



Bachelorarbeit

zum Thema:

Rastertunnelmikroskope in der Sekundarstufe I

—

Unterrichtskonzepte

Vorgelegt von:

Fabian Hölzle

Matrikelnummer: 7207637

fabian.hoelzle@stud.ph-weingarten.de

Gutachter 1: Prof. Dr. rer. nat. Florian Theilmann

Wangen, 02.02.2023

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Erwartungen an den Unterricht	2
3. Rastertunnelmikroskop.....	6
3.1. Funktionsgrundlagen.....	6
3.2. Aufbau.....	10
3.3. Möglichkeiten.....	14
4. Rastertunnelmikroskop im Unterricht.....	16
4.1. Anwendungen in der Schule	16
4.1.1. Vorbereitung.....	17
4.1.2. Durchführung von Experimenten.....	23
4.2. Mögliche Probleme in der Anwendung und eventuelle Lösungen	24
5. Entwicklung des Unterrichts	29
6. Fazit.....	32
7. Abbildungsverzeichnis	35
8. References	36
9. Eigenständigkeitserklärung	40

1. Einleitung

In meiner eigenen Schulzeit fand ich die Einführung der Atommodelle in historischer Reihenfolge sehr verwirrend. Doch genau dieser historische Ansatz ist für viele Lehrkräfte die übliche Herangehensweise. Welches Atommodell das als letztes und fortgeschrittenstes eingeführt wird ist unterschiedlich [1, p. 148]. Durch eine weitere Einführung eines Atommodells in der Chemie und der Aussage beider Fächer, dass dieses ein Atommodell das richtige sei, stieg die Verwirrung sogar weiter an. Aufgelöst wurde sie jedoch nicht, denn eine Besprechung, warum wir nun ein Modell dem anderen bevorzugen oder eine begründete Aussage, warum wir nun ein anderes Modell nicht verwenden gab es nicht. Auf das Problem der mangelnden Diskussion der Modelleigenschaften stößt man ebenfalls in der Literatur [1, p. 147]. Den Begriff der Quantenphysik kannte ich schon vor meinem Studium. Details lernte ich erst im Verlauf meines Bachelorstudiums kennen, zuvor hatte ich mich nicht mit ihr befasst. Allerdings warf das Kennenlernen dieser mein komplettes Verständnis über Elektrizität über den Haufen und auch mein bisheriges Teilchenverständnis war auf einen Schlag veraltet und musste von Grund auf überarbeitet werden. Bereits hier stellte sich mir die Frage, ob es nicht sinnvoller ist, wenn man in der Sekundarstufe I bereits das Quantenmodell anschnidet und in abgespeckter Form kennenlernt. Schließlich sich immer beim Thema Atome immer die Frage, welches Teilchenmodell man verwendet, denn man kann sie nicht in der freien Natur beobachten oder am eigenen Leib erfahren, wie zum Beispiel die Beschleunigung eines Körpers. Im Bezug zum Seminar zur Quantenphysik lernte ich das Rastertunnelmikroskop kennen und stellte mir die Frage, ob und wie man dieses im Schulunterricht verwenden könnte. Schließlich erhielten die Erfinder des Mikroskops dafür im Jahr 1986 den Physik-Nobelpreis [2, p. 4] und auch der didaktische Wert des Werkzeuges wird hoch bewertet [3, p. 15]. Durch die Betrachtung der Lehrpläne der letzten 70 Jahre im Bezug zur Atomphysik entstand die Idee, meine Bachelorarbeit über die Anwendung der Rastertunnelmikroskopie im Physikunterricht der Sekundarstufe I zu schreiben. Es entwickelte sich die Frage ob und wie ein Rastertunnelmikroskop im Teilchenunterricht der Sekundarstufe I angewandt werden kann und wo eventuelle Probleme liegen. Vorab gilt nun nur noch zu sagen, dass es kaum Quellen zur Arbeit mit Rastertunnelmikroskopen im Unterricht gibt, da dies bisher kaum angewendet wurde.

2. Erwartungen an den Unterricht

Bevor allerdings auf das Mikroskop und dessen Möglichkeit im Unterricht eingegangen wird, sollten die Erwartungen an dieses geklärt werden. Hierzu gibt es drei Ebenen, von welchen die Erwartungen gestellt werden. Zu diesen drei Ebenen gehört die Kultusministerkonferenz, der Lehrplan des Landes Baden-Württembergs und verschiedene Erwartungen von Lehrkräften und weiteren Personen in der Öffentlichkeit.

Betrachtet man die Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz, so werden einerseits die inhaltlichen Punkte der Teilchenvorstellung an den Beispielen zum Teilchenmodell und der Brownsche Bewegung wie auch der Struktur der Materie an Atomen, Molekülen und Kristallen [4] erwartet. All dies fällt dabei unter das Basiskonzept „Materie“ und erfordert unter anderem das Verstehen der Zusammenhänge und Modelle. Gerade zu den Modellen heißt es, dass das Bilden von Modellen ein Teil der Erkenntnisgewinnung ist und die Lernenden Modelle anwenden sollen, um damit neues Wissen zu generieren [4].

Blickt man nun in die bisherigen Lehrpläne, so lässt sich eine Tendenz erkennen, welche parallel zur Geschichte verläuft. In den Jahren bis 1952 gründeten die USA das Manhattan Projekt, warfen zwei Atombomben auf die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki und begannen den kalten Krieg mit der Sowjetunion, welche ebenfalls Atomwaffen testete [5]. Ebenfalls sah man in Deutschland bereits in den 1950er Jahren die Nutzung der friedlichen Atomkraft als ein großes Hoffnungssymbol [6]. Dies spiegelt sich im Lehrplan von 1952 [7, p. 98] wieder, indem der Atomzerfall, das Bohrsche Atommodell und die Kernspaltung behandelt werden soll. In den nachfolgenden Jahren konnte man eine Explosion in der Anzahl der Nuklearwaffen erkennen. Zeitgleich wurde die erste Wasserstoffbombe, wie auch die Zar-Bombe gezündet, die Welt vor Atomkriegen gewarnt und die Kuba-Krise ausgelöst [5]. Diese Ereignisse spiegeln sich erneut in den Lehrplänen wieder. Nun soll der Atombau und die Kernenergie in den Fächern Physik und Chemie als abschließende Betrachtung ihren Platz finden [8, pp. 111-112] und zusätzlich auch der Respekt vor der Natur, wie auch die, durch den Missbrauch des Wissens entstehenden Gefahren den Lernenden beigebracht werden [8, p. 109].

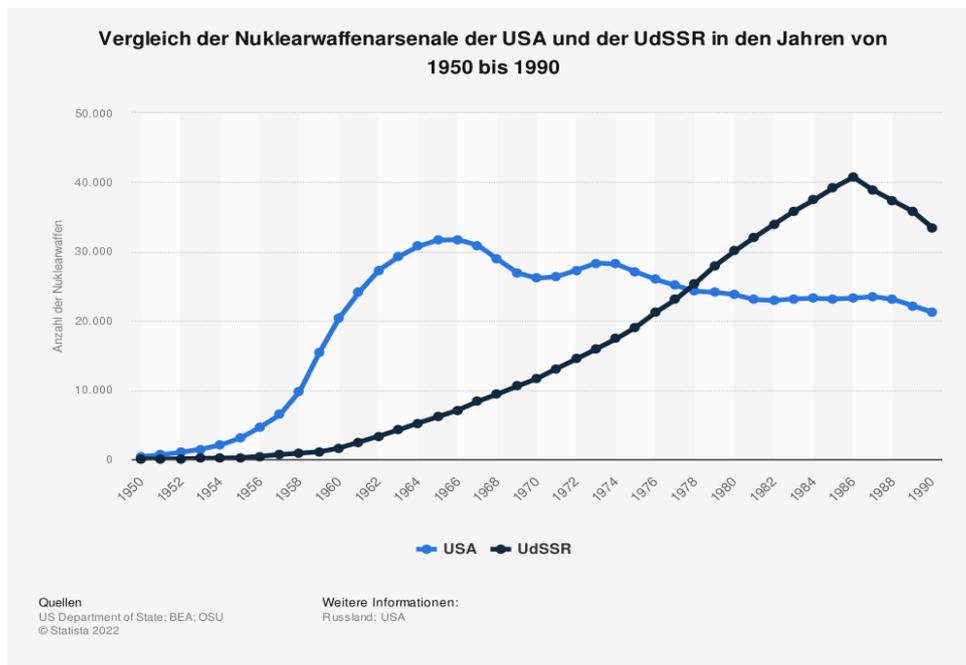


Figure 1: Vergleich der Nuklearwaffenarsenale der USA und der UdSSR 1950-1990 [9]

Die weiteren Jahre bis 1979 waren durch weitere Atomwaffentests aber auch durch den Nichtverbreitungsvertrag geprägt [5]. In Deutschland blühte die Atomkraft zur Energieerzeugung, da man eine Verbindung zwischen dem Energiekonsum und dem Wirtschaftswachstum sah. Gleichzeitig begann man auch das Problem der Endlager für hochradioaktive Stoffe zu entdecken [6]. In den Lehrplänen spiegelte sich dies erneut wieder, indem in Klassenstufe zehn die Radioaktivität zusammen mit ihren Auswirkungen aber auch die Kernspaltung als Energiequelle zusammen mit dem Problem der Entsorgung behandelt werden [10, p. 131]. In den nachfolgenden Jahren bis 1994 konnte man einen Rückgang der Nuklearwaffen der USA und der UdSSR feststellen [9], was mit der Abschaffung von Mittelstreckenraketen zusammenhängt. Ebenfalls entstehen immer mehr nuklearfreie Zonen [5]. Ein großes Ereignis, was einen Einfluss in den Bildungsplan hatte, war der Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 [6]. Im Bildungsplan spiegelt sich das wieder, indem im Fach Physik tiefer auf die Radioaktivität, den Kernaufbau und den Schutz vor Strahlung eingegangen wird. Auch das Thema Kernkraftwerk spielt dabei eine Rolle [11, p. 390]. Im Chemieunterricht wiederum wird auf die Atombindung [11, p. 317] wie auch den Atomaufbau zusammen mit dem Kern-Hülle-Modell und dem Atombau eingegangen [11, p. 244]. In den Jahren zwischen 1994 und 2016 wurden Atomwaffen für illegal erklärt und weitere Nationen führten Atomwaffentests durch [5]. Auch das Reaktorunglück von Fukushima fand in diesem Zeitraum, genauer gesagt 2011, statt [12]. Im Bildungsplan 2016 führte dies dazu, dass die Lernenden den Aufbau

der Atome kennen lernen sollen. Genauer wird hier auf die Hülle, die Kernladung und Isotope eingegangen. [13, p. 29]. Dabei sollen sie Modelle, wie das Teilchenmodell verwenden [13, p. 24] und auch das gelernte Wissen zu Bewerten und die Chancen und Risiken der Technologien beurteilen [13, p. 10].

Betrachtet man die Äußerungen aus der Gesellschaft, so werden Punkte gefordert und Probleme aufgezeigt. So werden Erwartungen an die Lernenden gestellt, dass sie nach dem Abschluss ihrer Allgemeinbildung mündige Bürger bilden, gerade wenn unsere Welt immer weiter auf die Nanotechnologie angewiesen ist [14, p. 580]. Die Bürger müssen somit nicht nur die Technologien und Hintergründe, sondern auch die Gefahren und Risiken kennen, damit sie als aufgeschlossen gelten und die Chancen richtig nutzen können [15, p. 328]. „Dazu gehören insbesondere Aussagen der Quantenphysik und der Elementarteilchenphysik“ [16, p. 9]. Neben dem Unterrichten eines zeitgemäßen Atommodelles am Ende der Sekundarstufe I [17, p. 40], wenn die notwendige Abstraktionsebene erreicht ist [17, p. 40], ist ein großes Thema auch der fächerübergreifende Unterricht. Diese Forderungen findet man ebenfalls in den meisten Lehrplänen, eine Umsetzung findet jedoch selten statt [18, p. 30].

Unter den Problemen des Unterrichts fallen viele selbstgemachte [19, p. 674] aber auch der Sache geschuldete Probleme. Da das Thema Atome sehr abstrakt ist, müssen Modelle erhalten. Betrachtet man allerdings die Hinführung an diese, so führen viele Lehrkräfte die Modelle historisch ein, hören aber frühzeitig auf und kommen gar nicht zum aktuellen Stand [1, p. 148]. Ebenfalls führt das Einführen der Modelle in Physik und Chemie dazu, dass nebenstehende Modelle für die Lernenden schwer zu erfassen sind, gerade wenn nicht darüber gesprochen wird [17, p. 40]. Somit wird es den Lernenden nicht klar, welches der Modelle sie in welcher Situation verwenden sollen. Folge dieses Modellkonfliktes der Fächer ist eine Einschränkung des Gelernten auf das jeweilige Fach an sich, ohne den Bezug zwischen beiden Fächern herzustellen [20, p. 81]. Natürlich benötigen die beiden Fächer unterschiedliche Modelle, allerdings dient jedes Modell einem Zweck und somit muss darüber gesprochen werden und auch die Grenzen und Zwecke der Modelle erkannt und behandelt werden. Geschieht dies nicht, so verbleiben die Lernenden bei den einfacheren Modellen und erhalten dadurch mehr Schwierigkeiten [17, p. 40]. Gerade das Kugelmodell ist bei Lernenden beliebt. Atome bestehen darin aus farbigen Kugeln, die sich planetenartig verhalten [17, p. 39]. Dies basiert auch darauf, dass genau dieses Modell von vielen Lehrpersonen eingeführt wird. Allerdings haben bereits die Lehrkräfte hier selbst Probleme die Modelle voneinander zu trennen und arbeiten mit Mischformen [1, p. 147]. Lernende halten häufig das vom Lehrer eingeführte Modell nicht für eine Modellaussage, sondern für eine Aussage

über die reale Form der Atome [20, p. 82], was zu dem Problem führt, dass eine Parallele aus dem Bekannten zu den Atommodellen gezogen wird und die Teilchenwelt wie die Alltagswelt verstanden wird [19, p. 674]. Dies führt sogar so weit, dass die Lernenden den Teilchen Eigenschaften der gewohnten Welt zuordnen [19, p. 675]. Allerdings kann man diesen Schluss nicht so leicht ziehen. Dies zeigt das Gedankenexperiment zu Gullivers Reisen. Stellt man sich Atome als herunterskalierte Version der normalen Welt vor, so ist dieser Vergleich ungeeignet [14, p. 582]. Ein Beispiel hierfür bildet die Sprache, welche bei einer reinen Skalierung verzerrt wird. Eine um ein Zwölftel verkleinerte Person hat eine Frequenz, welche um den Faktor zwölf höher liegt und eine Wellenlänge von einem zwölftel hat. Dies würde zu einer Stimmverzerrung führen [15, p. 332]. Genau hier liegt das Problem mit zu einfachen Modellen. Entweder werden falsche Vorstellungen gefördert oder eine Verwechslung mit der Realität in Kauf genommen [21, p. 95].

Wie man bereits erkennt, ist ein zentraler Punkt die Modellvorstellung. Wichtig dabei ist, dass nicht nur ein Modell das richtige ist, sondern für verschiedene Anwendungen und Fächer verschiedene Modelle gelten, welche aber durch Absprache der Fächer und Eingewöhnung der Lernenden möglichst wenig Verwirrung stiften sollen [17, p. 40]. Modelle bieten schließlich einen Teil der Erkenntnisgewinnung [4]. Auch die Förderung der Modellkompetenz steht bereits in den Bildungsstandards [21, p. 99] und wird unter anderem durch die Arbeit und Anpassung bereits vorhandener Modelle gefördert [16, p. 11]. Anschließend bleibt die Frage offen, welches Modell man einführen sollte. Hierfür sollte beachtet werden, dass ein Modell eine Einschränkung auf die wesentliche Funktion ist und bei der Erklärung und Visualisierung komplexer Zusammenhänge hilft [21, p. 94]. Dabei sollte auf ein zeitgemäßes Modell zurückgegriffen werden, welches sich für die Sekundarstufe I eignet und ohne Probleme für die Sekundarstufe II und die Hochschule erweitert werden kann [17, p. 39]. Hier wird klar, dass diese Welt der Atome für Lernende veranschaulicht werden muss, damit es verständlich wird [19, p. 674]. Genau für diese Visualisierung kann man das Rastertunnelmikroskop verwenden. Der didaktische Wert dieses Gerätes wurde schon sehr früh erkannt [3, p. 15], trotzdem sind diese Geräte durch einen erhöhten experimentellen Aufwand kaum verbreitet [3, p. 15]. Zwar gibt es für den Unterricht spezielle Rastertunnelmikroskope, die den Zugang vereinfachen sollen [3, p. 15], allerdings liegen die Kosten für so ein Gerät inklusive drei Materialroben bei über 10.000 € [22]. Trotzdem kann die Verwendung des Mikroskops und eine Einführung in die Grundlagen der Quantenphysik nicht nur die Richtung für ein Atommodell vorgeben, sondern gleichzeitig als Schlüsseldisziplin [14, p. 580] verschiedene Fächer wie Biologie, Mathematik, Physik und Chemie verbinden [16, p. 12].

Dadurch kann man den geforderten fächerübergreifenden Unterricht erreichen und so weitere Kompetenzen fördern. Doch was genau ist fächerübergreifender Unterricht und wie lässt sich dieser unterscheiden? Reicht schon das Behandeln des gleichen Themas in zwei Fächern aus, damit man es als fächerübergreifenden Unterricht bezeichnen kann? Fächerübergreifendes Lernen ist vielfältig und lässt sich in verschiedene Klassen aufteilen. In der Reihenfolge von einer schwachen zu einer starken Verbindung beginnt man beim fächerüberschreitenden Unterricht. Hierbei wird an das Wissen anderer Fächer angeknüpft, so etwa beim Rechnen in der Physik. Hierbei wird das in der Mathematik Gelernte, zum Beispiel Terme und Gleichungen, verwendet, um den Stoff im Fach weiterzubringen. Die nächste Stufe ist der fächerverknüpfende Unterricht, bei dem verschiedene Fächer aufeinander Bezug nehmen, dies jedoch nicht absprechen. Im fächerkoordinierenden Unterricht wird der Unterricht so geplant, dass er aufeinander abgestimmt unterrichtet wird. Ein Beispiel hierfür wäre das Einführen eines Atommodells in Chemie und der Aufbau darauf in Physik. Hinter dem fächerergänzendem Unterricht wird ein gemeinsamer Unterricht mit gemeinsamer Unterrichtszeit verstanden, indem mehrere Lehrkräfte gemeinsam unterrichten. Die Höchststufe bildet der fächeraussetzende Unterricht, bei dem beispielsweise ein Projekt außerhalb der regulären Unterrichtszeiten abgehalten wird [23, pp. 21-22].

3. Rastertunnelmikroskop

Das Rastertunnelmikroskop (RTM), oft auch unter dem englischen Begriff STM (scanning tunneling microscope) zu finden, ist ein Gerät zur Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit von leitenden Materialien. [24]

3.1. Funktionsgrundlagen

Der erste Schritt zu einem Rastertunnelmikroskop war der Versuch einer Tunnelstrommessung zwischen einer Platinoberfläche und einer Wolframspitze im Abstand von 10 Ångström. Gerd Binnig und Heinrich Rohrer entwickelten daraus dann ein Rastertunnelmikroskop, welches eine Metallspitze über eine Oberfläche bewegt. Die Abstände der Spitze wird über die Spannungsregulierung der Piezoelemente gesteuert. Daraus ergibt sich ebenfalls ein topografisches Bild der Oberfläche [25, pp. 57-58, 26, pp. 237-238]. Verändert sich die Breite der Tunnelbarriere an der Messspitze um 2-5 Ångström, so verändert sich der Tunnelstrom um das bis zu 10^3 -fache [25, p. 58].

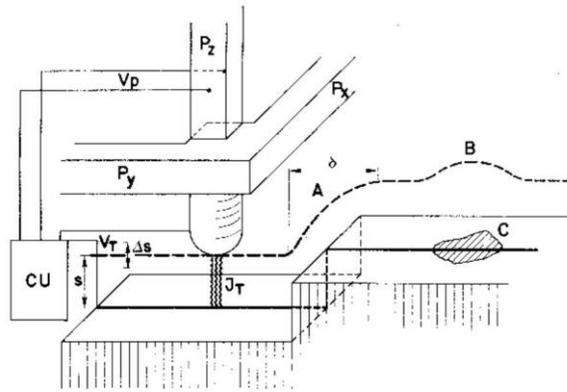


Figure 2: Schaubild RTM: Drei Piezoelemente (P_y , P_x , P_z) werden über die Steuereinheit (CU) angesteuert sodass die Spitze einen konstanten Tunnelstrom (I_t) bildet. [25, p. 58]

Somit benötigt das Rastertunnelmikroskop die Quantenphysik, genauer den Tunneleffekt als Funktionsgrundlage. In den Grundlagen lässt sich dieser komplexe Zusammenhang über ein Gedankenexperiment aus dem Vergleich der herkömmlichen und der Quantenphysik erfassen. Rollt in der herkömmlichen Physik eine Kugel mit einer Geschwindigkeit v an einen Hügel oder Wall, so benötigt die Kugel mehr Energie wie sie am Wall in potentielle Energie umwandelt. Überträgt man dieses Gedankenexperiment nun in die Quantenphysik, so besteht dieser Energiewall zum Beispiel aus der Abstoßung zweier Protonen. Versucht man nun eine dieser Ladungen über den Wall zu bringen, kann dieses Teilchen diese Barriere überspringen. Dies ist der Tunneleffekt [27, 01:15-07:09].

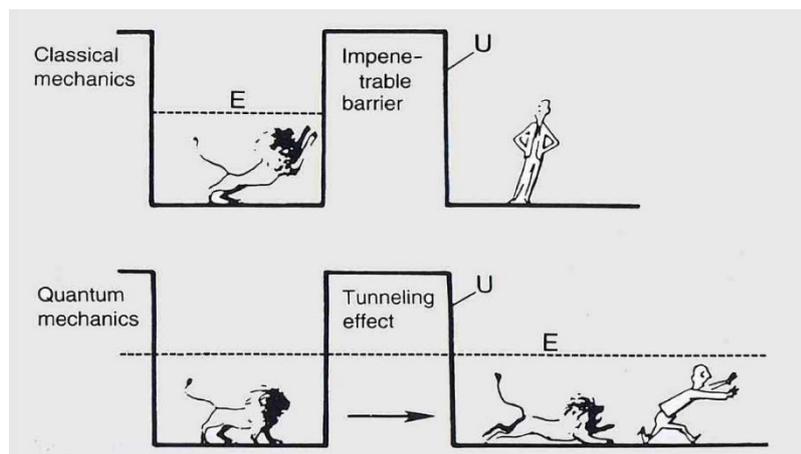


Figure 3: Tunneleffekt mit Potentialbarriere U und Energie E [28, p. 4]

Hergeleitet wird der Tunneleffekt über eine Reihe von Entdeckungen. Aus den Spaltexperimenten zur Beugung von Licht und Elektronen wird der Wellen-Teilchen-Dualismus hergeleitet. Dieser wird weiter durch den fotoelektrischen Effekt bewiesen, wobei Licht in Abhängigkeit dessen Frequenz Elektronen auf der Kathode freisetzt [29, pp. 3-5]. Ausgedrückt wird der Welle-Teilchen-Dualismus über die de Broglie-Gleichung.

$$h\nu = mc^2$$

Dabei werden die beiden Energien von Wellen und Teilchen gleichgesetzt, weshalb sie die Impulse der Teilchen und die Wellenlänge der Welle verbindet. Die de Broglie Wellenlänge hingegen gibt die Wellenlänge in Bezug zum Teilchenimpuls an [29, p. 6].

$$\lambda = \frac{h}{mv} = h/p$$

Auch wenn die de Broglie-Wellenlänge in der klassischen Physik vernachlässigbar ist, führt sie in der Welt der Elektronen zu einer Beugung. Durch diese Beugung lässt sich nun nicht mehr die Zeit, der Ort und Impuls und daher die Energie des Teilchens bestimmen. Dies ist die Heisenberg'sche Unschärferelation [29, pp. 7-8].

Nimmt man sich nun eine sinusförmige Welle mit der Amplitude ψ , der Phasengeschwindigkeit v und der Wellenlänge λ , so hat sie die Wellenzahl ($k=2\pi/\lambda$) und ergibt nun bei einer Verschiebung entlang der Welle um genau eine Wellenlänge folgende Wellengleichung [29, p. 11]

$$\psi(x, t) = A \sin[k(x - vt)]$$

Sperrt man nun ein Teilchen in einem Kasten ein, dessen Potentialwände bei $x=0$ und $x=a$ eine unendlich hohe Hürde darstellen und dessen Potential zwischen den Wänden bei null liegt, lässt sich über die Schrödingergleichung herleiten, dass nur stehende Wellen, also Wellen mit ganzzahligen Wellenzahlen n (also 1, 2, 3, ...) existieren können (siehe Figure 4, Seite 9). Der Fall $n=0$ ist ausgeschlossen, da die Energie des Teilchens nicht gleich null werden kann. Deshalb wird die Energie einer Welle mit $n=1$ als Nullpunktsenergie bezeichnet. Wendet man dies nun auf die drei Dimensionen an, so wird die Welle entartet und

verschiedene Wellen können nach Entartungsgrad (Energie) klassifiziert werden (siehe Figure 5) [29, pp. 17-22].

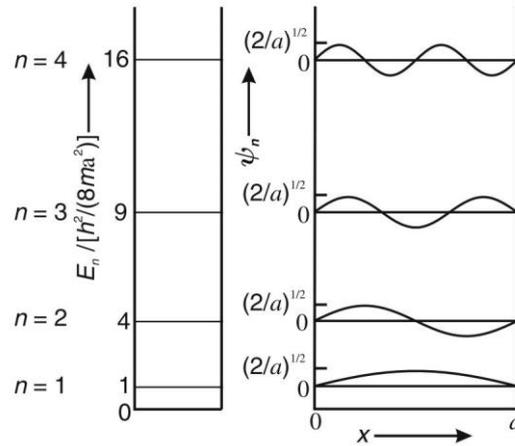


Figure 4: Vergleich Energie und Wellenzahl [29, p. 19]

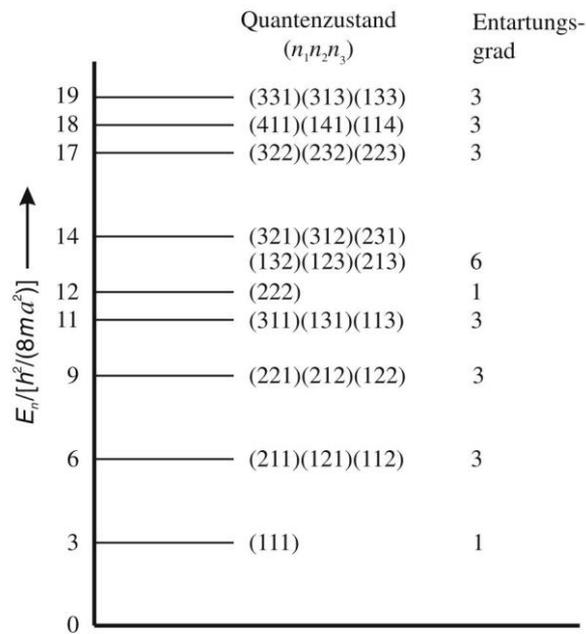


Figure 5: Wellenentartung im 3D-Kasten. Eine Welle (n_1, n_2, n_3) besteht aus den drei Richtungen, also (x, y, z) . Hat eine Welle nun eine Wellenzahl von 1 in x , 3 in y und 2 in z , so ergibt sich die Wellenartung $(1, 3, 2)$. [29, p. 21]

Betrachtet man nun einen Kasten mit einer nicht unendlich hohen Randbedingung, sondern einer Höhe V_0 und Breite a mit einem von links auftreffendem Elektron mit der Energie E , so wird dieses in der klassischen Physik zurückgestoßen, wenn $E < V_0$. In der Quantenphysik

durchquert das Elektron die Wand dann, wenn diese dünn genug ($a \ll \lambda$) oder der Wall niedrig genug ist ($V_0 - E \ll \lambda$) [29, pp. 22-24].

3.2. Aufbau

Betrachtet man das Rastertunnelmikroskop in Figure 2 (Seite 7), so kann man bereits die einzelnen Bestandteile des Rastertunnelmikroskops erkennen. Es besteht grundlegend aus einer Messspitze, einer Schwingungsdämpfung, drei Piezoelementen und einer Steuereinheit.

Die Messspitzen bestehen aus einem circa einem Millimeter starkem Wolframdraht. Als Alternative wird auch Molybdän oder sogar eine Mischung aus Platin und Iridium verwendet. In den Anfangszeiten wurde die Spitze im 90° -Winkel angeschliffen, sodass mehrere kleine Spitzen entstanden. Die Genauigkeit konnte durch das Berühren der Spitze mit den Fingern erhöht werden [25, p. 58, 26, p. 239, 30, p. 4]. Ein neues elektrochemisches Verfahren stellt die Spitze durch das Ätzen mit CaCl_2 und anschließendem polieren mit H_2SO_4 her. Dadurch wird die Produktionszeit einer Spitze reduziert [31, Abstract]. Eine weitere Methode zur Herstellung einer Messspitze besteht durch das Eintauchen eines Wolframdrahtes in eine negativ geladene Natronlauge mit einer dünnen Silberschicht auf der Oberfläche. Durch die Elektrolyse entsteht anschließend eine einatomare Spitze [32, p. 11].

Die Schwingungsdämpfung in der Originalarbeit von Binnig und Rohrer basiert auf Federn und Isolatoren und dient gleichzeitig als grobe Annäherung im 100 Ångström bis 1 Mikrometer Bereich [26, p. 239]. Eine dagegen eher provisorisch aussehende Dämpfung entsteht durch das Stapeln verschiedener Objekte wie Gummischläuchen, Dichtringen, Schaumstoff und Platten aus Holz, Granit und Marmor (siehe Figure 6, Seite 11) [28, p. 22]. Es ist zudem möglich eine Schwingungsdämpfung zu erhalten, indem man den gesamten Messapparat auf einer mit Blei beschwerten Holzplatte montiert und diese dann mit Gummiseilen aufhängt [32, p. 14].



Figure 6: Dämpfung durch die Verwendung verschiedener Materialien [28, p. 22]

Die Piezoelemente oder eher der Bewegungsapparat, dessen Bestandteile die Piezoelemente sind, ist eine Anordnung dreier Piezoelemente aus Piezokeramik [26, pp. 237-238], um eine XYZ-Bewegung zu erhalten. Die X- und Y-Achsen dienen dabei dem Abtasten der Oberfläche und bewegen sich somit in einer Ebene. Die Z-Achse hingegen ist für die Spitzenentfernung zuständig und bewegt sich senkrecht zur XY-Ebene. Da bei einem Rastertunnelmikroskop die Messfläche mit einer Seitenlänge von circa 670 nm [28, p. 38] sehr klein ist, wird auch keine Führung für die einzelnen Achsen benötigt, sodass diese an einer Art Achsenkreuz montiert werden können (siehe Figure 7, Seite 11). Eine weitere Möglichkeit, eine Bewegung über drei Achsen zu erhalten, besteht in der Verwendung von Röhrenpiezos. Diese können in die drei Bewegungsrichtungen auslenken und somit die Spitze steuern [32, p. 10].

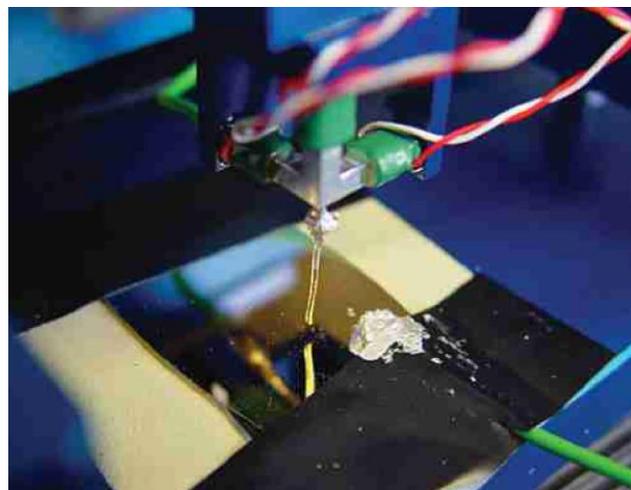


Figure 7: Anordnung Bewegungsapparat. In grün sind die Piezoelemente, welche die Goldspitze führen. [33, p. 217]

Eines der zentralsten Teile des Rastertunnelmikroskops ist die Steuereinheit. Die Elektronik ist zuständig für die Steuerung und das Messen des Mikroskops. Sie lässt sich in die Stromversorgung der Elektronik, Spannungsversorgung der Piezokristalle, Spannungsversorgung der Messprobe (Bias Spannung), Messen des Tunnelstroms durch Verstärkerschaltung mit Operationsverstärker, Steuerung der drei Achsen und die Kommunikation mit dem Computer aufteilen [30, pp. 5-11]. Die Bias-Spannung beträgt nur wenige Volt. Durch diese geringe Bias-Spannung und den unter 3.1 angesprochenen Tunneleffekt fließt bei einem Abstand von nur wenigen Nanometern ein Tunnelstrom im Nanoampere-Bereich [32, p. 5]. Auch wenn Nanoampere im ersten Moment schwer zu messen erscheinen, kann mithilfe einem Operationsverstärker wie dem OP471 dies erreicht werden [32, p. 20]. Dieser hat einen Nenn-Eingangsverstärkerstrom von 80 nA bis zu einem Maximum von 500 nA [34, p. 5]. Der Operationsverstärker LT1115 hat sogar einen Nennwert von 50 nA und einen Maximalwert von 380 nA [35, p. 2].

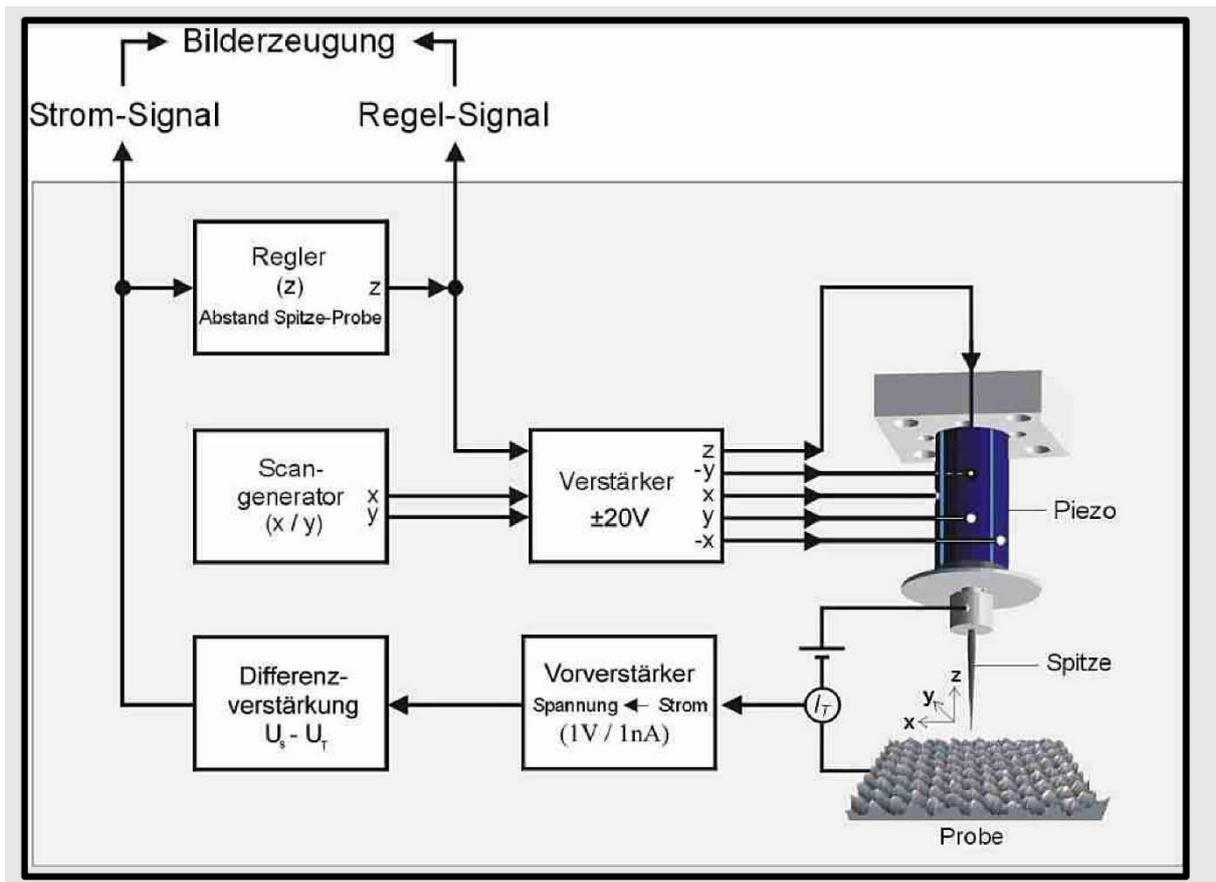


Figure 8: Steuerungsschemata RTM [28, p. 26]

Zur Herstellung der topographischen Karte gibt es zwei Verfahren. Diese unterscheiden sich in der Führung der Messspitze und damit auch dem Erfassen der Höhe des Messobjektes. Ebenfalls besitzen beide Verfahren Vor- wie auch Nachteile, sodass je nach Anwendung und Ziel ein Verfahren ausgewählt wird.

Im „Constant Height Mode“ (CHM), dem Modus der konstanten Höhe, wird die Messspitze nach der ersten Messung nicht mehr entlang der Z-Achse verschoben. Der unterschiedliche Tunnelstrom wird in ein Höhenprofil umgerechnet. Allerdings besteht bei dieser Methode die Gefahr eines Crashes, also einem Zusammenstoß von Messspitze und Messoberfläche, gerade wenn die Oberfläche sehr rau ist [3, p. 17, 30, p. 4]. Ein weiteres Problem mit dieser Methode besteht darin, dass die Messspitze sich zu weit von der Oberfläche entfernen kann, die Potentialbarriere zu groß wird und somit kein Tunnelstrom mehr fließt. Dadurch wird das Ergebnis verfälscht. Als Vorteile gilt bei dieser Methode allerdings, dass sich Messungenauigkeiten langsamer aufschaukeln, wodurch eine höhere Messgeschwindigkeit erreicht werden kann [32, pp. 9-10].

Im „Constant Current Mode“ (CCM) oder auf Deutsch dem Modus des konstanten Stromes, wird die Messspitze so geführt, dass der Tunnelstrom konstant bleibt. Dazu wird die Z-Achse auf- und abwärts bewegt. Aus der Position dieser Achse, also der an dem Z-Piezo anliegenden Spannung, wird direkt auf die Höhe an dieser Stelle rückgeschlossen [3, p. 17, 30, p. 4]. Durch die Anpassung der Z-Achse an das Höhenprofil wird somit ein Crash ausgeschlossen. Ebenfalls wird bei dieser Methode ein genaueres Ergebnis erreicht und die Umwandlung der Messdaten über Näherungsformeln fällt weg. Allerdings kann ein zu schneller Scan die Regler überfordern und aufschaukeln, sodass die Spitze beschädigt werden kann oder zumindest das Ergebnis verfälscht wird [32, p. 9].

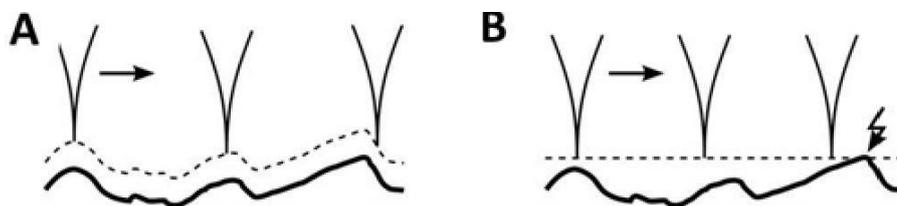


Figure 9: A: Constant Current Mode (CCM), B: Constant Height Mode (CHM) [3, p. 17]

3.3. Möglichkeiten

Ein Rastertunnelmikroskop öffnet die Zugänge zu einer neuen Welt. Nun lässt sich die Beschaffenheit einer leitenden Oberfläche im dreidimensionalen Raum darstellen. Weitergehend können mit diesem Mikroskop auch Atome bewegt werden [36].

Als einen ersten Versuch sollte man ein mit Gold bedampftes Holographiegitter nutzen. Dieses hat eine bekannte Größe zwischen den Gitterlinien, sodass man es leicht als Kalibrierung nutzen kann (siehe Figure 10, Seite 14). Zur Kalibrierung vergleicht man die gemessene und die reale Entfernung zwischen den Strichen und skaliert die gemessenen entsprechend [37, pp. 8-10].

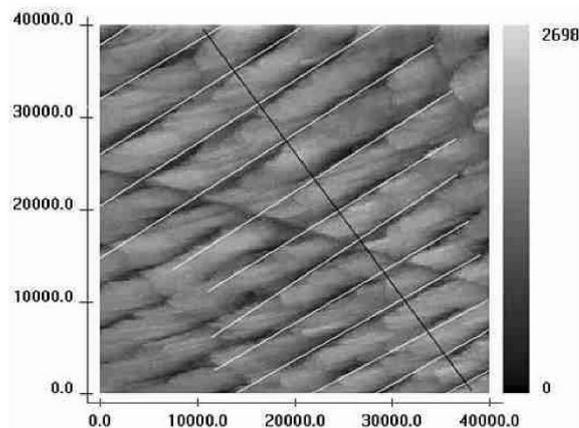


Figure 10: Goldbedampftes Gitter mit Markierungen [37, p. 10]

Die Oberfläche von Graphit lässt sich ebenfalls gut visualisieren. Vor dem Versuchsbeginn wird die oberste Schicht mit einem Klebeband abgezogen und anschließend abgerastert. Aus der topografischen Messung lässt sich die Abmessung des hexagonalen Bravaisgitter herleiten [38, pp. 5-6].

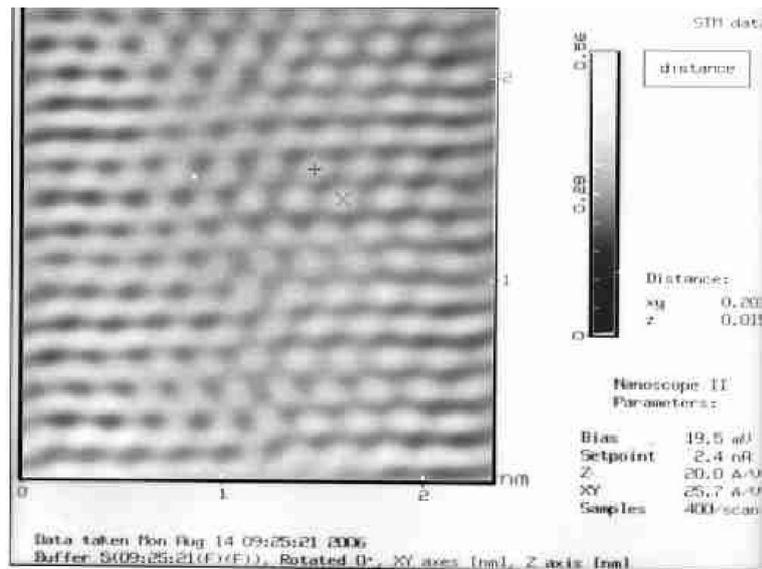


Figure 11: Darstellung der glatten Graphitoberfläche nach einer Fourieroptimierung [38, p. 8]

Durch eine starke Annäherung an ein Atom kann dieses über die Oberfläche bewegt und an einer anderen Stelle durch Vergrößerung des Abstandes abgesetzt werden [15, p. 329, 39, p. 130] . Somit lässt sich die Oberfläche eines Materials manipulieren. Das IBM hat daraus bereits den „kleinsten Film der Welt“ produziert [40, 1:45].

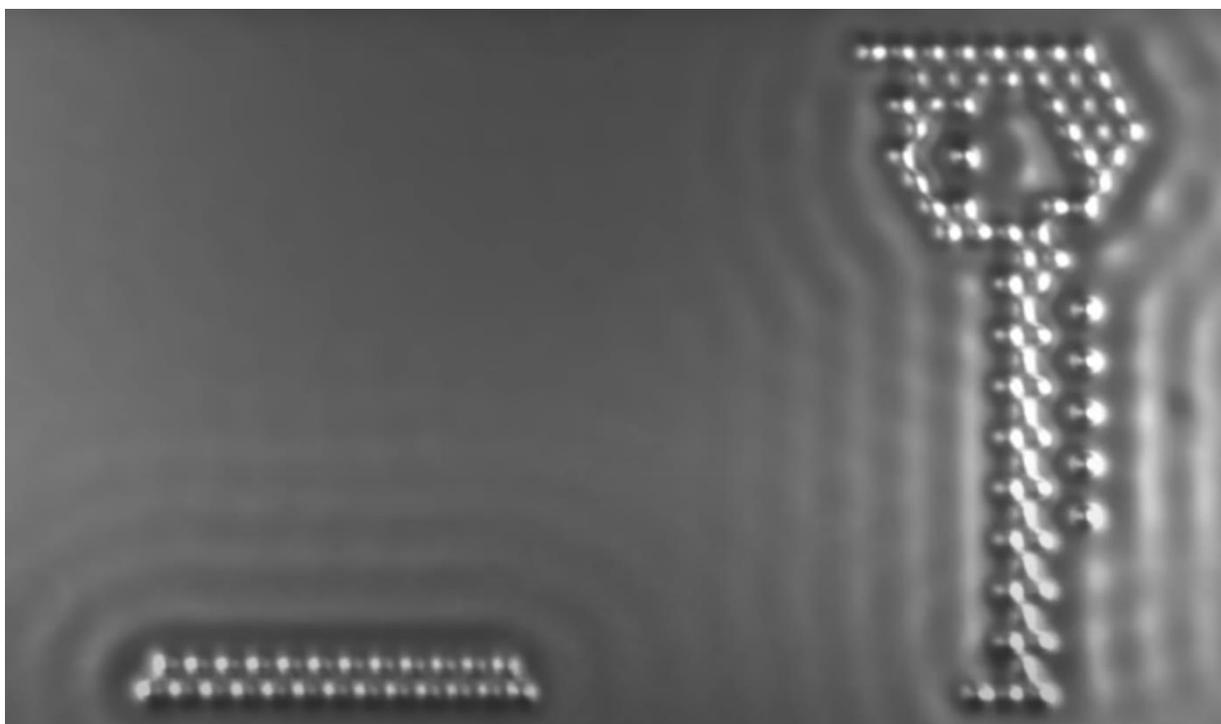


Figure 12: Filmausschnitt: A Boy And His Atom [40, 1:45]

Bildet man mit diesem Verfahren einen Ring aus Atomen, in den man ein einzelnes Atom mittig einsperrt, so erhält man einen sogenannten Quantenpferch. Dieser bildet stehende Wellen und zeigt Atome auf lokaler Ebene. Die stehenden Wellen ergeben sich aus der Überlagerung der einzelnen Wellen [15, pp. 329-331].

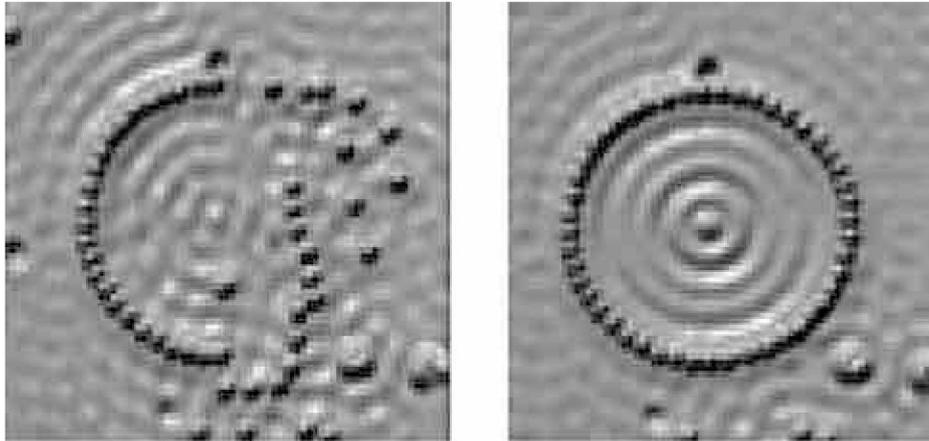


Figure 13: *Quantenpferch: Links => Im Aufbau, Rechts => Vollendet mit stehender Welle* [15, p. 329]

Es gibt noch viel mehr Experimente mit dem Rastertunnelmikroskop, wie der Untersuchung von Gold, Tantaldisulfid und den damit verbundenen Untersuchungen zur Oberfläche, Messung der Gitter, monoatomaren Stufen und vielem mehr [3, p. 19]. All dies hilft mit der Visualisierung des Rastertunnelmikroskops dabei das Abstrakte wahrzunehmen. [14, p. 581]

4. Rastertunnelmikroskop im Unterricht

4.1. Anwendungen in der Schule

Da, wie bereits oben in den Erwartungen an den Unterricht (siehe Seite 0) angesprochen wurde, ein modernes und aktuelles Teilchenmodell gefordert wird, sollte man auch diesen Forderungen nachgehen. In der heutigen Zeit ist dies das Modell der Quantenphysik. Auch wenn dieses Modell komplex und abstrakt ist, sollte es zu einem gewissen Grad eingeführt werden. Hierbei ist allerdings die Modellierung und Visualisierung eine Hürde, da mit der Darstellung etwas Abstraktes in einem Modell darzustellen, die Gefahr entsteht, dass sich die Lernenden dieses Modell als real vorstellen oder zumindest zu einem gewissen Punkt mit der Realität verwechseln [21, p. 95]. Somit muss eine gewisse Art an Visualisierung her, die es ermöglicht die Welt des Kleinen zu visualisieren ohne große Fehlbilder zu zeigen. Auch wenn das Rastertunnelmikroskop schon früh als didaktisch wertvoll gesehen wurde

[3, p. 15], sollte man darauf achten, dass die Funktionsgrundlagen geklärt wurden und das System nicht als magische Kiste oder Simulation abgetan wird.

Doch welche Ziele kann man nun mit dem Mikroskop verfolgen? Als erstes kann man den geforderten fächerübergreifenden Unterricht erweitern, indem man mit dem Fach Chemie gemeinsam die Oberflächenbeobachtungen durchführt und die Anordnung von Elementen wie Graphit bespricht.

Ein weiteres Ziel kann die Visualisierung von Modellen sein. Dabei dient das Rastertunnelmikroskop als Werkzeug, mit dem ein Blick auf das Kleine ein Verständnis durch Visualisierung fördert.

4.1.1. Vorbereitung

Die Vorbereitungen für einen Versuch mit dem Rastertunnelmikroskop im Unterricht lassen sich in drei Bereiche aufteilen. Der erste betrifft die Lehrperson, während der zweite Punkt die direkten Vorbereitungen für den Versuch und der dritte die Vorbereitungen der Lernenden auf das Rastertunnelmikroskop ist.

Unter den ersten Bereich fällt die Ausbildung der Lehrenden. Diese müssen sich einerseits in dem Gebiet der Quantenphysik so weit auskennen, dass sie den Lernenden dieses gut erklären und verständlich machen können. Dazu benötigen sie nicht nur das fachliche, sondern auch das entsprechende didaktische Wissen. Andererseits benötigen sie Erfahrung im Umgang mit dem Rastertunnelmikroskop und müssen dieses bedienen können. Gerade werdende LehrerInnen sollten in ihrem Studium das Rastertunnelmikroskop kennen lernen. Schließlich ist der Zugang zu Rastertunnelmikroskopen gestiegen, was sich auf den hohen didaktischen Wert zurückführen lässt [3, p. 17]. Behandelt man allerdings das Rastertunnelmikroskop in der Hochschule, so werden circa 20 Stunden für die Arbeit mit dem Rastertunnelmikroskop pro Studenten benötigt. Von dieser Zeit handelt es sich bei 40% um das reine Experimentieren [3, p. 18]. Eine Sache, welche nicht nur für das Lernen in der Hochschule, sondern gerade für die Schule gilt, ist, dass die Arbeit mit einem Rastertunnelmikroskop sehr viel Zeit in Anspruch nimmt und man nicht mit den Versuchen beginnen sollte, wenn man weniger wie einen halben Tag zur Verfügung hat [3, p. 18].

Die Vorbereitungen für den Unterricht hingegen belaufen sich auf das Herstellen der Messspitze und das Annähern dieser an die Messoberfläche. Da beides sehr zeitaufwendig und durch die geringe Größe sehr fehleranfällig und sensibel ist, sollte dies vor der Stunde passieren. Allerdings besteht dabei die Gefahr der Verschmutzung der Spitze mit einem

Fremdatom. Verwendet man eine Goldspitze, so wird eine atomare Auflösung verhindert. Benötigt man diese jedoch, so sollte eine Wolframspitze und ein Ultrahochvakuum verwendet werden [32, p. 11].

Als letztes gilt es den Lernenden das neue Werkzeug zu präsentieren und ihnen die Funktionsweise zu erklären, sodass nicht nur das Ergebnis gelernt wird, sondern auch der Weg Teil des Lernprozesses ist. Somit muss einerseits das Rastertunnelmikroskop und seine Funktionsgrundlage erklärt oder erarbeitet werden, andererseits sollte auch der Stoff dessen Visualisierung durch das Rastertunnelmikroskop geschieht behandelt werden. Dabei ist es jedoch wichtig, dass die Lernenden nicht vom Stoff überfordert werden, indem man sie die tiefen Ursachen des Tunnelstroms lernen lässt. Eine Erklärung der Funktionsweise über den Tunnelstrom basierend auf dem Abstand reicht hier bereits aus [20, p. 82]. Auf die Frage, wie man Sekundarstufenschülern das Rastertunnelmikroskop erklären kann, gibt es verschiedene Ideen. Gerade als Einstieg bewährt ist die Idee einer Black-Box, also einer Kiste mit unbekanntem Inhalt, dessen Form man sich durch Bewegen eines in der Ebene frei beweglichen Stiftes erschließen muss. Dies lässt sich auch darstellen, wie eine blinde Person, welche die Umgebung abtastet und versucht sich ein Bild dieser zu machen [14, p. 583, 15, pp. 335-337]. Auch die Verwendung von kompletten Simulationsapparaten eines Rastertunnelmikroskops ist eine Möglichkeit. So kann man das Prinzip hinter dem zeilenweisen Abtastern und der Messung einzelner Positionen besser nachvollziehen. Bauen lässt sich so eine Simulation mit unterschiedlichen Ausmaßen und Materialien. Ein Beispiel hierfür ist ein Holzrahmen, welcher mit LEGO NXT-Bausteinen bewegt wird [2, p. 8]. Eine Messung der Höhe findet dabei über einen Ultraschallsensor statt [2, pp. 13-15]. Das Messergebnis kann man Figure 14 und Figure 15 entnehmen.

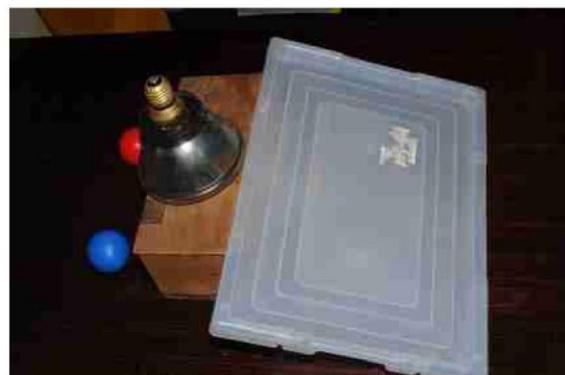


Figure 14: Zu messende Tischfläche [2, p. 15]

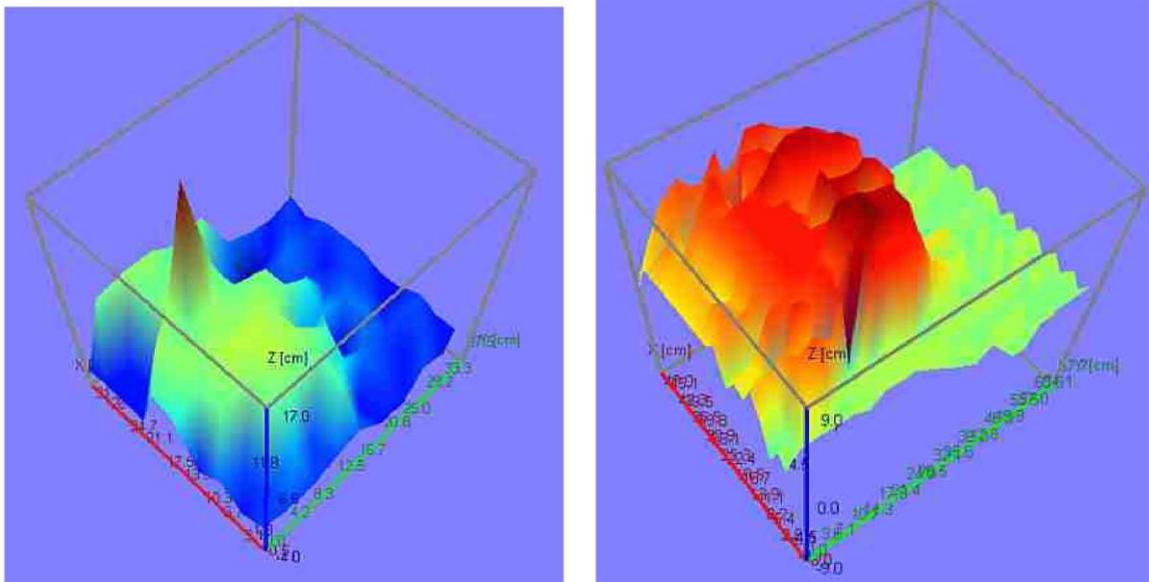


Figure 15: Zu Tischfläche gehörende Topographien [2, p. 16]

Eine andere Art der Messspitze bei einer Simulation ist die Kombination aus Lautsprecher und Mikrofon und somit die Verwendung von hörbaren Schallwellen. Dabei ist es wichtig, dass der Lautsprecher die Schallwellen radial ausgibt und das Mikrofon diese möglichst radial aufnimmt [41, p. 8]. Die zu scannenden Objekte sind dabei mit Wasser befüllbare Film Dosen [41, pp. 8-10].

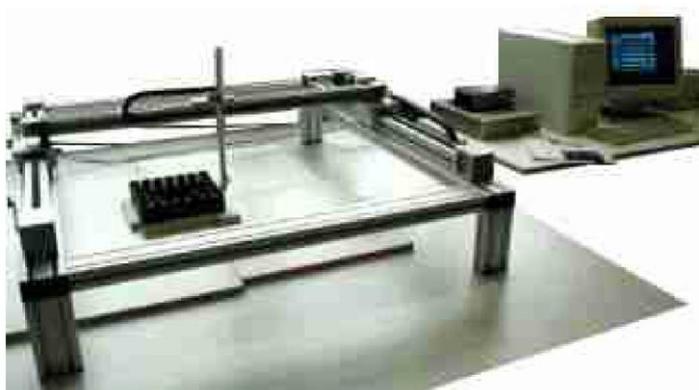


Figure 16: Aufbau Simulationrastertunnelmikroskop [41, p. 8]

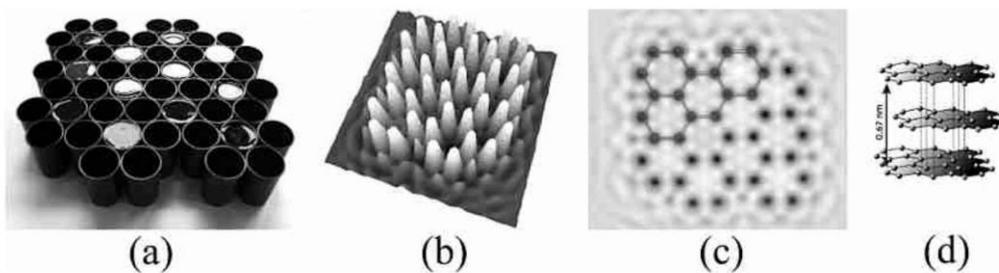


Figure 17: a) Filmdosen, b) 3D-Darstellung, c) simulierte Darstellung, d) Schematische Struktur von Graphit [41, p. 11]

Somit lässt sich das Rastertunnelmikroskop zumindest in dem Bereich visualisieren, dass die Bewegungen und einzelne Funktionsabschnitte mit bloßem Auge erkannt und nachvollzogen werden können. Allerdings sollte man dabei auch den Lernenden gegenüber aufzeigen, dass die Art der Entfernungsmessung in dieser Simulation auch nur eine vereinfachte Möglichkeit ist, da der reale Effekt, der Tunneleffekt, in diesen Dimensionen nicht mehr wirkt.

Nachdem nun die Visualisierung des Werkzeuges möglich ist, gilt es nun den dafür notwendigen Unterrichtsstoff zu betrachten. Auch hierzu gibt es verschiedene Herangehensweisen. Das in der Schule bekannte Bohrsche Atommodell dient dazu als Grundlage. Es gibt zwei Möglichkeiten auf diesem Atommodell aufzubauen und es zu erweitern. Zum Einen, indem man eine weitere Black-Box nimmt, also das Atom als eben diese Black-Box sieht, welche auf eine bestimmte Umgebung und Eingabe (Frage) mit einer bestimmten Reaktion (Antwort) agiert [17, p. 41] und zum Anderen mit einer Annäherung an die Quantenphysik.

Folgt man nun dem zweiten Ansatz, so wird die Richtung der Atomorbitale eingeschlagen. Dabei geht es um die Betrachtung des Atoms, genauer gesagt den Elektronen des Atoms, unter deren Wellencharakter. Ein solches Schalenelektron kann nur dann stabil auf seiner Schalenbahn sein, wenn es eine stehende Welle bildet. Dazu muss folgende Formel gelten, welche den Schalenradius in Bezug auf die Wellenlänge und Wellenzahl setzt [29, pp. 42-43]. Optisch lässt sich dies wie in Figure 18 (Seite 21) darstellen.

$$2 * \pi * r = n * \lambda$$

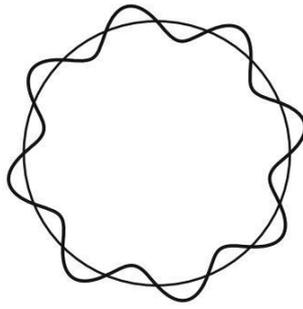


Figure 18: stehende Elektronenwelle [29, p. 43]

Betrachtet man nun die Wellenfunktion des Elektrons, kann man daraus die Intensitäten der Elektronenwelle erhalten und dies ebenfalls in einer Graphik plotten, sodass dunklere Stellen eine höhere Intensität haben. Daraus ergibt sich dann eine Visualisierung des Elektronenorbitals [29, p. 47].

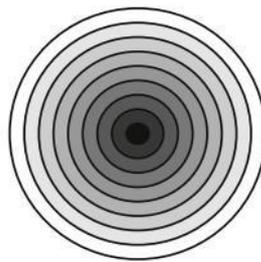


Figure 19: Intensität des Atomorbitals von Wasserstoff [29, p. 46]

Für die Lernenden besteht die Idee darin, dass eine Wolke den Atomkern umgibt, das sogenannte Elektronium. Die Dichte nimmt mit größerem Radius ab und hat, wie das Elektron, eine negative Ladung. Energieportionen lassen sich nur in der Elektronengröße hinzugeben oder entfernen und eine Verformung der Wolke benötigt Energie, während eine Rückformung Energie freigibt m[17, p. 41].

Vergleicht man nun die drei Modelle (Bohrsches Atommodell, Black-Box, und Elektronenwolke), so gibt es unterschiedliche Vor- und Nachteile (siehe Figure 20, Seite 22). Zum Beispiel eignet sich die Black-Box weniger dazu das Modell gut zu visualisieren, aber umso besser es zu verstehen und die Unanschaulichkeit und Komplexität der Quantenphysik aufzuzeigen. Die Elektronenwolke (Elektronium) hingegen umgeht dafür falsche Teilchenvorstellungen.

Verschiedene Atommodelle für den Mittelstufenunterricht im Vergleich			
	Bahnenmodell (vereinfachtes „Bohr-Modell“)	Elektronium	Black Box
Vermeidet das Modell, Eigenschaften aus Makro- und Mikroebene zu vermischen?	-	0	+
Vermeidet das Modell falsche Teilchenvorstellungen?	-	++	+
Anschaulichkeit des Modells	++	+	--
Tragfähigkeit (Wie schnell sind die Grenzen des Modells erreicht?)	--	+	++
Ist ein bruchloser Übergang zu den Modellen der Kursstufe/Universität möglich?	-	+	+
Wird die Unanschaulichkeit der Quantenphysik deutlich?	-	+	++

Figure 20: Stärken und Schwächen: Bohrmodell, Wolkenmodell, Black-Box [17, p. 42]

Sieht man sich nun die Modelle genauer an, so erkennt man die Unterschiede in Bezug auf Wiederverwendung und Visualisierung. Betrachtet man das Elektronenwolken- / Elektroniummodell, so ergibt sich eine Basis, auf der in weiterführenden Schulen und der Hochschulbildung aufgebaut werden kann, ohne das bisher gelernte Wissen verworfen oder verlernt werden muss. Durch das dann bereits vorhandene Wissen einer Elektronenwolke, fehlen nur noch die Grundlagen dieser Elektronenwolke und wie es dazu kommt. Anschließend gilt es dann darauf aufzubauen. Der Umstieg von einer Elektronenwolke zu einem Elektronenorbital mit einer Wahrscheinlichkeitsanhäufung ist dabei sehr gering, da hier mit der Dichte der Wolke als Wahrscheinlichkeit argumentiert werden kann. Somit besteht der Lernprozess aus einer Erweiterung des Wissens und nicht aus einem Vergessen und neu lernen beziehungsweise einem Abändern des bisher Gelernten. Betrachtet man hingegen das Black-Box Modell, so ist das darauf Aufbauen in der weiteren Schullaufbahn erschwert. Es muss zwar kein falsches Modell verlernt werden, jedoch wird mehr Wissen und somit mehr Zeit benötigt, damit die Lernenden sich dann auf dem neuen, erhöhten Wissensstand befinden. Obwohl beim Black-Box Modell viele Fragen nach dem Warum unbeantwortet bleiben, kann es trotzdem das Modell sein, welches für die Lernenden leichter zu verstehen ist, da es nicht versucht, die Atome zu erklären oder anschaulich zu machen, sondern nur die reinen Phänomene darstellt.

Egal welche Erörterung oder welches Modell man verwendet, man muss die Grenze der Visualisierung kennen. Es muss immer erkannt werden, dass die Bilder aus dem Rastertunnelmikroskop eine Mischung zwischen Teilchen und Wellen aufzeigen [15, p. 331].

Bezieht man diese Bilder auf die beiden oben genannten Modelle, so lässt sich in den Bildern Verschiedenes sehen.

Betrachtet man dazu folgendes Bild (Figure 21, Seite 23), so sieht man eine Erhebung an der Stelle eines Atoms. Unter Berücksichtigung der Black-Box-Herangehensweise, sieht man hier die Grenze des Atoms, die Grenze des Visualisierbaren. Man kann Informationen hineingeben und bekommt Antworten. Die Wege wie diese Antworten zustande kommen, lassen sich jedoch nicht erklären. Setzt man sich nun die Brille der Elektronenwolke auf, so sieht man genau diese. Die Wolke bildet die Form des Erkennbaren und wird vom Mikroskop aufgenommen. Ein Hineinblicken ist nicht möglich.

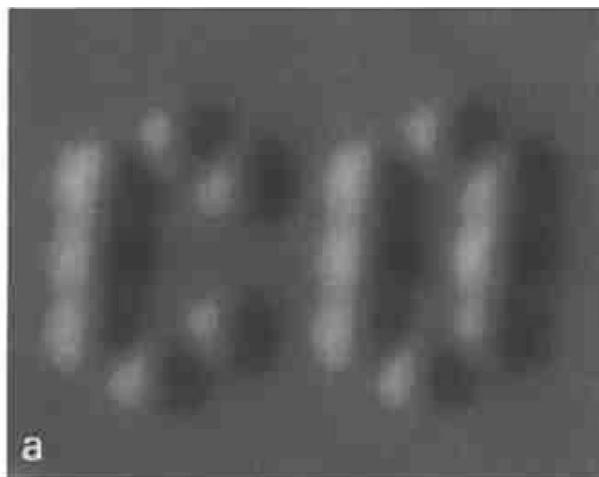


Figure 21: CO-Moleküle auf Platin-Oberfläche [39, p. 131]

4.1.2. Durchführung von Experimenten

Nachdem die Lernenden ein passendes Bild der Atome besitzen und die Grundzüge und Funktionsweise des Rastertunnelmikroskops erkundet haben, kann es an die Experimente gehen. Zuerst einmal lässt sich sagen, dass durch den hohen experimentellen Aufwand von mindestens einem halben Tag [3, p. 18] eine Durchführung innerhalb einer Schulstunde nicht möglich ist. Damit trotzdem mit einem Rastertunnelmikroskop experimentiert werden kann, müssen somit mehrere Stunden zusammengelegt werden, sodass die Stunden am Stück genutzt werden können. Ebenfalls kann das Rastertunnelmikroskop Teil einer Art Projektwoche sein, in der der Unterricht auf dieses Thema fokussiert wird und somit mehr Zeit zur Verfügung steht. Hier kann unter Umständen der fächerübergreifende Teil eintreten, indem zum Beispiel das Fach Chemie zusammen mit dem Fach Physik einen sechsstündigen Schulunterricht gestaltet. Im ersten Teil werden noch fachliche Informationen behandelt, während

im Hintergrund bereits die Vorbereitungen des Versuches laufen. Dadurch können die Lernenden am Stück lernen und die Unterrichtszeit wird effektiver genutzt. Ansonsten würden hier die Lernenden der Lehrperson zuschauen, wie sie, teilweise auch mehrfach, die Spitze vorbereitet und diese der Probe annähert. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Versuche in der Schule von der Lehrperson durchgeführt werden sollten, da einerseits mit ätzenden Chemikalien gearbeitet wird, andererseits die Durchführung durch kleinste Fehler, wie einer zu unvorsichtigen Annäherung der Spitze, sich in die Länge ziehen kann.

Die durchzuführenden Versuche hängen ebenfalls sehr stark von dem Ziel des Unterrichts mit dem Rastertunnelmikroskop ab, allerdings sollte man dabei auf Versuche abzielen, die eine gute Visualisierung bieten ohne ein Ultrahochvakuum-Rastertunnelmikroskop zu benötigen. Ein Beispiel hierfür ist die Oberfläche von Graphit.

4.2. Mögliche Probleme in der Anwendung und eventuelle Lösungen

Bei der Anwendung von Rastertunnelmikroskopen im Physikunterricht der Sekundarstufe kann es aufgrund verschiedenster Gründe zu Problemen kommen. Dabei können diese Probleme nicht erst im Unterricht auftreten, sondern bereits vor der Unterrichtsvorbereitung. Wie schon bei der Durchführung angesprochen, ist der große Arbeits- beziehungsweise Zeitaufwand bei der Durchführung der Experimente eines der Probleme, wodurch die Anwendung im Schulunterricht erschwert oder sogar unmöglich gemacht wird. Kann keine Lösung zur zeitlichen Verankerung der Versuche im Stundenplan gefunden werden, so scheitert die Anwendung der Rastertunnelmikroskopie bereits vor der Unterrichtsvorbereitung.

Eine weitere Ursache für mögliche Probleme basiert auf dem Verständnis der Lehrperson. Während man gerade bei jüngeren Lehrpersonen sagen kann, dass diese das Rastertunnelmikroskop, zumindest in der Theorie, kennen lernen, gilt dies nicht für schon ältere Lehrkräfte. Zählt man hierzu nun auch die jüngeren Lehrkräfte hinzu, welche noch nicht mit einem Rastertunnelmikroskop gearbeitet haben, so wird ein Großteil der Lehrkräfte Probleme in der Anwendung des Mikroskops haben, da sie bisher noch keine praktische Erfahrung sammeln konnten. Selbst wenn ab sofort alle neu ausgebildeten Lehrkräfte dies kennen lernen, zieht sich diese Wissenslücke über Jahrzehnte. Allerdings gibt es hiergegen verschiedene Lösungswege. Der allererste Weg ist eine Lehrerfortbildung für Lehrpersonen zum Thema Rastertunnelmikroskop. Bei diesen kann im gleichen Zug zur Praxis auch die Theorie hinter den Mikroskopen behandelt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass

diese, im Umgang mit dem Rastertunnelmikroskop unerfahrenen, Lehrkräfte sich mit anderen, im Umgang erfahreneren Lehrkräften, oder generell Personen, austauschen und entweder diese in ihrem Unterricht mit einbeziehen oder von diesen den Umgang mit dem Gerät lernen. Der dritte Part besteht in der Zusammenarbeit einer Schule mit einer Einrichtung, welche ein Rastertunnelmikroskop hat. Dabei kann die Schulklasse diese Institution besuchen und dort mit und von erfahrenen Personen lernen und das Mikroskop kennenlernen.

Eine weitere Ursache für Probleme in der Durchführung, besteht in dem schon oben angesprochenen Preis eines Rastertunnelmikroskops. Dieser ist selbst in Vergleich zu verschiedenen anderen Lehrmitteln wie einem Lehrerkoffer für Elektronikversuche mit 1.700 € [42], einem Klassensatz für sechs Schülergruppen zur Mechanik für 900 € [43] oder einem Komplettsatz für ein optisches Präzisionsinterferometer für 7.000 € [44] noch deutlich erhöht. Allerdings gibt es hierfür verschiedene Möglichkeiten, welche sich als Lösung eignen können. Die erste besteht darin, das Rastertunnelmikroskop im Unterricht theoretisch zu behandeln und die Praxis des Gerätes an Institutionen mit Rastertunnelmikroskopen kennen zu lernen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Versuche mit dem Mikroskop nur theoretisch zu behandeln [20]. Dadurch spart man sich ebenfalls das Gerät. Die dritte Möglichkeit besteht darin, ein Rastertunnelmikroskop selbst zu bauen und damit die Versuche durchzuführen.

Betrachtet man nun den rein theoretischen Ansatz, so ist eine Visualisierung über Multimediales Lehr-Lernkonzept möglich. Einen Ansatz, wie so ein Lernkonzept aussehen kann, liefern Ingo Elks et al.. Dabei wird eine digitale Lernumgebung, in diesem Fall auf HTML basierend, geschaffen, welche durch Animationen, Videos und die Kombination von Text und Bild mehrere Kanäle anspricht. Ebenfalls können die Lernenden die Geschwindigkeit bestimmen und somit selbstständig lernen. Durch eine Einleitung und anschließende Informationsseiten über Aufbau und Funktion wie auch weitere Selbstversuche wird langsam im Thema aufgebaut und eine Differenzierung auf SchülerInnen-Ebene erreicht [20, p. 83]. Diese Umgebung wurde in siebten und neunten Klassen von Realschulen und Gymnasien getestet und von konkreten Arbeitsaufträgen und weiteren Materialien wie Arbeitsblättern unterstützt [20, pp. 84-85].

Betrachtet man die Möglichkeit des Eigenbaus eines Rastertunnelmikroskop, so gibt es einige Grundlagen, an denen es sich zu orientieren gibt. Grundsätzlich gilt, dass eine Lehrkraft meist keine Elektrofachkraft ist [45, p. 226], weshalb die Reparatur an elektrischen Geräten und Anlagenteilen verboten ist [45, p. 225]. Inkludiert man in der Reparatur auch das von Grund auf Neubauen eines elektrischen Gerätes, da auch hier entsprechende

Sicherheiten getroffen werden müssen, so fällt die Stromversorgung über Netzspannung für die meisten Lehrkräfte weg. Allerdings ist dadurch nicht der gesamte Aufbau gefährdet. Die BIAS-Spannung hat nur wenige Volt (siehe 3.2), wodurch die Höchstspannung von den Piezoelementen bestimmt wird. Finden sich hier Elemente, welche unter 120V Gleichspannung funktionieren, so lässt sich das Mikroskop mit Schutzkleinspannung (SELV) oder Funktionskleinspannung (PELV) betreiben, sodass man hier nach RISU (Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht) die entsprechenden Sicherheitsvorschriften einhält [45, p. 223]. Geht man nun jedoch von einem Aufbau mit einer Elektrofachkraft aus, so muss das endgültige Gerät sicher sein, kann jedoch als Eingangsspannung eine nicht berührungssichere Spannung verwenden, solange das gesamte Gerät berührungssicher gestaltet ist, also seinen Basisschutz besitzt. Basisschutz bedeutet: „Gefährliche aktive (strom- und spannungsführende) Teile dürfen nicht berührbar sein.“ [45, p. 218].

Der Aufbau eines solchen Eigenbau-Rastertunnelmikroskop orientiert sich dabei an den Bestandteilen aus 3.2. Die Eingangsspannung wird zunächst verarbeitet und auf die entsprechenden Spannungsniveaus (BIAS-Spannung, Piezospannung, Steuerspannung) umgewandelt. Die Steuerung der Messspitze sowie die Kommunikation zum Computer kann heutzutage über einen Mikrocontroller wie dem Arduino UNO geschehen.

Allerdings gibt es bei dem Eigenbau eines solchen Mikroskops ebenfalls Probleme. Zum einen benötigt man Kenntnisse in der Elektronik zur Auswahl von Bauteilen und dem Erstellen der Schaltung. Zum anderen werden Programmierkenntnisse benötigt, damit man die Steuerung wie auch die Visualisierung der Messergebnisse erstellen kann. Zusätzlich nimmt das gesamte Projekt des Eigenbau-Mikroskops einiges an Zeit in Anspruch. Zudem besteht die Möglichkeit, dass das Eigenbau-Rastertunnelmikroskop die gewünschte Auflösung nicht erreichen und somit nicht für den geplanten Verwendungszweck eingesetzt werden kann. In diesem Fall würde viel Entwicklungs- und Bauzeit für ein nicht funktionierendes Gerät verschwendet werden. Das ein solches Projekt jedoch nicht unmöglich ist, zeigen verschiedene Selbstbau-Geräte. Die Universität Münster hatte eine Zeit lang mit der Interface Physics Group einen Bausatz für ein „Schüler-STM“ entwickelt. Dieser ist allerdings nicht mehr zu erwerben [30, pp. 4-5]. Allerdings wurde 2010 auf Basis dieses Bausatzes ein weiteres Rastertunnelmikroskop entwickelt, welches erstaunliche Bilder liefern kann (siehe Figure 23, Seite 27) [30]. Die Ansteuerung der Achsen geschieht, wie man in Figure 22 (Seite 27) sehen kann, bei diesem Mikroskop über drei Piezoelemente, welche über ein Achsenkreuz verbunden sind.

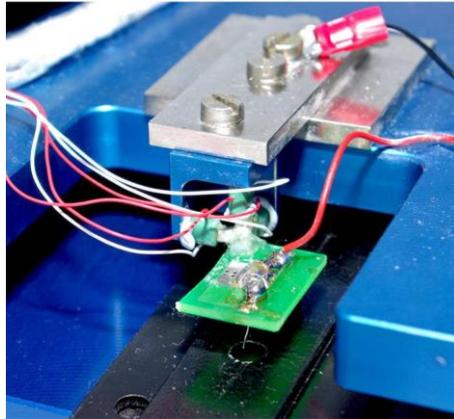


Figure 22: Scaneinheit mit Achsenkreuz aus Piezoelementen [30, p. 13]

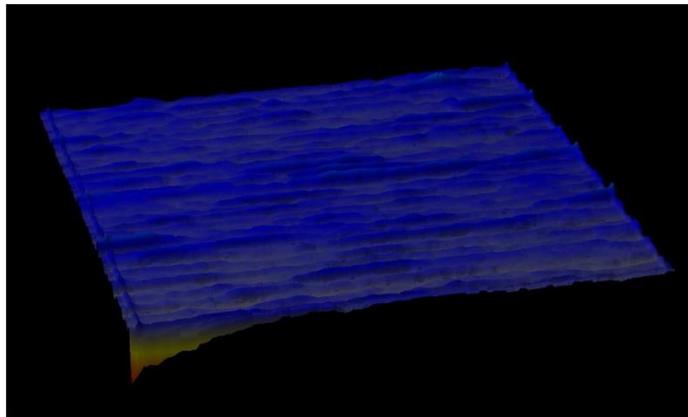


Figure 23: Goldoberfläche des Eigenbau-RTM [30, p. 15]

Ebenfalls im Jahr 2010 veröffentlichten Golda, Klump und Schulte-Braucks von der Ruhr Universität Bochum ihr Eigenbau-Rastertunnelmikroskop einschließlich Problemen und Lösungsvorschlägen [28]. Zur Bewegung der Achsen wird hier ebenfalls ein Achsenkreuz aus drei Piezoelementen verwendet [28, p. 24]. Dieses Mikroskop lieferte detailreiche Oberflächenbilder wie jenes in Figure 25 (Seite 28).

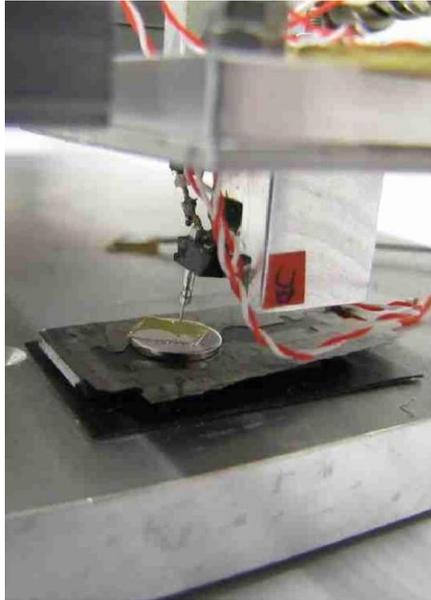


Figure 24: Ansicht Spitzenhalter und Probe [28, p. 23]

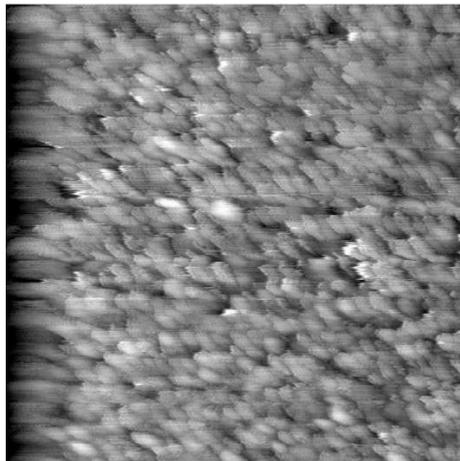


Figure 25: Gold auf Silizium [28, p. 74]

Ein Selbstbau muss jedoch nicht immer zum Erfolg führen. Dieser Misserfolg liegt jedoch an der fehlenden Fertigstellung des Aufbaus [32, p. 24]. Da sich allerdings auch aus Fehlschlägen Erkenntnisse und Ideen entwickeln lassen, darf dieser Aufbau nicht in der Auflistung fehlen. Der Aufbau (Figure 26, Seite 29) benutzt einen Röhrenpiezo und eine Grobnäherung aus Mikrometerschrauben und einer Blattfeder.

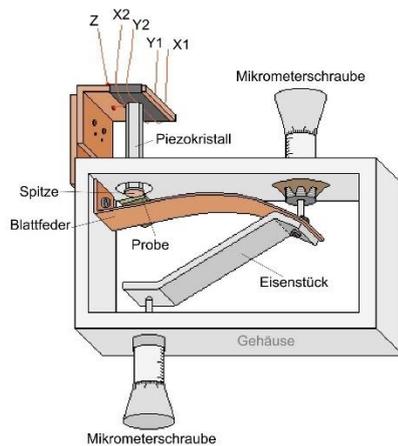


Figure 26: Mechanischer Aufbau [32, p. 12]

An diesen drei Beispielen lässt sich erkennen, dass ein Eigenbau eines Rastertunnelmikroskops möglich ist, dennoch seine Tücken bereithält. Allerdings lassen sich aus den Versuchen und gerade den Verbesserungsvorschlägen Ideen herausuchen, welche man in einem eigenen Projekt von vornherein einplanen könnte, wie etwa eine Grobannäherung per Schrittmotor [28, p. 82, 30, p. 16].

5. Entwicklung des Unterrichts

Nachdem die Anwendung der Rastertunnelmikroskopie im Unterricht behandelt wurde, steht nun zur Debatte, inwieweit sich der Unterricht verändern müsste, sodass das Rastertunnelmikroskop eine Verwendung findet. Selbstverständlich kann aktuell jede Lehrkraft für sich entscheiden, dass sie ihren Unterricht entsprechend gestaltet und das Rastertunnelmikroskop in diesen einbindet.

Der erste Punkt betrifft den Lehrplan. In diesem sollte ein einheitliches, fachlich fundiertes Atommodell genannt werden, welches als aktuelles Bildungsziel ausgewählt wird und die oben angesprochenen Probleme behandelt. Dazu sollte es leicht mit neuem Wissen erweiterbar sein, keine Fehlvorstellungen aufbauen und trotzdem die Fragen der Lernenden beantworten. Optimal wäre zudem noch eine Kombination mit dem Fach Chemie, sodass die verwendeten Modelle nicht konkurrieren, sondern sich gegenseitig ergänzen. Als solches Modell zeichnet sich zum Beispiel das Elektroniummodell aus. Da im Fach Chemie mit Elektronen und im Fach Physik mit einem Elektronium gearbeitet wird, scheinen die beiden Modelle zuerst nicht kompatibel. Allerdings lässt sich der Bezug über die Heißenberg'sche Unschärferelation stellen. Für die Lernenden wäre eine Beispielerklärung dann, dass in der

Chemie mit einzelnen Elektronen gearbeitet wird, da sie dort zur Bindung mehrerer Atome wichtig sind und die Position innerhalb der Schale nicht benötigt wird. Im Bereich der Atomphysik lässt sich jedoch genau diese Position innerhalb der Schale nicht mehr genau bestimmen, da die Elektronen keinen festen Ort haben, weshalb sich die Kernphysik dem Modell der Elektronenwolke (Atomorbitale) bedient. Ein solches, in den Bildungsplänen verankertes Modell gibt allen Lehrkräften ein gemeinsames Ziel. Wie sie dieses erreichen und ob sie einen historischen Rundgang oder eine reine Entwicklung dieses Modells verwenden, liegt in ihrem Ermessungsbereich. Vorteile dieses vorgegebenen Modells bestehen darin, dass alle Lernenden in der Schule das gleiche Modell als Lernziel haben und somit eine gemeinsame Grundlage für die weiteren Bildungswege besitzen. Zudem lässt sich auf diesem Modell weiterhin aufbauen, sodass auch in der weiteren Bildungskarriere dieses Modell erweitert wird und nicht vollständig neu erlernt werden muss. Als Nachteile lässt sich hier die Einschränkung in der pädagogischen Freiheit durch feste Zielsetzung nennen. Ein weiterer Nachteil besteht in der nun notwendigen Weiterbildung der Lehrkräfte über dieses Modell. Allerdings wird sich dies eventuell auf längere Zeit als Vorteil herausstellen, da somit alle Lehrenden dasselbe Ziel haben und nicht mehr unzählige (Misch-)Modelle unterrichten, wodurch der Austausch untereinander vereinfacht wird und die einzelne Lehrkraft nicht mehr verschiedene Modelle beibringen muss, wodurch Verwirrung und Verwechslung auf der Seite der Lernenden reduziert werden kann.

Da mit der Änderung im Bildungsplan die Grundlage für einen einheitlichen Stand zum Thema Atomvorstellungen geschaffen wurde, besteht nun die Frage, wie der jeweilige Unterricht stattfindet. Diese liegt selbstverständlich weiterhin in der Entscheidung der jeweiligen Lehrkraft. Allerdings können multimediale, digitale Medien bereitgestellt werden, auf welche Lehrkräfte und Lernende zugreifen können. Dabei sollten sie hauptsächlich den Lernenden helfen sich das Thema individuell zu erarbeiten und eine Quelle zum Nachlesen zur Verfügung zu stellen. Diese Unterlagen sollten online zur Verfügung gestellt werden, sodass die Lernenden online und von zuhause auf diese zugreifen können. Wird nun nicht nur das Rastertunnelmikroskop als Werkzeug und Erfindung der Atomphysik gezeigt, sondern auch das Atommodell im Bezug zu den Entdeckungen des Rastertunnelmikroskops, so wird basierend auf einer Visualisierung das gewählte Atommodell erkundet und aufgebaut. Somit bietet die multimediale Lernplattform eine Verbindung im Lernprozess zwischen den Ergebnissen des Mikroskops und den Teilchenvorstellungen der Lernenden, welche gegenseitig aufeinander abgestimmt ist. Außerdem wird durch eine digitale Lernplattform kein

eigenes Rastertunnelmikroskop benötigt, wodurch die Anwendung des Themas im Schulunterricht günstiger und somit plausibler wird.

Mit der ersten Änderung ist die Grundlage geschaffen, dass das Rastertunnelmikroskop im Unterricht überhaupt sinnvoll eingesetzt werden kann. Die zweite Änderung führt das Rastertunnelmikroskop mitsamt den Ergebnissen und Erkenntnissen in den Unterricht ein und ermöglicht das Arbeiten damit. Bis zu diesem Punkt ist das Mikroskop allerdings nur als Werkzeug und von Abbildungen bekannt. Deshalb ist die dritte Entwicklung des Unterrichts in der Anwendung der Rastertunnelmikroskopie in der Praxis. Damit eine Verwendung der Mikroskope im Schulunterricht stattfinden kann, wird eine breitere Verteilung der Geräte benötigt. Durch diese wird der Zugang für Schulen erleichtert. Dabei ist es jedoch irrelevant, wie diese Verteilung stattfindet. Da die Lehrkräfte ein weitreichenderes Wissen wie die Lernenden benötigen, wird auch dies bei einem weiterführenden Atommodell wie dem Elektronium erweitert. Somit wird eine Ausbildung im Bereich Rastertunnelmikroskop stattfinden. Damit die zukünftigen Lehrenden hier ein größeres Wissen wie die SchülerInnen erwerben, sollte hier ein Teil der Ausbildung die Arbeit mit Rastertunnelmikroskopen in die Ausbildung einfließen. Somit finden sich an den Hochschulen Geräte, welche für die Lehrerbildung verwendet werden und die Schulen besuchen oder auch ausleihen können. Weitere Möglichkeiten verhältnismäßig günstig an die Rastertunnelmikroskope heranzukommen, besteht natürlich über Schulzusammenschlüsse, sodass mehrere Schulen ein Gerät besitzen und sich gegenseitig absprechen, wann dieses wo ist. Ein ähnliches System könnte über die Kreismedienzentren eingerichtet werden, sodass die Geräte dort zur Verfügung stehen und von den Lehrkräften ausgeliehen werden können. Gleichzeitig kann dort eine entsprechende Schulung für das jeweilige Gerät stattfinden. Dem Selbstbau von Lehrgeräten von Lehrenden ist durch die oben angesprochenen Punkte, wie den hohen Zeitaufwand und die nötigen Kompetenzen, im Allgemeinen abzuraten.

6. Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, die Möglichkeiten der Anwendung des Rastertunnelmikroskops im Atomphysik-Unterricht zu betrachten. Der historische Rückblick in den Bildungsplänen wie auch die Forderungen aus den Bildungsstandards und der Öffentlichkeit zeigen, dass ein Atommodell gelehrt werden soll, welches der aktuellen Physik entspricht, aber auch als Grundlage für die weiterführenden Bildungswege der Lernenden dienen kann. Dies ist leider nicht immer gegeben. Zudem sollen die Lernenden die Verbindung und Verwendung mehrerer Atommodelle fächerübergreifend verstehen und anwenden können. Das Rastertunnelmikroskop kann hierbei helfen ein entsprechendes Verständnis zu visualisieren. Es basiert auf dem Tunneleffekt, welcher beim Annähern zweier leitender Objekte einen Tunnelstrom über die entsprechende Potentialbarriere, in diesem Fall der Spalt, fließen lässt. Dieser Strom ist abhängig vom Abstand der beiden Leiter, weshalb daraus eine topographische Karte der Oberfläche erstellen. Die Steuerung kann über zwei verschiedene Messmodi geschehen. Beim ersten bleibt die Höhe der Spitze konstant, wodurch die Messgeschwindigkeiten erhöht werden können, die Messung allerdings auch durch zu kleine oder zu große Entfernung fehlschlagen kann. Der andere Modus hält den Tunnelstrom konstant, wodurch ein Crash mit der Messoberfläche verhindert werden kann, bei höheren Geschwindigkeiten der Regler jedoch überfordert werden kann und somit die Messgeschwindigkeit reduziert werden muss. Die Oberflächenbetrachtung von verschiedenen Materialien erlaubt den Einblick in die Struktur der Materie. Allerdings wird eine atomare Auflösung fast nur unter Ultrahochvakuum erreicht, weshalb dies für die Schule bereits entfällt. Ebenfalls ist der Experimentieraufwand so hoch, dass mindestens ein halber Tag eingeplant werden muss, weshalb auch hier die Anwendung im Unterricht erschwert wird. Nicht zuletzt sind entsprechende Geräte sehr kostspielig. Für eine Durchführung im Unterricht kommen trotzdem verschiedene Unterrichtskonzepte ins Spiel. Einerseits kann der Unterricht durch Zusammenlegen mehrerer Unterrichtsblöcke oder das theoretische Behandeln des Rastertunnelmikroskops durchgeführt werden. Andererseits können die Geräte von mehreren Schulen geteilt oder eine Einrichtung mit Rastertunnelmikroskopen besucht werden. Nicht zuletzt besteht der Eigenbau eines solchen Mikroskops als Möglichkeit, welche allerdings entsprechende Qualifikationen und ein entsprechendes Wissen in Elektronikbauteilen und Programmierung benötigt, weshalb in den meisten Fällen davon abzuraten ist. Zusätzlich ist ein Selbstbau sehr Zeitintensiv und zudem nicht immer erfolgreich, weshalb hiervon in den meisten Fällen abgeraten werden kann. Damit ein Rastertunnelmikroskop im Schulunterricht jedoch großflächig

Verwendung finden kann und die Forderungen der Gesellschaft erfüllt werden, wird eine Änderung an den Bildungsplänen zu einem moderneren Atommodell der Atomphysik nötig sein. Ein erweitertes Atommodell, welches die Forderungen erfüllt und für die Lernenden auf den weiteren Bildungswegen ein Fundament bildet, ist zum Beispiel das Elektronium-Modell. Dies kann zusammen mit der Rastertunnelmikroskopie eingeführt werden, welche dieses Modell visualisiert. Da die Rastertunnelmikroskopie jedoch auf einem quantenmechanischen Effekt basiert, muss auch die Funktion des Mikroskops heruntergebrochen werden, sodass die Lernenden diese verstehen. Dies kann über etwaige Simulationen im größeren Maßstab geschehen. Im Endeffekt ist es jedoch egal, ob das Mikroskop nur in der Theorie oder auch in der Praxis erkundet wird, solange es zum Wissenserwerb genutzt werden kann.

Alles in Einem ist das Rastertunnelmikroskop ein interessantes, aber auch empfindliches und komplexes Werkzeug, welches uns Einblicke in die Welt des Kleinen ermöglicht. Allerdings besteht auch bei diesem Werkzeug die Gefahr, dass wir die Visualisierungen, welche auf Basis der Theorie entsteht, für eine Aussage über die Wahrheit sehen können, obwohl sie nur die Theorie zeigt. Wie bei jedem didaktischen Werkzeug gilt auch hier, dass die Art der Hinführung und Anwendung im Schulunterricht einen großen Einfluss auf den Erfolg des Werkzeuges haben kann. Dementsprechend lässt sich nicht sagen, ob das Rastertunnelmikroskop gut oder schlecht ist. Ebenfalls gibt es kaum Studien zur Anwendung im Schulunterricht, weshalb hierüber ebenfalls wenig fundierte Aussagen zu treffen sind. Ich selbst bin über die geringe Anzahl an Studien über die Anwendung eines so wertvollen Werkzeuges erstaunt gewesen. Trotzdem oder gerade aus diesem Grund sollte in dieser Hinsicht weiter geforscht werden, wie sich ein weiterreichendes Atommodell und das Rastertunnelmikroskop im Schulunterricht auswirken kann, sodass hier eventuell auf langfristiger Sicht die Verwirrungen der Lernenden reduziert wird und die Inhalte nachhaltiger gelernt werden können. Damit man allerdings in seiner Hochschullaufbahn mit diesen Geräten arbeiten kann, sodass man nach seiner Ausbildung den Lernenden diese Inhalte zeigen und bei Bedarf ein solches Mikroskop bedienen kann, ist ein Versuch in den Universitäten hilfreich, wenn nicht sogar von Nöten. Deshalb besteht bei mir weiterhin die Idee ein Rastertunnelmikroskop mit einem Mikrocontroller wie dem Arduino UNO zu entwickeln, welcher Versuche zur Visualisierung von atomaren Strukturen erlaubt. Inwieweit dies jedoch funktioniert und ob dies überhaupt so leicht machbar ist, steht zu aktuellem Zeitpunkt jedoch in den Sternen. Ein weiterer Punkt, welcher in der Zukunft weiter erforscht werden sollte, besteht aus der Anwendung verschiedener Atommodelle im Schulunterricht in Bezug zur Effizienz,

fachlichen Korrektheit, Verständlichkeit und der Möglichkeit dieses auch im weiteren Bildungsweg möglichst störungsfrei weiter zu benutzen. Ebenfalls sollte die Verwendung des Rastertunnelmikroskops im Schulunterricht in theoretischer und praktischer Form in Bezug zum Lerngewinn weiter erforscht werden, sodass eine Nutzung des Mikroskops fundiert begründet oder auch abgewiesen werden kann.

7. Abbildungsverzeichnis

Figure 1: Vergleich der Nuklearwaffenarsenale der USA und der UdSSR 1950-1990 [9]..	3
Figure 2: Schaubild RTM: Drei Piezoelemente (Py, Px, Pz) werden über die Steuereinheit (CU) angesteuert sodass die Spitze einen konstanten Tunnelstrom (It) bildet. [25, p. 58]...	7
Figure 3: Tunneleffekt mit Potentialbarriere U und Energie E [28, p. 4]	7
Figure 4: Vergleich Energie und Wellenzahl [29, p. 19]	9
Figure 5: Wellenentartung im 3D-Kasten. Eine Welle (n1,n2,n3) besteht aus den drei Richtungen, also (x, y, z). Hat eine Welle nun eine Wellenzahl von 1 in x, 3 in y und 2 in z, so ergibt sich die Wellenartung (1,3,2). [29, p. 21].....	9
Figure 6: Dämpfung durch die Verwendung verschiedener Materialien [28, p. 22]	11
Figure 7: Anordnung Bewegungsapparat. In grün sind die Piezoelemente, welche die Goldspitze führen. [33, p. 217]	11
Figure 8: Steuerungsschemata RTM [28, p. 26]	12
Figure 9: A: Constant Current Mode (CCM), B: Constant Height Mode (CHM) [3, p. 17]	13
Figure 10: Goldbedampftes Gitter mit Markierungen [37, p. 10].....	14
Figure 11: Darstellung der glatten Graphitoberfläche nach einer Fourieroptimierung [38, p. 8].....	15
Figure 12: Filmausschnitt: A Boy And His Atom [40, 1:45].....	15
Figure 13: Quantenpferch: Links => Im Aufbau, Rechts => Vollendet mit stehender Welle [15, p. 329]	16
Figure 14: Zu messende Tischfläche [2, p. 15]	18
Figure 15: Zu Tischfläche gehörende Topographien [2, p. 16]	19
Figure 16: Aufbau Simulationsrastertunnelmikroskop [41, p. 8].....	19
Figure 17: a) Filmdosen, b) 3D-Darstellung, c) simulierte Darstellung, d) Schematische Struktur von Graphit [41, p. 11].....	20
Figure 18: stehende Elektronenwelle [29, p. 43]	21
Figure 19: Intensität des Atomorbitals von Wasserstoff [29, p. 46]	21
Figure 20: Stärken und Schwächen: Bohrmodell, Wolkenmodell, Black-Box [17, p. 42].	22
Figure 21: CO-Moleküle auf Platin-Oberfläche [39, p. 131].....	23
Figure 22: Scaneinheit mit Achsenkreuz aus Piezoelementen [30, p. 13]	27
Figure 23: Goldoberfläche des Eigenbau-RTM [30, p. 15]	27
Figure 24: Ansicht Spitzenhalter und Probe [28, p. 23].....	28
Figure 25: Gold auf Silizium [28, p. 74]	28
Figure 26: Mechanischer Aufbau [32, p. 12]	29

8. References

- [1] Janina Sprotte, “Was Lehrer über die Vermittlung von Teilchenkonzept, chemischer Reaktion und Atombau denken,” in *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung: 34.] Jahrestagung in Essen [vom 17. bis 20. September] 2007 ; [Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, D. Höttecke, Ed., Münster: LIT-Verl., 2008, pp. 146–148. Accessed: Oct. 11 2022.*
- [2] C. V. Fabian Thorand, *Rastertunnelmikroskopie mit LEGO-Mindstorms*, 2012. Accessed: Dec. 24 2022. [Online]. Available: <https://www.dgzfp.de/portals/24/iz/pdf/jugend%20forscht/rw%20nordrhein-westfalen%20-%20k%c3%b6ln%20bonn%202012%20neu.pdf>
- [3] S. Penner, T. Möst, P. Scheier, and A. Kaleve, “Das didaktische Potential der Rastertunnelmikroskopie in der Hochschullehre,” *CHEMKON*, vol. 22, no. 1, pp. 15–22, 2015, doi: 10.1002/ckon.201410236.
- [4] *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss: Bildungsstandards Physik*, 2004. [Online]. Available: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf
- [5] International Campaign to Abolish Nuclear weapons (ICAN) - Deutschland e.V., *Atomwaffen - eine Chronologie*. [Online]. Available: <https://www.icanw.de/fakten/nuklearwaffen-eine-chronologie/> (accessed: Dec. 13 2022).
- [6] Jan-Henrik Meyer, *Kleine Geschichte der Atomkraft - Kontroverse in Deutschland*. [Online]. Available: <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/333362/kleine-geschichte-der-atomkraft-kontroverse-in-deutschland/> (accessed: Dec. 13 2022).
- [7] *Entwurf eines Lehrplans für die Mittelschulen in Nordwürttemberg*, 1952.
- [8] *Bildungsplan für Mittelschulen Baden-Württembergs*, 1964.
- [9] Bernhard Weidenbach, *Vergleich der Nuklearwaffenarsenale der USA und der UdSSR in den Jahren 1950 bis 1990*. Accessed: Dec. 13 2022. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/935948/umfrage/nuklearwaffenarsenale-der-usa-und-der-udssr/>
- [10] *Vorläufige Lehrpläne für die Realschule*, 1979.
- [11] *Bildungsplan für die Realschule: Bildungsplan 1994*, 1994. Accessed: Oct. 9 2022. [Online]. Available: https://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents_E-221826869/lbw/Bildungsplaene/Bildungsplaene-Archiv-Realschule/BP_1994_RS.pdf
- [12] Bundesamt für Strahlenschutz, *Der Unfall von Fukushima*. [Online]. Available: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/notfallschutz/notfall/fukushima/unfall.html> (accessed: Dec. 13 2022).
- [13] “GEMEINSAMER BILDUNGSPLAN DER SEKUNDARSTUFE I - Fachplan Physik: Bildungsplan 2016,” in *GEMEINSAMER BILDUNGSPLAN DER SEKUNDARSTUFE I*, Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, Ed., 2016. Accessed:

- Oct. 8 2022. [Online]. Available: <https://www.bildungsplaene-bw.de/,Lde/LS/BP2016BW/ALLG/SEK1/PH>
- [14] Manfred Euler, “Wege in die Nanowelt,” in *Springer eBook Collection, Physikdidaktik: Theorie und Praxis*, R. Girwitz, P. Häussler, and E. Kircher, Eds., 3rd ed., Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2015, pp. 579–600. Accessed: Oct. 9 2022. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-41745-0.pdf>
- [15] M. Euler, “Wege in die Nanowelt: Skalierungs- und Strukturprinzipien, Werkzeuge der Erkenntnisgewinnung, Modelle und Experimente,” in *Physikdidaktik*, E. Kircher, R. Girwitz, and H. E. Fischer, Eds., 4th ed., Berlin: Springer Spektrum, 2020, pp. 325–359.
- [16] Gesche Pospiech, “Teilchenphysik in der Schule: Ein fachdidaktischer Blick auf die Elementarteilchenphysik,” *Unterricht Physik*, vol. 31, 180-2020, pp. 9–13, 2020.
- [17] Florian Karsten, “Planeten, Wolken oder schwarze Kisten?: Wie können wir Atome in der Schule didaktisch sinnvoll beschreiben?,” in *Physik Journal*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.KgaA, 2011, pp. 39–42. Accessed: Oct. 9 2022. [Online]. Available: https://www.pro-physik.de/sites/default/files/pdf/articles/2018-11/1332092145f_PJ11_2011_39_42.pdf
- [18] Susanne Metzger, “Die Naturwissenschaft fächerübergreifend vernetzen,” in *UTB Pädagogik*, vol. 3248, *Fachdidaktik Naturwissenschaft: 1.- 9. Schuljahr*, P. Labudde and S. Metzger, Eds., 3rd ed., Bern: Haupt Verlag, 2019, pp. 29–44. Accessed: Oct. 11 2022.
- [19] R. Duit, “Alltagsvorstellungen und Physik lernen,” in *Springer-Lehrbuch, Physikdidaktik: Theorie und Praxis*, E. Kircher, R. Girwitz, and P. Häußler, Eds., 3rd ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 657–680.
- [20] I. Eilks, J. Möllering, G. Leerhoff, and B. Ralle, “Teilchenmodell oder Teilchenkonzept? Oder: Rastertunnelmikroskopie im Anfangsunterricht,” *CHEMKON*, vol. 8, no. 2, pp. 81–85, 2001, doi: 10.1002/ckon.20010080205.
- [21] Anni Heitzmann, “Modelle verwenden,” in *UTB Pädagogik*, vol. 3248, *Fachdidaktik Naturwissenschaft: 1.- 9. Schuljahr*, P. Labudde and S. Metzger, Eds., 3rd ed., Bern: Haupt Verlag, 2019, pp. 89–104. Accessed: Oct. 11 2022.
- [22] *PHYWE Compact STM, Rastertunnelmikroskop / PHYWE*. [Online]. Available: https://www.phywe.de/physik/moderne-physik/quantenphysik/phywe-compact-stm-rastertunnelmikroskop_1703_2634/ (accessed: Oct. 8 2022).
- [23] Veit-Jakobus Dieterich, “Fächerübergreifender Unterricht,” *Theo-Web. Zeitschrift für Religionspädagogik*, no. 1, pp. 17–27, 2008. [Online]. Available: <https://www.theo-web.de/zeitschrift/ausgabe-2008-01/4.pdf>
- [24] Technische Universität Dortmund, *Rastertunnelmikroskopie (STM)*. [Online]. Available: https://e1.physik.tu-dortmund.de/cms/de/AG_Westphal/untersuchungsmethoden/rastertunnelmikroskopie/index.html (accessed: Dec. 15 2022).

- [25] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, “Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy,” in *Physical Review Letters*, pp. 57–61. Accessed: Dec. 24 2022. [Online]. Available: <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.49.57>
- [26] G. Binnig and H. Rohrer, “Scanning tunneling microscopy,” *Surface Science*, vol. 126, 1-3, pp. 236–244, 1983, doi: 10.1016/0039-6028(83)90716-1.
- [27] L. Harald, *alpha-Centauri / Astro-Physik: Was ist der Tunneleffekt*: ARD alpha, 2022. Accessed: Dec. 21 2022. [Online]. Available: <https://www.br.de/mediathek/video/alpha-centauri-astro-physik-was-ist-der-tunneleffekt-av:5c489276e7ed850018665e56>
- [28] Judith Golda, Christian Klump, Christian Schulte-Braucks, *Rastertunnelmikroskop: im Selbstbau*. SOWAS-Praktikum Herbst 2010. [Online]. Available: https://praktikum.physik.ruhr-uni-bochum.de/fileadmin/praktikum/SOWAS/presentationen/Selbstbau_eines_STM.pdf (accessed: Oct. 8 2022).
- [29] M. D. Lechner, *Einführung in die Quantenchemie: Aufbau der Atome und Moleküle, Spektroskopie*, 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2017. Accessed: Dec. 24 2022. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-49883-5.pdf?pdf=button>
- [30] P. S. Christian Behrens, *Ein Rastertunnelmikroskop im Eigenbau*, 2010. Accessed: Dec. 24 2022. [Online]. Available: <http://www.dgzfp.de/portals/24/iz/langfassung%20rheinland-pfalz%202010.pdf>
- [31] L. Libiouille, Y. Houbion, and J.-M. Gilles, “Very sharp platinum tips for scanning tunneling microscopy,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, no. 1, pp. 97–100, 1995, doi: 10.1063/1.1146153.
- [32] Fabian Fleischer, Matthias Sturm, Renè Könnecke, Ramin Torabi, Heinrich Südmeyer, Diana Bednarczyk, *Das Rastertunnelmikroskop (STM)*. Versuchsprotokoll. Berlin, 2001. Accessed: Dec. 29 2022. [Online]. Available: <http://www.torabi.de/physik/projektlabor/bin/pl%20268%20stm.pdf>
- [33] O. Panzer and H. Fuchs, “Ein Rastertunnelmikroskop im Selbstbau,” *Physik in unserer Zeit*, vol. 35, no. 5, p. 217, 2004, doi: 10.1002/piuz.200490080.
- [34] Texas Instruments, *LM741 Operational Amplifier*. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf> (accessed: Dec. 30 2022).
- [35] Linear Technology Corporation, *LT1115 - Ultra-Low Noise, Low Distortion, Audio Op Amp*. [Online]. Available: <https://www.mouser.de/datasheet/2/609/lt1115fa-2955936.pdf> (accessed: Dec. 30 2022).
- [36] Michaela Ströbitzer, “Tunneleffekt - Moodleaufbereitung,” Diplomarbeit, Institut für Theoretische Physik, Johannes Kepler Universität Linz, Linz, 2015. Accessed: Oct. 8 2022. [Online]. Available: <https://epub.jku.at/obvulihs/content/titleinfo/451941/full.pdf>
- [37] S. F. Christian Dehne, *Protokoll zum Versuch 12 Rastertunnelmikroskopie*. [Online]. Available: <http://www.fleischmann-netz.de/studium/fpi/fpi-12b.pdf> (accessed: Jan. 1 2023).

- [38] M. G. Anton Haase, *Bericht zum Versuch Rastertunnelmikroskopie*. Accessed: Jan. 1 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Goerz/publication/265754250_Bericht_zum_Versuch_Rastertunnelmikroskopie/links/5630d3a508ae13bc6c352e6c/Bericht-zum-Versuch-Rastertunnelmikroskopie.pdf
- [39] P. Zeppenfeld, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, “Manipulating atoms and molecules with a scanning tunneling microscope,” *Ultramicroscopy*, 42-44, pp. 128–133, 1992, doi: 10.1016/0304-3991(92)90256-J.
- [40] IBM, *A Boy And His Atom: The World's Smallest Movie*, 2013. Accessed: Jan. 2 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0>
- [41] P. R. Christian Gerbig, *Rastertunnelmikroskopie*. [Online]. Available: <https://pi.blogger.de/static/antville/pi/files/a06%20rastertunnelmikroskopie%20gerbig%20rei.pdf> (accessed: Jan. 1 2023).
- [42] PHYWE, *Set Lehrerversuche Elektrik Baustein-System 1 für 30 Versuche, Demo advanced Physik ET-BS*. Accessed: Jan. 12 2023. [Online]. Available: https://www.phywe.de/versuche-sets/demo-lehrerversuche-sets/set-lehrerversuche-elektrik-baustein-system-1-fuer-30-versuche-demo-advanced-physik-et-bs_2299_3230/
- [43] Wiemann Lehrmittel, *Klassensatz "Mechanik 2.0": Material für 6 Schülergruppen*. Accessed: Jan. 12 2023. [Online]. Available: <https://www.wiemann-lehrmittel.de/shop/naturwissenschaften/physik/schlerversuchs-gerte/schlerexperimentier-gertesysteme-seg/mechanik-1-2/klassensatz-mechanik-2-0>
- [44] Dr. G. Schuchardt Institut für wissenschaftliche Lehrmittel, “PASCO Präzisionsinterferometer mit Laser Komplettsset,” <https://www.schuchardt-lehrmittel.de/datasheet/71041743> (accessed: Jan. 12 2023).
- [45] Kultusministerkonferenz, *RICHTLINIE ZUR SICHERHEIT IM UNTERRICHT: (RISU) Empfehlung der Kultusministerkonferenz*. [Online]. Available: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf (accessed: Jan. 7 2023).

9. Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Textstellen als solche kenntlich gemacht habe. Außerdem versichere ich, dass die vorliegende Arbeit noch nicht anderweitig zur Gänze oder in Teilen als Bachelorarbeit oder sonstige Prüfungsleistung eingereicht wurde. Die Prüfungsleistung kann mittels geeigneter Plagiatserkennungssoftware auf möglicherweise nicht kenntlich gemachte übernommene Textpassagen oder sonstige Quellen hin überprüft werden.

Datum

Fabian Hölzle