Cool Physics

Matthias Gluth und Frank Fiedler, Institut für Physik der Universität Mainz

> *Wärme erhält man leichter als Kälte. Ein Feuer kann entzündet und aufrecht erhalten werden. Der Kälte muss man nachlaufen, auf die Höhen der Berge, in Erdhöhlen, tiefen Kellern, oder man muss auf sie warten, bis sie da ist, auch dann lässt sie sich nicht halten.* [Bac70]

Wärme *erhält* man nicht nur leichter als Kälte, wie schon Francis Bacon im 17. Jahrhundert feststellte – als Lebensmittelkühlung zur Verlängerung der Haltbarkeit noch keine Selbstverständlichkeit und Speiseeis oder Klimaanlagen fast unvorstellbar waren – Wärme *versteht* man auch leichter als Kälte: Wenn ich mechanische Arbeit verrichte und einen Generator antreibe, an den ein Lastwiderstand angeschlossen ist, dann erzeuge ich Wärme. Das solchen Umwandlungsketten zugrundeliegende Prinzip der Energieerhaltung wird den meisten Schülern im Laufe ihres Schulunterrichts selbstverständlich geworden sein. Ganz anders sieht es beim Mysterium der Kühlung aus: Obwohl Kühlung im Alltag allgegenwärtig ist, bleiben die physikalischen Grundlagen oft unverstanden.

Der Kontext der Kühlung liefert nicht nur einen offensichtlichen und motivierenden Alltagsbezug[1], sondern führt, wie unten ausgeführt wird, auch direkt hin zu aktuellen Forschungsthemen. Darüber hinaus bietet er eine Anwendung für eine Vielfalt an fachlichen Inhalten. Hier setzt der Schülerexperimentiertag *Cool Physics* an, der an der Universität Mainz im Rahmen einer Masterarbeit [Glu15] für die Sekundarstufe II entwickelt und erfolgreich erprobt wurde. Er wird in Zukunft für Kurse aus der Umgebung, die für einen Tag zum Experimentieren an die Universität kommen, angeboten[2]; die Unterrichtsmaterialien[3] können aber auch als Vorlage für die Behandlung des Themas an der Schule dienen. Ob am außerschulischen Lernort oder an der Schule, *Cool Physics* kann beispielsweise die in [Ein10] beschriebene Unterrichtsreihe zur Energieentwertung am Stirlingmotor abschließen und erweitern – wie weit dabei elementarisiert wird (vgl. den Vorschlag zur Wärmepumpe in [BW12]), bleibt der Lehrkraft überlassen.

[1] Dass dieser Kontext sehr motivierend sein kann, wurde z. B. in [RMG11] für den Unterricht der Orientierungsstufe gezeigt.

[2] Anmeldung zu den Schülerprojekten der Physik-Institute der Universität Mainz über die Web-Seite www.schule.physik.uni-mainz.de

[3] Aufgabenblätter, Stationshandbücher und Simulationsprogramm können über die Web-Seite www.schule.physik.uni-mainz.de bezogen werden.

Themen und Experimente

Der Schülerexperimentiertag *Cool Physics* bietet zu vier unterschiedlichen Themengebieten jeweils eine Experimentierstation zu einer technischen Anwendung. Die Stationen wurden so ausgewählt, dass die Schüler Schlüsselexperimente zu jeder Anwendung selbst durchführen können, wobei verschiedene Experimente unterschiedliche methodische Schwerpunkte legen. Die Stationen bauen inhaltlich nicht aufeinander auf, so dass sie im Rahmen eines Stationenlernens in Kleingruppen durchlaufen werden können.

Der Stirling-Motor ist eine bekannte Wärmekraftmaschine. Diese Anwendung stellt im Kontext der Kühlung eine direkte Verknüpfung mit der Thermodynamik her, welche ggf. ohnehin im Unterricht behandelt wird. Der Bezug zur Thematik liegt in der Verwendung des Stirling-Motors als Wärme- bzw. Kältepumpe. Wird der Stirling-Motor extern, z.B. durch einen Elektromotor, angetrieben, so kann mit ihm ein Temperaturunterschied erzeugt werden. Die Physik, welche hinter dem Funktionsprinzip einer Wärmekraftmaschine bzw. einer Kältepumpe steckt, kann für Schüler der Sekundarstufe II zum Beispiel gemäß [Ein10] aufbereitet werden.

Der Kompressor-Kühlschrank ist das, was die Schüler vermutlich nur unter dem Begriff *Kühlschrank* kennen. Ein solcher steht heutzutage in fast jedem deutschen Haushalt und ist aus unserem Alltag nicht wegzudenken. Kompressor-Kühlschränke beruhen bei aller Komplexität im Detail auf einem sehr simplen physikalischen Prinzip: Dadurch, dass Verdampfungswärme zugeführt werden muss, damit ein Stoff vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand wechselt, wird die Umgebung gekühlt. In dieser Station wird die Funktionsweise eines Alltagsgegenstands experimentell erklärt und somit gleichzeitig die Brücke zu typischen Inhalten aus der Sekundarstufe I geschlagen.

Das Peltier-Element setzt sich im Allgemeinen aus Halbleitern zusammen, welche von zwei Keramikplatten eingerahmt werden. Fließt ein Strom durch das Element, so erwärmt sich die eine Seite, während sich die andere abkühlt. Umgekehrt kann ein Peltier-Element auch zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt werden: Man erwärmt eine Seite des Elements durch eine Heizung und kühlt die andere (z.B. mit Wasser). Ein umfassendes Verständnis der Physik des Peltier-Effekts kann im Rahmen eines Schülerprojekts nicht erreicht werden. Es bietet sich jedoch an, industriell gefertigte Peltier-Elemente auf Halbleiterbasis, wie sie in Kühlboxen z. B. beim Camping verwendet werden, zu untersuchen und einen Vergleich mit dem Peltier-Effekt bei Metallen experimentell durchzuführen.

Die Laser-Kühlung ist eine Methode der Kühlung, die fast ausschließlich in der wissenschaftlichen Forschung zum Einsatz kommt. Es gibt unterschiedliche Varianten der Laser-Kühlung; für dieses Projekt wurde speziell die Dopplerkühlung aufbereitet. Dabei dient der Dopplereffekt bei Licht in Kombination mit der Tatsache, dass Atome nur Lichtquanten bestimmter Energien absorbieren können, dazu, ein Gas auf Temperaturen im Bereich knapp oberhalb des absoluten Temperaturnullpunktes zu kühlen. Während die Kenntnis des Dopplereffekts bei Licht Voraussetzung für das Verständnis der Dopplerkühlung ist, sind keine Vorkenntnisse zur Quantenmechanik nötig, denn Energiequanten des Lichts und das Vorhandensein diskreter Energiezustände in Atomen können ohne Weiteres adhoc eingeführt werden, um dann später im Quantenmechanik-Unterricht wieder aufgegriffen zu werden. Sowohl durch die Einsatzgebiete der Kühlmethode als auch durch ihre physikalische Erklärung ist die Station der Laser-Kühlung für den außerschulischen Lernort Universität besonders passend.

Durchführung und Erfahrungen

Das Projekt ist für die Sekundarstufe II konzipiert und wurde so gestaltet, dass es mit einem Grund- oder Leistungskurs in jeder Phase der Oberstufe durchgeführt werden kann. Grundlage dafür ist, dass für jede Station neben Arbeitsblättern ein Stationshandbuch vorliegt, in dem neben der konkreten Handhabung der Geräte auch physikalische Grundlagen erklärt werden. Auszüge aus einem Stationshandbuch und einem Arbeitsblatt werden beispielhaft in Abbildungen 1 bzw. 2 gezeigt. Bei der Station zur Laserkühlung erfolgt zusätzlich eine Einführung in die nötigen Grundlagen der Quantenmechanik über eine interaktive Präsentation, gefolgt von einem Test.

Je nach Jahrgangsstufe und Kursart hat das Projekt eher erweiternden oder wiederholenden/vertiefenden Charakter, und dementsprechend variiert der Zeitbedarf etwas. Insgesamt ist mit etwa fünf Zeitstunden zu rechnen, wobei eine ausreichende Mittagspause bereits enthalten ist.

Durchgeführt wurde das Projekt im Rahmen der Erstellung der zugehörigen Abschlussarbeit bereits zwei Mal, zum einen mit einem Grundkurs nach Abschluss des ersten Halbjahres, zum anderen mit einem Leistungskurs nach Abschluss des zweiten Jahres der Oberstufe. Die beiden Kurse spiegeln also besonders geringe bzw. besonders große zu erwartende Vorkenntnisstände wider. In beiden Fällen zeigte sich ein großes Interesse an der Thematik und auch an der zugrundeliegenden Physik. Neben dem Thema erhielt auch der Einsatz digitaler Medien, wie einer interaktiven PowerPoint-Präsentation oder der Simulation zur Laserkühlung, in der Evaluation durch die Schüler sehr gute Bewertungen. Der Unterschied im Zeitbedarf der beiden Kurse erwies sich als gering: Während der Grundkurs pro Station ca. 55 Minuten benötigte, war der Leistungskurs im Schnitt zehn Minuten eher fertig, da weniger Hintergründe selbständig erarbeitet werden mussten.

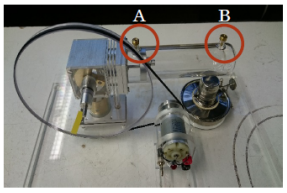
Insgesamt wurde das Projekt von allen Schülern angenommen und durchweg sehr positiv beurteilt. Gerade die Thematik der Kühlung und der Exkurs in die Anwendungen der Quantenphysik begeisterten. Dies bestätigt darin, dass beide Bereiche im Physikunterricht nicht fehlen sollten.

EIN MOTOR ZUM KÜHLEN – DER STIRLING MOTOR

Versuch zur Kältepumpe

Aufbau:

1. Das Schwungrad ist durch einen Gummiring mit dem Elektromotor verbunden.
2. Der Schalter am Elektromotor zeigt Richtung Decke (die Buchsen sind dann zugeschaltet).
3. Der Elektromotor ist mit der Spannungsquelle verbunden. Ein Voltmeter ist parallel geschaltet.
4. Für die Durchführung sollte der Motor auf unter 30°C abgekühlt sein (andernfalls abwarten!).



Durchführung:

1. Dreht die Spannungsquelle auf den gewünschten Wert.
2. Messt die Temperatur bei jedem Spannungswert an den markierten Punkten A und B.

Tipp: Wartet nach Einstellen der Temperatur mindestens eine Minute, solange bis sich ein fester Wert eingestellt hat.

3. Notiert auch die Drehzahl für jeden Spannungswert.

Abb. 1: Auszug aus dem Stationshandbuch zum Stirling-Motor

KÜHLUNG FÜR UNTEWEGS – DAS PELTIER-ELEMENT

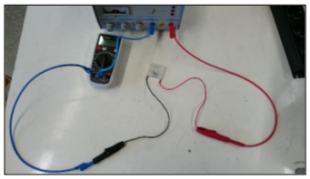
KÜHLUNG FÜR UNTERWEGS – DAS PELTIER-ELEMENT

Wenn man im Sommer lange unterwegs ist (zum Beispiel beim Camping), ist man immer froh, wenn man kalte Getränke hat. Aber einen ganzen Kühlschrank im Auto mitschleppen? Das ist natürlich ungünstig, also muss man sich anders zu helfen wissen. Eine Möglichkeit bietet eine elektrische Kühlbox, wie ihr sie an dieser Station seht.

FUNKTIONSWEISE EINER KÜHLBOX

Geräte und Materialien

[1]	Peltier-Element mit zwei Klemmen
[2]	Netzgerät, Amperemeter, Kabel zum Betrieb des Peltier-Elements



Durchführung

Versorgt das Peltier-Element mit Spannung. Kontrolliert, dass ihr nicht mehr als 1A Strom fließen lasst, sonst kann das Element überhitzen. Stellt durch Fühlen und Messen der Temperatur einen Effekt fest.

Auswertung

Abb. 2: Auszug aus den Arbeitblättern zum Peltier-Element

Experimentierstation 1: Ein Motor zum Kühlen – der Stirling-Motor

Ein und dasselbe Gerät kann als Wärme- und als Kältepumpe zwischen Orten verschiedener Temperatur eingesetzt werden. Der einzige Unterschied ist der Anwendungszweck: Während bei der Wärmepumpe der Ort hoher Temperatur (z. B. das Hausinnere im Winter) weiter erwärmt *werden soll, ist das Ziel der Kältepumpe das weitere* Abkühlen *des Ortes niedriger Temperatur (z. B. des Inneren eines Kühlschranks).*

Die Schüler experimentieren mit dem in Abb. 3 gezeigten kleinen Experimentiermotor mit Glaskolben und entwickeln dabei ein Verständnis für seine Anwendung als Wärmekraftmaschine und als Kältepumpe.

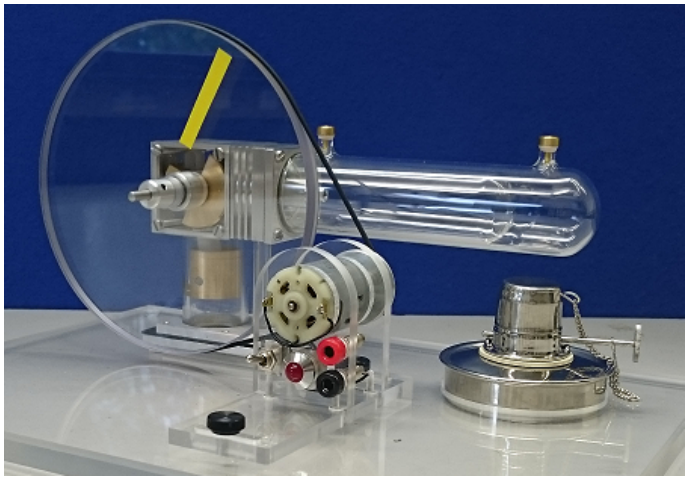


Abb. 3: Bei der Durchführung verwendeter Stirlingmotor [eigene Aufnahme]

Die Vorgehensweise bei diesem Experiment orientiert sich an dem, was Lehrkräften aus den meisten universitären Physikpraktika bekannt ist: Zunächst wird der Motor als Wärmekraftmaschine, danach als Kältepumpe betrieben. Entscheidend ist, dass der Schwerpunkt hier auf den zweiten Teil verlagert wird: Die Verwendung als Wärmekraftmaschine dient nur dazu, mit dem Motor und den verschiedenen Stadien eines Zyklus vertraut zu werden.

Bei der Verwendung als Kältepumpe wird eine quantitative Auswertung vorgenommen: Die Schüler beobachten die Temperaturen an beiden Enden des Verdrängerkolbens, während sie die Umlauffrequenz variieren. Durch das Auftragen der Messwerte in einem Diagramm und dem Eintragen der Temperaturdifferenzen erkennen die Schüler, wann die Kältemaschine am effizientesten arbeitet. Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, dass die Schüler das Experiment selbständig durchführen und optimieren.

Zusätzlich zum experimentellen Teil ist auch eine Betrachtung der Anwendungsgebiete des Motors sinnvoll. Die Nutzung von Stirling-Motoren in Kraftwärmekopplungsanlagen ist verbreitet und kann den Schülern einen Einblick in moderne Energietechnik bieten.

Ein Stirling-Motor wie der in Abb. 3 gezeigte lässt sich als Selbstbauset günstig im Internet erwerben, wird aber auch von Lehrmittelfirmen experimentierfertig vertrieben.

Experimentierstation 2: Der Haushaltskühlschrank

Die Funktionsweise des Kompressor-Kühlschranks wird häufig in der Sekundarstufe I theoretisch mit Hilfe des Schulbuchs oder durch Animationen oder Videos verdeutlicht. Wirklich begreifen, dass diesem Gerät ein simples physikalisches Prinzip zugrundeliegt, werden Schüler jedoch erst, wenn sie mehrere Experimente dazu im Kontext der Kühlung am besten selbst durchgeführt haben.

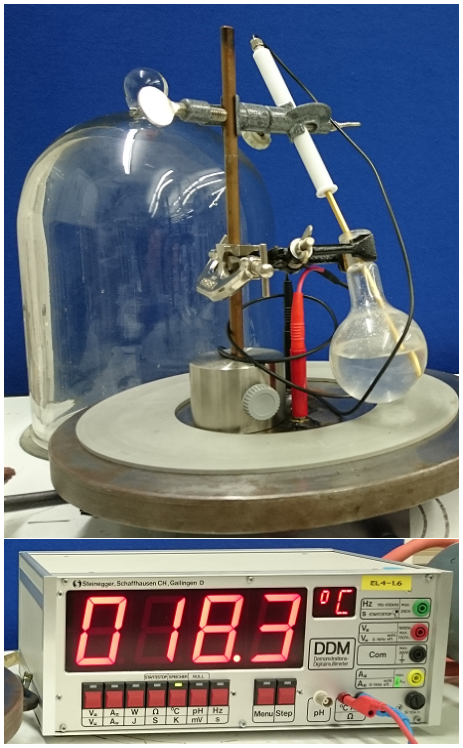


Abb. 4: Versuchsaufbau zur Beobachtung des Temperaturrückgangs beim Siedevorgang [eigene Aufnahmen]

Dass die Haut beim Schwitzen gekühlt wird, ist schnell gezeigt, genügt zu einem richtigen Verständnis des Kühlschranks aber noch nicht: Warum sollte in einem Kühlschrank Flüssigkeit verdampfen?

Hier hilft das Experiment mit siedendem Wasser unter einer Vakuumglocke. Lässt man Wasser unter einer Vakuumglocke durch Verminderung des Umgebungsdrucks sieden, kann man dabei eine Verringerung der Wassertemperatur messen. Deutlich wird, dass Wasser bei entsprechend niedrigem Druck schon bei Raumtemperatur siedet. Doch hier kommt es zu einer neuen Verständnishürde, denn ein Kompressor-Kühlschrank enthält keine Vakuumpumpe.

Erst die Kombination mit einem dritten Experiment liefert eine vollständige Erklärung [Jun09]: Durch Verwendung eines in der Dünnschichtchromatographie üblichen Zerstäubers kann mit Druckluft und Wasser ein Kühlungseffekt beobachtet werden. Interessant ist dabei, dass über den Bernoulli-Effekt mit *Druck*luft ein deutlicher *Unterdruck* erzeugt werden kann.

Zerstäuber finden sich in Chemiebedarfsgeschäften, im Internet oder sogar in der Chemiesammlung der Schule. Wer über keinen geeigneten Druckluftanschluss verfügt, kann im Internet günstig Airbrush-Kompressoren ersteigern, welche den nötigen Druck aufbauen können, jedoch ggf. einer Anpassung für den Unterricht bedürfen.

Experimentierstation 3: Das Peltier-Element

Seebeck-Effekt (thermoelektrischer Effekt) und Peltier-Effekt (Wärmetransport aufgrund eines elektrischen Stromflusses) gehen auf Vorgänge in den Übergangsbereichen der Leiter zurück. Leider liefern viele Lehrbücher eine falsche Erklärung, die beide Effekte lediglich auf die temperaturabhängige Kontaktspannung zwischen zwei Leitern und nicht (wie korrekt) auf die Thermodiffusion der Ladungsträger zurückführt. Eine gelungene und verständliche Gegenüberstellung beider Erklärungen ist bei [PPH05] zu lesen und auch in [Glu15, Kapitel I, Abschnitt 3] zu finden.

Verglichen mit Stirling-Motor und Kompressor-Kühlschrank ist die Physik des Peltier-Elements zu komplex, um umfassend erklärt zu werden. Weil aber mobile Kühlboxen oft auf Peltier-Elementen basieren, eignet sich eine Vorgehensweise im Unterricht, bei der die Schüler eine Kühlbox untersuchen, den Peltier-Effekt am industriell hergestellten Peltier-Element beobachten und dann Messungen zur Thermoelektrizität an Metalldrähten selbst durchführen.

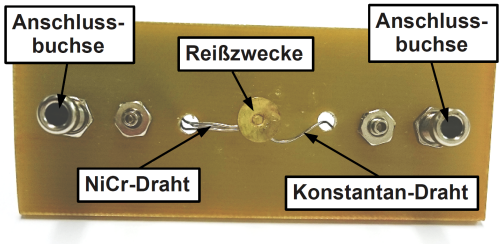


Abb. 5: Thermoelement aus NiCr und Konstantan [eigene Aufnahme]

Was vielen nicht bekannt ist: Sowohl Seebeck- als auch Peltier-Effekt zeigen nicht nur Halbleiter, sondern (wenn auch in viel geringerem Ausmaß) auch beliebige Metalle. Es genügt prinzipiell, zwei Drähte aus unterschiedlichen Metallen miteinander zu verbinden und zum Beispiel mit einem Gasbrenner stark zu erwärmen, um den Seebeck-Effekt zu beobachten. Allerdings hängt die Größe des Seebeck-Effektes stark von den gewählten Stoffen ab. Für einen gut messbaren Effekt sollten die Seebeck-Koeffizienten beider Metalle möglichst verschieden sein (eine gute Kombination bietet z. B. Nickel und Nichrome).

Was für den Seebeck-Effekt gilt, gilt ebenso für den Peltier-Effekt, nur dass seine Beobachtung bei einfachen Metalldrähten sehr schwierig ist. Dies liegt an der guten Wärmeleitfähigkeit von Metallen, dem insgesamt doch sehr geringen Effekt und der entstehenden Jouleschen Wärme bei einem stromdurchflossenen Leiter. Am geeignetsten ist der folgende Aufbau: Die beiden Drähte werden verzwirbelt, diese Stelle an der Unterseite einer Reißzwecke befestigt und diese wiederum auf einer hitzebeständigen Platte fixiert (siehe Abbildung 5). Durch das Umbiegen der Reißzwecke erhält man eine recht große Oberfläche zum Messen der Temperatur. Wichtig für die Beobachtung des Effektes: Ein möglichst konstanter Strom im Milliampere-Bereich, Thermometer mit Messfühler (Genauigkeit mindestens 0,1K) und Geduld.

Industriell gefertigte Peltier-Elemente basieren auf dotierten Halbleitern und zeigen einen deutlich größeren Effekt. Der Aufbau eines solchen Elements ist interessant und keineswegs trivial: Bei elektrischer Reihenschaltung der einzelnen Thermoelemente ist insgesamt eine thermische Parallelschaltung möglich.

Die Schüler experimentieren zunächst mit einem industriell gefertigten Peltier-Element, stellen fest, dass sich eine Seite erwärmt und die andere abkühlt, und ermitteln dann quantitativ den Wirkungsgrad eines Peltier-Elements bei Kühlung eines Kupferblocks durch Messung der Temperatur und der elektrischen Energie. Um auf die Funktionsweise des Peltier-Elements zu schließen, experimentieren die Schüler zuletzt mit mehreren der in Abb. 5 gezeigten Thermoelemente.

Peltier-Elemente auf Halbleiterbasis sind genauso wie komplette Kühlboxen im Internet oder im Elektrofachhandel zu erwerben.

Experimentierstation 4: Laserkühlung

Der Begriff der Laserkühlung erscheint zunächst widersprüchlich, transportiert Licht doch Energie. Der entscheidende Unterschied zu den üblichen Anwendungen, bei denen Laser zum Erhitzen genutzt werden, liegt darin, dass bei der Laserkühlung zunächst ein Photon absorbiert, im darauffolgenden Schritt aber ein Photon mit größerer Energie reemittiert wird. Einem Gas wird so insgesamt kinetische Energie entzogen.

Zur Kühlung liegt die Frequenz des Lasers geringfügig unter dem Wert, der zur Anregung ruhender Gasatome nötig ist. Nur wenn sich ein Atom auf den Laser zubewegt, kann es aufgrund des Dopplereffekts ein Photon absorbieren. Bei der Rückkehr in den Grundzustand wird ein Photon in eine beliebige Richtung emittiert. Durch Absorption oder Emission eines Photons ändert sich wegen der Impulserhaltung die Geschwindigkeit des Atoms. Nach ausreichend vielen Vorgängen hebt sich der mittlere Impulsübertrag durch die Emissionen auf, weil alle Emissionsrichtungen gleich wahrscheinlich sind; die Impulsüberträge durch die Absorption sind jedoch immer gleich gerichtet und sorgen so für eine Abbremsung des Atoms. Setzt man in jeder Raumrichtung zwei entgegengesetzt ausgerichtete Laser ein, so wird das Atom in beliebiger Bewegungsrichtung verlangsamt [Lan07, S. 9].

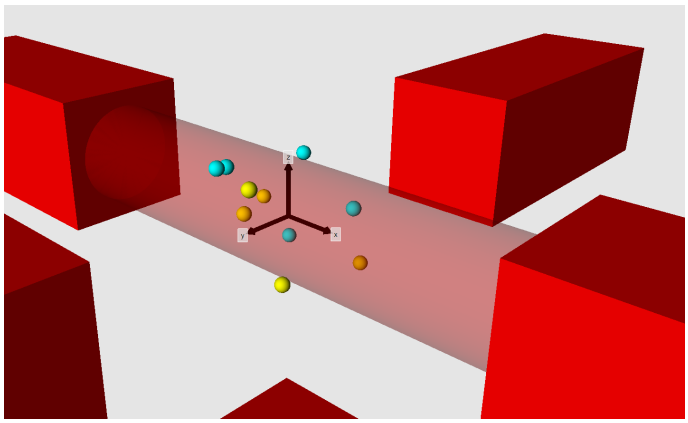


Abb. 6: Simulationsprogramm zum Verständnis der Laserkühlung [eigene Darstellung]

Ziel dieser Station ist, dass die Schüler ein Basiswissen aus der Quantenmechanik erhalten und aufbauend darauf ein im Vergleich zu den anderen Methoden grundsätzlich anderes Konzept der Kühlung verstehen. Vertieft wird dabei das Verständnis der Temperatur eines Gases im Teilchenmodell.

Einerseits eignet sich die Laserkühlung nicht für eine Umsetzung in einem Schülerexperiment; andererseits ist gerade bei dieser Thematik, bei der viele konzeptionell neue Inhalte auftauchen, ein spielerisch handelnder Zugang entscheidend. Daher bietet es sich an, die Schüler das Verfahren der Laserkühlung mit einem Simulationsprogramm selbst ausprobieren zu lassen.

Damit die Kühlung in der Simulation nicht lediglich durch Ausprobieren „zufällig“ erreicht, sondern wirklich verstanden wird, werden die Grundlagen zuvor eigenverantwortlich anhand von einer Präsentation erarbeitet. Die Simulation wird erst nach erfolgreich bestandenem Selbsttest gestartet und dient dann zur Visualisierung, zum Ausprobieren und damit zur Sicherung des Gelernten.

Mit einer Powerpoint-Präsentation wiederholt die Kleingruppe den optischen Dopplereffekt und erarbeitet die Grundlagen zum Bohrschen Atommodell, zum Lichtquantenmodell und zum Zusammenhang von Temperatur und Teilchenbewegung. Bei der Erstellung der Präsentation wurde auf Methodenvielfalt Wert gelegt. Aufbauend auf diesen Grundlagen wird dann das Prinzip der Dopplerkühlung erklärt. Die Präsentation endet mit einem Selbsttest in Form eines Quiz.

Abb. 6 zeigt eine Momentaufnahme aus der Simulation, in welcher Kugeln die Bewegungen einzelner Atome darstellen. Um den Effekt der Kühlung gut beobachten zu können, werden cyanfar-

bene Kugeln (Atome, die gekühlt werden) und gelbe (Atome, die keine entsprechenden Energieniveaus aufweisen) unterschieden; die Atome stoßen der Einfachheit halber nicht untereinander. Um Fehlvorstellungen vorzubeugen, werden keine einzelnen Photonen dargestellt. Das elektromagnetische Strahlungsfeld ist durch eine eingefärbte Raumregion zwischen den Lasern (rote Boxen) wiedergegeben; die zu jeder Raumrichtung gehörenden Laser können separat an- und ausgeschaltet werden. Implementiert wurden in der Simulation Absorption von Photonen aufgrund eines Übergangs mit natürlicher Linienbreite und Emission in zufällig verteilte Raumrichtungen sowie die Bewegung der Atome in einem Fallenpotential[4]. Die Kühlung der cyanfarbigen Atome ist anhand ihrer Geschwindigkeiten deutlich sichtbar.

Mit dem spielerischen Zugang zu unbekannten physikalischen Sachverhalten über die Simulation wurden sehr gute Erfahrungen gemacht. Das Projekt *Cool Physics* stellt keinen Vorgriff auf den Quantenmechanikunterricht dar (der Einstieg kann dort weiterhin sowohl mit dem Doppelspalt wie auch mit dem Photoeffekt geschehen; wenn das Bohrsche Atommodell nicht unterrichtet werden soll, kann der entsprechende Teil der Präsentation leicht entsprechend verändert werden, denn es kommt nur auf die Existenz diskreter Energieniveaus an) – allerdings kann der Wiedererkennungseffekt beim späteren Quantenmechanikunterricht hilfreich sein.

Die Powerpoint-Präsentation und das Simulationsprogramm wurden für das Projekt erstellt, sie können zusammen mit den anderen Materialien des Projekts bezogen werden.

[4] Dass es sich also strenggenommen um geladene Ionen in einer Ionenfalle handelt, ist für das Verständnis des Prinzips der Methode nicht relevant und wird daher nicht thematisiert.

Literatur

[Bac70] BACON, Francis ; RAWLEY, William (Hrsg.): *Sylva Sylvarum: Or, A Natural History, in Ten Centuries*. London, 1670

[BW12] BAUER, Th. ; WILHELM, Th.: *Die Wärmepumpe – Wie gelangt eigentlich die Wärme vom Kalten ins Warme?* (2012). – in: Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule Nr. 6/61, S. 34

[Ein10] EINHAUS, Erik: *Energieentwertung am Stirlingmotor verstehen lernen*. (2010). – in: Naturwissenschaften im Unterricht Physik Nr. 115, S. 20

[Glu15] GLUTH, Matthias: *Cool Physics - Ein Schülerprojekt zu den Methoden der Kühlung in Haushalt und Technik*, Univeristät Mainz, Diplomarbeit, 2015. http://www.physik.uni-mainz.de/Lehramt/Lehramt/Vortraege/Anleitung/Matthias_Gluth_MEd.pdf

[Jun09] JUNGERMANN, Arnd: *Der Kühlschrank - Modellversuch und Deutung*. (2009). http://arndjungermann.de/quantenthermodynamik/entrosit/entropdf/Kuehlschrank.pdf. – Zugriff am 31. 01. 2015 – Version: 28. 04. 2009

[Lan07] LANGE, Jörg: *Erzeugung ultrakalter LiCs-Moleküle durch Photoassoziation*. Freiburg i. B., Albert-Ludwigs-Universität, Diss., 2007. http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/4516/pdf/DissertationJL.pdf

[PPH05] PELSTER, Rolf ; PIEPER, Reinhard ; HÜTTL, Ingo: *Thermospannungen - Viel genutzt und fast immer falsch erklärt!* In: PhyDid A Band 4.1 (2005), Seiten 10 - 22. http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/28/28

[RMG11] RIESS, Falk ; MAISEYENKA, Veronika ; GLEINE, Kerstin: *Cool, ey*. (2011). – in: Naturwissenschaften im Unterricht Physik Nr. 126, S. 11