

Rastertunnelmikroskopie

Tommy Müller, Marcus Dittrich, Vincent Nocolak

May 30, 2016

Contents

1	Versuchsauswertung	3
1.1	Ebene Grafitoberfläche	3
1.2	Fouriertransformation einer ebenen Fläche Grafits	5
2	Diskussion	6

1 Versuchsauswertung

1.1 Ebene Grafitoberfläche

Wir sollten eine Ebene Fläche im Grafit finden und versuchen anhand dieser die Atomare Struktur des Grafits darzustellen. Obwohl wir Ebene Flächen im Grafit fanden, war es nicht möglich Atomare Strukturen zu erkennen. Dies lag wahrscheinlich daran, dass die Spitze unseres Sensors nicht spitz genug war. Deshalb haben wir zur Untersuchung der Atomaren Struktur die Daten aus den Referenzmaterialien genommen. Die Messung aus den Referenzmaterialien kann in 1 gesehen werden. Hier ist 1a die rohe Messung an sich. In 1b haben wir mithilfe einer doppelten Fouriertransformation Störung aus der Messung entfernt. Dadurch lässt sich die atomare Struktur genauer erkennen und untersuchen.

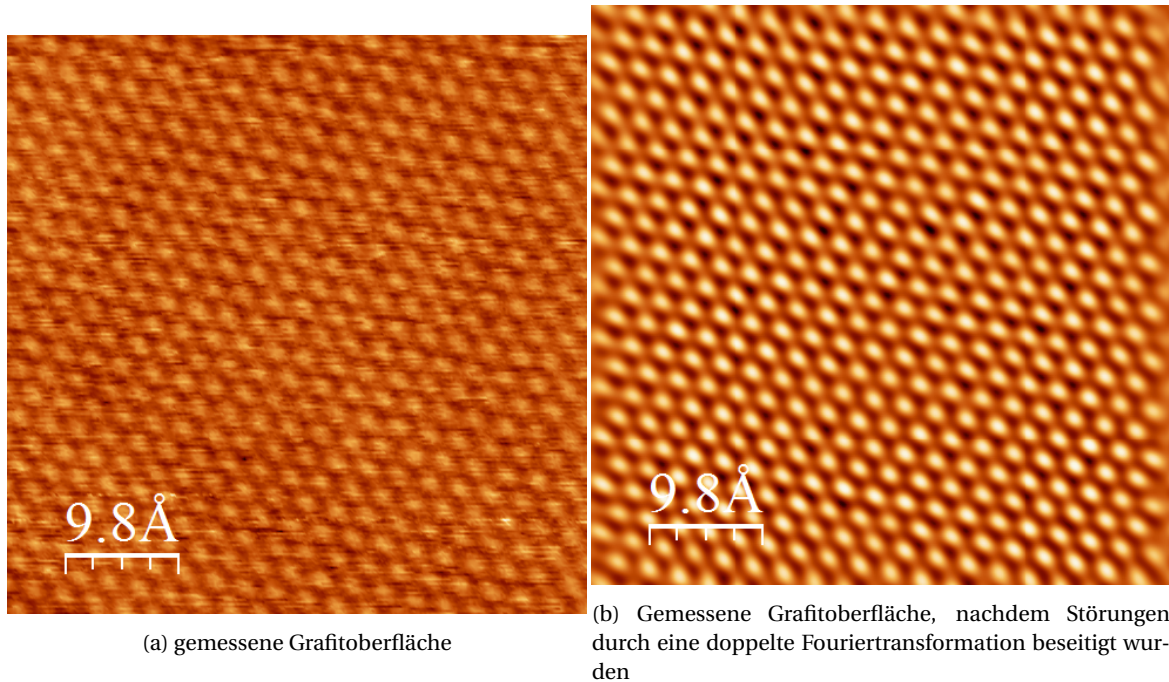


Figure 1: Messung des Tunnelstroms an einer ebenen Fläche Grafit

Es kann klar erkannt werden, dass die Kohlenstoffatome regelmäßig in einer Kristallstruktur angeordnet sind. Man erkennt ein hexagonales Kristallsystem, wie es für Grafit zu erwarten war.

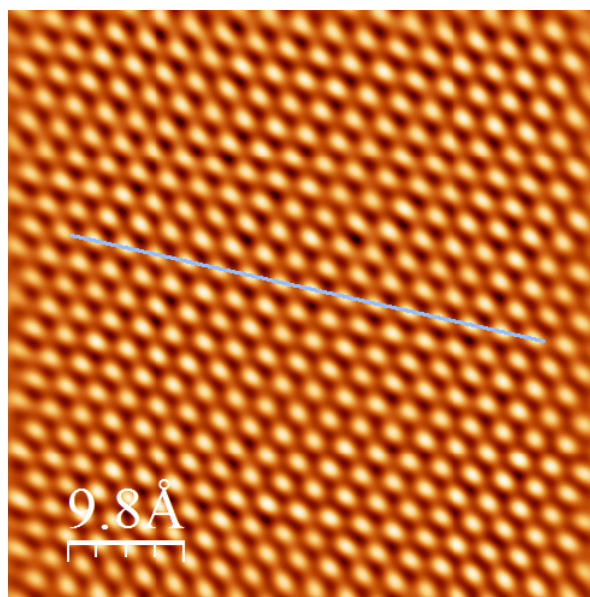


Figure 2: Messung der Abstände der atomaren Erhebungen

Entlang der in 2 zu sehenden Linie haben wir die Abstände der atomaren Erhebungen gemessen. Das dazugehörige Diagramm kann in Abbildung 3 gesehen werden. Wir haben alle Abstände entlang der zu sehenden Gerade

gemessen und anschließend einen Mittelwert mit Standardabweichung gebildet. Die gemessenen Abstände sind in Tabelle 1 zu sehen. Unser Wert für den Abstand der atomaren Erhebungen ist $(0,266 \pm 0,001) \text{ nm}$.

Laut der Theorie sehen wir in dem mit dem Rastertunnelmikroskop aufgenommenen Bild nur jedes zweite Atom des Grafit-Kristalls. Der planare Abstand nächster Nachbarn im Kristall ist mit $b = 0,142 \text{ nm}$ gegeben. Der von uns zu erwartende Abstand der atomaren Erhebungen lässt sich mithilfe des Kosinussatzes als

$$s = b \cdot \sqrt{2(1 - \cos(120^\circ))} = 0,246 \text{ nm} \quad (1)$$

berechnen. Auch wenn unserer gemessener Wert bis zur ersten signifikanten Stelle mit diesem theoretischen Wert übereinstimmt, liegt dieser wegen der kleinen Standardabweichung nicht innerhalb des dritten Fehlerintervalls. Dass unser Wert nicht mit dem theoretischen übereinstimmt, könnte daran liegen, dass wir mit dem Rastertunnelmikroskop nicht senkrecht auf die Probe gucken. Dadurch werden bei der Messung Abstände zwischen atomaren Erhebungen verzerrt.

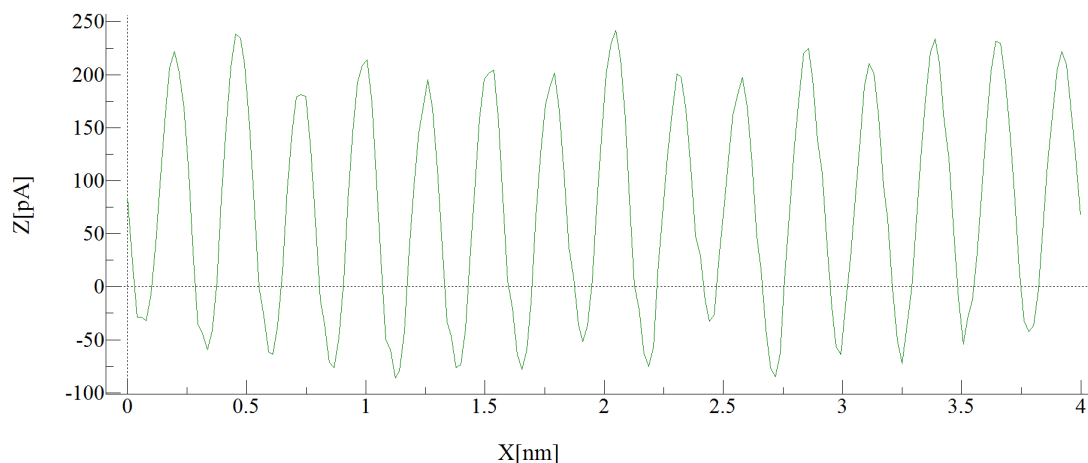


Figure 3: Diagramm zur Messung der Abstände der atomaren Erhebungen

Zur Messung der Höhe der atomaren Erhebungen mussten wir die Messdaten, die die Höhen und nicht den Tunnelstrom angeben verwenden. Auf diesen Messdaten waren die atomaren Erhebungen selbst nach einer doppelten Fouriertransformation nicht sehr klar zu erkennen, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Wir haben entlang der in Abbildung 4 zu sehenden Geraden gemessen. Das zu der Geraden gehörende Diagramm kann in 5 gesehen werden. An diesem Diagramm haben wir durch das Bilden der Differenz von Maxima und Minima die Höhen der atomaren Erhebungen gemessen. Die Werte können in Tabelle 1 gesehen werden. Nach dem Bilden eines Mittelwerts und einer Standardabweichung haben wir für den Wert der Höhe $(8,8 \pm 0,4) \text{ pm}$.

Der theoretische Wert für den Abstand benachbarter Ebenen in Grafit ist 335 pm . Dieser Wert übersteigt bei weitem die von uns gemessene Höhe der atomaren Erhebungen. Folglich lassen sich unsere gemessenen Höhen nicht mit diesem Wert identifizieren. Um nachzuvollziehen, wie unsere gemessenen Höhen für die atomaren Erhebungen zustande kommen, müssen wir die Form der Metallspitze, die wir als Sensor benutzen, mit in Betracht ziehen. Diese Spitze hat ein gewisses Ausmaß und kann, wenn es als äußerstes Orbital ein s-Orbital hat, als eine Kugel mit gewissen Radius verstanden werden. Lässt der Tunnelstrom zwischen Sensor und Probe nach, fährt dieser näher an die Probe ran. Dies ist zum Beispiel zwischen den atomaren Erhebungen der Fall. Weil die Metallspitze jedoch einen Radius hat wird es auch, wenn es über einer Stelle zwischen den atomaren Erhebungen ist, mit diesen beim Versuch sich der Probe anzunähern "zusammenstoßen". Deshalb sind die gemessenen Höhen der atomaren Erhebungen viel kleiner als der tatsächliche Ebenenabstand.

Anhand von Abbildung 6 haben wir die Winkel zwischen den atomaren Richtungen gemessen. Unsere gemessenen Winkel, startend von dem Winkel rechts oben und dann entgegen dem Uhrzeigersinn laufend sind 63° , 67° , 48° , 67° , 66° und 49° , mit jeweils einem Fehler von 1° . Wegen der hexagonalen Struktur von Grafit wäre bei einer naiven Herangehensweise zu erwarten, dass alle Winkel 60° sind. Dies ist nicht der Fall. Es fällt auf dass die besonders kleinen Winkel (48° und 49°) entgegengesetzt voneinander liegen. Dies unterstützt die Theorie, dass die Winkel deshalb alle unterschiedlich groß sind, weil wir nicht senkrecht auf die Grafitprobe gucken.

Eine andere Erklärung für die unterschiedlichen Winkel könnte daran liegen, dass der Sensor in einem Raster über die Probe fährt. Dabei könnte es zu einem Umrechnungsfehler bei der Berechnung des Bildes aus den Rasterpunkten kommen. Wir halten diese Theorie als weit unwahrscheinlicher, als die, dass wir nicht senkrecht auf die Probe gucken.

Weil von uns beobachteten atomaren Erhebungen der Grafits bilden ein hexagonales Kristallgitter. Es ist 6-zählig. Entlang einer Translation von ganzzahligen Abständen der atomaren Erhebungen der in 6 eingezeichneten Linien,

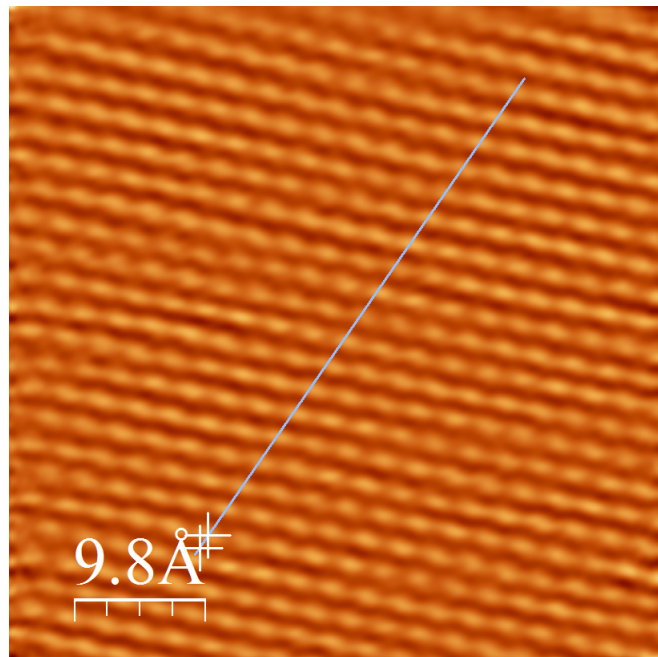


Figure 4: Messung der Höhe der atomaren Erhebungen

Abstand/nm	Höhe/pm
0,262	9,364
0,27	10,901
0,264	10,967
0,259	6,444
0,259	8,436
0,267	9,675
0,264	11,881
0,27	6,705
0,262	9,023
0,27	5,687
0,262	8,74
0,277	8,513
0,262	8,829
0,27	9,606
	8,773
	7,371
	8,671
	10,187
	7,835

Table 1: Gemessene Werte für die Abstände und Höhen der atomaren Erhebungen

gibt es außerdem eine Translationssymmetrie. Zusätzlich sieht man, dass bei einer Spiegelung entlang einer der Geraden und einer Inversion an dem Punkt, in dem sich die Geraden schneiden, das Gitter symmetrisch ist.

1.2 Fouriertransformation einer ebenen Fläche Graphits

In Abbildung 7 kann das Gitter aus Abbildung 1a nach einer Fouriertransformation betrachtet werden. Man erkennt sechs Punkte, die auf einem leicht verzerrten Hexagon um den Ursprung liegen. Um den Ursprung herum sieht man Werte in geringer Intensität. Dies sind die Störungen, die beim Aufnehmen der Messung entstanden sind. Die sechs zu erkennenden Punkte beinhalten alle Informationen über die Periodizität des gemessenen Gitters. Jedem der sechs Punkte kann ein Vektor \vec{k} zugeordnet werden. Dies ist ein Wellenvektor, der die Periodizität des Gitters angibt. Verschiebt man das Gitter also um eine Periode der Welle, die mit dem Wellenvektor \vec{k} zu assoziieren ist, bleibt das Gitter unverändert. Daraus lässt sich leicht folgern, dass man aus \vec{k} direkt den Abstand zweier atomarer Erhebungen berechnen kann durch.

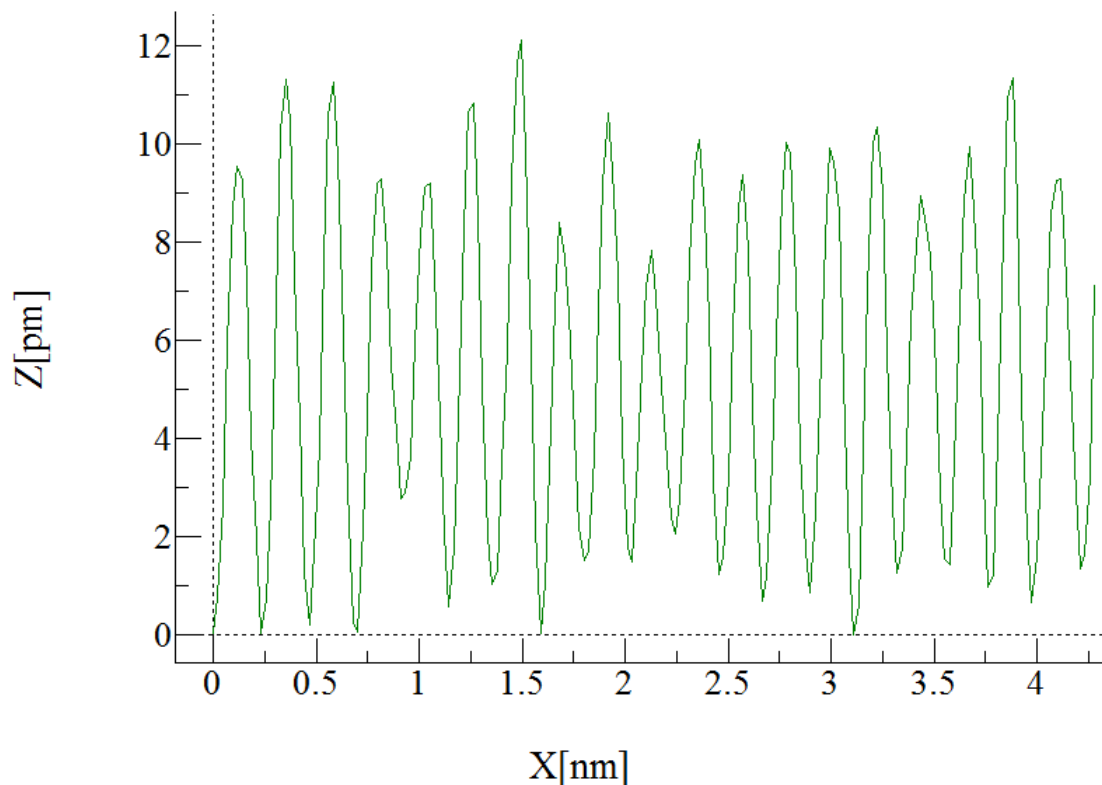


Figure 5: Diagramm zur Messung der Höhe der atomaren Erhebungen

$$|k| = \frac{2\pi}{a} \quad (2)$$

Hier ist a der Abstand zweier atomarer Erhebungen

2 Diskussion

Wir haben mit dem Rastertunnelmikroskop die Struktur von Grafit betrachtet. Da unsere Sensorspitze nicht fein genug war konnten wir zwar Kanten an der Oberfläche erkennen, die atomare Struktur des Grafits konnten wir jedoch nicht erkennen, beziehungsweise nur eingeschränkt über eine kleine Fläche. Deshalb mussten wir zur Betrachtung der Struktur von Grafit Referenzdaten benutzen.

Anhand der Referenzdaten konnten wir die hexagonale Struktur des Grafits erkennen. Es konnten Translations-, Inversions-, Spiegelungs- und Rotationssymmetrien erkannt werden. Die leicht unterschiedlichen Größen der Winkel zwischen den atomaren Richtungen konnten wir damit erklären, dass das Rastertunnelmikroskop nicht senkrecht auf die Grafitprobe schaute. Obwohl es uns gut gelang, die Struktur des Grafits zu untersuchen, konnten wir keine mit dieser Struktur zusammenhängenden physikalischen Größen, wie zum Beispiel den Abstand der Kohlenstoffatome oder den Ebenenabstand, im Einklang mit der theoretischen Werten bestimmen. Unser Wert für den Abstand der atomaren Erhebungen war $(0,266 \pm 0,001) \text{ nm}$ und wich mit 20 Fehlerintervallen von dem theoretischen Wert von $0,246 \text{ nm}$ ab.

Anhand der Fouriertransformation (Abb. 7) konnte die periodische Struktur des Grafitgitters eindeutig dargestellt werden. Möglicherweise ist die fouriertransformierte Darstellung des Gitters besser als das direkte Abmessen an der Gitterstruktur geeignet, um die Abstände der atomaren Erhebungen zu bestimmen. Um dies zu tun müsste das Rastertunnelmikroskop möglich senkrecht auf das Grafit schauen, damit die periodischen Strukturen des Gitters nicht verzerrt werden. Es wäre auch möglich diese Verzerrung numerisch zu lösen, was jedoch mit hohem Aufwand verbunden wäre. Die atomaren Abstände könnten dann unter Verwendung von 2 mit dem in der Fourierdarstellung vorkommenden k berechnet werden.

Um bessere Versuchsergebnisse zu erzielen, könnte man die Sensorspitze des Rastertunnelmikroskops mit einer

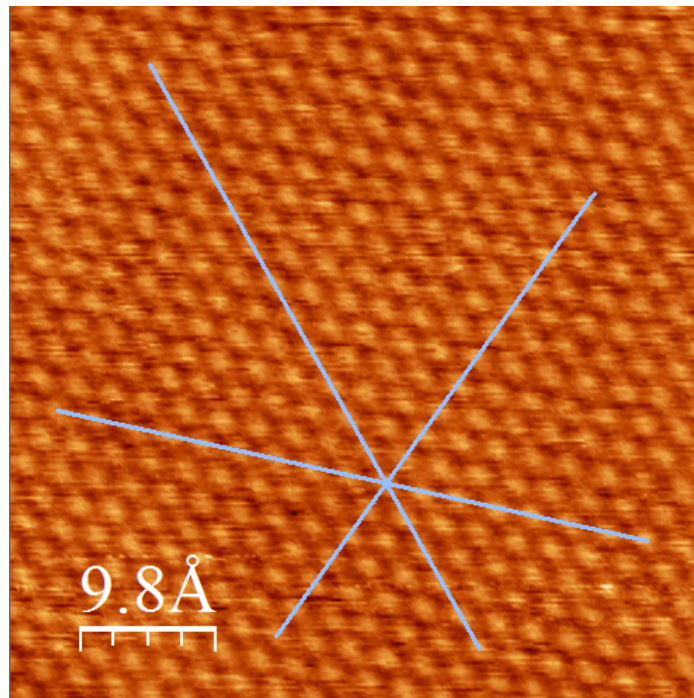


Figure 6: Messung der Winkel zwischen den atomaren Richtungen

anderen Methode herstellen. Die Feinheit der Sensorspitze ist für den Erfolg des Versuchs ausschlaggebend und bestimmt, ob es Möglich sein wird, die atomare Struktur des Grafits zu messen.

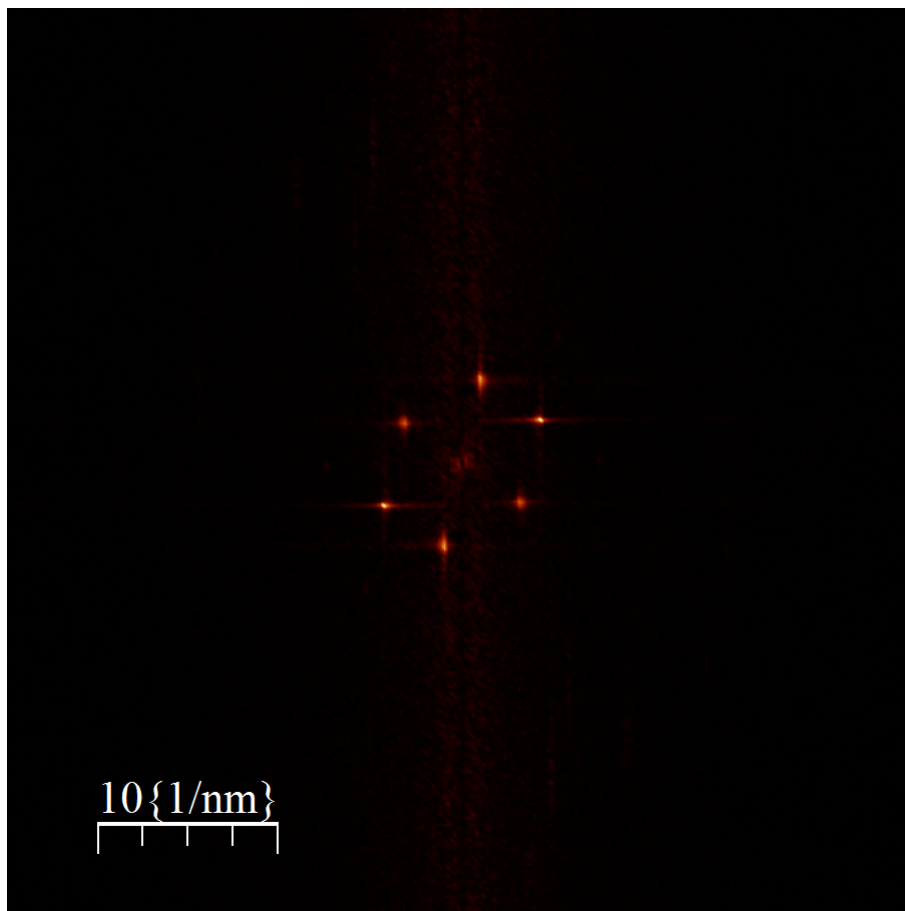


Figure 7: Fouriertransformation von Abbildung 1a