

Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum

Rastertunnelmikroskop

– *Auswertung* –

Armin Burgmeier

Robert Schittny

1 Präparation einer Tunnelspitze

Da noch eine gute funktionierende Spitze im Mikroskop eingebaut war, konnten wir hier auf die Präparation einer neuen Tunnelspitze verzichten.

2 Untersuchung der Goldprobe

Nachdem wir uns mit der Steuerungssoftware des Nanosurf-RTM vertraut gemacht hatten, bauten wir eine geflammte Goldprobe in das Mikroskop ein, welche wir daraufhin untersuchten.

Eine ungeflammte Goldprobe war nicht vorhanden.

Nach dem Einbau nahmen wir zunächst ein erstes Testbild auf, um uns näher mit dem RTM vertraut zu machen. (siehe Abbildung 1)

Aus dem Testbild können wir erkennen, dass die verwendete Spitze wohl gut verwendbar ist. Wir erkennen jedoch einerseits relativ häufig auftretende Störungen, die als waagrechte Streifen erkennbar sind, sowie ein leicht schräg verlaufendes Streifenmuster, welches dem gesamten Bild überlagert ist. Diese Störungen konnten wir trotz Verändern der Scanparameter (Tunnelstrom, Verstärkung, Scangeschwindigkeit und -auflösung) nicht verhindern.

2 Untersuchung der Goldprobe

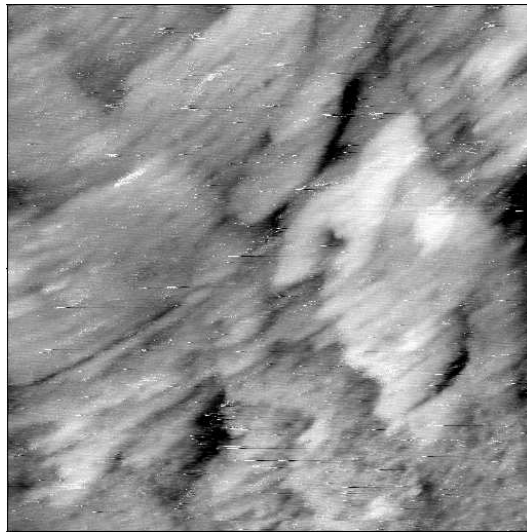


Abbildung 1: Goldoberfläche, 200 nm × 200 nm

2.1 Strom-Spannungs-Kennlinie

Wir nehmen zunächst eine Strom-Spannungs-Kennlinie im Bereich von 0,2 V bis −0,2 V Spitzenspannung auf, zu sehen in Abbildung (2).

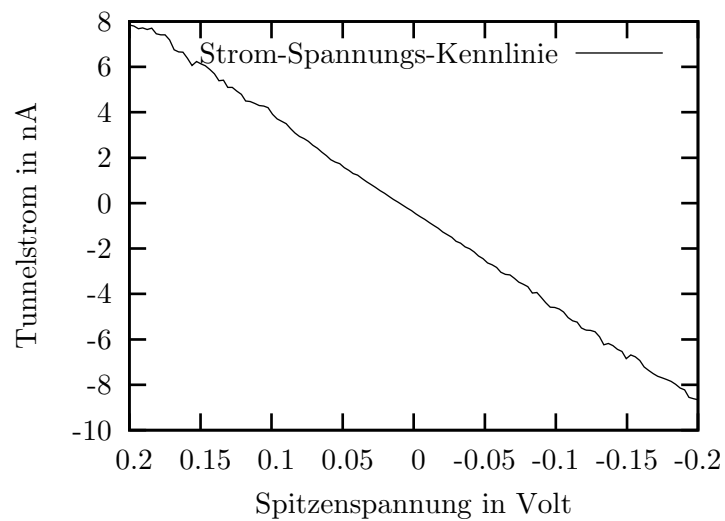


Abbildung 2: Strom-Spannungs-Kennlinie der Goldprobe

Die Kennlinie ist offensichtlich in guter Näherung linear. Dies spiegelt die theoretisch erwartete lineare Abhängigkeit des Tunnelstroms I_T von der Tunnelspannung U_T wieder, die im Bereich von kleinen Tunnelspannungen gilt. Im von uns verwendeten Spannungsbereich gilt diese Linearität offenbar.

2.2 Terrassenförmige Oberfläche

Wir wollten nun die Ausbildung von großen atomar flachen Terrassen untersuchen, die sich bei der geflammten Goldprobe ausbilden. Dazu fuhren wir verschiedene Bereiche der Probe an, um eine möglichst gute Stelle für die Untersuchung zu finden. Leider konnten wir die Terrassen nicht so gut ausmachen, wie sie in der Vorbereitungshilfe abgebildet waren. Abbildung 3 zeigt die von uns verwendete Aufnahme.

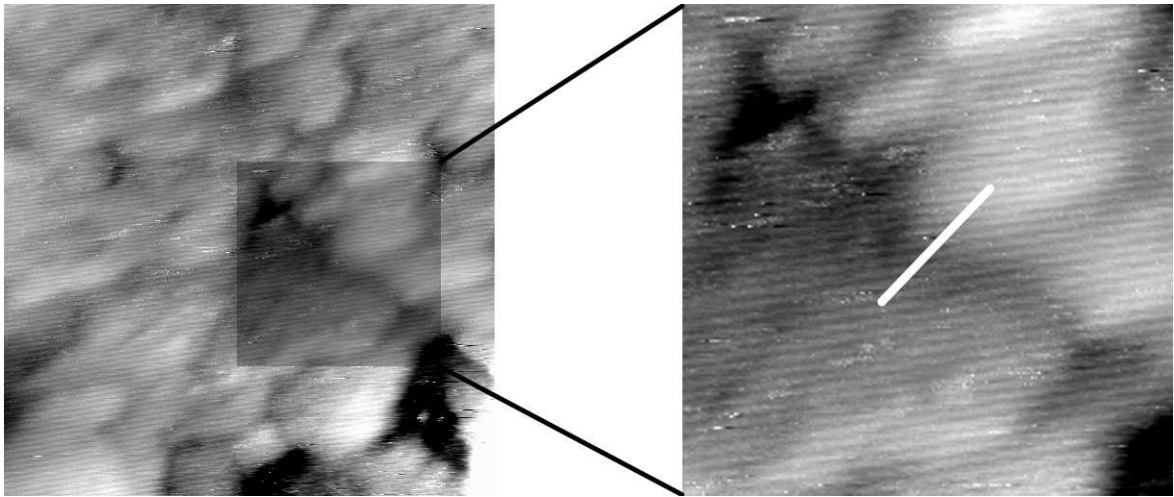


Abbildung 3: Geflammte Goldoberfläche; links $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$, rechts $42 \text{ nm} \times 42 \text{ nm}$

Die weiße Linie kennzeichnet die Stufe zwischen zwei Terrassen, welche wir zur Bestimmung des Terrassenabstands heranzogen.

Bildung der Stufen Beim Aufdampfen auf Quarzglas wächst Gold zunächst polykristallin, was in einer sehr körnigen und rauen Oberfläche resultiert. Durch das sog. *Flammen* können sich jedoch die beobachteten atomar flachen Schichten ausbilden. Durch die Zuführung von Wärme wird die Oberflächendiffusion der Goldatome verstärkt, was das Einnehmen der energetisch günstigsten Anordnung stark begünstigt. Diese Anordnung zeichnet sich gerade durch die atomar flachen Bereiche aus, die bevorzugt in $[111]$ -Richtung orientiert sind.

Auswertung des Bildes Über die im Bild gekennzeichnete Stufe legten wir nun mittels der NanoSurf-Software mehrere *cross-sections*, die uns jeweils ein Höhenprofil entlang einer Linie lieferten. Diese sind in den Abbildungen 4 bis 6 zu sehen.

Wir bestimmten jeweils den Höhenunterschied der Stufe, indem wir Geraden durch die Bereiche vor und nach der Stufe legen und deren Höhen voneinander abziehen. Wir erhalten dabei folgende Ergebnisse:

2 Untersuchung der Goldprobe

Bild	h_1 in Å	h_2 in Å	$ h_1 - h_2 $ in Å
1	-2,2	0,3	2,5
2	-1,9	0,7	2,6
3	2,0	1,5	3,5
4	-0,7	1,7	2,4
5	-0,4	2,0	2,4

Tabelle 1: Stufenhöhen

Wert 3 fällt dabei als „Ausreißer“ auf, hier könnte es sein, dass wir die Linie für das Höhenprofil ungünstig gewählt und nicht mehr nur die eigentliche Stufe getroffen haben. Als mittlere Stufenhöhe erhalten wir damit

$$\bar{h} = 2,68 \text{ \AA} , \quad (1)$$

was dem realen Wert von $h = 2,4 \text{ \AA}$ ziemlich nahe kommt. Ohne den Ausreißer würden wir diesen Wert noch genauer treffen. Wir können damit aussagen, dass die Kalibrierung des z-Piezos des RTM von vornherein sehr gut war und hier nicht weiter geändert werden muss.

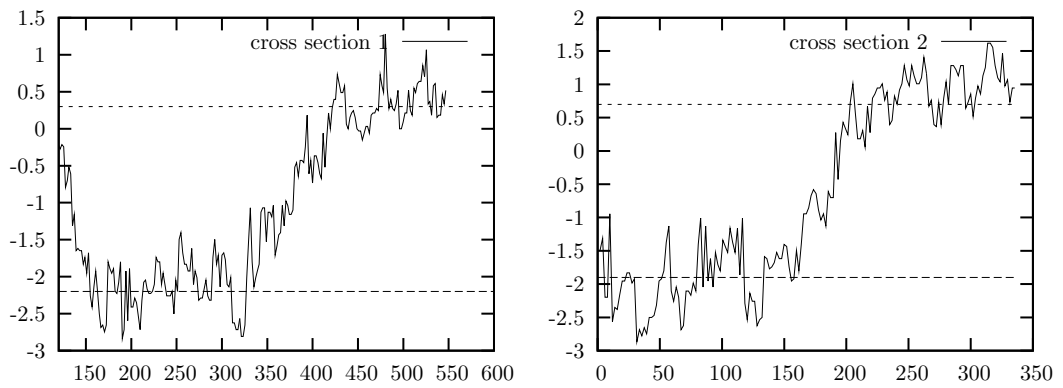


Abbildung 4: Höhenprofile an einer atomaren Terrasse der Goldoberfläche, x - und y -Achse jeweils in Å

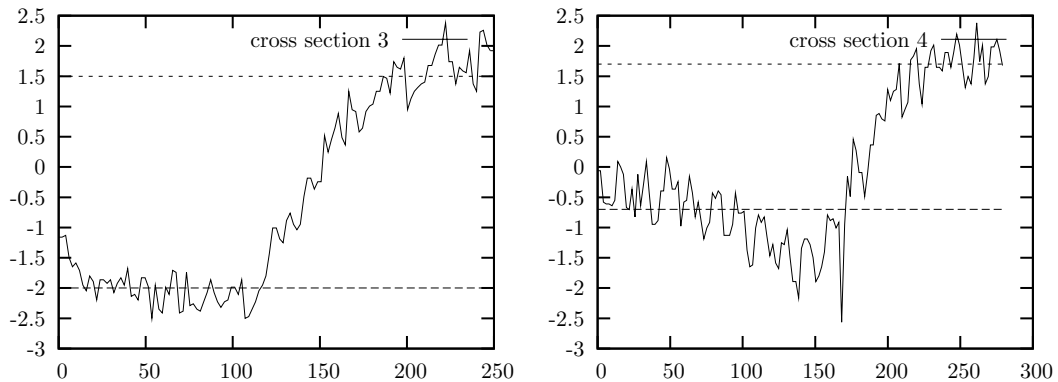


Abbildung 5: Weitere Höhenprofile

2 Untersuchung der Goldprobe

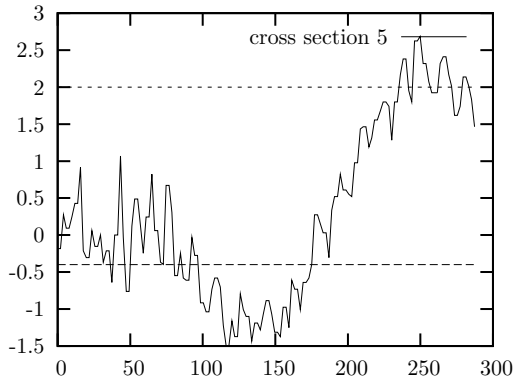


Abbildung 6: Weiteres Höhenprofil

2.3 Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms

Die Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms haben wir ebenfalls mit der Goldprobe untersucht. Dabei wählten wir eine Tunnelspannung von $U_T = 0,3$ V.

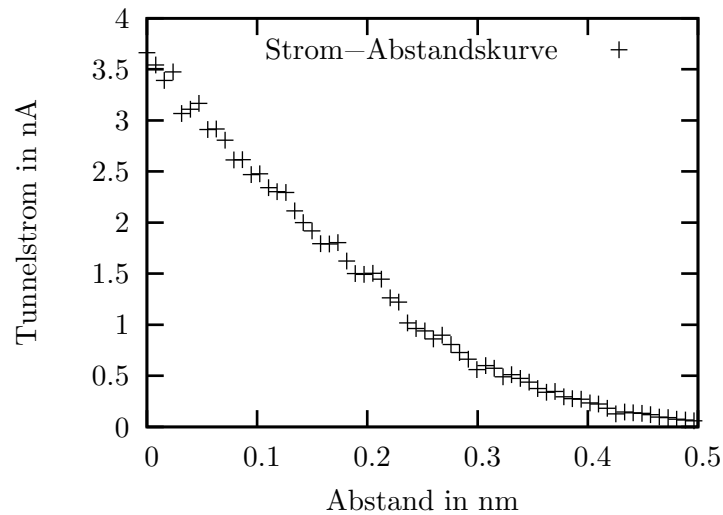


Abbildung 7: Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms

Die Abstandswerte sind dabei relativ zu verstehen. Dem Abstand 0nm entspricht also ein gewisser Tunnelstrom, und höhere Abstandswerte sind relativ dazu gemeint, weiter weg von der Probe.

Der exponentielle Zusammenhang lässt sich mit einer logarithmischen Auftragung noch besser erkennen.

2 Untersuchung der Goldprobe

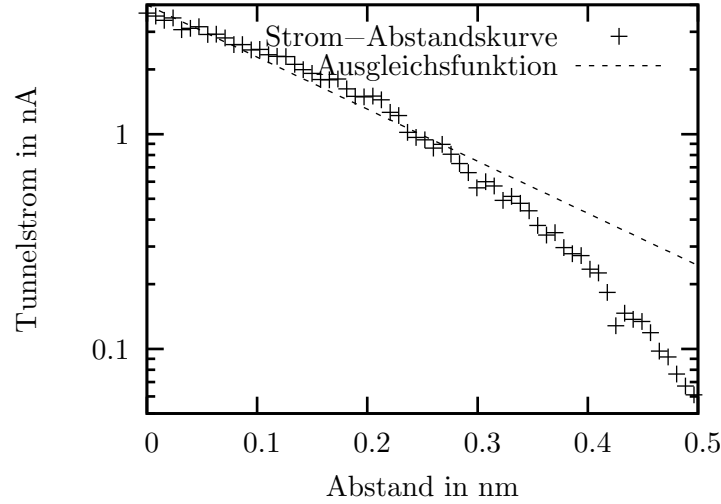


Abbildung 8: Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms, logarithmische Auftragung

Bei größeren Abständen wird der Tunnelstrom so klein, dass es überhaupt sehr schwierig ist, überhaupt noch einen Strom zu messen, daher wundert es uns nicht, dass die Ausgleichsgerade in dem Bereich nicht mehr so gut zu den Messwerten passt wie bei kleineren Abständen.

Der Fit einer Exponentialfunktion $I(d) = Ae^{-2\kappa d}$ liefert

$$\begin{aligned} A &= (3,99 \pm 0,07) \text{ nA} \\ \kappa &= (2,79 \pm 0,08) \frac{1}{\text{nm}} \end{aligned}$$

Die mittlere Potentialbarrierenhöhe $\bar{\varphi}$ hängt mit der Abklingkonstanten κ wie folgt zusammen:

$$\kappa^2 = \frac{2m_e}{\hbar^2} \bar{\varphi} \quad (2)$$

Da diese Formel in der Vorbereitungsmappe bereits ausführlich hergeleitet wurde gehen wir nicht näher darauf ein. Für unser κ folgt daraus $\bar{\varphi} = 0,30 \text{ eV}$.

Der statistische Fehler ergibt sich durch einfache Fehlerfortpflanzung des Fehlers von κ :

$$\sigma_{\bar{\varphi}} = \left| \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \kappa} \right| \sigma_{\kappa} = \frac{2\kappa \hbar^2}{2m_e} \sigma_{\kappa} = 0,02 \text{ eV} \quad (3)$$

Es ergibt sich also

$$\bar{\varphi} = (0,30 \pm 0,02) \text{ eV} \quad (4)$$

Im Gegensatz zu im Vakuum erwarteten 4oder 5eV ist unser Wert um etwa eine Größenordnung kleiner. Dies deutet darauf hin, dass die Luftmoleküle die effektive Potentialbarriere absenken und das Tunneln daher noch auf größere Entfernungen erlauben.

3 Nanogrid

Wir bauten nun die NanoGrid-Probe in das RTM ein, um die Kalibrierung der x- und y-Piezos zu überprüfen. Wir erhielten zwar sehr schöne Aufnahmen von der zuvor schon beschriebenen grobkörnigen Struktur der ungeflamten Goldoberfläche, konnten jedoch trotz mehrfachen Wechsels des zu rasternden Bereiches die Strukturen des NanoGrid nicht entdecken. Abbildung 9 zeigt die aufgenommene Struktur.

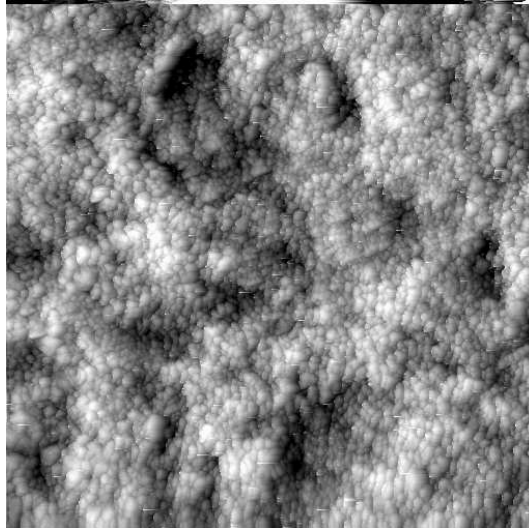


Abbildung 9: Aufnahme der NanoGrid-Probe; 715 nm \times 715 nm

Mit viel Phantasie sind hier einzelne Teile des 160 nm-Musters zu sehen, für eine Kalibrierung der Piezosteuerungen reicht dies aber bei weitem nicht aus.

Da auf dem verwendeten Rechner auch die Daten vorheriger Versuchstage vorhanden waren, möchten wir hier kurz ein „passableres“ Vergleichsbild zeigen (Abbildung 10).

Bei einer Kantenlänge von 568 nm ist hier sehr schön die Struktur des Grids zu erkennen, wenn auch die Auflösung des Bildes nicht so gut ist und viele Störungen (waagrechte Streifen) auftreten.

4 Untersuchung einer Graphitprobe

Als nächstes untersuchten wir die Graphitprobe im RTM. Bevor wie diese eingebaut haben, haben wir mit Tesafilm zwei Schichten von der Oberfläche abgezogen um eine möglichst flache Probe zu erhalten. Nach Einbau derselben haben wir zunächst wieder eine Strom-Spannungskennlinie aufgenommen.

4 Untersuchung einer Graphitprobe

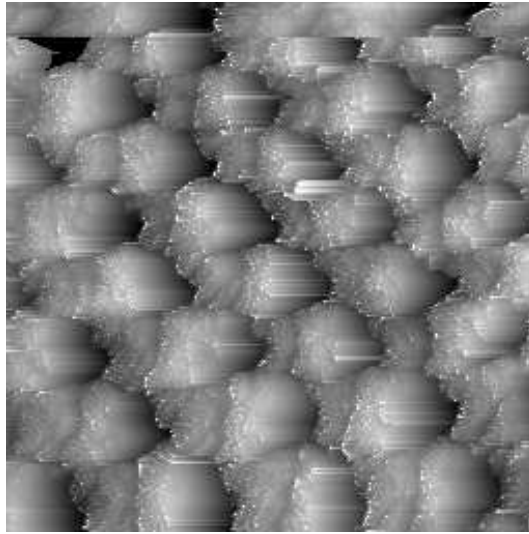


Abbildung 10: Oberfläche des Gold-Nanogrids, $568 \text{ nm} \times 568 \text{ nm}$

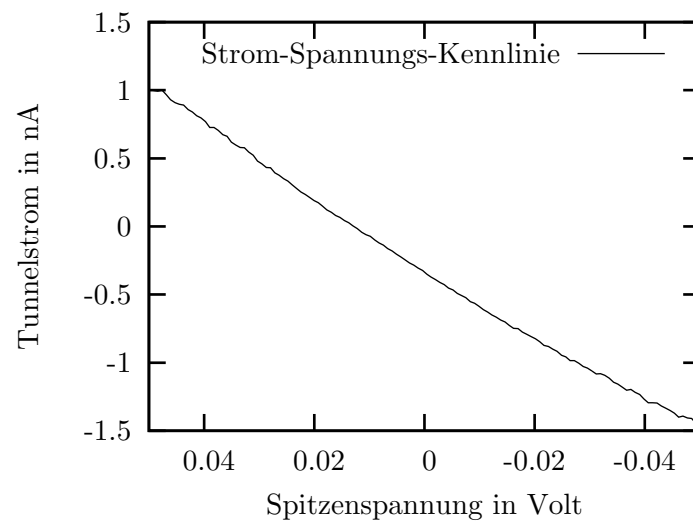


Abbildung 11: Strom-Spannungs-Kennlinie der Graphitprobe

Wieder ist die Kennlinie bei kleinen Spannungen linear. Auch bei mehrfachen Aufnahmen der Kennlinie erhielten wir dasselbe Ergebnis. Es liegen also gute Tunnelbedingungen vor.

Zunächst wählten wir einen relativ großen Bereich von $(100\text{nm})^2$, damit wir daraus einen möglichst flachen Bereich für die atomare Auflösung auswählen können. Abbildung 12 zeigt die erhaltene Aufnahme.

4 Untersuchung einer Graphitprobe



Abbildung 12: Aufnahme der Graphitprobe; $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$

Es ist deutlich zu sehen, dass der Bereich unten links vergleichsweise flach ist. Die folgende $(3 \text{ nm})^2$ -Aufnahme stammt daher von dort. Bei einem Gitterabstand von $2,46 \text{ \AA}$ erwarten wir also etwa 12 Atome in beiden Richtungen zu sehen.

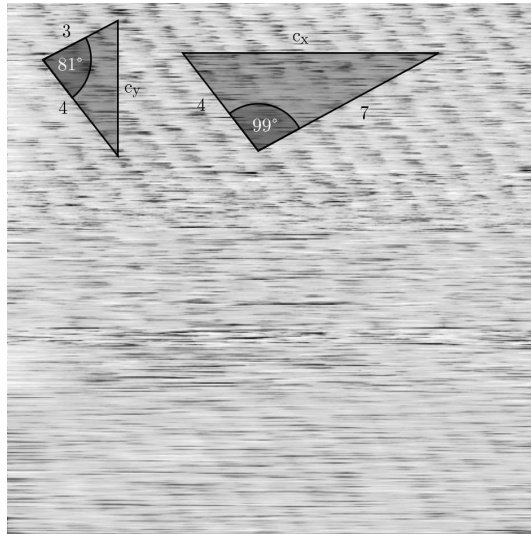


Abbildung 13: Aufnahme der Graphitprobe; $3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$

Während dieser Aufnahme haben wir mehrfach die Messparameter geändert, da am Anfang noch keine atomare Struktur zu erkennen war (das Bild wurde von unten nach oben aufgenommen). Am Schluss kam dann die Struktur des Graphits zum Vorschein, und wie erwartet zeigt sich nur eine dreieckige Kristallstruktur. Dabei wählten wir einen Tunnelstrom von $I_T = 4 \text{ nA}$, eine Tunnelspannung von $U_T = 0,2 \text{ V}$ und für die Verstärkung $\text{PGain} = 4500$ und $\text{IGain} = 2000$.

Wir haben versucht, noch deutlichere Aufnahmen mit weiterer Anpassung der Parameter vorzunehmen. Auf diesen war die Struktur zwar auch zu erkennen, aber es ist uns nicht

4 Untersuchung einer Graphitprobe

gelungen, sie genauer aufzulösen als auf diesem Bild.

Für die Kalibrierung der x- und y-Piezos wählen wir zwei Dreiecke so, dass die Ecken jeweils auf einzelnen Atomen enden und eine Seite parallel zur x- bzw. y-Achse ist. An den anderen Seiten ist jeweils angegeben, wieviele Atome diese Seite umfasst. Mit dem bekannten Atomabstand lassen sich die Längen dieser Strecken also leicht ausrechnen, und bei Kenntnis des eingeschlossenen Winkels auch die gegenüberliegende Strecke. Der Vergleich mit dem direkten Ausmessen dieser Strecke liefert dann den Kalibrierungsfaktor.

Nach dem Kosinussatz gilt

$$\begin{aligned}c_x &= \sqrt{(4 \cdot 2,46\text{\AA})^2 + (7 \cdot 2,46\text{\AA})^2 - 2 \cdot 4 \cdot 7 \cdot (2,46\text{\AA})^2 \cdot \cos(99^\circ)} = 21,13\text{\AA} \\c_y &= \sqrt{(3 \cdot 2,46\text{\AA})^2 + (4 \cdot 2,46\text{\AA})^2 - 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot (2,46\text{\AA})^2 \cdot \cos(81^\circ)} = 11,34\text{\AA}\end{aligned}$$

Direktes Ausmessen liefert

$$\begin{aligned}c_x &= 14,22\text{\AA} \\c_y &= 7,56\text{\AA}\end{aligned}$$

Daraus ergeben sich die Kalibrierungsfaktoren für X- und Y-Richtung zu

$$\begin{aligned}s_x &= 1,49 \\s_y &= 1,50\end{aligned}$$

Dass beide Faktoren in etwa gleich sind bedeutet, dass die Aufnahme nicht verzerrt ist. Es ist allerdings verwunderlich, dass beide Werte gerade um einen Faktor 1,5 größer sind als 1, was einer korrekten Kalibrierung entspräche.