequenz f . Dabei bewirken attraktive Wechselwirkungen eine negative Frequenzverschiebung Δf und repulsive eine positive Verschiebung. Die Frequenzverschiebung Δf ist somit ein Maß für die Messspitze-Probe-Wechselwirkung. Die einzelnen für diese Arbeit relevanten Kraftkomponenten werden ausführlich in 1.3 diskutiert. Das Rastern einer Probe kann dabei in zwei verschiedenen Messmodi erfolgen:

- Im **Constant Height Modus** wird die Messspitze in einem konstanten Abstand z_{const} zur Probenoberfläche geführt und parallel zu der Rasterbewegung die Frequenzverschiebung $\Delta f(x, y)$ aufgenommen.
- Im **Constant Δf Modus** wird hingegen ein Regelkreis eingesetzt, der über entsprechende Steuerspannungen am Röhrenpiezo den Abstand zwischen Messspitze und Probenoberfläche so einstellt, dass die Frequenzverschiebung Δf konstant bei einem zuvor eingestellten Sollwert bleibt. Wird dieser Sollwert verändert, führt dies je nach Vorzeichen der Änderung zu einem kleineren oder größeren Abstand z . Dementsprechend stellen hier die Steuerspannungen für den Röhrenpiezo das Messsignal dar. Sie können über entsprechende Eichparameter später in Längeneinheiten umgerechnet werden und geben die Höheninformation $z(x, y)$ in nm an.

In beiden Fällen wird, wie in Abbildung 1.2 gezeigt ist, ein Frequenzdemodulator eingesetzt, um aus dem oszillierenden Signal des Auslenkungsdetektors die aktuelle Schwingfrequenz des Federbalkens zu bestimmen. Im Fall des Constant Height Modus entstehen aus den Messwerten $\Delta f(x, y)$ -Darstellungen. Im

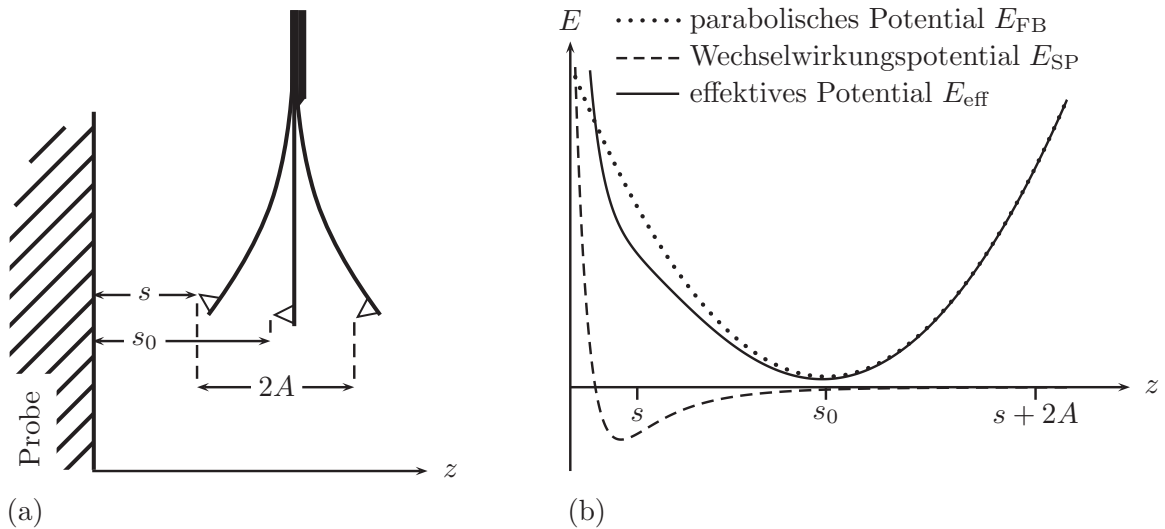


Abbildung 1.1: a) Skizze, um die verschiedenen Abstände z , s zwischen Spitze und Probe sowie die Schwingungsamplitude A des Federbalkens zu definieren. b) Darstellung der Potentiale, die bei der Beschreibung der Federbalkenschwingung eingehen. Der ungestörte Federbalken hat das parabolische Potential eines harmonischen Oszillators (E_{FB}). Wird eine Probe an die Messspitze am Federbalken angenähert, ergibt sich durch die Überlagerung mit dem Potential zwischen Probe und Spitze ein neues (effektives) Potential E_{eff} für den Federbalken. Als Wechselwirkungspotential zwischen Probe und Messspitze E_{SP} wird hier ein Lennard-Jones-Potential angenommen (siehe auch Abschnitt 1.3).

Constant Δf Modus hält der z -Regelkreis durch Änderungen des Abstands z diesen Wert konstant und die Messdaten werden als $z(x, y)$ -Darstellung aufgezeichnet. Nachfolgend wird diese Darstellung und der z -Regelkreis auch als Topographie bzw. Topographieregelkreis bezeichnet.

Amplituden- und Phasenregelkreis

Bei der Federbalkenschwingung handelt es sich im beschriebenen Experiment um eine selbstangeregte Schwingung, d.h. die bestehende Schwingung wird als Eingangssignal für einen Regelkreis verwendet, der ein entsprechendes Ausgangssignal mit einer Phasenverschiebung von $\pi/2$ an den Anregungspiezo gibt. Dieser kombinierte Amplituden- und Phasenregelkreis regelt damit die Anregung a_{exc} der Schwingung, wobei jeweils für die Amplitude und die Phase eigene Regelparameter definiert werden können. Diese permanente Anregung ist notwendig, da der schwingende Federbalken durch verschiedene dissipative Prozesse Bewegungsenergie verliert und andernfalls je nach Güte mehr oder weniger schnell zum Stillstand käme. Der Regelkreis steuert dabei die Spannung am Anregungspiezo und kann in zwei verschiedenen Modi betrieben werden:

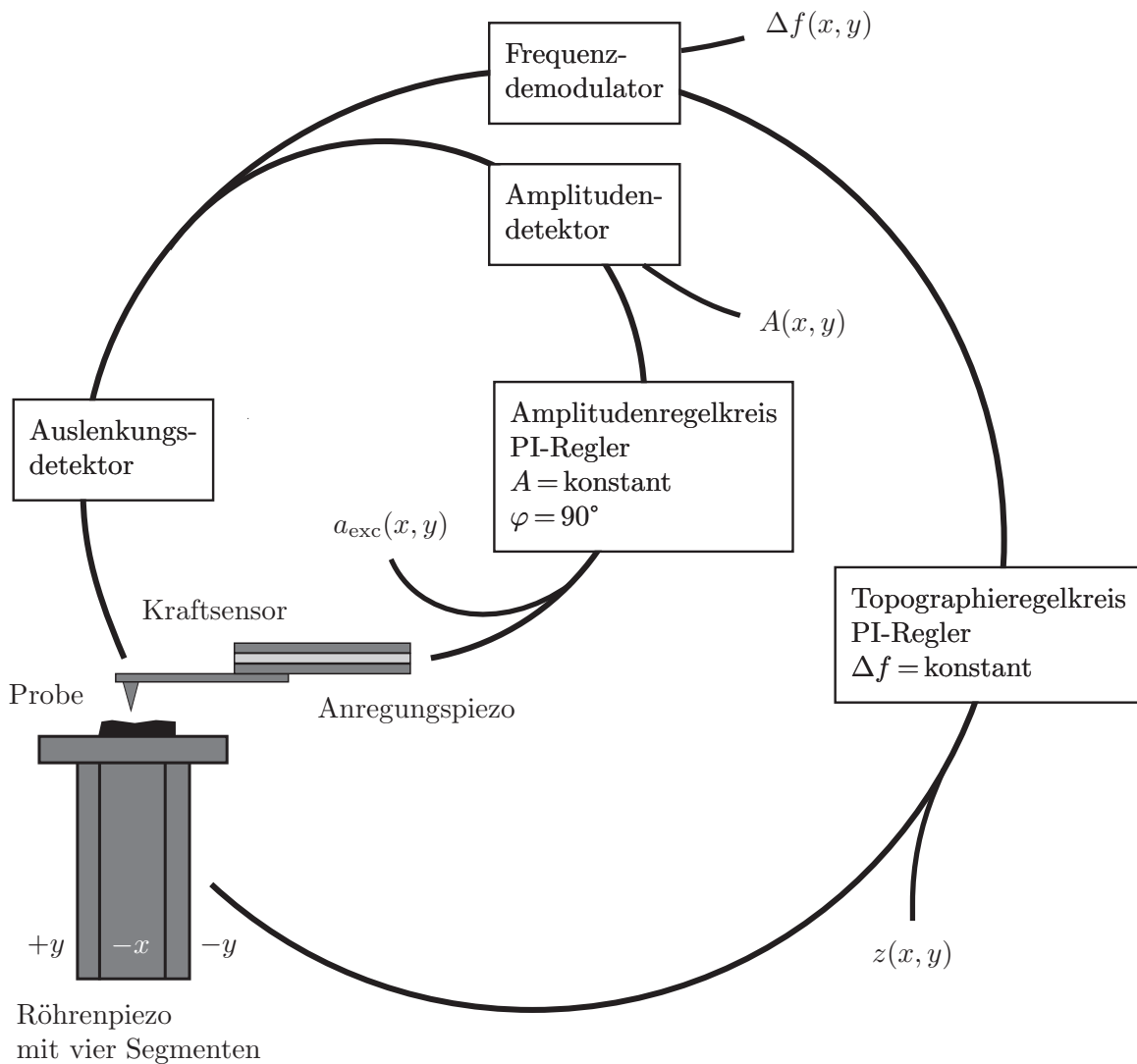


Abbildung 1.2: Skizze der Funktionsweise des Topographie- sowie des Amplituden/Phasenregelkreises. Die Größen Δf , z , A , φ und a_{exc} sind dabei die Sollwerte der verschiedenen Betriebsarten des RKM. Teilweise bilden sie aber auch die Datenkanäle, wenn sie nicht als Sollwert verwendet werden. Die Phasenverschiebung φ wird entweder durch einen Phasenschieber oder, wie im vorliegenden Experiment, durch einen eigenen PI-Regler gegeben.

- Im **CA-Modus** (engl. **constant amplitude**) bildet die Schwingungsamplitude A_0 des Federbalkens den Sollwert der Regelung und wird somit konstant gehalten. Die Anregung $a_{\text{exc}}(x, y)$ kann in diesem Modus als zusätzlicher Datenkanal aufgenommen werden und ist ein Maß für die dissipierte Energie. Üblicherweise wird diese Energie in Elektronenvolt pro Schwingungszyklus angegeben [26].