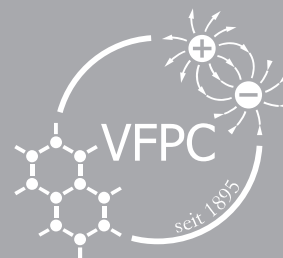


plusLucis



Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts



Gemischter Satz 2023

Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729)
Erscheint vierteljährlich

Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts
Adr.: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien
Web: <https://www.pluslucis.org>
E-Mail: schriftenleitung@pluslucis.org

Redaktion:

Mag. Dr. Thomas Plotz (Leitung)
Mag. Brigitte Knaus
Mag. Sarah Zloklikovits

Verantwortlicher Herausgeber dieser Ausgabe:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf, Universität Wien, Physikdidaktik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at

Herausgeber:innenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer
Universität Graz, Physikdidaktik
E-Mail: claudia.haagen@uni-graz.at
Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien, Physikdidaktik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens
Universität Wien, Chemiedidaktik
E-Mail: anja.lembens@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Thomas Wilhelm
Universität Frankfurt, Physikdidaktik
E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.
Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und ChemielehrerInnen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten Autor:innen verantwortlich.

Titelbild (Umschlag):

Gläser bei einer Verkostung
© ÖWM / Martin Grabmayer
www.oesterreichwein.at

Inhalt

Um die Ecke schauen – die Winkelbrille im Optikunterricht.....	4
<i>Thomas Wilhelm</i>	
„Wie funktioniert eigentlich der Speicher in meinem Smartphone?“	7
<i>Markus Sebastian Feser</i>	
Das Beharrungsvermögen – ein kein gerade einfacher Fall	10
<i>Engelbert Stütz</i>	
Elektronenbeugung modellieren mit der Zeigerdarstellung – mehr als nur visualisieren.....	14
<i>Michael Rode</i>	
„Stau bei Kilometer 24,36847669“.....	19
<i>Rainer Pippig</i>	
Die magnetohydrodynamische Pumpe – ein reizvolles Demonstrationsexperiment zur Lorentzkraft.....	22
<i>Georg Fuchs</i>	
Messwagen für Kurvenfahrten.....	24
<i>Elias Stadlmann</i>	
Die Entdeckung des Higgs-Bosons als Beispiel für Nature of Science – Alles in einer Box.....	26
<i>Sarah Zöchling, Margherita Boselli, Panagiota Chatzidakis, Merten Nikolay Dahlkemper, Ruadh Duggan, Guillaume Durey, Niklas Herff, Anja Kranjc Horvat, Daniele Molero, Gernot Werner Scheerer, Sascha Schmeling, Patrick Georges Thill, Jeff Wiener und Julia Woithe</i>	
Ernst Mach und die Geschichte der Relativitätstheorie.....	32
<i>Eren Simsek</i>	
Variationen eines Themas.....	37
<i>Peter Schmid</i>	
Elektronische Weihnachtskarten.....	39
<i>Joe Cossette, Sara-Elizabet Maksim, Geza Papp und Martin Hopf</i>	

Editorial

Liebe Kolleg:innen,

ja – die Schreibweisen sind ja in Österreich einmal wieder in die Diskussion gekommen. Und von Deutschland wollen wir da gar nicht sprechen. Aber als Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts bekennen wir uns klar dazu, geschlechtsneutrale Sprache zu verwenden. Ab dem aktuellen Heft stellen wir außerdem vom bisher verwendeten „Sternchen“ zum Doppelpunkt um. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass automatische Vorlesesysteme den Doppelpunkt erkennen, aber nicht das Sternchen. Wir gehen davon aus, dass Sie, liebe Kolleg:innen, diese Entscheidung im Sinne größtmöglicher Inklusivität unterstützen.

Vor Ihnen liegt eine neue Ausgabe des gemischten Satzes. Zur Erinnerung: Das sind Hefte ohne ein Rahmenthema. Immer wieder erhalten wir Einreichungen von interessanten Manuskripten, die aber nicht wirklich in eines der vorgesehenen Themenhefte passen. In regelmäßigen Abständen werden diese Artikel im „gemischten Satz“ zusammengefasst.

Den Auftakt des Heftes macht ein Beitrag von Wilhelm. Er beschreibt, wie die „Fernseh-Lese-Brille“ funktioniert und wie man sie im Optik-Unterricht einsetzen kann. Im Anschluss erläutert Feser die Funktionsweise von Flash-Speichermedien. Danach stellt er vor, wie dieses Thema im Physikunterricht anhand einer Modellschaltung besprochen werden kann.

Im dritten Beitrag widmet sich Stütz einem bekannten Versuch zur Beschleunigung einer Spielkarte, auf der eine Münze liegt. Wie der Autor eindrucksvoll beschreibt, ist dieser Versuch ein Vielfaches komplizierter zu erklären als allgemein angenommen. Zudem kann auch hier umfangreich gemessen und modelliert werden. Ein anderer Demoversuch, die Beugung von Elektronen, ist ebenfalls viel komplexer als üblicherweise beschrieben wird, wie Rode im nächsten Beitrag darstellt. Der Autor hat umfangreiche Untersuchungen unternommen, um die Funktionsweise der Demonstration richtig beschreiben zu können. Daneben macht er einen Vorschlag zur Umsetzung im Physikunterricht unter Verwendung des Zeigermodells und von Geogebra.

Pippig geht im nächsten Beitrag auf die bekannten Probleme ein, die beim Einsatz elektronischer Taschenrechner in Rechenaufgaben entstehen und macht einen Vorschlag, wie im Physikunterricht sinnvoll mit der Frage des Rundens umgegangen werden kann.



Martin Hopf

Ein neuartiges Demonstrationsexperiment zur Lorentzkraft beschreibt Fuchs. Dabei wird ein Strom einer Salzlösung in einem Magnetfeld als Antrieb eines Experimentierwagens ausgenutzt und so ein magnetohydrodynamischer Motor gebaut. Stadlmann stellt einen 3D-gedruckten Experimentierwagen für Kurvenfahrten vor. Im Gegensatz zu handelsüblichen Experimentierwägen kann bei diesem Gerät der Radius der Kurvenfahrt mittels eines Reglers eingestellt werden.

Zöchling, Boselli, Chatzidaki, Dahlkempoer, Duggan, Durey, Herff, Kranjc Horvat, Molaro, Scheerer, Schmeling, Thill, Wiener und Woithe erläutern im nächsten Beitrag, wie die Entdeckung des Higgs-Bosons ein Anlass für den Physikunterricht sein kann, über die Natur der Naturwissenschaften zu reflektieren. Sie beschreiben dazu einerseits, wie ein (online verfügbarer) Informationstext im Unterricht eingesetzt werden kann und schlagen andererseits den Einsatz von 3D-druckbaren Black-Box-Experimenten vor.

Simsek gibt in seinem Beitrag einen Einblick in den Einfluss von Ernst Mach auf die Entwicklung der Relativitätstheorie. Schmid erläutert anschließend den Zusammenhang von Leuchttürmen mit dem Doppler-Effekt.

Im letzten Beitrag des Hefts beschreiben Cossette, Maksim, Papp und Hopf die Lokalisierung einer wunderbaren weihnachtlichen Idee in Österreich.

Daneben finden Sie im vorliegenden Heft auch das Programm der 78. Fortbildungswoche 2024. Vom 26.-28.2.2024 wird es wieder ein vielfältiges und überaus interessantes Angebot an Vorträgen, Workshops und Exkursionen geben. Wir freuen uns darauf, Sie dort wieder einmal persönlich zu treffen.

Beste Grüße und einige erholsame Feiertage,

Martin Hopf

Um die Ecke schauen – die Winkelbrille im Optikunterricht

Thomas Wilhelm

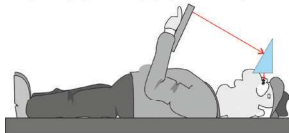
1. Die Winkelbrille

Eine Winkelbrille kostet im Internet zwischen 4 € und 15 €, so dass sie auch leicht für den Physikunterricht beschafft werden kann. Als Massenprodukt kann sie so kostengünstig sein, da sie komplett aus Kunststoff besteht und zwei Glasprismen aus Acrylglas enthält. Im Internet wird sie auch unter den Begriffen „Fernsehbrille“, „Lesebrille“, „Prismabrille 90 Grad“ oder „90° Horizontalsicht-Liegebrille“ angeboten.

Die Werbung empfiehlt die Brille, um in flacher Rückenlage lesen oder fernsehen zu können, ohne den Nacken unnötiger Belastung auszusetzen und Verspannungen zu bekommen (siehe Abbildung 1 oben). Es wird dargelegt, dass man sich normalerweise beim Lesen den Kopf verrenken muss oder das Buch hoch in der Luft halten muss.

Deutlich teurer, aber auch schöner, feiner und von besserer Qualität sind sogenannte Sicherungsbrillen, wie sie im Klettersport benutzt werden (siehe Abbildung 1 unten). Sie ermöglichen dem Sichernden, ununterbrochen Blickkontakt zum Kletternden zu haben, ohne Haltungsschäden oder Nackenschmerzen zu bekommen. Physikalisch gesehen unterscheiden sich diese Brillen von obigen Brillen dadurch, dass das Prisma genau umgedreht eingebaut ist.

Fernseh-Lese-Brille:



Sicherungsbrille:

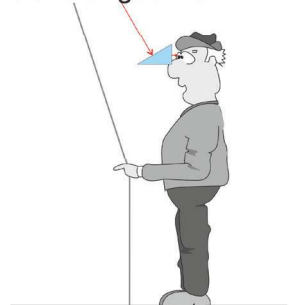


Abbildung 1: Verwendung von Winkelbrillen

Die Fernseh-Winkelbrille ist bei Jugendlichen bekannt, da die Versprechen verlockend sind. Tatsächlich ist aber das Gesichtsfeld eingeschränkt und man muss den Kopf stillhalten. Dabei wird ausdrücklich empfohlen, die Brille nicht über einen längeren Zeitraum zu verwenden. Eine gute Lösung mag sie jedoch für bettlägerige Menschen sein. Und für den

Physikunterricht ist sie eine schöne Anwendung optischer Gesetze.

Die häufige Behauptung, dass der „Blickwinkel“ um 90° geändert wird, ist allerdings falsch. Außerdem kann man im Internet auch falsch dargelegte Strahlengänge finden. Dabei müssten bereits Schüler:innen nach dem Optikunterricht der Sekundarstufe I den Strahlengang konstruieren können.

2. Funktionsweise der Winkelbrille

Die zwei wesentlichen Phänomene der geometrischen Optik sind die Reflexion und die Brechung. Ein Spezialfall der Brechung ist die Totalreflexion, wenn Licht flach auf die Grenzschicht zwischen optisch dichterem und optisch dünnerem Medium trifft. Eine wichtige Anwendung der Totalreflexion ist die Lichtübertragung durch Lichtleitfasern zur Signalübertragung, zur Beleuchtung oder zur Bildübertragung. Eine weitere technische Anwendung ist die Verwendung von Glas- und Kunststoffprismen als Spiegel, wobei die Totalreflexion an einer oder mehreren Prismenflächen ausgenutzt wird. Bekannt sind das gleichschenklige 90°-Umlenkprisma, das gleichschenklige 180°-Umkehrprisma und das geradsichtige Wendeprisma (Dove-Prisma). Für den Physikunterricht gibt es Unterrichtsvorschläge zum Regensor [1], zum Brillanten [2] und zu Lichtleitern [3, 4].

Ein Prisma lässt sich aus einer Winkelbrille herauslösen, in die es nur eingeklebt ist, wobei nur die horizontale Fläche etwas Klebstoff bekommen hat. Bei den Erprobungen war es am einfachsten, vorne ein wenig vom Plastikrand abzuschneiden und dann ein Teppichmesser (Cutter) zwischen Prisma und Brille hineinzuschieben. Beim Herausnehmen des Prismas sieht man, dass es sich um ein Prisma mit den Winkeln 30°, 60° und 90° handelt und dass die Seite an der längeren Kathete verspiegelt ist (siehe Abbildung 2). Es handelt sich dabei um ein sogenanntes „Bauernfeind“-Prisma, das senkrecht auf die Hypotenusenfläche einfallendes Licht um 60° ablenkt, ohne dabei das Bild zu spiegeln oder auf den Kopf zu stellen. Das Prisma ist benannt nach dem deutschen Geodäten Karl Maximilian von Bauernfeind (1818-1894).

Licht, das senkrecht auf die Hypotenuse fällt, tritt ins Prisma ein, ohne dabei gebrochen zu werden (siehe Abbildung 2). Fällt es dann auf die lange Kathete, wird es dort aufgrund der Verspiegelung reflektiert und trifft erneut auf die Hypotenuse. Nun ist der Winkel zum Lot mit 60° größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion, so dass Totalreflexion auftritt. Dadurch

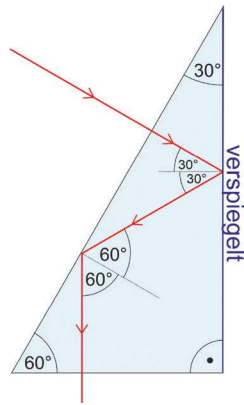


Abbildung 2: Strahlengang im Prisma der Winkelbrille

trifft der Lichtstrahl wieder senkrecht auf die kürzere Kathete und geht hier ohne Brechung hindurch. Da das Licht in diesem Beispiel nie gebrochen, sondern nur zweimal gespiegelt wird, gibt es keine Dispersion und damit keine Zerlegung von weißem Licht in seine Spektralfarben, wie man das sonst von Prismen kennt.

Günstige Winkelbrillen haben ein Prisma aus dem Kunststoff PMMA (Polymethylmethacrylat) – meist als Acrylglas oder mit dem Markennamen „Plexiglas“ bezeichnet. Da dieses einen Brechungsindex von 1,49 hat, liegt ein Grenzwinkel der Totalreflexion von ca. 42° vor.

3. Die Winkelbrille in Algodoo

Tatsächlich fällt aber Licht aus vielen Richtungen auf das Prisma. Um das untersuchen zu können, braucht man einen Simulationsbaukasten wie Yenka (www.yenka.com/de/Home) oder Algodoo (<http://www.algodoo.com>) [5]. Da Algodoo im Gegensatz zu Yenka kostenfrei ist, wird im Folgenden Algodoo verwendet. Damit können Simulationen zur geometrischen Optik [2, 4] und zur Mechanik [6, 7] erstellt werden. In Algodoo zeichnet man ein Prisma und weist diesem das Material „Glas“ zu, womit automatisch der richtige Brechungsindex 1,5 festgelegt ist. Für die Verspiegelung zeichnet man ein sehr schmales Rechteck und weist dem Material die Brechzahl unendlich zu, so dass es sich wie ein Spiegel verhält. Nun kann man mit Hilfe des „Laserwerkzeuges“ Lichtstrahlen erzeugen und deren Breite, Farbe und Richtung einstellen.

Betrachtet man nun einen Leuchtpunkt nahe am Prisma (siehe Abbildung 3), fällt dessen Licht unter unterschiedlichen Winkeln auf das Prisma und seine Lichtstrahlen werden beim Ein- und Austritt leicht gebrochen. Verlängert man in der Abbildung 3 die vier unten aus dem Prisma austretenden Linien, schneiden sie sich leicht oberhalb der Abbildung; das ist das virtuelle Bild des Leuchtpunktes, an dem man den Leuchtpunkt sieht. Die Simulation zeigt außerdem, dass nur Licht, dass in einem gewissen Bereich auf das Prisma fällt, nach zwei Spiegelungen wieder die andere Kathete verlässt.

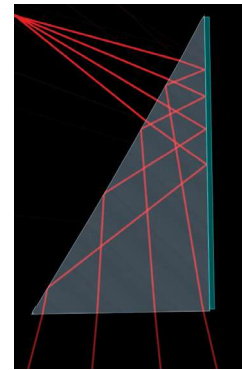


Abbildung 3: Strahlenverlauf durch das Prisma von Licht von einem nahen Leuchtpunkt.

Betrachtet man dagegen unendlich weit entfernte Punkte, so trifft deren Licht parallel, aber unter verschiedenen Winkeln auf das Prisma. Diese Lichtstrahlen werden nun ebenfalls beim Ein- und Austritt leicht gebrochen (siehe Abbildung 4). Auch hier fällt auf, dass nur Licht, dass in einem gewissen Bereich auf das Prisma fällt, wieder die andere Kathete nach zwei Spiegelungen verlässt. Und tatsächlich kann man bei dem Prisma ca. die Hälfte der längeren Kathete zukleben, ohne dass man dies bemerkt, wenn man durch die Brille schaut.

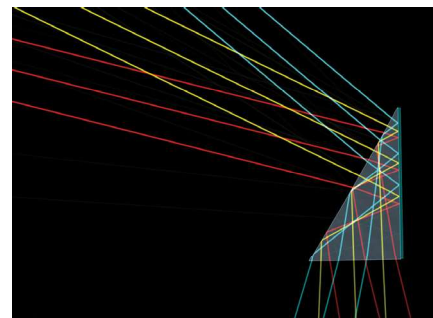


Abbildung 4: Strahlenverlauf durch das Prisma von Licht von drei unendlich weit entfernten Leuchtpunkten

Setzt man sich in Gedanken in der Simulation an eine Stelle vor und eine nach dem Prisma und verändert die Richtung, in die man schaut, stellt man fest, dass die Reihenfolge, unter der man die verschiedenen Punkte sieht, gleichbleibt. Die doppelte Spiegelung bewirkt also, dass man die Welt NICHT gespiegelt sieht. Alle Lichtstrahlen werden ähnlich stark um gut 60° abgelenkt.

Wer nicht entspannt geradeaus in die Winkelbrille schaut, sondern schräg, sieht, dass man in einem kleinen Winkelbereich noch einmal ein Spiegelbild der Welt vor der Brille sehen kann. An der Simulation kann man erkennen, dass es auch möglich ist, dass Licht so einfällt, dass es ein zweites Mal an der verspiegelten Kathete gespiegelt wird. Abbildung 5 zeigt das für das Licht zweier unendlich weit entfernter Leuchtpunkte. Setzt man sich auch hier in Gedanken vor und nach dem Prisma, stellt man fest, dass die Reihenfolge, unter der man die verschiedenen Punkte sieht, jeweils anders herum ist. Die dreifache Spiegelung bewirkt also, dass man die Welt gespiegelt sieht. Die Lichtstrahlen, die unter verschiedenen Winkeln

auftreffen, werden hier insgesamt unterschiedlich stark abgelenkt (in Abbildung 5 rot um 72° und gelb um 86°).

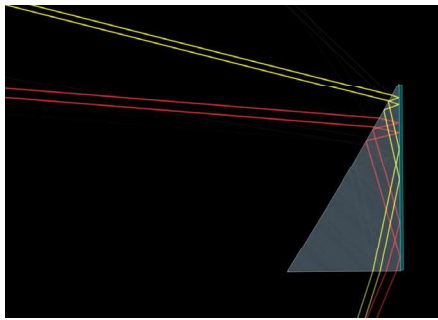


Abbildung 5: Strahlenverlauf durch das Prisma von Licht von zwei unendlich weit entfernten Leuchtpunkten mit einer zusätzlichen Reflexion

4. Experimente

Nun ist es auch sinnvoll, den Strahlengang im Experiment zu betrachten, indem man einen Laserstrahl sichtbar macht. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, solche Lichtstrahlen sichtbar zu machen [1]. Zum einen kann man den Laserstrahl durch ein Medium schicken, das einen Teil des Lichtes streut (Rauch oder Nebel in Luft, Wasser mit Fetttropfchen von Milch oder ein selbst gefertigter Gelatineblock). Zum anderen kann man den streifenden Lichteinfall eines Lichtfächers nutzen. Dabei wird die Schnittlinie zwischen einer Lichtebeine und einem Schirm sichtbar, die man als Lichtstrahl interpretiert. Hierzu kann man Licht einer Lampe durch eine Schlitzblende gehen lassen oder einen Laserstrahl mit einem Glasrührstab (= zylinderförmige Sammellinse mit sehr kleiner Brennweite) aufweiten. Letzteres wird von Lehrmittelfirmen in Laser-Ray-Boxen für die Tafeloptik verwendet.

Eine viel kostengünstigere Lösung findet man im Baumarkt in der Form eines Linienlasers (auch Laserwasserwaage genannt) [8], in dem sich bereits vom Hersteller eine Zylinderlinse vor

einem roten Diodenlaser befindet. Geeignet ist ein Linienlaser, der eine gerade Linie auf die Oberfläche projiziert, auf der er steht. Optimal ist eine sogenannte „Lasermäus-Wasserwaage“, die wie eine Computermäus in der Hand liegt und auf dem Tisch verschoben wird. Sie ist für 10 € zu bekommen und völlig ungefährlich [8].

Legt man das Prisma der Winkelbrille wie in Abbildung 6 auf den Tisch, kann man mit einer Lasermäus oder einer Laser-Ray-Box oder einem anderen Linienlaser Licht auf die Hypotenuse fallen lassen und sieht auf dem Tisch Linien, die als Lichtwege von Lichtstrahlen interpretiert werden können. So lässt sich untersuchen, bei welchem Einfallswinkel an welcher Eintrittsstelle das Licht wo und in welchem Winkel wieder austritt. Leider ist aber der Lichtweg in dem Prisma selbst so nicht zu sehen, da die Grund- und Deckfläche matt ist. Für die Abbildung 6 wurde die Deckfläche glattgeschliffen und poliert, so dass man den Lichtweg auch im Prisma sehen kann. In jedem Falle bestätigen die sichtbaren Linien die Ergebnisse obiger Simulation.



Abbildung 6: Strahlenverlauf mit einer Lasermäus-Wasserwaage

Thomas Wilhelm Goethe-Universität Frankfurt
am Main, Institut für Didaktik der Physik

Literatur

- [1] Geßner, T.; Wilhelm, T. (2008). Der Regensor im Unterricht – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 1, S. 24-31, <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Regensor.pdf>
- [2] Wilhelm, T.; Zang, M. (2011). Das Glitzern der Brillanten – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 8, S. 12-17, <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Brillant.pdf>
- [3] Wenzel, M.; Wilhelm, T. (2016). Schülerlabor zu Anwendungen der Totalreflexion – In: PhyDid-B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/675/814>
- [4] Wenzel, M.; Wilhelm, T. (2015). Simulationen zu Anwendungen der Totalreflexion – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 64, Nr. 5, S. 34-38, <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Totalreflexion.pdf>
- [5] Zang, M. & Wilhelm, T. (2013). Modellieren ohne Mathematik mit Algodoo. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 62 (2). S. 37-40, <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Algodoo.pdf>
- [6] Wilhelm, T. & Wenzel, M. (2018). EINE Kraft kann verformen? Wilhelm, T. (Hrsg.). Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Seelze: Aulis/Friedrich. S. 42-47.
- [7] Wilhelm, T.; Wenzel, M. & Reusch, W. (2018). Wie ist die Beschleunigung an der Rampe? Wilhelm, T. (Hrsg.). Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Seelze: Aulis/Friedrich. S. 18-21
- [8] Wilhelm, T. (2009). Brechung mit der Laserwasserwaage – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 1, S. 5-8, <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Laserwasserwaage.pdf>

„Wie funktioniert eigentlich der Speicher in meinem Smartphone?“

Eine Modellschaltung zur Thematisierung von Flash-Speichermedien im Physikunterricht

Markus Sebastian Feser

1. Einleitung

Für Schüler:innen der heutigen Generation sind Tablet-PCs, Smartphones, USB-Sticks, usw. ein selbstverständlicher Bestandteil ihres Alltags. In all diesen Geräten werden Flash-Speicher als digitale Speicherbausteine eingesetzt. Die hier zugrundeliegende Speichertechnik stellt daher einen alltagsnahen und damit attraktiven Kontext für den Physikunterricht dar. In aktuellen Schulbüchern werden Datenspeicher allerdings kaum behandelt. Typischerweise werden hier verschiedene Speichermedien chronologisch aufgeführt und vornehmlich Faktenwissen wie Speichergröße oder das Jahr der Markteinführung benannt. Zugrundeliegende physikalische Ideen und Funktionsprinzipien werden lediglich an Datenspeichern wie der Diskette oder der CD-ROM behandelt, die in inzwischen merklich an Bedeutung verloren haben.

Dieser Beitrag soll einen ersten Schritt zur didaktischen Aufbereitung des Themas „Flash-Speicher“ für den Physikunterricht darstellen. Hierzu wird zunächst das physikalische Funktionsprinzip von Flash-Speichermedien zusammenfassend dargestellt. Anschließend wird eine Modellschaltung einer einzelnen Speicherzelle eines Flash-Speichers als eine mögliche didaktische Reduktion des Sachverhalts für unterrichtliche Zwecke vorgestellt.

2. Das Funktionsprinzip von Flash-Speichermedien

Jeder digitale Speicherbaustein besteht aus einer immensen Anzahl an Speicherzellen (z. B. besteht ein 1-Gigabyte-USB-Stick aus insgesamt 1.073.741.824 Speicherzellen). In diesen Speicherzellen ist jeweils 1 Bit, also die Information „0“ oder „1“ gespeichert. Bei einem Flash-Speicher besteht jede Speicherzelle im Kern aus einem n-Kanal Feldeffekttransistor [1]. Hierbei handelt es sich um einen Transistor, bei dem ein elektrischer Strom nicht durch einen Steuerstrom gesteuert wird, sondern durch das Anlegen eines positiven elektrischen Feldes [2]. Dessen Anschlüsse werden daher auch nicht als Basis, Kollektor und Emitter bezeichnet, sondern als Gate, Drain und Source.

Wie aus Abbildung 1 deutlich wird, kann die Anordnung von Gate, Isolator und Halbleitersubstrat in einem n-Kanal Feldeffekttransistor auch als ein elektrischer Kondensator aufge-

fasst werden. Durch Anlegen eines positiven elektrischen Feldes am Gate sammeln sich auf der „gegenüberliegenden Kondensatorplatte“ (dem Halbleitersubstrat) negative elektrische Ladungen an. Anders als bei einem Metallkontakt sitzen diese Ladungen nicht nur an der Oberfläche, sondern erstrecken sich etwas in das Halbleiterinnere. Es entsteht zwischen Source und Drain ein Kanal, in dem die Leitfähigkeit durch die negativen Ladungsträger erhöht ist, wodurch letztendlich ein Stromfluss einsetzt [1,3]. Umgekehrt: Liegt am Gate kein oder ein negatives elektrisches Feld an, so wird die Ausbildung eines leitfähigen Kanals im Halbleitersubstrat unterdrückt und der Feldeffekttransistor ist gesperrt [1,3].

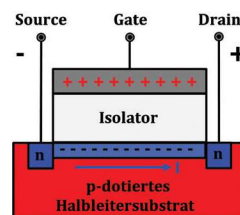


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines n-Kanal Feldeffekttransistors.

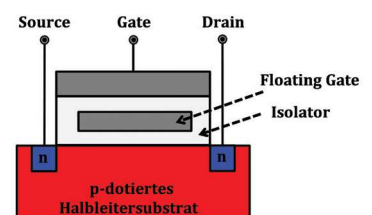


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer einzelnen Speicherzelle eines Flash-Speichers.

Die Speicherzellen eines Flash-Speichermediums bestehen allerdings nicht nur aus einem n-Kanal Feldeffekttransistor. Wie in Abbildung 2 dargestellt besitzt jede Speicherzelle zwischen Gate und Halbleitersubstrat ein (metallisches) Gate, das man als Floating Gate bezeichnet [1]. Dieses Floating Gate ist vom Isolator vollständig umschlossen und daher elektrisch isoliert. Ohne weiteres Zutun ist es daher nicht möglich das Floating Gate elektrisch zu laden oder zu entladen. Durch Anlegen einer geeignet hohen Spannung zwischen Gate und Halbleitersubstrat (ca. 40 Volt) ist es allerdings aufgrund des Tunneleffekts möglich zusätzliche Elektronen auf dem Floating Gate zu platzieren bzw. Elektronen von diesem zu entfernen [1]. Wird diese Spannung wieder abgestellt, kann sich der hergestellte Elektronenüberschuss bzw. Elektronenmangel nicht von selbst wieder ausgleichen, da dann ein „Zurücktunneln“ der Elektronen durch den Isolator nicht mehr möglich ist [1]. Vereinfacht ausgedrückt: Das Floating-Gate ist eine Ladungsfalle, in der durch Anlegen einer elektrischen Spannung elektrische Ladungen dauerhaft eingefangen werden können.

Das Floating Gate besitzt also einen bestimmten und dauerhaften elektrischen Ladungszustand. Die möglichen Ladungszustände (positiv, negativ oder neutral) machen es möglich, den Feldeffekttransistor als Speicher zu nutzen, indem genau eine binäre Information gespeichert ist. Hierzu wurde die Konvention festgelegt, dass die Information „0“ im Feldeffekttransistor gespeichert ist, wenn sein Floating Gate einen Elektronenmangel aufweist. Analog ist die Information „1“ gespeichert, wenn im Floating-Gate ein Elektronenüberschuss herrscht.

Um die so gespeicherte Information auslesen zu können, bestimmt man die Leitfähigkeit zwischen Source und Drain des Feldeffekttransistors. Da aus einem Elektronenmangel bzw. -überschuss ein elektrisches Feld resultiert, beeinflusst der Ladungszustand des Floating Gates die Leitfähigkeit des Halbleitersubstrats. Bei einem Elektronenmangel im Floating Gate (Information „0“) ist der Feldeffekttransistor geöffnet, da sich ein leitfähiger Kanal im Halbleitersubstrat ausbildet (vgl. Abbildung 3a). Bei einem Elektronenüberschuss (Information „1“) wird die Bildung eines solchen Kanals unterdrückt und der Feldeffekttransistor ist gesperrt (vgl. Abbildung 3b).

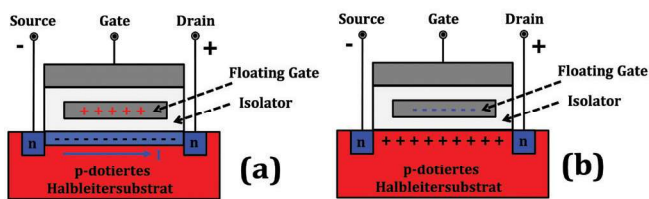


Abbildung 3: Speicherzelle eines Flash-Speichers in der (a) die Information „0“ bzw. (b) die Information „1“ gespeichert ist.

3. Modellschaltung einer einzelnen Speicherzelle eines Flash-Speichers

Zusammenfassend lässt sich das Funktionsprinzip einer einzelnen Speicherzelle eines Flash-Speichers auf folgende Grundideen reduzieren:

1. Durch ein elektrisches Feld wird der Strom zwischen Source und Drain eines Feldeffekttransistors gesteuert (anders als bei gewöhnlichen Transistoren, bei denen hierzu ein Steuerstrom genutzt wird).
2. Die Zustände „der Feldeffekttransistor ist gesperrt“ und „der Feldeffekttransistor ist durchgeschaltet“ können als binäre Information „1“ bzw. „0“ interpretiert werden.
3. Eine Ladungsfalle kann als Informationsspeicher dienen, indem man die Konvention „Elektronenmangel in der Ladungsfalle = Information 0“ und „Elektronenüberschuss in der Ladungsfalle = Information 1“ wählt.
4. Befindet sich eine Ladungsfalle im Isolatormaterial eines Feldeffekttransistors, so ist die binäre Information, die im Zustand „der Feldeffekttransistor ist gesperrt“ bzw. „der Feldeffekttransistor ist durchgeschaltet“ enthalten ist, dieselbe wie die, die in der Ladungsfalle als „Elektronenmangel“ bzw. „Elektronenüberschuss“ gespeichert ist.

5. Um einen Feldeffekttransistor als wiederbeschreibbaren Speicher nutzen zu können, muss der Ladungszustand der Ladungsfalle veränderbar sein. Dies gelingt durch Ausnutzen des Tunneleffekts mit Hilfe einer geeignet hohen Spannung.

In einem Unterricht, der das Ziel hat, das Funktionsprinzip von Flash-Speichermedien zu vermitteln, gilt es diese fünf Ideen den Schüler:innen zugänglich zu machen. Eine Möglichkeit hierzu stellt die in Abbildung 4 skizzierte Modellschaltung dar. Mit dieser lassen sich die Grundideen 2-5 auf phänomenologischer Ebene veranschaulichen. Um vor der Thematisierung dieser Modellschaltung das Funktionsprinzip eines n-Kanal Feldeffekttransistors im Unterricht zu veranschaulichen (Grundidee 1), kann das im Info-Kasten beschriebene Demonstrationsexperiment genutzt werden (für ein mit diesem Demonstrationsexperiment vergleichbares Schülerexperiment siehe [4 S. 79]). Darüber hinaus finden sich weitere spannende Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten des Feldeffekttransistors für den Unterricht beispielsweise in der Handreichung Elektronik aus der Reihe Unterricht Physik [4], sowie in ausgewählten Beiträgen zur Unterrichtspraxis in internationalen Physikdidaktik-Journalen [z. B. 5-9].

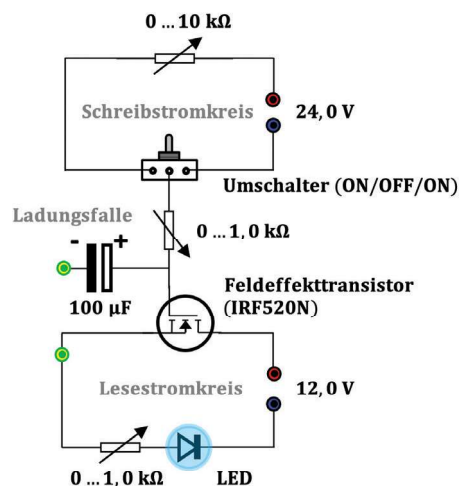


Abbildung 4: Modellschaltung einer einzelnen Speicherzelle eines Flash-Speichermediums.

Die Modellschaltung ist in die drei Bereiche „Ladungsfalle“, „Schreibstromkreis“ und „Lesestromkreis“ unterteilt.

Die Ladungsfalle besteht aus einem 100 µF Elektrolytkondensator. Eine Elektrode des Kondensators liegt auf Erde. Die andere Elektrode ist über einen Lastwiderstand mit dem Schreibstromkreis verbunden.

Der Schreibstromkreis ist im wesentlichen aus einer Gleichspannungsquelle und einem Umschalter aufgebaut (anstelle des Umschalters können z. B. auch zwei in Reihe geschaltete Taster verwendet werden). Je nachdem auf welche der beiden ON-Positionen der Umschalter gestellt wird, wird der Elektrolytkondensator geladen oder entladen, elektrische Ladungen also in der Ladungsfalle platziert oder entfernt.

Im Lesestromkreis wird die in der Modellschaltung gespeicherte Information durch eine Leuchtdiode sichtbar gemacht. Diese leuchtet auf, wenn der Lesestromkreis geschlossen, also der Feldeffekttransistor durchgeschaltet ist. Dies ist wiederum genau dann der Fall, wenn der Elektrolytkondensator aufgeladen wurde, also in der Ladungsfall die Information „1“ gespeichert wurde. Ist dagegen die Information „0“ in der Modellschaltung gespeichert, so ist der Elektrolytkondensator entladen. In diesem Fall ist der Feldeffekttransistor gesperrt und die Leuchtdiode im Lesestromkreis leuchtet folglich nicht auf.

unterrichtet dar. Die vorgestellte Modellschaltung, mit der dieses Funktionsprinzip veranschaulicht werden kann, lässt sich leicht mit dem gängigen Inventar in Schulgerätesammlungen, beispielsweise als Demonstrationsversuch, realisieren. Einzige Ausnahme stellt der benötigte Feldeffekttransistor dar (Bauart: IRF520N). Dieser kann allerdings für zirka 1 Euro z. B. in Onlineshops für Elektronikbauteile erworben werden. Für den Aufbau der Schaltung ist wichtig zu beachten, dass der Lesestromkreis zusätzlich geerdet werden muss. Dies ist notwendig, da der Feldeffekttransistor, um fehlerfrei arbeiten zu können, ein geeignetes Bezugspotenzial benötigt.

4. Zusammenfassung und abschließende Bemerkung

Das Funktionsprinzip von Flash-Speichermedien stellt einen alltagsnahen und somit attraktiven Kontext für den Physik-

Markus Sebastian Feser Universität Hamburg, Physikdidaktik

Kasten 1: Demonstrationsexperiment zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips eines n-Kanal Feldeffekttransistors

Benötigte Materialien

- Hochspannungsquelle
- Influenzplättchen
- Konduktorkugel
- Leuchtdiode
- mehrere Bananensteckerkabel
- n-Kanal Feldeffekttransistor (IRF520N)
- Plattenkondensator
- Gleichspannungsquelle (12 V)
- veränderbarer Widerstand (1 kW)

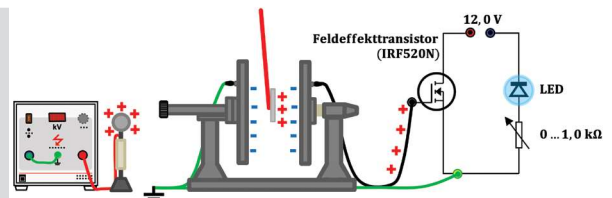


Abbildung 5: Aufbau des Demonstrationsexperiments.

Aufbau und Durchführung

Das Demonstrationsexperiment wird entsprechend Abbildung 5 aufgebaut. Für die Durchführung wird zunächst ein Influenzplättchen elektrisch positiv aufgeladen. Hierzu wird eine mit dem +Pol einer Hochspannungsquelle verbundene Konduktorkugel verwendet. Anschließend wird das Influenzplättchen in den Raum zwischen den beiden Kondensatorplatten eingebracht, ohne dabei die Kondensatorplatten zu berühren.

Beobachtung

Beim Einbringen des Influenzplättchens in den Plattenkondensator beginnt die Leuchtdiode zu leuchten. Wird das Plättchen wieder entfernt, erlischt auch die Leuchtdiode.

Erklärung

Befindet sich das geladene Plättchen im Kondensatorzwischenraum, bewirkt dessen positive elektrische Ladung, dass in den Kondensatorplatten negative elektrische Ladungen induziert werden. Diese Ladungsverschiebung führt insbesondere dazu, dass im Kabel, das mit dem Gate des n-Kanal Feldeffekttransistors verbunden ist, Elektronenmangel herrscht. Am Gate des Feldeffekttransistors liegt somit ein positives elektrisches Feld an. Im Feldeffekttransistor bildet sich daher ein leitender Kanal aus, weswegen er durchschaltet und die Leuchtdiode aufleuchtet. Wird das Influenzplättchen aus dem Zwischenraum wieder entfernt, gleicht sich die Ladungsverschiebung in den Kondensatorplatten wieder aus, also auch in der Kabelverbindung zum Gate des Feldeffekttransistors. Am Feldeffekttransistor liegt kein positives elektrisches Feld mehr an, der leitende Kanal im Feldeffekttransistor bricht zusammen und die Leuchtdiode erlischt wieder.

Anmerkung

Für das Aufladen des Influenzplättchens lässt sich anstelle einer Hochspannungsquelle beispielsweise auch ein Bandgenerator verwenden. Auch das Einbringen eines durch Reibung positiv geladenen Glasstabes in den Kondensatorzwischenraum ist möglich, führt der Erfahrung nach aber oftmals zu „instabilen“ Ergebnissen. Entscheidend für den Erfolg des Demonstrationsexperiments ist, dass das Influenzplättchen eine starke positive Ladung aufweist, damit genügend negative elektrische Ladungen in den Kondensatorplatten induziert werden.

Literatur

- [1] Radovan, F. (2011). Solid state drives: Backup capacitors in modern solid state drives. Solid State Technology. Online verfügbar unter: <https://sst.semiconductor-digest.com/2011/05/solid-state-drives/> (Stand August 2022)
- [2] Thuselt, F. (2011). Physik der Halbleiterbauelemente. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [3] Sze, S.M. (2002). Semiconductor devices, physics and technology. 2. Auflage. New York: Wiley.
- [4] Wörlen, F., Schell, N. & Schneider, W. (2001). Unterricht Physik: Band 11: Elektronik. Köln: Aulis-Verlag Deubner.
- [5] Dorner, R.F. (1997). Add flash to your class with an LED student strobe. The Physics Teacher 35(3), S. 164-166.
- [6] Johns, R.H. (1974). Apparatus for teaching physics: FET electrometer. The Physics Teacher 12(2), S. 113-114.
- [7] Ohnishi, Y., Nakano, T., Tamai, T., Mori, S. & Kawada, K. (2021). Practical Learning of Science for Elementary School Students via Programming and Control Experimentation. Journal of Robotics, Networking and Artificial Life 7(4), S. 266-269.
- [8] Yavaş, P.Ü. & Karadag, M. (2019). An electronic electroscope for determining polarity of charge. Physics Education 54(4).
- [9] Tay, D., Fu, T., Goo, A. & Ricardo, B. (2021). White Light Communication: A Design for High School Experiment. The Physics Educator 03(03).

Das Beharrungsvermögen – ein kein gerade einfacher Fall

Engelbert Stütz

1. Die Bedeutung von Alltagsvorstellungen für einen erfolgreichen Physikunterricht

Physik wird von vielen Schüler:innen als schwierig empfunden, die Mechanik erst recht. Was sind Gründe dafür? „Von zentraler Bedeutung für das Unterrichten und das Lernen von Physik ist, was die Schüler:innen an Vorwissen, Vorstellungen und Denkmustern bereits mitbringen. Diese Faktoren formen das Vorverständnis der Lernenden über den zu erarbeitenden Sachverhalt.“ [1] Die Konzepte, die Menschen über ihre Alltagswelt haben, entwickeln sich aus ihren Erfahrungen in der Welt, in der sie sich bewegen. Diese Konzepte müssen sich bewähren. Sie müssen gewährleisten, dass man in der Alltagswelt erfolgreich mit den Dingen zurechtkommt. Es kommt nicht auf das Verstehen an. Albert Einstein sagte: „Man muss die Welt nicht verstehen, man muss sich nur darin zurechtfinden.“ [2] Berücksichtigen Lehrkräfte die fest verankerten Alltagskonzepte im Unterricht nicht, so sind Verständnisschwierigkeiten unausweichlich. Erschwerend kommt noch dazu, dass Fachbegriffe aus der Mechanik wie „Kraft“, „Impuls“, „Masse“ oder „Trägheit“ im Alltag fast immer andere Bedeutungen haben als in der Physik.

2. Ein „Zaubertrick“

Dieses Experiment ist ein „Klassiker“. Die Suche nach „trägheit experiment münze“ gibt beim Googeln ungefähr 120 000 Treffer, davon sind 808 Videos [3].

Du brauchst ein Trinkglas, eine Spiel- oder Postkarte und eine Münze. „Lege die Karte auf das Glas und die Münze drauf. Schnipse mit deinen Fingern genau gegen den Kartenrand. Du musst die Karte genau in der Mitte der Karte treffen. ... Wenn du alles richtig gemacht hast, fliegt die Karte davon und die Münze fällt ins Glas.“ [4] Warum ist dieses Experiment beliebt? Es erfordert keine besondere experimentelle Geschicklichkeit, es gelingt (fast) immer. Der Versuchsaufbau ist nämlich einfach. Die verwendeten Materialien sind leicht verfügbar, sie entstammen der Alltagswelt.

Als „Zaubertrick“ gelingt das Experiment leicht. Nach dem Motto „It's not magic, it's physics“ ergeben sich interessante Fragen und Antworten. Das, was passiert, ist verblüffend. Die Karte fliegt davon. Man „sieht“, dass die Münze zuerst stehen bleibt und dann lotrecht ins Glas fällt. Ein Video in Zeitlupe ist noch verblüffender: Die Münze bleibt nicht stehen und sie fällt auch nicht lotrecht ins Glas. Was wäre eine angemessene

physikalische Erklärung? Welche Kräfte wirken? Die Erklärung mit der Trägheit bzw. dem Beharrungsvermögen allein führt zu Misskonzepten [5] bei Schüler:innen.

Mit Hilfe eines selbst hergestellten Zeitlupenvideos dieses Experiments [6] soll der Ablauf genauer untersucht und dann geklärt werden. Es wird vorgestellt, wie das beobachtete Phänomen im Rahmen des Physikunterrichts in der Oberstufe der Newtonschen Mechanik modelliert werden kann.

2.1 Vorbereitung und Durchführung

Zum Aufbau des Versuches verwendet man drei gleiche Trinkgläser, ein Weinglas, etwas Plastilin, ein Geodreieck, eine Karte, eine Münze und eine Entlötpumpe. Das Weinglas dient als „Stativ“ für das Smartphone. Mit der gespannten Entlötpumpe kann man die Karte bequem wegschießen.

- Zeichne auf die Karte parallele Linien in gleichem Abstand. Der Abstand kann frei gewählt werden. Das ist nicht unbedingt nötig, bietet aber zusätzliche Möglichkeiten bei der Auswertung des Videos.
- Positioniere die Karte und die Münze auf das mittlere Glas.
- Die beiden seitlichen Gläser dienen als Halterung für ein Geodreieck. Bringe vier Kügelchen aus Plastilin wie im Bild dargestellt an. Drücke das Geodreieck so weit nieder, bis zwischen der Münze und dem Geodreieck ein sehr kleiner Abstand bleibt, etwa 0,5 mm. Der vordere Rand der Münze soll genau unter dem Rand des Geodreiecks liegen.
- Positioniere das Smartphone so auf dem passenden Weinglas, dass das Objektiv möglichst genau über dem Rand des Geodreiecks liegt. Das Bild der Münze soll auf dem Display des Smartphones in der Mitte sein.
- Vorbereitung des Smartphones: Im Modus „Video“ Zeitlupe wählen und einen Faktor für die Zeitlupe einstellen. Der Faktor 64 passt. Das ergibt 720 fps (frames per second). Die Kamera soll selbst auslösen, wenn sich etwas im Bildfeld der Kamera rasch bewegt. Das Huawei P40 pro hat diese Funktion.
- Spanne die Entlötpumpe. Halte sie an die Mitte der Karte. Drücke den Auslöseknopf der Entlötpumpe. Der Stempel der Pumpe saust nach vor und stößt die Karte weg.
- Wiederhole diese Prozedur so oft, bis du mit der Qualität des Videos in Zeitlupe zufrieden bist.

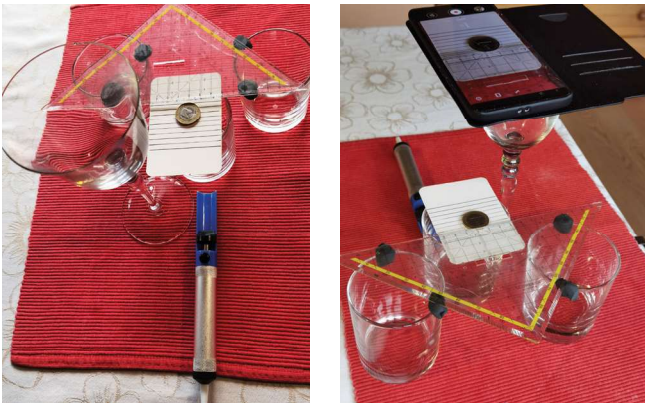


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Smartphone

In Schulbüchern oder im Internet lassen sich Fragen und Erklärungen finden:

- (1) „Welche Kräfte wirken, damit die Münze ins Glas fällt, wenn man ein Glas hat, ein Blatt Papier und eine Münze...?“ – „Die Trägheit hält die Münze an Ort und Stelle während man das Papier wegzieht. Die Schwerkraft lässt die Münze ins Glas fallen, wenn das Papier als Widerstand weg ist.“ [7]
- (2) „Wenn das unterstützende Papierblatt rasch entfernt wird, fällt die Münze lotrecht ins Glas. [8]

Gerade bei diesem einfachen „Münztrick“ lohnt es sich, genauer hinzusehen und die hier zitierte Erklärung kritisch zu hinterfragen. Es geht um die Suche nach einer angemessenen physikalischen Erklärung.

2.2 Videoanalyse

Wenn du beim Betrachten des Videos [5] den Fokus auf die Bewegung der Münze legst, was fällt dabei auf?

Solange die Münze auf der wegfliegenden Karte liegt, bewegt sie sich kaum merkbar. Sie wird eine winzig kleine Strecke in die Richtung verschoben, in die die Karte wegfliegt. (Bild 0 und 1).

Bild 2: Die Münze beginnt zu fallen, wenn die Karte nicht mehr im Bild zu sehen ist. Während die Münze fällt, bewegt sich der linke Rand der Münze unter den Rand des Geodreiecks. Die Münze fällt also nicht genau lotrecht.

Außerdem fällt auf, dass das Bild der Münze immer kleiner wird. Das hängt damit zusammen, dass der Abstand der Münze vom Kameraobjektiv immer größer wird. Bei der Vermessung der Verschiebung der Münze mit Hilfe der Bilder ist das zu berücksichtigen.

Wenn die Münze nicht genau lotrecht fällt, auf welcher Bahn fällt sie nach unten?

Tabelle 1: Auswahl von Messwerten.

Bild Nr.	Zeit / s	Horizontale Verschiebung pro mm
0	0	0
1	0,0417	----
2	0,0833	0,5
3	0,1250	2,0
4	0,1667	3,5
5	0,2083	4,5
6	0,2500	6,5
7	0,2917	----
8	0,3333	----

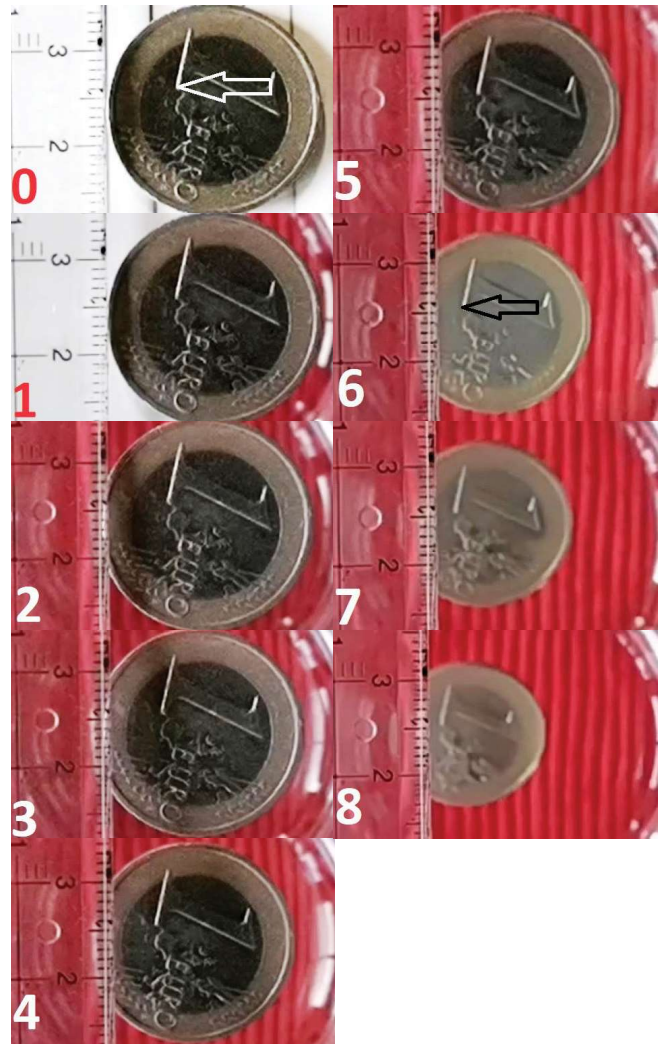


Abbildung 3 bis 11: Screenshots (Zeitlupenvideo)

Der Pfeil gibt die Bewegungsrichtung der Münze nach links an. Die Spitze des Pfeils markiert den Punkt, der zur Messung der Verschiebung der Münze verwendet wird.

Wir bestimmen vorerst die horizontale Verschiebung der Münze in Abhängigkeit von der Zeit. Wir wählen jedes dreißigste Bild des Videos [6] für einen Screenshot aus. Bei 720 Bildern pro Sekunde ist das Zeitintervall zwischen zwei Screenshots daher ohne Berücksichtigung systematischer Fehler 0,04167 s.

Durch Vermessung der Screenshots erhalten wir die Daten in der Tabelle. In der Tabelle sind nur die gut erfassbaren Werte angeführt.

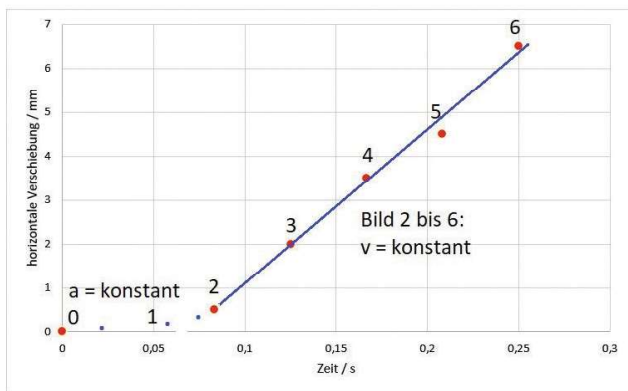


Diagramm 1: Zeit-Ort-Diagramm der horizontalen Bewegung der Münze

Das Diagramm zeigt, dass sich die Münze mit einer Geschwindigkeit von näherungsweise 30 mm/s in horizontaler Richtung bewegt. (Bild 2 bis 6) $\Delta v \approx 30 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 3 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

Die Überlagerung der horizontalen Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit und der Fallbewegung ergibt für den Massenmittelpunkt der Münze die Bahnform einer Parabel.

2.3 Vom Phänomen zum Modell

Die Modellierung muss imstande sein, die horizontale Bewegung der Münze vorherzusagen. Ziel ist es, die Geschwindigkeitszunahme Δv der Münze vorherzusagen und dann zu testen, ob die Vorhersage mit dem experimentell ermittelten Wert übereinstimmt.

Man braucht das zweite Newtonsche Axiom:

$$F \cdot \Delta t = \Delta p = m \cdot \Delta v. \quad (1)$$

Es ist hier sinnvoll, mit einem endlichen Zeitintervall Δt zu arbeiten. Auch im Zeitlupenvideo [6] mit 720 Bildern pro Sekunde ist der exakte zeitliche Verlauf der Bewegung nicht auswertbar.

Aus (1) erhält man $\Delta v = \frac{F \cdot \Delta t}{m}. \quad (2)$

Welchen Wert man für die Masse m nehmen soll, ist naheliegend, nämlich die Masse der Münze. Wahrscheinlich ist für etliche Schülerinnen und Schüler nicht evident, welche Kraft die Geschwindigkeitszunahme Δv bewirkt. Es ist die Gleitreibung. Die Haftreibung ist vernachlässigbar. Wäre die Haftreibung von Bedeutung, müsste sich die Münze zu Beginn des Wegschießens mit der Karte mitbewegen. Das ist im Zeitlupenvideo nicht beobachtbar.

Die Gleitreibung F zwischen Münze und Spielkarte ist

$$F = m \cdot g \cdot \mu. \quad (3)$$

Aus (2) und (3) erhält man $m \cdot g \cdot \mu \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v. \quad (4)$

Dabei ist g die Fallbeschleunigung und μ der Koeffizient der Gleitreibung und Δt die Zeitdauer für die Wechselwirkung zwischen Münze und Spielkarte.

Daraus ergibt sich für die Geschwindigkeitsänderung der Münze: $\Delta v = g \cdot \mu \cdot \Delta t. \quad (5)$

Bemerkenswert ist, dass die Masse der Münze keine Rolle spielt, wie sehr sich die Geschwindigkeit ändert.

Aus der Gleichung (5) erhält man für die Geschwindigkeitsänderung Δv den Wert

$$\Delta v = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,11 \cdot 0,043 \text{ s} = 0,046 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 46 \frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

Den Wert für $\Delta t = 0,043 \text{ s}$ erhält man aus dem Zeitlupenvideo durch Zählung der Frames vom Start des Wegschießens der Karte bis zum Ende der Wechselwirkung zwischen Karte und Münze. Die Dauer zwischen zwei Frames ist $\frac{1}{720} \text{ s} \approx 0,00139 \text{ s}$. Die Zahl der Frames beträgt 31.

$$\Delta t = 31 \cdot \frac{1}{720} \text{ s} = 0,04306 \text{ s} \approx 0,043 \text{ s}$$

Den Gleitreibungskoeffizienten bestimmen wir mit Hilfe einer schiefen Ebene. Diese wird so eingerichtet, dass die Münze noch nicht rutscht, bei leichtem Klopfen auf das Holzstück aber zu rutschen beginnt und gleichförmig weiter rutscht:

$$\mu = \tan \alpha = 0,11.$$



Abbildung 12: Bestimmung des Gleitreibungskoeffizienten

Aus der Auswertung des Zeitlupenvideos erhielten wir für die Geschwindigkeitsänderung der Münze in horizontaler Richtung $\Delta v \approx 30 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 3 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

Die Modellierung mit Hilfe des zweiten Newtonschen Axioms liefert den Wert $\Delta v = 46 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 4,6 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

Auf den ersten Blick erscheint die Diskrepanz sehr hoch. Betrachtet man die möglichen Fehlerquellen, so scheint das eher ein Problem des Anspruches zu sein. Die Investition für die Apparatur dieses Experiments erschöpft sich im Kauf eines geeigneten Smartphones. Mit einer industriellen Hochgeschwindigkeitskamera ließen sich die Fehlergrenzen verkleinern. Aber um welchen Preis? Die Idee des Experiments bliebe unverändert und das Ergebnis im Prinzip ebenfalls. In der folgenden Fehlerbetrachtung ist begründet, warum die Übereinstimmung zwischen der Modellierung durch das zweite Newtonsche Axiom und der Videoanalyse zufriedenstellend ist.

3. Fehlerbetrachtungen

Die Zeitmessungen bei der Videoanalyse sind sehr präzise. Das ermöglicht die Einzelbildfortschaltung im verwendeten Videoplayer (VLC Plus Player). Die Vermessung der Verschie-

bung der Münze in den Screenshots birgt einen geschätzten Messfehler von etwa 20%. Einerseits ist die Genauigkeit der Positionsmessung höchstens 0,5 mm, andererseits wird das Bild der Münze unschärfer und kleiner während sie fällt. Der Wert des Gleitreibungskoeffizienten μ liegt zwischen 0,09 und 0,11. Der relative Fehler liegt bei 10%. Es gibt auch Fehler durch nicht berücksichtigte Randbedingungen. Die genaue Betrachtung des Zeitlupenvideos bei der Einzelbildfortschaltung legt nahe, dass die Spielkarte beim Anstoßen durch den Stempel der Entlötpumpe zu schwingen beginnt. Die Wechselwirkung zwischen Münze und Spielkarte ist vermutlich viel komplexer als die Wechselwirkung zwischen zwei starren Körpern.

4. Resümee

Die Analyse des Experiments mit einem Zeitlupenvideo hat zweifelsfrei gezeigt, dass die Münze nicht lotrecht ins Glas fällt. Die Erklärung der Geschwindigkeitsänderung der Münze in horizontaler Richtung durch die Wechselwirkung zwischen

Karte und Münze (Gleitreibung) ist eine angemessene physikalische Erklärung. Die Modellierung des Phänomens mit dem zweiten Newtonschen Axiom liefert innerhalb der Fehlergrenzen eine Übereinstimmung mit den Daten aus der Videoanalyse. Es ist im Physikunterricht von Bedeutung, dass die Unterscheidung von Phänomen und Modell erlebbar wird. Ausgehend von einem Phänomen kann man mit einem Modell arbeiten [9]. Diese Vorgangsweise bietet einen Einblick in die naturwissenschaftliche Arbeitsweise. Geht man vom Phänomen aus, lassen sich Schüler:innenvorstellungen leichter thematisieren und Lernhindernisse dadurch besser aus dem Weg räumen.

„There are no tricks to follow nor shortcuts to go, but only sustained and dedicated work will make a genuine difference.“
[10]

Engelbert Stütz *JKU Linz, Physikdidaktik, bis 2021*

Literatur

- [1] Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg., 2018). Schülervorstellungen und Physikunterricht: Springer Spektrum.
- [2] Zitiert in <https://gutezitate.com/zitat/242506> (abgerufen am 24.10.2021)
- [3] https://www.google.com/search?q=tr%C3%A4gheit+experiment+m%C3%BCnze&client=firefox-b-d&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwjX-v2z-YDyAhUKxBQKHxN9A8EQ_AUoAHoECAEQAg&biw=1236&bih=950&dpr=1.25 (aufgerufen am 16.11.2021)
- [4] <https://physikforkids.de/labor/mechanik/die-traege-muenze> (abgerufen am 16.11.2021)
- [5] Leisner, A. (1999). Mentale Modelle und Misskonzepte – Theoretische Betrachtungen und ihre Bedeutung in der Schulphysik; Hausarbeit 1999; <https://www.grin.com/document/99495> (abgerufen am 18.11.2021)
- [6] <https://www.youtube.com/watch?v=eu0EbtOqq9E> (abgerufen am 19.07.2021)
- [7] <https://www.finanzfrage.net/g/frage/welche-kraefte-wirken-damit-die-muenze-ins-glas-faellt-wenn-man-ein-glas-hat-ein-blatt-papier-und-eine-muenze> (abgerufen am 16.11.2021)
- [8] Physik Basiswissen 5. Oebv, S.35.
- [9] Grusche, S. (2018). Entwurf einer phänomenbasierten Modellmethode. PhyDid B. (abgerufen am 25.07.2023 von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/882>)
- [10] Luo, X., Liu, X. et al. (1998). Educational considerations for designing, selecting and using hands-on experiments. ICPE-GIREP Conference 1998 Duisburg, Proceedings, S. 77-83.

Elektronenbeugung modellieren mit der Zeigerdarstellung – mehr als nur visualisieren

Michael Rode

Kurzfassung

Nach einer kurzen Beschreibung des schulüblichen Experiments zur Elektronenbeugung wird gezeigt, dass die Modellierung in der Zeigerdarstellung einerseits mit den Beobachtungen kompatibel ist, darüber hinaus aber auch Aufschlüsse über den Aufbau der beugenden Objekte und deren Beitrag zur Beobachtung ermöglicht. In Verbindung mit einem Experiment mit Röntgenstrahlung zeigt sich, dass statt dreidimensionaler Kristallite ebene, graphitartig aufgebaute so genannte Platelets das beobachtete Interferenzmuster bedingen.

1. Das Schulexperiment zur Elektronenbeugung

Im Physikunterricht der Kursstufe in Deutschland kommt der Quantenphysik eine bedeutende Rolle zu. Ein wichtiger Lerninhalt ist die Interferenz von Quantenobjekten mit Ruhemasse. Als zur Zeit einziges einschlägiges im Original vorführbares Experiment wird dazu an vielen Schulen eine Elektronenbeugungsröhre eingesetzt, die man im Angebot mehrerer Lehrgeräteanbieter findet. Abbildung 1 zeigt den Schnitt durch eine solche Röhre.

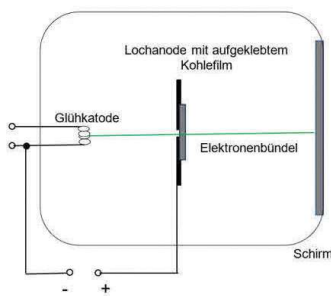


Abbildung 1: Schnitt durch eine Elektronenbeugungsröhre

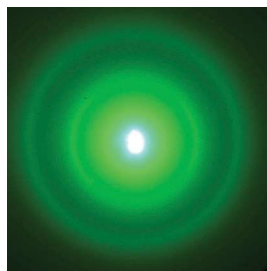


Abbildung 2: Zwei Interferenzringe auf dem Bildschirm einer Elektronenbeugungsröhre. Im Original ist der Durchmesser des größeren Ringes von der Größenordnung 4 cm.

Anlegen einer Hochspannung im Bereich zwischen etwa 1,5 kV und 5 kV bewirkt ein recht scharfes Elektronenbündel. Dieses wird auf ein Target gestrahlt, das aus einer sehr dünnen Kohlenstoff-Schicht auf einem Trägernetz aus Nickel besteht. Man beobachtet Interferenzerscheinungen wie in Abbildung 2. Auf deren Grundlage ordnet man den Elektronen gemäß der deBroglie-Gleichung $\lambda = \frac{h}{p}$ eine Wellenlänge im Bereich um 20 pm zu. Mit der Vorstellung von ungeordnet vorliegenden

Beugungsobjekten im Target erklärt man die Ringstruktur der Erscheinung.

Im überwiegenden Teil der Literatur wird die Erscheinung analog zu einem Debye-Scherrer-Experiment, also als Beugung an dreidimensionalen Kristalliten behandelt. Zur mathematischen Analyse wird dann wie in Abbildung 3 links die Bragg-Bedingung $\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \alpha$ herangezogen. In einem kleineren Teil – aber auch in frühen Versionen der zum Experiment gehörenden Anleitungen – wird darauf hingewiesen, dass man auch dann zutreffende Ergebnisse berechnet, wenn man die Beugung auf orthogonal durchstrahlte ebene Gitter zurückführt und die Gleichung $\lambda = d \cdot \sin 2\alpha = d \cdot \sin \delta$ anwendet, wie Abbildung 3 rechts beschreibt. In den Gleichungen sind α der in der Literatur so genannte Glanzwinkel, δ der aus dem Experiment bestimmte so genannte Detektionswinkel.

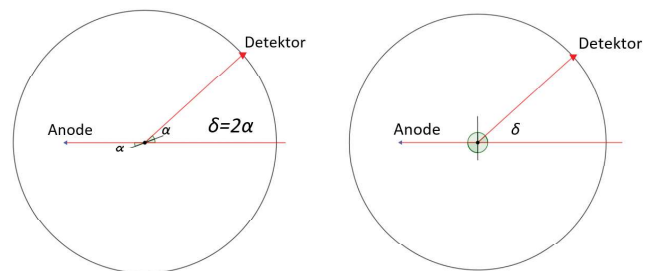


Abbildung 3: Links ist die Situation bei Bragg-Reflexion dargestellt, rechts die bei orthogonaler Durchstrahlung des Targets. In beiden Fällen misst man den gleichen Detektionswinkel δ .

Unabhängig vom Modell verwendet man die gleichen charakteristischen Abstände in der beugenden Substanz, nämlich $d_1 = 123$ pm bzw. $d_2 = 213$ pm und bestimmt daraus eine deBroglie-Wellenlänge, die mit der Vorhersage auf Grundlage der beschleunigenden Spannung übereinstimmt. Beide Ansätze liefern trotz der unterschiedlichen Vorstellung über das beugende Objekt gleiche Ergebnisse. Für Winkel $\delta = 2\alpha < 10^\circ$ ist das verständlich, da hier $2\sin \alpha \approx \sin 2\alpha$ ist.

Erst bei hinreichend großen Winkeln würde man die beiden Modelle unterscheiden können. Dazu müsste die beschleunigende Spannung aber so klein werden, dass kein Muster mehr sichtbar wäre. Bestrahlung mit Röntgenstrahlung könnte das ändern. Ein einschlägiges Experiment [1] zeigt zusammen mit Abbildung 11, dass Beugung an ebenen, orthogonal durchstrahlten Gittern zur Intensität deutlich stärker beiträgt als die meist angenommene Bragg-artige Bestrahlung.

2. Vorstellungen über die beugenden Objekte

Nur wenige Arbeiten behandeln das Wachstum von Kohleschichten auf Trägernetzen, die Hersteller der Targets besitzen hierzu keine eigenen Untersuchungsergebnisse. In den vorliegenden Arbeiten findet man, dass sich zunächst eine nur etwa 3 nm dicke Basisschicht in paralleler Anordnung zum Trägernetz bildet, auf die in der Folge bis zur endgültigen Dicke von etwa 6 nm 10 nm säulenartige, amorphe Strukturen aufsetzen. Die Basisschicht und die Säulen enthalten einzelne, Platelets genannte, grafitartige Strukturen geringer Größe [2-6]. Die Herstellfirma beschreibt die Targets als amorph mit einzelnen sp^2 - bzw. sp^3 -Einlagerungen (das sind kleine, grafitisch bzw. diamantartig geordnete Bereiche). Alle Experimente zeigen stets nur die Interferenzringe zu 123 pm bzw. 213 pm, niemals den dritten Interferenzring zu 335 pm, den man bei Vorliegen dreidimensionaler Kristallite erwarten müsste. Das wird unterschiedlich gedeutet. Es gibt die Auffassung, dass die postulierten Kristallite aus so wenigen Basalebene bestehen, dass der zugehörige Bragg-Reflex nicht hell genug erscheint. [7] konstatiert, dass ein Fehlen des dritten Interferenzringes regelhaft ein Zeichen dafür sei, dass alle vorhandenen Kristallite parallel zur Trägersubstanz liegen, so dass sie bei orthogonaler Durchstrahlung die Bragg-Bedingung niemals erfüllen können. Deutlich schärfer wird in [8] postuliert, dass dreidimensional aufgebaute Kristallite selbst dann im Interferenzmuster zu erkennen seien, wenn sie aus nur zwei zweidimensionalen Kohlenstoff-Ringen bestehen.

Abschätzungen im Online-Material (2.3) zeigen, dass die beugenden Strukturen etwa 4 nm groß sind, also aus etwa 15x15 Kohlenstoff-Ringen bestehen.

3. Fragestellungen für die Modellierung

Durch das Fehlen des dritten Interferenzrings und die im Röntgen-Experiment beobachtete unterschiedliche Höhe der Beugungsmaxima zu orthogonal durchstrahlten Gittern bzw. Bragg-artig bestrahlten (Online-Material) ergeben sich zwei Fragestellungen, die hier modellierend untersucht werden sollen.

- Lässt sich der Einfluss einer dreidimensionalen Struktur, also das Vorliegen von Kristalliten in der Kohlenstoff-Schicht erkennen?
- Lässt sich begründen, warum trotz etwa gleicher Größe der zugehörigen Platelets die Bragg-Reflexe kleiner ausfallen als die Beiträge orthogonal durchstrahlter Gitter?

4. Vorgehen bei der Modellierung

Die hypothetischen Strukturen könnten nach den Angaben aus der Literatur hauptsächlich auf zwei verschiedene Arten angeordnet sein, wie Abbildung 4 zeigt. Hier wird aus Gründen der Übersichtlichkeit jeweils nur ein einzelner Kohlenstoff-Ring dargestellt.

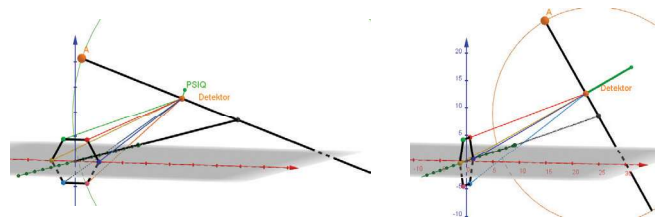


Abbildung 4: links: Kohlenstoff-Ring in der Basisschicht, parallel zum Trägernetz und daher orthogonal durchstrahlt; rechts: Kohlenstoff-Ring in der amorphen Struktur, parallel zum Elektronenbündel, daher streifend bestrahlt.

Im Ursprung des Koordinatensystems liegt ein Kohlenstoff-Gebilde aus (punktförmig gedachten) Atomen als Streuzentren. Es werde aus sehr großer Entfernung mit Strahlung bekannter Wellenlänge bestrahlt. Dem Huygensschen Prinzip folgend wird jedes der Atome zum Ausgangspunkt einer Kugelwelle. In der Zeigersprache formuliert: es entstehen dadurch denkmögliche Pfade für jede Verbindung von der Quelle über eines der Atome zum Ort eines fiktiven Detektors. Dieser wird in unendlicher Ferne gedacht. Jedem Pfad wird ein Zeiger (Wahrscheinlichkeitsamplitude) zugeordnet. Eine Summe aller so beschriebenen Terme kann für alle Punkte des Bildschirms berechnet werden. Sie bestimmt die dort registrierte Helligkeit. Dies gilt für jede beliebige Anordnung! In den Modellen wird ein punktförmiger Detektor planmäßig über den Bildschirm geführt. Durch die Bindung des Detektors an einen wählbaren Durchmesser des Schirms erhält man zunächst Intensitätsverteilungen für alle Detektionswinkel längs dieses Durchmessers. Die Intensität wird als Quadrat der Länge des resultierenden Zeigers bestimmt (in den Abbildungen PSIQ genannt). Eine kurze Darstellung zur Zeigerdarstellung findet man im Kasten. Im Online-Material stehen alle Geometrie-Dateien zusammen mit einer Anleitung zur Verfügung.

Der betrachtete Durchmesser wird durch die Einstellung des in den Modellen LageSchnitt benannten Punktes A ausgewählt. Die Ringstruktur des Interferenzmusters lässt auf regellose Anordnung der beugenden Objekte schließen. Das kann im Modell dadurch berücksichtigt werden, dass man für jeden Detektionswinkel über alle Lagewinkel integriert. Mit dem Werkzeug GeoGebra erfordert dies schrittweises Einstellen und Ablesen und anschließende Berechnung in einer Tabellenkalkulation. Im Fall streifenden Einfalls liegt das Interferenzmuster im Wesentlichen auf einem Schnitt parallel zum Platelet. In diesem Fall ist dennoch ebenfalls eine Integration erforderlich – diesmal über alle Orientierungen des Platelets, wie Abbildung 5 zeigt.

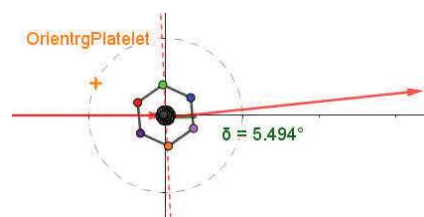


Abbildung 5: Seitenansicht zur Orientierung eines Platelets bei streifender Bestrahlung

Abbildung 6 zeigt links die Skizze des Modell-Platelets. Beispielfähig werden zudem Modellergebnisse für orthogonale Durchstrahlung abgebildet, um die korrekte Funktion der Modellierung zu belegen. In der Mitte ist die modellierte Intensität längs eines Schnitts zum Schnittwinkel 60° abgebildet. Er gehört zu Netzgeraden mit dem Abstand 213 pm ; man erwartet dafür das erste Maximum unter dem Detektionswinkel $4,8^\circ$ und das zweite unter $9,6^\circ$. Rechts sieht man das Modellergebnis längs eines 30° -Schnitts mit dem erwarteten Maximum bei $8,4^\circ$. Beide Ergebnisse stimmen mit den theoretischen Erwartungen überein.

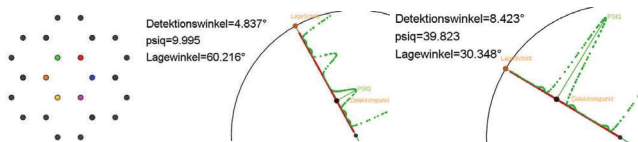


Abbildung 6: Ein Platelet aus sieben Kohlenstoff-Ringen erzeugt Maxima in den erwarteten Richtungen und Detektionswinkeln.

5. Untersuchung der Fragestellungen

5a Lässt sich der Einfluss einer dreidimensionalen Struktur der Kristallite in der Kohlenstoff-Schicht erkennen?

Zur Beantwortung wird eine Wellenlänge von 18 pm zugrunde gelegt, entsprechend einer Beschleunigung mit $4,5\text{ kV}$. Wieder erwartet man unabhängig vom mathematischen Modell Interferenzringe unter den Detektionswinkeln $\delta = 4,8^\circ$ bzw. $\delta = 8,4^\circ$, die im Realexperiment auch beobachtet werden.

Im Modell wird ein zweiter Kohlenstoff-Ring im Abstand von 335 pm hinzugefügt. Die gegenseitige Anordnung entspricht der Regel, die in Abbildung 7 illustriert wird.

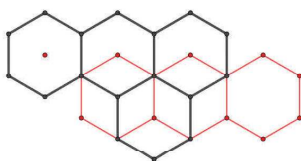


Abbildung 7: Draufsicht auf die gegenseitige Anordnung zweier Basalebenen in Grafit

Im Fall der Durchstrahlung einer einzelnen ebenen Struktur mit sieben Kohlenstoff-Ringen erhält man nach Integration das Interferenzmuster der Abbildung 8. Einzelne Platelets

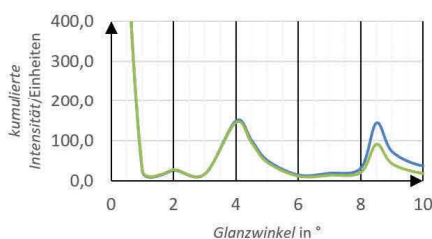


Abbildung 8: Das durch Integration erhaltene Interferenzmuster ist in blauer Farbe dargestellt. In grüner Farbe darunter liegt das Muster, das man bei Berücksichtigung der Beugung an den einzelnen Atomen erhält (siehe Online-Material).

in ebener Durchstrahlung tragen also zu den beobachtbaren Interferenzringen bei.

Im Fall orthogonaler Durchstrahlung (Gittervorstellung) ergibt das Hinzufügen einer zweiten Ebene die Vorhersage über das Interferenzmuster in Abbildung 9. Diese Vorhersage beruht auf der Annahme, dass alle beugenden Objekte aus mehr als einer Ebene bestehen, also dreidimensionale Kristallite und keine ebenen Platelets sind. Die im Realexperiment beobachteten Interferenzringe stehen zu dieser Vorhersage im Widerspruch. Wenn man allerdings annähme, dass nur wenige Kristallite in einer Umgebung existieren, die weit überwiegend aus Platelets bestünde, wäre dies dem Interferenzmuster angesichts der Breite der Interferenzringe nicht anzusehen.

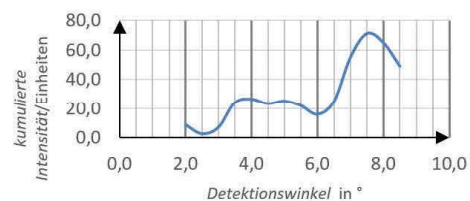


Abbildung 9: Bereits zwei verbundene Kohlenstoff-Ebenen in orthogonaler Durchstrahlung ergeben nach Integration ein deutlich verschobenes Interferenzmuster

Im Fall streifender Bestrahlung (Bragg-ähnlich) ist das Ergebnis noch deutlicher. Hier erwartet man zwar bei der Wellenlänge 18 pm und dem Netzebenenabstand von 335 pm die zusätzlichen Detektionswinkel $\delta = 3,1^\circ$ für das erste und $\delta = 6,2^\circ$ für das zweite Maximum. Überraschend ist aber, dass die beiden erwarteten Maxima bei $4,8^\circ$ und $8,4^\circ$ in Abbildung 10 völlig verschwinden.

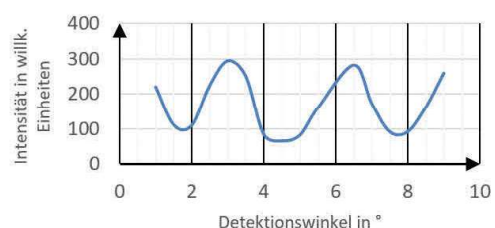


Abbildung 10: Bereits zwei Kohlenstoff-Ebenen ergeben bei streifender Bestrahlung ein Muster, das nur noch auf den größten der drei Netzebenenabstände hinweist.

Auch diese Aussage gilt unter der Annahme, dass alle beugenden Gebilde Kristallite sind – die Existenz einer kleinen Anzahl kann auch hier nicht ausgeschlossen werden. Allerdings gilt zu bedenken, dass schon Hinzufügen einer zweiten Ebene die Zahl zu addierender Zeiger verdoppelt und damit die Intensität vervierfacht. Eine nennenswerte Anzahl von Kristalliten nennenswerter Tiefe müsste also im Interferenzmuster auch durch „Glanzpunkte“ erkennbar sein, wie man sie von typischen Debye-Scherrer-Aufnahmen kennt. Im Elektronenbeugungs-Experiment findet man sie nicht.

Die bei [8] notierte Aussage wird durch diese Befunde unterstützt und hier ein wenig erweitert: Schon ein zweiter, geeignet angeordneter Kohlenstoffring verändert das beobachtete Muster unübersehbar, wenn es sich nicht nur um seltene Ausnahmen handelt!

5b Lässt sich begründen, warum trotz etwa gleicher Anzahl von Netzgeraden der zugehörigen Platelets die Bragg-Reflexe kleiner ausfallen als die Beiträge orthogonal durchstrahlter Gitter?

Im Online-Material wird gezeigt, dass sich aus dem Röntgen-Interferenzmuster eines Kohletargets für die beiden Scharen von Netzgeraden eine annähernd gleiche Zahl von Atomen ergibt. Folglich gehören zu dem beobachteten Interferenzmaximum gleich viele Pfade, es sollte sich also eine übereinstimmende Intensität ergeben. Das ist erkennbar nicht der Fall, wie Abbildung 11 zeigt.

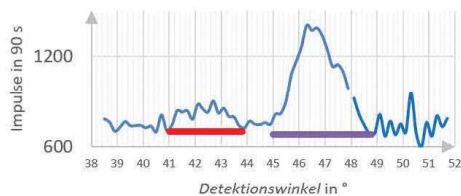


Abbildung 11: Gemessenes Interferenzmuster von K-Strahlung ($\lambda = 154 \text{ pm}$) an einem Kohletarget. Der rot markierte, recht flache Peak entsteht durch streifende Bestrahlung und gehört zum Netzabstand 123 pm . Der violett unterlegte gehört zu orthogonaler Durchstrahlung und beruht auf dem Abstand 213 pm .

Zur Modellierung wird die schon in Abbildung 6 dargestellte Struktur angenommen, also ein Gebilde mit etwas geringerer Größe als im Experiment. Insbesondere um das Geometrie-programm nicht zu stark zu bremsen musste die Anzahl der Rechenschritte sinnvoll begrenzt werden.

Eine Polardarstellung der Intensität kann Frage 5b beantworten helfen. Dazu wird für einen theoriegeleitet vorgegebenen Detektionswinkel die in jeder Richtung zu diesem gehörende Intensität als Polardiagramm angezeigt.

Die Modellierung in Abbildung 12 erfolgte mit der im Röntgen-Experiment vorherrschenden Wellenlänge von 154 pm . Daher wurde der Detektionswinkel auf etwa 46° eingestellt.

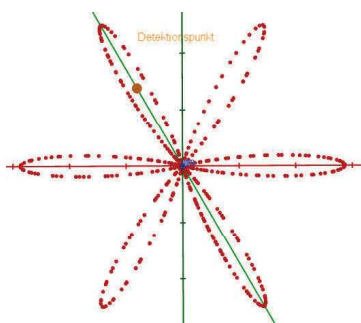


Abbildung 12: Wegen der Drehsymmetrie trägt ein orthogonal durchstrahltes Platelet in sechs Richtungen zur Intensität bei.

Bei der nachfolgenden Integration über alle Orientierungen von Platelets parallel zum Trägernetz wird man für jedes Platelet gleich große, nur verdreht liegende Beiträge zum gleichen Detektionswinkel erhalten, so dass sich insgesamt eine große Intensität längs des zugehörigen Interferenzrings ergeben wird.

Das ist bei streifender Bestrahlung anders. Hier muss über alle Orientierungen von Platelets in einer Ebene senkrecht zum Trägernetz integriert werden (Abbildung 5). Abbildung 13 zeigt in grüner Farbe das Polardiagramm für die Lage eines Platelets im Glanzwinkel, wie die kleine Abbildung am linken Bildrand zeigt. In roter Farbe ist das Diagramm für eine nur um wenige Grad abweichende Orientierung dargestellt. Die Beiträge außerhalb der eingestellten Schnittebene sind erkennbar sehr klein.

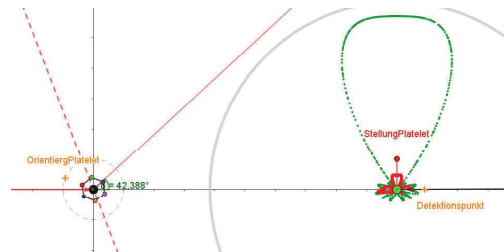


Abbildung 13: Polardiagramm für streifende Bestrahlung im Glanzwinkel (grün) und dicht daneben (rot).

Die Integration über alle Orientierungen des Platelets enthält jetzt sehr unterschiedlich große Summanden, die vor allem in Richtung seiner Ebene erzeugt werden. Das erklärt, warum der beobachtete Gitter-Peak im Röntgen-Experiment (Abbildung 11) so viel intensiver ist als der Bragg-Peak. Obwohl beide durch Addition von etwa gleich vielen Zeigern entstehen, hat man es im Fall orthogonaler Durchstrahlung mit sehr vielen, gleich großen Summanden zu tun, im Fall streifender Bestrahlung mit deutlich weniger, die dazu noch unterschiedlich groß sind.

6. Fazit und Ausblick

Sowohl als ebene Gitter aufgefasste und orthogonal durchstrahlte Platelets als auch solche, die vom Elektronenbündel streifend getroffen werden, tragen zu den im Experiment beobachteten Interferenzringen bei. Dabei überwiegt der Einfluss der orthogonal durchstrahlten. Die zur Erklärung mit Hilfe der Bragg-Beziehung typischerweise postulierten dreidimensionalen Kristallite kommen in den Targets offenbar allenfalls sehr selten vor, sowohl in der Basisschicht als auch eingebettet in die amorphe Struktur. Die Modellierung zeigt, dass ihre Existenz für die Erklärung des „Bragg-Peaks“ auch nicht notwendig ist. Offenbar reichen zweidimensionale, streifend bestrahlte Platelets aus, um den beobachteten, vermeintlichen Bragg-Reflex zu deuten.

Im Online-Material wird auf die noch fehlende Anpassung der Intensitätsverhältnisse zwischen den Maxima an das Real-experiment sowie eine Abschätzung des Beitrags der Einzel-atome in der amorphen Schicht eingegangen. Dort findet

man auch die zugrundeliegenden GeoGebra-Dateien, eine zusammenfassende Anleitung und die Auswertwerkzeuge.

Michael Rode StD i.R., ehemals Gymnasium Johanneum Lüneburg

Kasten 1: Zur Modellierung von Interferenz in der Zeigerdarstellung

Zur Beschreibung von klassischen Wellen und auch von Wahrscheinlichkeitsamplituden werden Funktionen der Form $\Psi(x) = A \cdot e^{-i2\pi \frac{x}{\lambda}}$ herangezogen, wenn es auf Zeitabhängigkeit nicht ankommt. Derartige Funktionen können anschaulich durch Zeiger in der Zahlenebene dargestellt werden. Sie haben die Länge A und ändern ihre Richtung in Abhängigkeit vom Ort x nach den Regeln: Drehung mit zunehmendem Ort im Uhrzeigersinn, je eine vollständige Drehung je Pfadabschnitt der Länge λ . Vorzüge der Zeigerdarstellung sind die Anschaulichkeit und die sehr einfache Modellierbarkeit von Interferenzsituationen. Wenn man sich für die Modellierung in GeoGebra entscheidet, kann man komplexe Funktionen direkt eingeben; deren Werte werden unmittelbar als Zeiger dargestellt. Zu Beginn jeder Modellierung legt man die Orte von Quelle und Detektor sowie relevanter Punkte auf allen klassisch denkmöglichen Pfaden fest, durch die Quelle und Detektor verbunden sein können. Abbildung 1 zeigt dies für eine Doppelspalt-Situation.

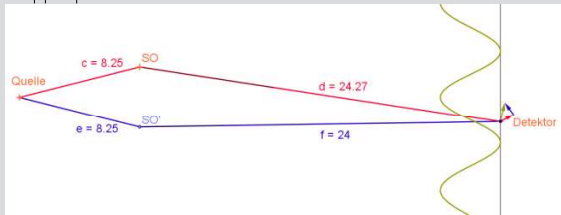


Abbildung 1: Darstellung einer Doppelspalt-Situation

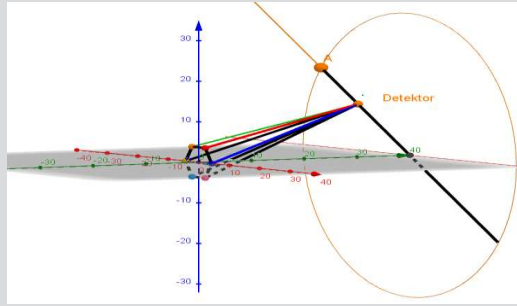


Abbildung 2: Prinzipskizze des Modells für die Beugung an einem Kohlenstoffring

Die Arbeitsschritte sind im Einzelnen:

- Festlegen des Versuchsaufbaus durch Konstruieren der Punkte *Quelle*, *S_i* und *Detektor*.
- Konstruieren der geometrischen Verbindungsstrecken und Ermitteln der Längen.
- Festlegen einer Wellenlänge; sinnvoll ist die Nutzung eines Schiebereglers.
- Erzeugen der beiden Zeiger $z1 = A \cdot e^{-i2\pi \frac{c+d}{\lambda}}$ und $z2 = A \cdot e^{-i2\pi \frac{e+f}{\lambda}}$ für die beiden denkmöglichen Pfade. i wird in GeoGebra als AltGr i gesetzt.
- $z1$ und $z2$ werden am Detektor wie Vektoren addiert, in GeoGebra ist das algebraisch sowie auch geometrisch möglich.
- Die Intensität (klassisch) bzw. Nachweiswahrscheinlichkeitsdichte (Quantenphysik) ist proportional zum Quadrat der resultierenden Zeigerlänge. Sie wird zweckmäßiger Weise über dem Ort des Detektors dargestellt. Nicht in allen Fällen möglich, aber sehr hilfreich ist die Darstellung als Ortslinie.

Bei der Modellierung zum Kohlenstoff-Ring (Abbildung 2) wurden die folgenden Schritte programmiert: Auswahl der 3-D-Darstellung, da die beugende Struktur (anders als der Doppelspalt in Abbildung 1) zweidimensional ist. Markieren von sechs Atomen P_k , sodass der Kohlenstoffring den Koordinatenursprung enthält. Die Quelle enthält einen festen, sehr weit vom beugenden Objekt entfernten Ort auf einer zum Kohlenstoffring senkrecht stehenden Koordinatenachse. Der Detektor wird auf einem Durchmesser des Schirms, der parallel zum Kohlenstoff-Ring orientiert ist, durch die Polarkoordinaten (δ, r) festgelegt und ist im Modell über den ganzen Schirm beweglich. Dann definieren von sechs Zeigern für die Pfade Quelle - A_k - Detektor in der Form $\psi_k(d) = e^{-i2\pi \frac{x_k}{\lambda}}$. Darin bezeichnet $k \in \{1..6\}$ die Nummer des streuenden Atoms, d den Ort des Detektors und x_k die Pfadlänge Quelle - P_k - Detektor.

Zum Schluss wird die Summe der sechs Zeiger am Ort des Detektors gebildet. Der Betrag der Summe wird quadriert, so dass sich ein Maß für die Nachweiswahrscheinlichkeit ergibt.

Literatur

- [1] Rode, M. (2022): Beugung an zweidimensionalen Gittern als Modell für die Elektronenbeugung. MNU-Journal 4/75. S. 309 ff.
- [2] Ando, Y. & Sumio, I. (1993): Preparation of Carbon Nanotubes by Arc-Discharge Evaporation. Japanese Journal of Applied Physics 32.1AB: L107-L109.
- [3] Kaspar, T. (2010): Graphen-abgeleitete Materialien. Zürich, ETH. Dissertation. S. 42. und persönliche Mitteilung <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/152096/eth-1568-02.pdf> (22.12.2020)
- [4] Sinnott, S.B., R. Andrews et al (1999): Model of Carbon Nanotube Growth through chemical vapor deposition. Elsevier, Chemical Physics Letters 315 (1999), 25-30. https://engineering.louisville.edu/eri/publications/papers_pres/ecd6.pdf (9.11.2023)
- [5] Stüber, M. (1997): Magnetron-gesputterte superharte, amorphe Kohlenstoffsichten mit gradiertem Schichtaufbau. Forschungszentrum Karlsruhe. FZKA 5919. S. 81. <https://d-nb.info/1103572261/34> (22.12.2020)
- [6] van der Drift, A. (1967): Evolutionary Selection, A Principle Governing Growth Orientation in Vapour-Deposited Layers. Philips Res. Repts. 22, 1967. S. 274. https://projects.iq.harvard.edu/files/taolab/files/evolutionary_selection_ref.pdf (08.01.2021)
- [7] Mc Cartney, J.T. & S. Ergun (1967): Optical Properties of Coal and Graphite. Washington, US. Dept of the Interior. S. 37ff.
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Exfoliated_graphite_nanoplatelets (26.01.2023)

„Stau bei Kilometer 24,36847669“

Runden will gelernt sein

Rainer Pippig

Abstract

Woher kommen die Probleme bei vielen Schüler:innen (und manchmal auch Lehrer:innen)? Woran erkennt man eine gerundete Zahl? Wie rundet und rechnet man sinnvoll und richtig? Aber auch: wie stellt man Aufgaben, bei denen Lernende richtige Rundungsergebnisse angeben können? Dieser Beitrag versucht Antworten auf diese Fragen zu geben.

1. Einleitung

Würde eine Radiosprecher:in tatsächlich die Meldung „Stau bei Kilometer 24,36847669“ im Verkehrsfunk durchgeben, würden sich wohl viele Menschen wundern und sich fragen, was diese Ansage solle. Die Genauigkeit von 1/100 Millimeter entspricht wohl ungefähr der Dicke der Lackschicht auf der Karosserie. Genau solche Angaben liefern aber viele Schüler:innen, indem sie kritiklos bei einer Aufgabe die Anzeige des Taschenrechners abschreiben.

Der bedeutende Mathematiker Carl Friedrich Gauß (1777-1855) empfand dies als einen der gravierendsten Fehler überhaupt und prägte dadurch seinen berühmten Aphorismus: „*In nichts zeigt sich der Mangel an mathematischer Bildung mehr als in einer übertrieben genauen Rechnung.*“

2. Gerundete Werte:

In der Mathematik ist 2,0 dasselbe wie 2,00 oder 2,000000000, nämlich genau 2 ohne jede Benennung. In den Naturwissenschaften und vor allem in der Physik ist das ganz anders, denn Zahlenangaben sind immer Messwerte. Jeder Messwert (sofern er frei von groben oder systematischen Fehlern ist) hat stets nur einen begrenzten Bereich, innerhalb dessen man mit definierter Wahrscheinlichkeit darauf vertrauen darf, dass der „wahre Wert“ darin liegt. Dieser Bereich wird mit Hilfe der Messunsicherheit definiert.

Der Zahlenwert 2,0 m bedeutet in der Physik, dass jemand auf Dezimeter genau gemessen hat; bei 2,00 m ist es auf Zentimeter genau. Der wahre Wert liegt also im 1. Fall zwischen 1,95 und 2,05 (genauer im halboffenen Intervall $[1,95; 2,05[$), im 2. Fall zwischen 1,995 und 2,005 (genauer im halboffenen Intervall $[1,995; 2,005[$). Bekanntermaßen entstehen die Intervallgrenzen so, dass bei den Ziffern 0 bis 4 der links stehende Zahlenwert abgerundet, bei 5 bis 9 auf die nächsthöhere Ziffer aufgerundet wird. Die nachfolgenden, d. h. weiter rechts stehenden Ziffern sind bei keiner Angabe von nennenswerten Relevanz. Man

kennt sie nicht; deshalb können sie jeden beliebigen Ziffernwert annehmen, was völlig egal für den weiteren Verlauf ist.

Probleme kann es aber geben, wenn man zweimal rundet, d. h. z. B. einen schon gerundeten Zahlenwert für die weitere Rechnung verwendet und dann das Endergebnis nochmals rundet.

Beispiel: 23,45 € ergibt auf Euro gerundet 23 €. Rundet man zuerst auf 10 Cent genau und anschließend nochmals auf ganze Euro, so erhält man über den Zwischenwert 23,5 € das Endergebnis 24 €.

Merke: Runden eines bereits vorher schon gerundeten Zahlenwerts kann den Wert verändern.

3. Geltende Ziffern:

Die Genauigkeit eines Messwerts erkennt man an der Anzahl der geltenden Ziffern (manchmal auch gültige Ziffern oder signifikante Stellen genannt).

Bei 1,93 m sind Ziffern an drei Stellen angegeben ebenso wie bei 20,8 m; bei 1,992 m sind es vier Ziffern, die „gelten“. Gibt man die Werte in der Benennung Dezimeter an, so haben wiederum 19,3 dm und 208 dm drei und 19,92 dm vier geltende Ziffern. Der Wert 0,25 m hat dem zufolge zwei geltende Ziffern, denn 2,5 dm hat auch zwei; 6,70 dm hat 3 geltende Ziffern wie 0,670 m auch. Das wäre ebenso bei Angabe in Kilo- oder Zentimeter der Fall.

Merke: Die Zählung der geltenden Ziffern beginnt bei der ersten von 0 verschiedenen Ziffer von links und endet bei der letzten Ziffer rechts. Die geltenden Ziffern haben absolut nichts mit Dezimalstellen vor oder hinter dem Komma zu tun.

Dabei gibt es aber doch eine Schwierigkeit: die sogenannten „Endnullen“ links vom Komma, die für die Genauigkeit wichtig sind.

2,0 m hat zwei geltende Ziffern, 2,00 m drei. Gibt man beide Werte in Millimeter an, so erhält man jeweils 2000 mm. Diesem Wert sieht man die geltenden Ziffern leider nicht mehr an. Der Ausweg liegt in der üblichen, wissenschaftlichen Potenzschreibweise.

Bei $2,0 \cdot 10^3$ mm bzw. $2,00 \cdot 10^3$ mm ist die Zahl der geltenden Ziffern wieder eindeutig ersichtlich. Übrigens gilt das auch bei

einem Wert wie 2000,0 mm; hier liegen fünf geltende Ziffern in eindeutiger Weise vor.

Merke: Endnullen vor dem Komma können geltende Ziffern nicht eindeutig darstellen.

Man sollte sie daher ganz einfach in Angaben von Prüfungsfragen vermeiden.

4. Addition und Subtraktion

Wenn Sie einem:er Millionär:in 10 Cent schenken, besitzt diese:r dann 1000000,10 €? Wenn man 60 kg wiegt und ein Gummibärchen von 2 g isst, zeigt die Badezimmerwaage dann 60,002 kg an?

Die oben erwähnten Zahlenwerte gerundeter Größen kann man nur im dem Bereich addieren oder subtrahieren, in dem die geltenden Ziffern übereinstimmen. Ist das nicht der Fall, spielen die zu kleinen Zahlen keine Rolle und sind „vernachlässigbar“. In der Physik schreibt man hier korrekterweise sogar ein Gleichheitszeichen (und nicht etwa das „Ungefähr-Zeichen“ $\approx$).

Hier einige Beispiele dazu:

$$2,0 \text{ m} + 2 \text{ mm} = 2,0 \cdot 10^3 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 2,0 \cdot 10^3 \text{ mm} = 2,0 \text{ m}.$$

$$2,00 \text{ m} + 2 \text{ mm} = 2,00 \cdot 10^3 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 2,00 \cdot 10^3 \text{ mm} = 2,00 \text{ m}.$$

$$2,000 \text{ m} + 2 \text{ mm} = 2,000 \cdot 10^3 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 2002 \text{ mm} = 2,002 \text{ m}.$$

$$2,006 \text{ m} - 0,5 \text{ cm} = 200,6 \text{ cm} - 0,5 \text{ cm} = 200,1 \text{ cm} = 2001 \text{ mm}.$$

$$\text{Korrekt wäre auch: } 2,006 \text{ m} - 0,005 \text{ m} = 2,001 \text{ m}.$$

Schwieriger wird es wieder, wenn beim Ergebnis Endnullen ins Spiel kommen wie z. B.: $2,005 \text{ m} - 0,5 \text{ cm} = 200,5 \text{ cm} - 0,5 \text{ cm} = 200,0 \text{ cm}$. Die Angabe 200 cm wäre zu ungenau, weil ja sogar die Ziffer 0 rechts von 200 bekannt ist. Das Ergebnis kann ja bis auf den Millimeter genau angegeben werden.

Die Angabe in Meter oder Zentimeter (natürlich auch die in Potenzschreibweise) macht alles eindeutig: $2,005 \text{ m} - 0,005 \text{ m} = 2,000 \text{ m} = 200,0 \text{ cm}$.

Merke: Bei unterschiedlichen Benennungen sollte man immer die größte wählen, damit Endnullen links vom Komma möglichst nicht auftreten, ansonsten die Potenzschreibweise verwenden.

5. Multiplikation und Division

Hier liegt die mit Abstand häufigste Anwendung innerhalb naturwissenschaftlicher Aufgaben.

Nehmen wir an, es soll die Geschwindigkeit eines Spielzeugautos gemessen werden. Für eine Strecke von 5 m braucht das Auto 2,6 s. Der Taschenrechner liefert für die Geschwindigkeit $v = 5 \text{ m} / 2,6 \text{ s} = 1,923076923 \text{ m/s}$ als Ergebnis.

Bedenkt man aber, dass 5 m eine Bandbreite von 4,9 bis 5,1 m und 2,6 s einen Bereich von 2,59 bis 2,65 s umfasst, dann muss das Ergebnis zwischen $v_{\min} = 4,9 \text{ m} / 2,65 \text{ s} = 1,849056604 \text{ m/s}$ und $v_{\max} = 5,1 \text{ m} / 2,59 \text{ s} = 1,96911969 \text{ m/s}$ liegen. Das heißt, dass bereits die zweite Ziffer von links (hier die erste Ziffer nach dem Komma) unbestimmt ist, weil sie eine 8 oder auch eine 9 sein kann. Alle folgenden Ziffern von 1,923076923 m/s sind logischerweise auch unbestimmt.

Wird die Messstrecke etwas genauer auf 5,0 m bestimmt, verringert sich in diesem Fall die Bandbreite für die Geschwindigkeit von $v_{\min} = 4,95 \text{ m} / 2,65 \text{ s} = 1,867924528 \text{ m/s}$ bis $v_{\max} = 5,05 \text{ m} / 2,59 \text{ s} = 1,949806950 \text{ m/s}$. Damit ergibt sich die zweite Ziffer durch Auf- bzw. Abrunden mit Sicherheit zu 9. Natürlich bleiben alle folgenden Ziffern rechts davon weiterhin völlig unbestimmt.

Im ersten Fall kann man die Geschwindigkeit des Autos deshalb nur mit 2 m/s angeben (nur eine geltende Ziffer), im zweiten Fall mit 1,9 m/s (zwei geltende Ziffern).

Aus diesen beiden Fällen ergibt sich eine einfache Faustregel:

Merke: Stelle für jede der vorgegeben Größen die Anzahl der geltenden Ziffern fest und merke dir die kleinste Anzahl von allen gegebenen Werten. Runde dann dein Ergebnis auf diese kleinste Anzahl.

Noch deutlicher wird dieses Vorgehen durch folgendes Beispiel: Es sollen die beiden Messwerte 2,53 und 6,1 miteinander multipliziert werden. Die erste Ziffer nach den drei bzw. zwei geltenden Ziffern ist offensichtlich unbekannt und wird jeweils durch ein Fragezeichen ersetzt, also 2,53? und 6,1?. Immer wenn beim Multiplizieren ein Fragezeichen als Faktor auftaucht, wird das Ergebnis ebenfalls mit einem Fragezeichen geschrieben und natürlich liefert auch die Addition von Fragezeichen ein Fragezeichen.

Die ausführliche Rechnung mit allen Fragezeichen sieht dann so aus:

$$\begin{array}{r} 2,53? \cdot 6,1? \\ 1518? \\ 253? \\ \hline ???? \\ 15? ?? \end{array}$$

Bereits die dritte Ziffer von links ist demnach schon unbestimmt. Ursache dafür ist, dass die ungenaueste Zahl mit 6,1 nur zwei geltende Ziffern hat. Die obige Faustregel liefert dann tatsächlich das Ergebnis 15 auf nur zwei geltende Ziffern genau.

Wenn man beim Ausmessen eines Zimmers auf eine Breite von 2,53 m und eine Länge von 6,5 m kommt, dann kann man die Fläche dem zufolge nur mit 15 m² angeben und nicht etwa 15,433 m², was der Taschenrechner anzeigen würde.

Liebe Vereinsmitglieder, sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

wir sind mitten in einer Corona-Welle, als ich das hier schreibe. Und natürlich wünsche ich allen gerade erkrankten Kolleg:innen gute Besserung. Aber ich bin auch froh darüber, dass wir zur Normalität zurückgekehrt sind. Wir konnten für 2024 wieder eine Fortbildungswoche planen, ohne dass wir uns vor Lockdowns oder Platzbeschränkungen fürchten mussten. Die in den letzten Jahren begonnene Tradition einiger Online-Angebote haben wir aber auch dieses Mal wieder beibehalten. Auch in diesem Programmteil sind einige Highlights enthalten.

Bedanken möchte ich mich bei den Fördergeber:innen und Unterstützer:innen der Fortbildungswoche. Die Unterstützung durch die Fakultät für Physik der Universität Wien, die

Pädagogische Hochschule Wien und die kirchlich pädagogische Hochschule Wien/Krems macht diese Veranstaltung erst möglich. Dank gilt auch den Arbeitsgemeinschaften der Region und den anderen pädagogischen Hochschulen. Die vielen Menschen in den AECCs Chemie und Physik sind wesentlich für das Gelingen der Fortbildungswoche. Ein besonderer Dank gilt Christian Nosko von der KPH Wien/Krems, der den Volksschulnachmittag der Fortbildungswoche verantwortet.

Viel Spaß auf der Fortbildungswoche

Martin Höpf, Obmann

Anmeldung zur Fortbildungswoche

Für die 78. Fortbildungswoche wird auch in diesem Jahr wieder mit dem Buchungssystem eveeno gearbeitet. Abgewickelt wird die Anmeldung über folgende Homepage:

<https://eveeno.com/PlusLucis>

Folgen Sie zur Anmeldung einfach diesem Link. Bei Problemen bitten wir um eine Mail an die folgende Adresse:

vorstand@pluslucis.org

Den obigen Link finden Sie auch auf der Vereinshomepage, wo Sie zudem eine Langform des Programms inklusiver verschiede-

denster Beschreibungen für die Vorträge, Workshops und Exkursionen finden.

Die Anmeldung für Vereinsmitglieder ist mittels Anmeldecode (findet sich auf der Rückseite dieser Plus Lucis Ausgabe) ab 3.1.2024 möglich. Alle anderen können sich ab 8.1.2024 für die Fortbildungswoche anmelden.

Wir freuen uns auf Ihr Kommen im Februar.

Der Vorstand

Montag, 26.2.2024

Vorträge

ORT: Lise-Meitner-Hörsaal, Boltzmannngasse 5, 1. Stock, 1090 Wien

9:15-10:00	Begrüßung und Eröffnung Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf, Obmann
10:00-11:00	TBA N.N.
11:30-12:30	Das Wildschwein-Paradoxon Univ.-Prof. Dr. Georg Steinhauser, TU Wien

Vorträge

ORT: Lise-Meitner-Hörsaal,
Boltzmannngasse 5, 1. Stock, 1090 Wien

Workshops

14:00-15:00	Strahlungsantrieb und Klimasensitivität – zwei zentrale Konzepte zur Beschreibung der globalen Erderwärmung Doz. Dr. Franz Embacher, FH Technikum Wien	14:00-17:00	Chemie all-inclusive! – Methodenwerkzeuge für die Gestaltung von diversitäts-bewusstem naturwissenschaftlichem Unterricht Dr. ⁱⁿ Katja Weirauch, Universität Würzburg Multifunktionsraum (Porzellangasse 4, 3. Stock) Unterrichtsplanung für heterogene/diverse/ inklusive Lerngruppen mit ChemDive Dr. ⁱⁿ Monika Holländer, Technische Universität Dortmund Seminarraum AECCs (Porzellangasse 4, 3. Stock) Producing comics in physics without being a great artist Eman Sharaf MEd, Universität Wien Josef-Stefan-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 3. Stock, Raumnr. 3329) „strukturiert diskutiert“ – Komplexe gesellschaftliche Themen im naturwissenschaftlichen Unterricht diskutieren, aber wie? Matthias Fasching MEd, Universität Wien Kurt-Gödel-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, EG) Zwischen Fakten und Fakes – Klimawandel im Physikunterricht Ass.-Prof. Thomas Schubatzky, PhD und Mag. ^a Sarah Wildbichler, Universität Innsbruck Erwin-Schrödinger-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 5. Stock, Raumnr. 3500) 2 Freihandexperimente zur E-Kompetenz „Vertrauenswürdigkeit von Daten“ Dr. Clemens Nagel, Universität Wien Zimmer 55 (Boltzmannngasse 5, 1. Stock, Raumnr. 3114)
15:00-16:00	Allgemeine Relativitätstheorie in der Oberstufe Sven Weissenborn, Universität Hildesheim		
16:30-17:30	Forschendes Lernen und Konzeptverständnis in der Wellenoptik Dr. ⁱⁿ Karolina Matejak Cvenic, Universität Zagreb, Didaktik der Physik		
17:45-18:45	Wissenschaftsskeptisch betrachtet Dr. Johannes Starkbaum, IHS, Science, Technology and Social Transformation	16:00-19:00	Physics Toolbox: Do You See What I See? Sensors for Physics Education Rebecca & Chrystian Vieyra, University of Colorado, Boulder online

danach

Brötchen und Getränke

Dienstag, 27.2.2024

Vorträge Physik

ORT: Lise-Meitner-Hörsaal,
Boltzmannngasse 5, 1. Stock, 1090 Wien

Vorträge Chemie

ORT: Christian-Doppler-Hörsaal,
Boltzmannngasse 5, 3. Stock, 1090 Wien

9:00-10:00	Klimawandel und das CERN CLOUD Experiment Univ.-Prof. Dr. Jasper Kirkby, CERN und Goethe-Universität Frankfurt	9:00-9:55	Grüner Wasserstoff: Herstellung und Anwendungen Dr.-Ing. ⁱⁿ Marina Bockelmann, Technische Universität Clausthal
10:00-11:00	Sprachbewussten Nawi-Unterricht einfach umsetzen Dr. ⁱⁿ Melanie Renner, BORG Feldbach und Universität Graz, Didaktik der Physik	10:00-10:55	LEIFIchemie – das kostenfreie Lehr-/Lernportal für den Chemieunterricht Daniel Klaus, Joachim Hertz Stiftung Hamburg
11:30-12:30	Die Interessentstypen von Schüler:innen an Physik neu betrachtet Dr. ⁱⁿ Sarah Zöchling, CERN	11:30-12:30	KI-Systeme im und für den Chemieunterricht? Dr. Marvin Rost, AECC Chemie, Universität Wien

Workshops nach dem Mittagessen		Exkursionen	
14:00-17:00	Holz als nachwachsender Rohstoff – ein Beispiel Grüner Chemie Rosina Steininger und Martina Zodl, AECC Chemie, Universität Wien <i>Multifunktionsraum (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i> Ausgewählte KI-Systeme für den Chemieunterricht kennenlernen und erproben Marvin Rost, AECC Chemie, Universität Wien <i>Seminarraum AECCs (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i> Buzz Lightyear and the Physics classroom: in-class discussion of time dilation Dr.ⁱⁿ Esmeralda Campos, Universität Wien <i>Besprechungsraum AECCs (Porzellangasse 4, 2. Stock)</i> Der Neue Lehrplan in Physik für die Sekundarstufe 1 Univ.-Prof. Dr.ⁱⁿ Claudia Haagen-Schützenhöfer, Universität Graz, Dr.ⁱⁿ Susanne Neumann, ARGE Physik Wien, Martin Hopf, Universität Wien <i>Josef-Stefan-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 3. Stock, Raumnr. 3329)</i> Klimamodelle für den Physikunterricht Dr. Franz Embacher, Universität Wien <i>Christian-Doppler-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 3. Stock)</i> Didaktik der Allgemeinen Relativitätstheorie: Mit einem Geodreieck im Gepäck zum Neutronenstern Sven Weißenborn, Universität Hildesheim <i>Schulversuchspraktikum (Porzellangasse 4, E1 Zwischengeschoß)</i> Die Entdeckung des Higgs-Boson als Beispiel für Nature of Science – Alles in einer Box Dr.ⁱⁿ Sarah Zöchling, CERN <i>Erwin-Schrödinger-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 5. Stock, Raumnr. 3500)</i>	14:00-17:00	Wasserbaulabor der Universität für Bodenkultur Wien <i>Am Brigittenauer Sporn 3, 1200 Wien</i>
16:00-19:00	Interactive Virtual Field Labs: Connecting Climate Change to the Physics and Chemistry Classroom Louise Huffman & Bill Grosser, U.S. Ice Drilling Program Education Outreach <i>online</i>		
17:30-19:00	Pub Quiz Louisa Winter, Florian Budimaier und das Team der Fortbildungswoche <i>Schulversuchspraktikum (Porzellangasse 4, Stiege 2, Zwischengeschoß)</i>		

Mittwoch, 28.2.2024

Workshops		Exkursionen	
9:00-12:00	Elektromagnetische Strahlung verständlich unterrichten Mag.^a Sarah Zloklikovits, GRG 3 Haagenmüllergasse <i>Schulversuchspraktikum (Porzellangasse 4, E1 Zwischengeschoß)</i> Einsatz von Smartphones in der Physiklehre mit phyphox Ahmed Asali MA, RWTH Aachen <i>Multifunktionsraum (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i>	9:00-12:00	Happy Lab als außerschulischer Lernort <i>Schönngasse 15-17, 1020 Wien</i>
		9:00-12:00	Virtueller Besuch am CERN <i>online</i>
		10:00-13:00	Krankheitserregern auf der Spur – das Geheimnis von PCR-Tests <i>Ingenetix GmbH, Haidingergasse 1, 1030 Wien</i>
		9:00-16:00	Science teacher meets scientist – ein Blick hinter die Kulissen eines Weltklasse-Forschungsinstituts (ISTA) <i>Shuttle ab Wien (Details werden noch bekannt gegeben)</i>
16:00-19:00	PhET Interactive Simulations: Open Education Resources and Pedagogies for Chemistry and Physics Education Rebecca & Chrystian Vieyra, University of Colorado, Boulder <i>online</i>	14:00-15:00	Labor für Gang- und Bewegungsanalyse <i>Orthopädisches Spital Speising, Speisinger Straße 109, 1130 Wien</i>
		14:00-17:00	Kraftwerk Freudenau <i>Kraftwerk Freudenau, Am Praterspitz, 1020 Wien</i>

Fokus Sachunterricht 2024: Farbe, Licht und Schatten

ORT: KPH Wien/Krems, Campus Wien-Strebersdorf, Mayerweckstraße 1, 1210 Wien

Donnerstag, 29.2.2024, 14:00-18:00

Schillernde Farben, buntes Licht und farbige Schatten – diese und mehr Themen stehen im Zentrum der diesjährigen Veranstaltung „Fokus Sachunterricht“. Naturwissenschaften zum Anfassen, Ideen zum Mitnehmen und Experimente zum Staunen erwarten Sie.

Nach einem Impulsvortrag können Sie in zwei Workshop-Runden in die Welt von Farbe, Licht und Schatten eintauchen, Materialien selbst ausprobieren und Ihre eigene Expertise zum Thema erweitern.

Die Anmeldung für die Workshops ist bei der Registrierung vor Ort möglich. In der Pause ist Zeit zum Austausch bei Kaffee und Kuchen, zum Schmökern in Literatur und zum Besuch der Informationsstände.

HAUPTVORTRAG: Licht – Botschafter des Kosmos

Univ.-Prof. Mag. Dr. Franz Kerschbaum, Universität Wien, Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie

WORKSHOPS

- Licht analysieren
- Was vertauscht der Spiegel? – Experimentieren mit Spiegeln im Sachunterricht
- Astronomy to go – Mobiles Planetarium
- MINT ist mehr als nur eine Farbe
- Farbe, Licht und Schatten – eine Lernwerkstatt zum Fragen und Forschen
- Wir treiben es bunt – malen und schreiben wie früher
- Aus den Augen, aus dem Sinn?

Mehr Informationen: www.kphvie.ac.at/fokus-sachunterricht

Die Teilnahme ist kostenfrei. Um Anmeldung bei der Schulaufsicht wird gebeten.

Hinweise für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer:

- Für alle Veranstaltungen ist wegen beschränkter Teilnehmerzahl eine vorherige Anmeldung notwendig. Die Anmeldung erfolgt ausschließlich über das Internet unter <https://www.pluslucis.org/>. Dort sind weitere Informationen zu finden. Sollte später Ihre Teilnahme unmöglich werden, ersuchen wir Sie dringend, sich im Anmeldesystem selbst wieder abzumelden, damit andere Personen den Platz nutzen können. Anmeldeschluss: 20.2.2024
- Zur dienstrechtlichen Absicherung Ihrer Teilnahme ist die Inskription an der Pädagogischen Hochschule Wien notwendig. Informationen dazu sind auf unserer Homepage abrufbar.
- Die Teilnahme ist für Mitglieder des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts frei. Von Nichtmitgliedern wird für die Anmeldung ein Spesenbeitrag zu den Organisationsspesen in der Höhe von Euro 20,- eingehoben.
- Alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer werden aufmerksam gemacht, dass sie Labors, Betriebsstätten und sonstige Teile von Fabriks- oder anderen Anlagen auf eigene Gefahr besuchen und dass weder das Unternehmen noch der Verein für Unglücksfälle und sonstige wie immer geartete Schadensfälle, die sich – gleichgültig ob durch eigenes oder fremdes Verschulden, Zufall oder sonst wie immer – während oder anlässlich des Besuches ereignen, haftbar oder schadenersatzpflichtig sind.
- Es wird darauf hingewiesen, dass am Veranstaltungsort Fotos angefertigt werden und zu Zwecken der Dokumentation der Veranstaltung veröffentlicht werden können.
- Die Workshops werden unterstützt durch die Pädagogische Hochschule Wien.
- Mit der Anmeldung zur Fortbildungswoche stimme ich ausdrücklich zu, dass die von mir angegebenen Daten für Veranstaltungszwecke verarbeitet werden dürfen. Die Datenschutzerklärung für diese Anwendung finden Sie unter https://www.pluslucis.org/Dateien/Datenschutzerklaerung_Verein.pdf.
- Mir ist bekannt, dass ich meine Einwilligung jederzeit durch Übersendung eines Schreibens an den Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts, +43-1-4200-60330, vorstand@pluslucis.org, Martin Hopf widerrufen kann.

6. Auswirkung auf Aufgabenstellungen und Korrektur

Nach meiner Erfahrung sollte man dem Runden von Ergebnissen keine überragende Bedeutung beimessen und es nicht als Großproblem thematisieren. Viele Schüler:innen haben bei solchen Aufgaben häufig mit anderen Problemen zu kämpfen. Andererseits ist das unkritische Abschreiben der Taschenrechneranzeige schlicht und einfach falsch und damit als Fehler anzustreichen, weil alle weiteren Ziffern rechts von den geltenden Ziffern durch nichts gerechtfertigt sind.

Ein Ausweg ist, dass sich viele Taschenrechner im Voraus auf bestimmte Anzeigeformate einstellen lassen (geltende Ziffern meist mit einer SCI-Taste für Science), so dass man von Anfang an Rundungsfehler besser vermeiden kann. Natürlich kann man alle Angaben in Prüfungen von vornherein mit der gleichen Anzahl geltender Ziffern stellen und unklare Endnullen grundsätzlich vermeiden. Vermutlich ist das sowohl für Lehrkräfte (bei Aufgabenstellung und Korrektur)

sowie für Schüler:innen (bei der Bearbeitung und Lösung) die unproblematischste Variante.

Die obige Faustregel sollte dabei allerdings immer beachtet werden, aber vielleicht mit etwas Großzügigkeit: Das Ergebnis wird als richtig anerkannt, wenn sich Lernende um eine Stelle täuschen, also maximal um eine geltende Ziffer von der Faustregel abweichen. Damit weiß man als Lehrkraft, dass Schüler:innen über das Ergebnisformat wenigstens nachgedacht haben.

Ein Punkteabzug dürfte in diesem Fall dann nicht mehr erfolgen; bei einer Angabe wie 24,36847669 km für einen Staubeginn auf der Autobahn aber schon – ganz im Sinne des großen Mathematikers Carl Friedrich Gauß.

Rainer Pippig *Schulleiter i.R. des Gymnasiums Oberhaching*

Die magnetohydrodynamische Pumpe – ein reizvolles Demonstrationsexperiment zur Lorentzkraft

Georg Fuchs

1. Einleitung

Es gibt zur Lorentzkraft zahlreiche anschauliche Experimente. Zumeist benützt man metallische Leiter in einem Magnetfeld, die von Strom durchflossen werden, wobei dann eine Querablenkung beobachtet werden kann. Im Folgenden wird ein Ionenstrom in einem Magnetfeld quer abgelenkt, und man kann so das (stetige) Pumpen einer Salzlösung direkt beobachten. Die Idee zum Bau dieser Pumpe kam in der Fortbildung der Leiter:innen der Physikolympiadekurse im vergangenen November in Mariazell auf. Ich unterhielt mich dazu mit Kollegen Lorbek über seine diesbezüglichen Versuche. Er beklagte das Rosten der Neodym-Magnete und die Instabilität seiner Konstruktion, die mittels eines 3D-Filamentdruckers hergestellt wurde. Diese Probleme treten bei der weiter unten beschriebenen Konstruktion nicht auf (Abb. 1)!



Abbildung 1: Die magnetohydrodynamische Pumpe in Betrieb

Zum Nachbau ist ein Informationspaket mit einem Film der magnetohydrodynamischen Pumpe im Betrieb, stl-Datei zum direkten 3D-Drucken und weiteren Fotos online verfügbar [1].

2. Das Prinzip der magnetohydrodynamischen Pumpe

Zwei Neodym-Magnete bilden in ihrem Zwischenraum ein extrem starkes Magnetfeld. Quer zu dessen Verlauf wird mittels einer Gleichspannung von etwa 12V ein Ionenstrom (NaCl-Lösung) erzeugt (Abb. 2). Die auftretende Lorentzkraft auf die im Magnetfeld bewegten Ionen führt zu einem beträchtlichen Flüssigkeitsstrom quer zum ursprünglichen Ionenstrom und dem Magnetfeld. Da die Anordnung rohrförmig ausgebildet ist, wirkt sie wie eine Flüssigkeitspumpe. Die Strömung kann gut mittels eines Tintentropfens sichtbar gemacht werden.

3. Benötigte Gerätschaft, Materialien und Kosten

Das Gehäuse wurde mit einem **Resin-3D-Drucker** (Elegoo Mars2 pro) aus einem **transparenten Resin** gedruckt (Abb. 3). Es besteht aus zwei „Taschen“ für die **2 Neodym-Magnete**, die nach dem Einschub vergossen werden (Schutz vor der

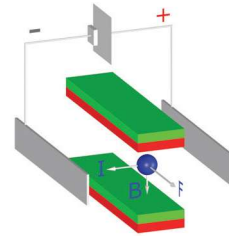


Abbildung 2: Aufbau des Geräts

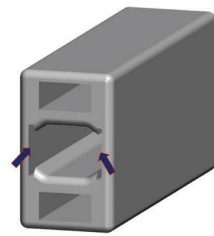


Abbildung 3: Gehäuse

Salzlösung) und den Aufnahmeschlitzten (blaue Pfeile) für die beiden Niro-Elektroden. Dieses Material ist weitgehend unempfindlich gegenüber der Salzlösung. Die Niro-Elektroden können von einem ca. 1 mm dicken **Niro-Blech** mit einer **Bleischere** abgeschnitten und anschließend rechtwinklig gebogen werden. Sie sitzen in den Schlitzten, und an ihren abgewinkelten Enden kann **je eine Kroko-Klemme** zum Anlegen der Spannung angebracht werden (Abb. 4, 5). Zum Sichtbarmachen der Strömung benötigen wir ein paar **Tropfen Tinte oder ein anderes Färbemittel**, das in die gut **gesättigte NaCl-Lösung** getropft wird.



Abbildung 4: Gehäuse mit Elektroden



Abbildung 5: Elektroden und Magnete

Die Gesamtkosten dieser Materialien liegen unter 10€. Das Niro-Blech bekommt man in Baumärkten oder bei Amazon. Die zu dem angegebenen Gehäuse passenden Neodym-Magnete (60 x 10 x 5 mm) erhält man ebenfalls z. B. bei Amazon.

4. Bau der magnetohydrodynamischen Pumpe

Nach dem Druck des Gehäuses schiebt man die Magnete in die Taschen und befüllt den restlichen Hohlraum mit Resin. Dieses Resin wird mit der UV-Curelampe des 3D-Druckers gehärtet. Damit sind die Magnete geschützt. Am Blech markiert man zwei ca. 9mm breite und ca. 12cm lange Streifen, die mit einer Bleischere zugeschnitten werden. Zum Biegen der Streifen spannt man diese am besten in einen Schraubstock ein und klopft die Winkelstellen anschließend mit einem Hammer flach. Die Elektroden sollten leicht in die Führungsschlitzte eingeschoben werden können.

5. „Kondensator-Variante“

Bei der Diskussion, die der Ausgangspunkt für diese Konstruktion war, ging es im Weiteren auch darum, ob die Pumpe ebenfalls bei galvanisch getrennten Elektroden funktioniert. Nun bilden sie ja einen Plattenkondensator. Nach energetischen Überlegungen kann kein permanenter Flüssigkeitsfluss ohne andauernden elektrischen Stromfluss erfolgen. Unmittelbar nach dem Einschalten – also während der Ladestrom des Kondensators fließt – sollte jedoch für kurze Zeit eine Lorentzkraft auftreten. Die Ionen werden im neu angelegten Feld verschoben, bis ein Gegenfeld aufgebaut ist. Daher sollte sich die Flüssigkeit ein wenig entlang des Pumpenrohres verschieben. Ich habe diese Variante ebenso gebaut. Dabei habe ich nicht nur die Magnete, sondern auch die Elektroden eingegossen, also voneinander isoliert. Als Spannungsquelle habe ich 18kV (Sicherheitsvorkehrungen!) benutzt. Ich konnte aber erwartungsgemäß keinen merklichen Effekt feststellen.

6. Durchführung des (ursprünglichen) Experiments

Es wird eine gut gesättigte NaCl-Lösung benutzt. Einfach so lange Salz einstreuen und umrühren, bis sich nichts mehr löst. Diese Lösung wird am besten in ein durchsichtiges Gefäß gefüllt, in dem die magnetohydrodynamische Pumpe am Boden liegt. Dabei sollten die Elektrodenenden aus der Flüssigkeit ragen, damit die Kroko-Klemmen angeschlossen werden können. Nach dem Einschalten der Spannungsquelle (ca. 12V) beginnt sofort die Chlor-Alkali-Elektrolyse, und es bilden sich Gasbläschen. Es entstehen zwar nur geringe Mengen an Chlorgas, doch soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass dieses beim Einatmen giftig ist. Das ebenso entstehende Wasserstoffgas bildet zusammen mit dem Chlor sogenanntes Chlorknallgas. Dieses explodiert bei Entzündung. Bei der kurzen Versuchsdauer von etwa einer Minute und guter Lüftung sollten sich daraus keine wirklichen Gefahren ergeben! Die Lösung beginnt sofort nach dem Einschalten durch die Pumpe zu fließen. Nun kann der Farbtropfen an der Eingangsöffnung platziert werden, damit die Strömung noch besser sichtbar wird. Einen Film der magnetohydrodynamischen Pumpe im Betrieb (Abb. 6) kann man online ansehen [1].

7. Weitere Variationen und Anregungen

Eine wahrscheinlich lohnende Variation wäre es, diese Pumpe als **magnetohydrodynamischen Motor** umzufunktionieren. Dazu müsste die ursprüngliche Pumpe an der Unterseite eines kleinen Modellbootes montiert werden [2]. Derartige Antriebe

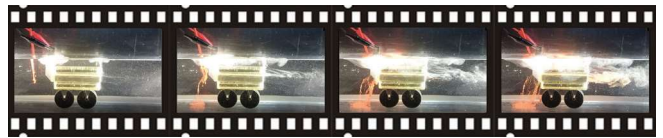


Abbildung 6: Magnetohydrodynamische Pumpe im Betrieb

wurden im großen Maßstab bereits für Boote und U-Boote realisiert [3].

So wie man einen Elektromotor prinzipiell auch als Generator betreiben kann, kann das vorliegende Gerät ebenso „invers“ betrieben werden. Statt eine Spannung zwischen den Elektroden anzulegen und damit einen Ionenstrom zu erzeugen, ist auch die Umkehrung möglich. Dazu schließt man zwischen den Elektroden ein Voltmeter (Millivoltbereich!) an und erzeugt in der Pumpe (Aufstellung wie oben) eine Strömung der Salzlösung. Dazu kann man zum Beispiel eine Injektionsspritze mit einem angesteckten Plastikslauch benutzen, mit der man in eine Öffnung der untergetauchten Pumpe hineinspritzt. Die Folge ist eine Querspannung zwischen den Platten, welche gemessen werden kann [4]. Es gibt im Handel Strömungsmessgeräte, die nach diesem Prinzip funktionieren. Die Anordnung ist sehr ähnlich jener, bei der der **Halleffekt** auftritt. Bei mir zeigte das Messgerät auch ohne Strömung eine Spannung an. Dabei handelt es sich um eine elektrochemische Spannung. Die Elektroden werden ja im Zuge der Benützung chemisch leicht verändert. Dennoch führt die „Hallspannung“ zu einer Veränderung der auftretenden gesamten Querspannung und kann so nachgewiesen werden.

Um den **Blick ins Innere** der Pumpe zu ermöglichen, müsste einer der beiden Magnete weggelassen werden. Dabei wird das verbleibende Magnetfeld deutlich schwächer. Das kann entweder durch eine höhere Spannung kompensiert werden oder durch Verwenden eines (einseitigen) Halbach-Arrays. Bauanleitungen dazu findet man auch auf Youtube.

8. Abschlussbemerkung

Wenn die magnetohydrodynamische Pumpe einmal hergestellt ist, bedeutet die Demonstration des Experiments keinen nennenswerten Aufwand. Vor dem Einschalten pflege ich mit den Schüler:innen zu überlegen, in welche Richtung die Strömung stattfinden wird, was wir dann nach dem Einschalten der Spannungsquelle überprüfen. Quantitative Berechnungen werden sich vermutlich schwieriger gestalten.

Georg Fuchs BRG 4, Waltergasse

Literatur

- [1] https://brg4-my.sharepoint.com/:f/g/personal/t3001_brg4_at/Epg4f1vtK-9NoRawG-vRVGsBLNnFL4BZy0QFFDZpEJmgdg?e=vfiGWl
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=FsiydpICtw> (Juli 2023)
- [3] <https://www.brightengineering.com/naval-architecture/60576-how-can-a-ship-be-moved-by-magneto-hydrodynamic-propulsion/> (Juli 2023)
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=LS3GQk9ETRU>, ab Minute 12 (Juli 2023)

Messwagen für Kurvenfahrten

Elias Stadlmann

1. Einführung

Die Beschreibung von Bewegungen entlang einer gekrümmten Bahnkurve ist ein wichtiger Bestandteil des Mechanikunterrichts in der Sekundarstufe. Durch geeignete Versuche können die Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Beschleunigung und den auftretenden Kräften veranschaulicht werden, jedoch ist die Auswahl an passenden Experimentiergeräten rar. Diverse Firmen bieten Experimentierwägen in verschiedenen Ausführungen an, die zum Inventar der meisten Physiksammlungen gehören. Diese Wägen eignen sich für die Untersuchung geradliniger Bewegungen – bis dato werden aber keine Modelle für Kurvenfahrten angeboten. Die Ausgangsidee war es also, einen einfachen Wagen mit einer Achsschenkelenkung zu konstruieren, der zusätzlich über eine Halterung für Smartphones verfügt, sodass deren Sensoren zur Bestimmung der relevanten Größen im Experiment herangezogen werden können.

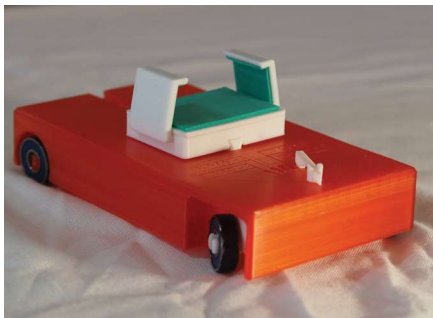


Abbildung 1: Messwagen

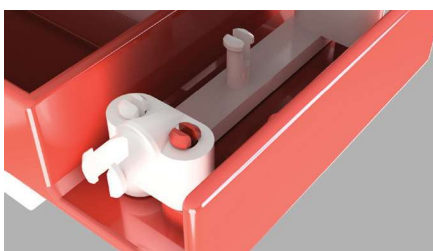


Abbildung 2: Achsschenkelenkung mit Clip-Mechanismus (CAD)

2. Realisierung

Der Messwagen besteht im Wesentlichen aus einem Chassis, der Achsschenkelenkung, den Rädern und der Handyhalterung. Die Hinterachse des Fahrzeugs ist fest mit dem Chassis verbunden und stellt ein gedrucktes Bauteil dar. Die Lenkeinheit an der Vorderachse setzt sich aus fünf Einzelteilen zusammen, die ebenfalls vollständig druckbar sind. Mit einem Zeiger an der Oberseite des Wagens kann der Lenkeinschlag eingestellt werden, wobei nach links und rechts je zwei, sowie eine Stellung für die geradlinige Fahrt durch eingelassene Kerben vorgegeben sind. Durch einen Zusammenhang aus dem Einspurmodell für

Fahrzeuge [1] konnten die Kurvenradien vorab berechnet und als Beschriftung zu den Lenkeinschlägen angegeben werden. Konstruktionsbedingt haben sich die Radien 30 cm und 60 cm ergeben. Im Re-Design des Modells wurde eine Version des Chassis mit kontinuierlich einstellbarem Lenkeinschlag für eine Rechtskurve hinzugefügt.

Für alle Komponenten, die beweglich montiert werden müssen, wurde sich für einen Clip-Mechanismus anstatt von Schrauben oder sonstigen nicht-gedruckten Teilen entschieden, bei dem ein federnder Bolzen mit Verriegelung auf einem Bauteil und eine passende Bohrung auf dem zweiten Bauteil ein Drehgelenk bilden.

Um eine möglichst geringe Rollreibung zu gewährleisten, werden Kugellager als Räder verwendet, die ebenfalls mittels Clips werkzeuglos aufgesteckt werden können. Da die blanken metallischen Laufflächen bei zügiger Kurvenfahrt die Haftung zum Untergrund verlieren würden, werden diese mit Sprühkunststoff aus dem Automobilbedarf überzogen. Beim Prototypenbau hat sich gezeigt, dass die Toleranzklasse der Kugellager (z. B.: ABEC 9) für diese Anwendung vernachlässigbar ist, weshalb preisgünstige Lager verwendet werden können. Dagegen hat sich herausgestellt, dass die meisten Lager ab Werk mit einem sehr viskosen Schmierfett befüllt werden, das für eine gewisse Schwergängigkeit sorgt. Dieses kann ohne großen Aufwand mit Waschbenzin entfernt und durch Feinmechaniköl ersetzt werden, was zu einer deutlich geringeren Rollreibung führt.

Die Handyhalterung besteht aus vier Einzelteilen und wird mittels einer doppelten Schwalbenschwanzverbindung am Chassis befestigt. Zwei ausziehbare Haltearme sind mit zwei Gummiringen unter der Deckplatte gespannt, wodurch Smartphones verschiedener Größen befestigt werden können. An allen Kontaktflächen können Ausschnitte aus Moosgummi in dafür vorgesehene Vertiefungen geklebt werden, um Beschädigungen am Gerät zu vermeiden.



Abbildung 3: Montieren des Smartphones

Insgesamt müssen elf Einzelteile gedruckt werden. Zusammen mit den Kugellagern belaufen sich die Kosten pro Wagen auf rund 8€, wenn man herkömmliches PLA-Filament (ca. 20€/kg) verwendet. Somit kann dieses Experimentiergerät für einen vergleichsweise geringen Kostenaufwand in Klassenstärke hergestellt werden, um Schüler:innenversuche zu ermöglichen. Sämtliche STL-Dateien der gedruckten Einzelteile, sowie eine Auflistung der übrigen Komponenten und detaillierte Abbildungen stehen bei Thingiverse [2] zum Download zur Verfügung.

4. Anwendung

Zur Erprobung des Messwagens wurden zwei Versuche zur Zentripetalbeschleunigung entworfen mit denen die Abhängigkeiten dieser erforscht werden können. Hierfür kann die App phyphox [3] verwendet werden, welche die Daten des im Smartphone verbauten Beschleunigungssensors ausliest und grafisch am Display darstellt. Somit kann durch die Messung während einer Kurvenfahrt beispielsweise gezeigt werden, dass

die Zentripetalbeschleunigung vom Radius der Bahnkurve abhängt.

Neben den genannten Versuchen, die speziell die Fähigkeit der Kurvenfahrt des Wagens aufgreifen, sind auch diverse Experimente mit einer geradlinigen Bewegung denkbar. Mithilfe der Sensoren im Smartphone können Bewegungsdiagramme erstellt werden, wobei neben dem Beschleunigungssensor auch der Näherungs-, Licht- oder Magnetfeldsensor zum Einsatz kommen könnten. Weiters wurde in der Evaluation des Modells eine mögliche Verwendung in Versuchen zum Dopplereffekt mithilfe des in der App integrierten Frequenzgenerators und der Audio-Frequenzanalyse diskutiert. Das Einsatzgebiet dieses günstigen Messwagens ist also nicht nur auf Experimente aus dem Themenbereich Mechanik beschränkt.

Elias Stadlmann *Gymnasium der Stiftung
Theresianische Akademie*

Literatur

- [1] Unterreiner, M., Hesse, B., Schramm, D. & Maas, N. (2016): Fahrzeugtechnik: Technische Grundlagen aktueller und zukünftiger Kraftfahrzeuge. Oldenburg: De Gruyter, S. 68 ff.
- [2] <https://www.thingiverse.com/thing:4900608> (Juli 2023)
- [3] <https://phyphox.org/de/home-de/> (Juli 2023)

Die Entdeckung des Higgs-Bosons als Beispiel für Nature of Science – Alles in einer Box

Sarah Zöchling, Margherita Boselli, Panagiota Chatzidaki, Merten Nikolay Dahlkemper, Ruadh Duggan, Guillaume Durey, Niklas Herff, Anja Kranjc Horvat, Daniele Molaro, Gernot Werner Scheerer, Sascha Schmeling, Patrick Georges Thill, Jeff Wiener und Julia Woithe

1. Einleitung

Am 4. Juli 2012 wurde von der ATLAS-Kollaboration und der CMS-Kollaboration am CERN offiziell die Entdeckung des Higgs-Bosons bekannt gegeben. Seit den 1960er Jahren wurde nach diesem Teilchen gesucht. Somit bildete die Bekanntgabe seiner Entdeckung den Abschluss der längsten Suche nach einem Teilchen in der Geschichte der Teilchenphysik. Dabei haben tausende Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen aus der ganzen Welt zusammengearbeitet und die größten und komplexesten Physik-Experimente aller Zeiten durchgeführt. Die Entdeckung des Higgs-Bosons war für die Teilchenphysik-Gemeinschaft am CERN unglaublich wichtig. Deshalb war der Andrang zur Verkündung am 4. Juli so groß, dass viele Menschen stundenlang Schlange standen, manche sogar über Nacht und mit Schlafsäcken ausgerüstet, um einen der Plätze in dem Hörsaal zu bekommen, in dem sie stattfinden würde.

Die Entdeckung des Higgs-Bosons war so wichtig, weil sie entscheidende Hinweise für eine in den 1960er Jahren entwickelte Theorie lieferte. Sie beschreibt die Existenz des Brout-Englert-Higgs-Felds (kurz: BEH-Feld). Dieses Feld kann man nicht direkt wahrnehmen. Es bewirkt jedoch, dass Elementarteilchen eine Masse haben können. Im Jahr 2013 wurde der Nobelpreis für Physik an François Englert und Peter Higgs für ihre Arbeit an der Theorie des BEH-Felds verliehen [1]. Zwar ist diese Theorie nur mit Mathematik- und Physikkenntnissen auf Hochschulebene zugänglich, dennoch wurde die Entdeckung des Higgs-Bosons in vielen Nachrichten prominent dargestellt und fand sogar Eingang in die Popkultur [z. B. 2]. Auch in neueren Physik-Lehrbüchern der Sekundarstufe wird diese bemerkenswerte Geschichte behandelt [z. B. 3].

Die Geschichten wissenschaftlicher Entdeckungen zu erzählen kann dabei helfen, die Natur der Naturwissenschaften (engl. “Nature of Science”, NOS) im Unterricht zu behandeln [4]. NOS meint das Wesen oder die Charakteristika von Naturwissenschaften. Das heißt, sie beschäftigt sich zum Beispiel mit der Frage: „Wie wird naturwissenschaftliche Forschung betrieben?“ Ein explizit-reflexiver Ansatz ist für einen effektiven NOS-Unterricht unerlässlich [5, 6]. Es liegen auch schon einige Unterrichtskonzeptionen für NOS vor [7]. Häufig wird NOS im Unterricht zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt oder auf ungünstige Weise dargestellt [8]. Insbesondere Themen der modernen Physik, wie die Quantenphysik, bieten jedoch ein großartiges Potenzial, um NOS zu vermitteln [9, 10]. In Schulbüchern wird dieses Potenzial bisher nur wenig genutzt, was uns motivierte, diesen Beitrag zur Entdeckung des Higgs-Bosons zu verfassen. Die Entdeckung des Higgs-Bosons ist ein Paradebeispiel für aktuelle, moderne Physik, um NOS im Unterricht zu behandeln. In diesem Artikel stellen wir Verbindungen her zwischen a) den Meilensteinen der Entdeckung des Higgs-Bosons, b) charakteristischen Aspekten der Naturwissenschaften und c) Experimenten mit Blackboxes, die es Schüler:innen ermöglichen, selbst naturwissenschaftliche Forschung zu betreiben und explizit über NOS zu reflektieren (siehe Abbildung 1).

2. Die Entdeckung des Higgs-Bosons für Schüler:innen im Unterricht

Im Online-Anhang [A] zu diesem Artikel finden Sie einen Informationstext für Schüler:innen, in dem ausgewählte Meilensteine der Entdeckung des Higgs-Bosons dargestellt werden, basierend auf einem Buch von Castillo [12]. Im

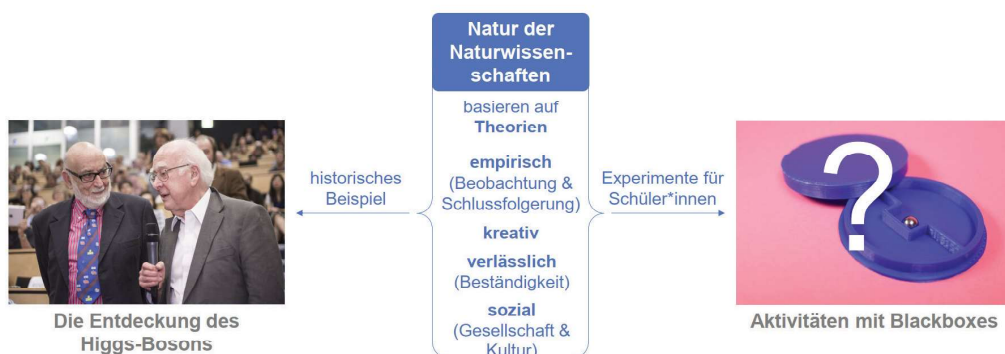


Abbildung 1: Verbindungen zwischen den drei Schwerpunkten des Beitrags. Reproduziert von [11] © CERN (<https://cern.ch/copyright>).

Folgenden schlagen wir eine Reihe von Begleitaufgaben zum Informationstext vor. Sie stellen Anregungen für Schüler:innen dar, charakteristische Aspekte der Naturwissenschaften zu erkennen und explizit darüber nachzudenken.

Begleitaufgaben zum Informationstext über die Entdeckung des Higgs-Bosons

- Beschreibe, wie die Theorie die Experimente geleitet hat.
- Begründe, warum man Higgs-Bosonen nicht direkt beobachten kann.
- Erkläre, wie die ATLAS-Kollaboration Higgs-Bosonen indirekt beobachtet hat.
- Erläutere, welche Schlussfolgerungen die ATLAS- und CMS-Kollaborationen aus ihren Beobachtungen gezogen haben.
- Beschreibe, bei welchen Schritten im Prozess der Entdeckung des Higgs-Bosons die Kreativität der Forscher:innen gefordert war.
- Erläutere, welche sozialen Aspekte der Wissenschaft beschrieben werden.
- Erkläre, wie sicher die Forscher:innen waren, dass sie das Higgs-Boson entdeckt haben.

3. NOS und die Entdeckung des Higgs-Bosons

Eine Übersicht über verschiedene Schülervorstellungen zu NOS und verschiedene Unterrichtsvorschläge findet man beispielsweise bei Höttecke und Hopf [13]. Außerdem sind bereits Kernaspekte zur Natur der Naturwissenschaften in einem Plus Lucis Beitrag beschrieben worden [14]. Allerdings erscheint es uns für den Unterricht angesichts der viel diskutierten Wissenschaftsskepsis sinnvoll, die Verlässlichkeit von Wissen und die sozialen Aspekte von Wissenschaft zu betonen. Deshalb schlagen wir vor, die charakteristischen Aspekte der Naturwissenschaften folgendermaßen im Unterricht zu behandeln, basierend auf einem Beitrag von Abdel-Khalick [15]. Außerdem werden wir diese Aspekte mit der Geschichte der Entdeckung des Higgs-Bosons verbinden und uns dabei auf die im vorherigen Abschnitt vorgeschlagenen Begleitaufgaben beziehen.

Naturwissenschaften basieren auf theoretischen Überlegungen: Es ist eher selten, dass Wissenschaftler:innen eine wissenschaftliche Untersuchung mit neutralen Beobachtungen eines Phänomens beginnen. Stattdessen beschäftigen sie sich mit Theorien, um darauf aufbauend Forschungsfragen festzulegen, die den Forschungsprozess leiten. Sie überlegen sich, welche Beobachtungen gemacht werden sollen (und welche nicht), wie ein Phänomen beobachtet werden soll und welche Schlussfolgerungen aus den Beobachtungen gezogen werden können. Insbesondere leiten Wissenschaftler:innen neue Vorhersagen aus der Theorie ab und vergleichen diese Vorhersagen mit ihren Beobachtungen. Das Vertrauen der

Wissenschaftler:innen in die getestete Theorie steigt, wenn die Beobachtungen mit den ursprünglichen Vorhersagen übereinstimmen. Manchmal sagen Theorien allerdings die Existenz von etwas vorher, das nicht direkt beobachtet werden kann. In so einem Fall müssen Wissenschaftler:innen zusätzlich basierend auf theoretischen Überlegungen Forschungsansätze vorschlagen, mit denen man indirekt Beobachtungen machen kann, die eine Theorie stützen und bestätigen [15].

Verbindung zur Entdeckung des Higgs-Bosons:

- Die **Theorie**, die das BEH-Feld beschreibt, sagte die Existenz des Higgs-Bosons vorher. Doch das BEH-Feld und das Higgs-Boson kann man nicht direkt beobachten.
- Deshalb nutzten Wissenschaftler:innen das theoretische Verständnis des Higgs-Bosons, um vorherzusagen, in welche anderen Teilchen sich das Higgs-Boson umwandeln würde, die man **direkt** beobachten kann.
- Basierend auf diesen theoretischen Überlegungen entschieden sie sich für folgenden Forschungsansatz: Es sollten die Teilchen direkt beobachtet werden, in die sich das Higgs-Boson laut Theorie umwandelt, um dadurch **indirekt** Nachweise zu sammeln, die die Theorie des Higgs-Bosons und somit auch des BEH-Feldes stützen.

Naturwissenschaften sind empirisch und unterscheiden zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung: Wissenschaftliche Aussagen basieren auf der Beobachtung von Phänomenen. Beobachtung kann hier einfach bedeuten, dass man etwas mit eigenen Augen oder anderen menschlichen Sinnen wahrnimmt. In den meisten Fällen müssen Wissenschaftler:innen jedoch Messgeräte nutzen, da unsere Augen oder anderen Sinne viele Phänomene entweder nicht genau genug oder überhaupt nicht wahrnehmen können. Wenn ein theoretisch vorhergesagtes Phänomen nicht direkt beobachtet werden kann – auch nicht mit den komplexesten Messgeräten, können Wissenschaftler:innen nur indirekt Beobachtungen davon machen (wie bereits im vorherigen Abschnitt besprochen). Es besteht ein wichtiger Unterschied zwischen (1) der Beobachtung (sei sie direkt oder indirekt) und (2) der Art und Weise, wie Wissenschaftler:innen diese Beobachtung auf Basis wissenschaftlicher Theorien interpretieren (das heißt, den Schlussfolgerungen, die sie aus den Beobachtungen ziehen [15].

Verbindung zur Entdeckung des Higgs-Bosons:

- Die ATLAS- und CMS-Kollaborationen haben große Teilchendetektoren (d. h. Messgeräte) gebaut, um Beobachtungen zu machen.
- Das Higgs-Boson kann man nicht direkt beobachten. Physiker:innen haben die Theorie entwickelt, dass sich das Higgs-Boson beispielsweise in Paare hochenergetischer Photonen umwandeln könnte, die man direkt beobachten kann.
- Deshalb haben die ATLAS- und CMS-Kollaborationen u. a. Paare hochenergetischer Photonen direkt beobachtet,

um dadurch indirekt Belege für die Existenz des Higgs-Bosons zu sammeln.

- Die Wissenschaftler:innen verglichen dieses Signal (d. h. ihre Beobachtung) mit den vorhergesagten Hintergrundsignalen. Sie kombinierten ihre Forschungsergebnisse und schlussfolgerten, dass ein neues Teilchen entdeckt wurde.

Naturwissenschaften basieren auf Kreativität: Wissenschaftler:innen müssen oft kreative Lösungen finden, wenn sie Forschung betreiben. Sie können bestehende Theorien kreativ anpassen oder in ungewöhnlichen Bereichen anwenden. Sie müssen auch kreative Wege finden, um Experimente durchzuführen, vor allem, wenn sie etwas untersuchen wollen, das nicht direkt beobachtet werden kann. Darüber hinaus ist Kreativität gefragt, wenn man Beobachtungen interpretiert (d. h. Schlussfolgerungen zieht) [15].

Verbindung zur Entdeckung des Higgs-Bosons:

- Die Wissenschaftler:innen, die die Idee des BEH-Felds hatten, wandten auf kreative Weise einen Mechanismus aus einem anderen Bereich der Physik auf ein Problem der Teilchenphysik an.
- Die Physiker:innen mussten kreative neue Ideen entwickeln, um durch indirekte Beobachtungen Belege für die Existenz von Higgs-Bosonen zu sammeln.
- Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen entwickelten neuartige Technologien, um den Teilchenbeschleuniger mit der bis heute höchsten Energie der Welt zu bauen.

Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sind verlässlich und beständig, auch wenn sie sich weiterentwickeln: Das bedeutet, dass sich das Wissen, das für unseren Alltag relevant ist, nicht von einem Tag auf den nächsten ändert. Zum Beispiel wird Wasser nicht plötzlich bei 100°C gefrieren anstelle von verdampfen. Genauso gelten die Funktionsprinzipien von Technologien, die aus naturwissenschaftlichen Erkenntnissen entstanden sind, beständig – andernfalls würde man sich nicht auf Herzschrittmacher oder Flugzeuge verlassen [14]. Dennoch können sich wissenschaftliche Erkenntnisse im Laufe der Zeit verändern und sind niemals absolut sicher. So können beispielsweise aufgrund technologischer Fortschritte neue Beobachtungen gemacht werden. Außerdem können Beobachtungen nochmals interpretiert werden (d. h. es können neue Schlussfolgerungen aus den Beobachtungen gezogen werden), nachdem wissenschaftliche Theorien weiterentwickelt worden sind [15].

Verbindung zur Entdeckung des Higgs-Bosons:

- Seit der Vorhersage des Higgs-Bosons im Jahr 1964 arbeiteten viele Wissenschaftler:innen daran, unser Verständnis dieses Teilchens zu verbessern und herauszufinden, wie es in Experimenten beobachtet werden könnte.
- Eines der Experimente am Large Electron Positron (LEP) Collider meldete ein verdächtiges Signal in seinen Daten

bei einer Masse von etwa $115 \text{ GeV}/c^2$, das sich jedoch als statistische Schwankung herausstellte und von anderen Experimenten nicht bestätigt werden konnte.

- Technologische Fortschritte ermöglichten den Bau eines Teilchenbeschleunigers, des Large Hadron Collider (LHC), der genügend große Energie für die Erzeugung von Higgs-Bosonen lieferte.
- Im Jahr 2012 sagte der damalige Generaldirektor des CERN, Rolf Heuer: „Ich glaube, wir haben es“. Doch damals war noch unklar, ob es sich bei dem neu entdeckten Teilchen tatsächlich um das vorhergesagte Higgs-Boson handelt. Erst in den folgenden Jahren deuteten immer mehr wissenschaftliche Beobachtungen darauf hin, dass das neu entdeckte Teilchen tatsächlich das Higgs-Boson ist.

Naturwissenschaften sind sozial und in das gesellschaftliche und kulturelle Leben eingebettet: Einzelne Wissen-

schaftler:innen haben subjektive Ansichten darüber, wie man die Beobachtungen eines Experiments interpretieren kann (d. h. welche Schlussfolgerungen man ziehen kann). Diese Ansichten basieren auf ihrem theoretischen Wissen, aber auch auf ihren persönlichen Einstellungen. Der soziale Aspekt der Naturwissenschaften trägt jedoch dazu bei, Objektivität sicherzustellen: Wissenschaftler:innen arbeiten nicht alleine, sondern in Gruppen und tauschen sich aus, um möglichst objektive Schlussfolgerungen sicherzustellen. Darüber hinaus haben die wissenschaftlichen Gemeinschaften gut etablierte Verfahren zur kritischen Prüfung und Diskussion neuer Ideen: Wissenschaftler:innen stellen ihre Forschung auf wissenschaftlichen Konferenzen vor oder reichen Forschungsartikel bei Fachzeitschriften ein. Dort werden die Theorien, Methoden, Beobachtungen und Schlussfolgerungen von anderen Wissenschaftler:innen gründlich geprüft. Außerdem beeinflusst die Wissenschaft das soziale und kulturelle Leben und wird ebenso von diesem beeinflusst. Zum Beispiel verändern technologische Neuerungen unser gesellschaftliches Zusammenleben und umgekehrt. Außerdem entscheiden häufig wirtschaftliche oder politische Institutionen über die Finanzierung von Forschungsprojekten [15].

Verbindung zur Entdeckung des Higgs-Bosons:

- Peter Higgs reichte einen wissenschaftlichen Artikel bei einer Zeitschrift ein. Der Artikel wurde von anonymen Gutachter:innen überprüft und abgelehnt. Deshalb überarbeitete er seinen Artikel, um seine Theorie in einer anderen Zeitschrift veröffentlichen zu können.
- Um Gelder für den Beschleuniger LHC zu erhalten, mussten die Wissenschaftler:innen des CERN Politiker:innen vieler verschiedener Regierungen davon überzeugen, ihr Forschungsprojekt zu finanzieren.
- Die Teilchenphysik-Gemeinschaft entwickelte den 5-Sigma-Standard. Außerdem müssen die Beobachtungen von zwei unabhängigen Experimenten übereinstimmen, um als Entdeckung zu gelten.

- Dass der Nobelpreis für Physik im Jahr 2013 an nur zwei theoretische Physiker verliehen wurde, warf die wichtige Frage auf, ob die Regeln für die Vergabe von Nobelpreisen in der Wissenschaft längst überholt sind. Wissenschaftliche Forschung wird heutzutage von großen Teams betrieben, die eng zusammenarbeiten.

4. Blackboxes für den NOS-Unterricht

In diesem Abschnitt stellen wir Blackboxes für den Unterricht vor und erklären, wie man verschiedene Blackbox-Aktivitäten nutzen kann, um charakteristische Aspekte der Naturwissenschaften am Beispiel der Entdeckung des Higgs-Bosons zu lernen. Die unten beschriebenen Aktivitäten können als eigenständige Einheit eingesetzt werden. Wir empfehlen jedoch, dass die Schüler:innen zuerst die Geschichte der Entdeckung des Higgs-Bosons lesen und besprechen, bevor sie mit den Blackbox-Aktivitäten beginnen. So können die Schüler:innen das Beispiel einer aktuellen wissenschaftlichen Entdeckung mit ihrem eigenen Forschungsprozess und den charakteristischen Aspekten der Naturwissenschaften verbinden.

4.1. Was sind Blackboxes?

Blackboxes (oder “Mystery Boxes”) sind Objekte mit einer inneren Struktur, die nicht direkt beobachtet werden kann. Sie sind ein vielseitiges Mittel, um NOS auf explizit-reflektierende Weise zu unterrichten [16]. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, indirekte Beobachtungen der inneren Struktur einer Blackbox zu machen [17]. Außerdem gibt es verschiedene Arten von Blackboxes. In ihrer einfachsten Form bestehen Blackboxes aus einer geschlossenen Schachtel (z. B. einer Schuhschachtel), die einfache alltägliche oder geometrische Gegenstände enthält [18].

Alle Blackboxes haben gemeinsam, dass man ihre innere Struktur nur indirekt beobachten kann. Deshalb müssen Schüler:innen systematisch Experimente durchführen, um Erkenntnisse über die innere Struktur der Blackbox zu gewinnen. In einem zyklischen Modellbildungsprozess, entwickeln die Schüler:innen zuerst ein erstes Modell. Basierend auf diesem Modell treffen sie Vorhersagen. Dann testen sie dieses Modell, indem sie die Vorhersagen mit ihren experimentellen Beobachtungen vergleichen.

4.2. Eine Unterrichtseinheit mit Blackboxes

Im Folgenden werden Aktivitäten mit zylinderförmigen, 3D-druckbaren Blackboxes beschrieben, die eine Stahlkugel beinhalten (Abb. 2, [19]). Wenn man die Blackbox bewegt, hört man ein Klickgeräusch, sobald die Stahlkugel auf eine Oberfläche prallt. Das Klickgeräusch kann man hören (d. h. direkt beobachten). Mit Hilfe des Klickgeräusches kann man die innere Struktur indirekt beobachten. Außerdem kann man einen kleinen Magneten verwenden, um die Stahlkugel zu bewegen und so Modelle über die innere Struktur systematisch

zu testen. Die beschriebenen Aktivitäten können jedoch auch auf andere Arten von Blackboxes übertragen werden.



Abbildung 2: Innere Struktur einer 3D-druckbaren Blackbox mit einer Stahlkugel.

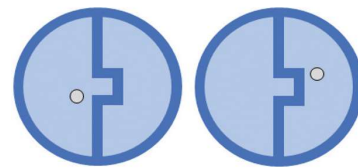


Abbildung 3: Innere Struktur der Blackbox, die bei diesen Aktivitäten verwendet wird. Der graue Kreis stellt eine Stahlkugel dar. Sie kann auf beiden Seiten der Innenwand platziert werden. Je nach Niveau der Schüler:innen können beide Varianten ausgeteilt werden, um die Diskussion im Klassenzimmer zu bereichern.

Vorbereitung und allgemeine Hinweise

Für die folgenden Aktivitäten empfehlen wir, dass die Schüler:innen in Gruppen von zwei bis vier Personen arbeiten, um gemeinsam eine Blackbox zu erforschen. Daher müssen die Lehrenden das folgende Material für jede Gruppe vorbereiten:

- Einen Deckel (siehe Datei „Lid.stl“ [20])
- Eine Basis mit der in Abbildung 3 dargestellten inneren Struktur (siehe Datei „Base_Heavyside_Step_Function.stl“ [20])
- Eine Stahlkugel mit 5 mm Durchmesser (aus Kugellagern) oder ein kleiner Kugelmagnet
- Einen kleinen Neodym-Stabmagneten

Die 3D-druckbaren Blackboxes haben einen Bajonettverschluss. Wir empfehlen jedoch, den Deckel auf die Basis zu kleben, sobald die Stahlkugel drinnen ist, um zu verhindern, dass jemand die Box öffnet.

Aktivität 1: Naturwissenschaften basieren auf theoretischen Überlegungen

Nach einer kurzen Einführung zeigt die Lehrkraft eine der Blackboxes (ohne den Magneten) und drei verschiedene Modelle der inneren Struktur (siehe Abbildung 4). Dann überlegen sich die Schüler:innen Forschungsmethoden, um die Modelle zu testen. Da es nicht möglich ist, die innere Struktur direkt zu beobachten, erarbeiten die Schüler:innen Ideen, um systematisch mit Hilfe des akustischen Signals der Stahlkugel indirekt Beobachtungen zu machen. Um beispielsweise die

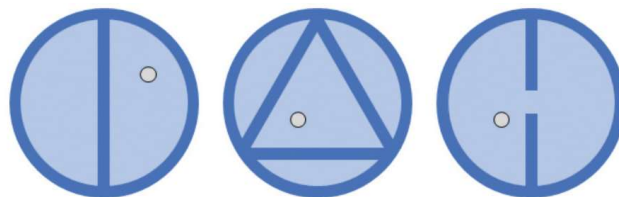


Abbildung 4: Drei verschiedene Modelle der möglichen inneren Struktur einer zylinderförmigen Blackbox.

Theorie einer dreieckigen inneren Struktur zu testen, könnten die Schüler:innen vorschlagen, die Box um 360° zu drehen und die Anzahl der Klickgeräusche zu zählen.

Aktivität 2: Naturwissenschaften sind empirisch und unterscheiden zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung

Nun erhalten die Gruppen je eine Blackbox, um ihre Theorien systematisch zu testen (d. h. um empirische Forschung zu betreiben). Aus ihren indirekten Beobachtungen schlussfolgern sie, welches der drei Modelle am besten zu ihren Beobachtungen passt. Sie notieren ihre Beobachtungen und die entsprechenden Schlussfolgerungen, beispielsweise mit Hilfe der Postervorlage im Online-Anhang [B] oder mit Hilfe von Online-Tools (z. B. „Padlet“).

Aktion 3: Naturwissenschaften basieren auf Kreativität

Keines der drei ursprünglichen Modelle, die den Schüler:innen gezeigt werden (Abb. 4), passt perfekt zu ihren Beobachtungen. Nur die Lehrkraft weiß, dass die Blackboxes die in Abb. 3 gezeigte innere Struktur haben. Daher werden die Schüler:innen nun aufgefordert, kreativ zu werden und sich ein neues Modell zu überlegen, das besser zu ihren Beobachtungen passt. Wenn es die Zeit erlaubt, können sie sogar eine neue Blackbox auf der Grundlage ihres neuen Modells entwerfen und bauen, und das Verhalten dieser neuen Blackbox mit dem der ursprünglichen Blackbox vergleichen. Am Ende dieser Aktivität zeichnet jede Gruppe das Modell, das ihre beste Theorie von der inneren Struktur der Blackbox darstellt, beispielsweise mit Hilfe der Postervorlage im Online-Anhang [B].

Aktivität 4: Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sind verlässlich und beständig, auch wenn sie sich weiterentwickeln

Nun erhalten die Gruppen einen kleinen Neodym-Stabmagneten. Mit diesem neuen Forschungsinstrument testen die Schüler:innen ihr Modell der inneren Struktur ein weiteres Mal. Dazu bewegen sie die Stahlkugel systematisch mit dem Magneten und zeichnen so die Innenwand nach. Dieser Fortschritt in ihrer Forschungsmethode könnte zu einer besseren Theorie ihrer Blackbox führen. Die Schüler:innen können ihr Modell ein weiteres Mal überarbeiten.

Aktivität 5: Naturwissenschaften sind sozial und in das gesellschaftliche und kulturelle Leben eingebettet

Die Schüler:innen präsentieren nun ihre Ergebnisse vor der Klasse, beispielsweise in Form eines Posters. Zunächst stellen sie ihre Beobachtungen und Schlussfolgerungen vor, die sie beim Testen der drei vorgegebenen Modelle in Aktivität 2 gemacht haben. Dann stellen sie ihr eigenes Modell vor, das sie in Aktivität 3 entwickelt haben, sowie das überarbeitete Modell, das durch den Einsatz des Magneten in Aktivität 4 entstanden ist. Nachdem alle Gruppen ihre Ergebnisse präsentiert haben, werden die Schüler:innen nach dem Zufallsprinzip aufgefordert, einer anderen Gruppe anonymes Feedback zu geben, beispielsweise mit Hilfe von Post-it-Zetteln, die anonym an die Lehrperson abgegeben werden und von ihr auf das jeweilige Poster (siehe Online-Anhang [B]) geklebt werden,

oder mit Hilfe von Online-Tools (z. B. „Padlet“). Auf diese Weise sollte jedes Poster von mindestens zwei Schüler:innen begutachtet werden. Dies ähnelt dem wissenschaftlichen Peer-Review-Prozess, bei dem Autor:innen anonymes Feedback („Review“) von unabhängigen Gutachter:innen erhalten, die im selben Forschungsfeld arbeiten („Peers“). Die Autor:innen der Poster können dieses Feedback dann nutzen, um ihr Modell und ihr Poster zu verbessern oder zu erklären, warum sie den Kommentar einer:s Gutachterin:s nicht berücksichtigen werden. Abschließend diskutieren alle Gruppen gemeinsam die verschiedenen Modelle mit dem Ziel, sich auf eine gemeinsame Theorie über die innere Struktur der Blackbox zu einigen.

Aktivität 6: Reflexion über NOS

Nach den Aktivitäten 1 bis 5 reflektieren die Schüler:innen explizit über ihre Erfahrungen. Insbesondere vergleichen sie die verschiedenen Aktivitäten mit den wichtigen Meilensteinen der Entdeckung des Higgs-Bosons. Dazu können die eingangs vorgestellten Begleitaufgaben leicht angepasst werden:

- Beschreibe, wie theoretische Überlegungen eure Experimente geleitet haben.
- Begründe, warum es nicht möglich ist, die innere Struktur der Blackbox direkt zu beobachten.
- Erkläre, welche indirekten Beobachtungen ihr gemacht habt.
- Erläutere, welche Schlussfolgerungen ihr aus euren Beobachtungen gezogen habt.
- Beschreibe, bei welchen Schritten Kreativität gefordert war.
- Erläutere, welche sozialen Aspekte der Wissenschaft ihr erlebt habt.
- Erkläre, wie sicher ihr seid, dass euer letztes Modell richtig ist.
- Begründe, warum euer letztes Modell verlässlich ist.

5. Schlussfolgerungen

Viele Schüler:innen haben naive Vorstellungen von NOS [13]. Deshalb empfehlen fachdidaktische Studien, im Unterricht Blackboxes einzusetzen [16] oder authentische Geschichten von (modernen) wissenschaftlichen Entdeckungen zu besprechen [4, 5]. So kann NOS auf explizit-reflektierende Weise gelernt werden. In diesem Artikel haben wir beschrieben, wie man die Geschichte der Entdeckung des Higgs-Bosons zusammen mit einer Reihe von Blackbox-Aktivitäten nutzen kann, um über die charakteristischen Aspekte der Naturwissenschaften zu reflektieren. Wir glauben, dass dies Lehrkräfte dabei unterstützen kann, ihren Schüler:innen nicht nur die Geschichte hinter diesem Paradebeispiel einer modernen wissenschaftlichen Entdeckung zu erzählen, sondern ihnen auch NOS zu vermitteln. So können Schüler:innen eine kritische Haltung und eine wissenschaftliche Denkweise entwickeln, die ihnen dabei hilft, (vermeintlich) wissenschaftliche Berichte, Nachrichten oder Aussagen anderer bewerten zu können.

6. Online-Anhang

- [A] Zoechling, S., Boselli, M., Chatzidaki, P., et al. (2023). Informationstext – Die Entdeckung des Higgs-Bosons, CERN Document Server. <http://cds.cern.ch/record/2864186/files/CERN-OPEN-2023-013.pdf> (abgerufen am 12. Juli 2023).
- [B] Zoechling, S., Boselli, M., Chatzidaki, P., et al. (2023). Poster – Die Entdeckung des Higgs-Bosons, CERN Document Server. <http://cds.cern.ch/record/2864186/files/CERN-OPEN-2023-014.pdf> (abgerufen am 12. Juli 2023).

Sarah Zoechling CERN & Universität Wien
 Margherita Boselli CERN
 Panagiota Chatzidaki CERN & Universität Lund
 Merten Nikolay Dahlkemper CERN & Universität Göttingen
 Ruadh Duggan CERN & Universität Utrecht
 Guillaume Durey CERN
 Niklas Herff CERN & Technische Universität Dresden
 Anja Kranjc Horvat CERN
 Daniele Molaro CERN
 Gernot Werner Scheerer CERN
 Sascha Schmeling CERN
 Patrick Georges Thill CERN
 Jeff Wiener CERN
 Julia Woithe CERN

Literatur

- [1] Nobel Prize Outreach AB (2013). 'The Nobel Prize in Physics 2013', NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/> (abgerufen am 7. Juli 2023).
- [2] Warner Bros Television (2012). 'The Higgs Boson Observation', The Big Bang Theory, Chuck Lorre Productions.
- [3] Sexl, R., Kühnelt, H., Stadler, H., Jakesch, P. & Sattlberger, E. (2019). Sexl Physik 8. Öbv. <https://www.oebv.at/produkte/sexl-physik-8-schulbuch-0> (abgerufen am 7. Juli 2023)
- [4] Nouri, N. & McComas, W. F. (2019). 'History of science (HOS) as a vehicle to communicate aspects of nature of science (NOS): Multiple cases of HOS instructors' perspectives regarding NOS', Res. Sci. Educ., 51(1), S. 289-305, <https://doi.org/10.1007/s11165-019-09879-9>
- [5] Abd-El-Khalick, F. & Lederman, N. G. (2000). 'The influence of history of science courses on students' views of nature of science', J. Res. Sci. Teach. Off. J. Natl. Assoc. Res. Sci. Teach., 37(10), S. 1057-1095, [https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200012\)37:10<1057::AID-TEA3>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200012)37:10<1057::AID-TEA3>3.0.CO;2-C)
- [6] Lederman, N. G. (2006) 'Syntax of nature of science within inquiry and science instruction', in Scientific inquiry and nature of science, Springer, S. 301-317.
- [7] Höttecke, D. & Schecker, H. (2021). Unterrichtskonzeptionen für Nature of Science (NOS), in Wilhelm, T., Schecker, H., Hopf, M. (Hrsg.): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis, Springer, S. 401-433. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2>
- [8] Abd-El-Khalick, F., Myers, J.Y., Summers, R., Brunner, J., Waight, N., Wahbeh, N., Zeineddin, A.A. & Belarmino, J. (2017). 'A longitudinal analysis of the extent and manner of representations of nature of science in U.S. high school biology and physics textbooks', J. Res. Sci. Teach., 54(1), S. 82-120, <https://doi.org/10.1002/tea.21339>
- [9] Stadermann, K. & Goedhart, M. (2022). "'Why don't you just tell us what light really is?' Easy-to-implement teaching materials that link quantum physics to nature of science', Phys. Educ., 57(2), S. 025014, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac39e7>
- [10] Park, W., Yang, S. & Song, J. (2019). 'When Modern Physics Meets Nature of Science', Sci. Educ., 28(9), S. 1055-1083, <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00075-9>
- [11] Brice, M. (2022). 'Higgs collection images gallery', CERN Document Server. <https://cds.cern.ch/images/CERN-HI-1207136-101> (abgerufen am 7. Juli 2023).
- [12] Castillo, L. (2014). The Search and Discovery of the Higgs Boson. Institute of Physics, <http://dx.doi.org/10.1088/978-1-6817-4078-2ch1>
- [12] Lederman, N. G. (2007). 'Nature of science: Past, present, and future', in Handbook of research on science education, Routledge, S. 845-894.
- [13] Höttecke, D. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften, in Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., Duit, R. (Hrsg.): Schülervorstellungen und Physikunterricht. Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_13
- [14] Ertl, D. (2013). 'Sechs Kernaspekte zur Natur der Naturwissenschaft', Plus Lucis, 1(2), S. 16-20.
- [15] Abd-El-Khalick, F. (2022). 'Examining the Sources for our Understandings about Science: Enduring confluences and critical issues in research on nature of science in science education', Int. J. Sci. Educ., 34(3), S. 353-374, <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.629013>
- [16] Lederman, N. & Abd-El-Khalick, F. (1998). 'Avoiding de-natured science: Activities that promote understandings of the nature of science', in The nature of science in science education, Springer, S. 83-126. https://doi.org/10.1007/0-306-47215-5_5
- [17] Cápay, M. & Magdin, M. (2013). 'Tasks for teaching scientific approach using the black box method', in European Conference on e-Learning (ECEL), S. 64-70.
- [18] Llewellyn, D. (2013). Inquire within: Implementing inquiry-and argument-based science standards in grades 3-8. Corwin press.
- [19] CERN S'Cool Lab, '3D-Printable Mystery Box | S'Cool LAB', CERN. <https://scoolab.web.cern.ch/3d-printable-mystery-box> (abgerufen am 7. Juli 2023).
- [20] SCoolLAB (2018). 'Mystery Boxes', Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:3136566> (abgerufen am 7. Juli 2023).

Ernst Mach und die Geschichte der Relativitätstheorie

Eren Simsek

„Nur wer die Vergangenheit kennt, kann die Gegenwart verstehen und die Zukunft gestalten.“ (zugeschrieben: August Bebbel).

1. Einleitung

In der Didaktik gibt es zahlreiche Theorien, von denen jede ihre eigene Entstehungsgeschichte hat [1]. Die historisch-kritische Didaktik, die ich im Folgenden näher erläutern werde, ist eines dieser pädagogischen Konzepte. Dabei wird betont, dass bestimmte Vorstellungen im Laufe der Zeit entstanden sind und durch kulturelle Einflüsse geprägt wurden. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse in einen solchen historischen Kontext zu stellen und dadurch verschiedene (geschichtliche) Perspektiven einzunehmen, ist überaus wichtig, um das kritische Denken der Schüler:innen anzuregen – siehe dazu auch [2].

Aktuelle Forschungsbestrebungen zielen darauf ab, diese auch im Kontext der Fachdidaktik anzuwenden [3, 4]. Ein klassisches Beispiel für die Anwendung der historisch-kritischen Methode im Physikunterricht wäre die Atomtheorie. Wie wir alle wissen, hat sich die Vorstellung von Atomen von den antiken griechischen Philosophen bis zur modernen Atomphysik stets weiterentwickelt und verändert. Wenn Schüler:innen die Physikgeschichte verfolgen, können sie verschiedene Modelle und Theorien vergleichen, die im Laufe der Zeit zur Lösung bestimmter wissenschaftlicher Probleme beigetragen haben; und sie werden erkennen, wie sehr sich die Vorstellungen – von „atomar“ (= unteilbar) bis radioaktiv – verändert haben. Dies kann dazu beitragen, dass die Schüler:innen ihre eigenen Überzeugungen und Vorurteile hinterfragen und ein tieferes Verständnis für komplexe Themen entwickeln.

Ähnlich spannend in diesem Zusammenhang sind auch andere Beispiele, wie die Relativitätstheorie und die Quantentheorie. Denken wir hier daran, welche weltanschauliche Herausforderungen es gegeben hat, um die Newton'sche Mechanik durch Einsteins Relativitätstheorie zu ersetzen. Oder erinnern wir uns an Einsteins eigenes Ringen um ein Verständnis der Verschränkung in der Quantentheorie [5]. Offensichtlich ist Einstein bis in unsere Zeit mit der Geschichte der modernen Physik eng verbunden; besonders faszinierend ist, dass er selbst erheblichen Nutzen aus der historisch-kritischen Methode von Ernst Mach gezogen hatte. Die Worte Machs, die er bereits mehrere Jahrzehnte vor der Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie im Jahr 1905 veröffentlichte (1872), klingen fast wie ein leidenschaftlicher Aufruf:

„[...] In der That, wenn man aus der Geschichte nichts lernen würde, als die Veränderlichkeit der Ansichten, so wäre sie schon unbezahlbar. [...] Wer nur eine Ansicht oder eine Form einer Ansicht kennt, glaubt nicht,

dass je eine andere da gewesen, glaubt nicht, dass je eine andere kommen wird, der zweifelt nicht, der prüft nicht. [...]

Erwarten wir von der Geschichte alles, vor allem aber, was ich auch von meiner Geschichte hoffen will, dass sie nicht zu langweilig sei.“ (S. 3-4) [6]

Aus heutiger Perspektive erkennen wir, dass das Leben von Mach alles andere als langweilig war. Durch seine kritische und untersuchende Herangehensweise leistete er einen maßgeblichen Beitrag zur fortschreitenden Entwicklung der Wissenschaft in verschiedenen Gebieten. Nach Abschluss seines Studiums an der Universität Wien (1855-1860) gelang ihm im Jahr 1860 der experimentelle Nachweis des akustischen Doppler-Effekts. Ein Jahr darauf habilitierte er sich und wirkte fortan als Privatdozent in Wien. In dieser Phase begann er, sich intensiv mit der Sinnesphysiologie zu beschäftigen. Anschließend übernahm er eine Professur für Mathematik an der Universität Graz (1864-1866), um kurz darauf zum ordentlichen Professor für Physik (1866) ernannt zu werden. Die nach ihm benannten Mach-Bänder, die aus einer Arbeit aus dem Jahr 1865 resultieren, entstanden während dieser Zeit. Im Jahr 1867 nahm er den Ruf an die Karls-Universität in Prag an und übernahm den Lehrstuhl für Experimentalphysik. Während seiner Zeit dort fungierte er auch als Dekan des physikalischen Instituts und wurde 1883/84 zum Rektor der Universität ernannt. In Prag führte er als Experimentalphysiker bahnbrechende ballistische Versuche zur Erforschung von Überschallgeschwindigkeiten durch. Es ist bis heute beeindruckend, dass es ihm vor rund 130 Jahren gelang, ein fliegendes Projektil zu fotografieren. Offensichtlich war es ihm ein Anliegen, das unmittelbar Unsichtbare für wissenschaftliche Untersuchungen anschaulich zu machen. Seine herausragenden Beiträge zur Aerodynamik führten schließlich zur Benennung der Mach-Zahl, die das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit eines Objekts und der Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium beschreibt. Ebenso wurde der Mach-Kegel, eine Verdichtungsstelle, die sich um Objekte bildet, die mit Überschallgeschwindigkeit fliegen, nach ihm benannt. Während seiner Zeit in Prag verfasste er auch Lehrbücher, in denen er die historisch-kritische Methode [7, 8] verfolgte und klassische Konzepte hinterfragte. Auf diese werden wir später noch genauer eingehen.

Schließlich wurde er im Jahr 1895 als Professor für Philosophie, insbesondere Geschichte und Theorie der induktiven Wissenschaften, an die Universität Wien berufen, was ihn zu einem Pionier in der Wissenschaftstheorie machte. Seine Ideen hatten einen enormen Einfluss auf die Mitglieder des Wiener Kreises, die sich für ein wissenschaftliches Weltbild einsetzten.

Als Experimentalphysiker und Wissenschaftstheoretiker vertrat Mach konsequent die Ansicht, dass unsere Erkenntnisse stets

durch Erfahrungen überprüft werden sollten. Diese Haltung verlieh ihm eine herausragende Position als Kritiker der klassischen Mechanik. In seinem Werk „Die Mechanik in ihrer Entwicklung“ [8], das heuer sein 140-jähriges Jubiläum feiert, behandelt er die Geschichte der Mechanik und argumentiert gegen dogmatische Konzepte wie den absoluten Raum oder die absolute Zeit, deren „Absolutheit“ nicht experimentell überprüfbar waren. Dadurch ebnete er den Weg für Einsteins Relativitätstheorie. Heutzutage sind ausreichend Dokumente verfügbar, die diese Perspektive umfassend veranschaulichen. Beispielsweise liefern die Briefkorrespondenz zwischen Mach und Einstein [9] sowie Einsteins eigene Artikel hierzu wichtige Belege. In seinem Nachruf auf Ernst Mach drückt Einstein dies treffend aus: *„Niemand kann es den Erkenntnistheoretikern nehmen, daß sie der Entwicklung hier die Wege geebnet haben; von mir selbst weiß ich mindestens, daß ich insbesondere durch Hume und Mach direkt und indirekt sehr gefördert worden bin. Ich bitte den Leser, Machs Werk: ‚Die Mechanik in ihrer Entwicklung‘ in die Hand zu nehmen und die unter 6. und 7. im zweiten Kapitel gegebenen Betrachtungen (‚Newtons Ansichten über Zeit, Raum und Bewegung‘ und ‚Übersichtliche Kritik der Newtonschen Aufstellungen‘). Dort finden sich Gedanken meisterhaft dargelegt, die noch keineswegs Gemeingut der Physiker geworden sind.“* (S. 102) [10]

Nach einer kurzen Einführung in Machs Kritik über den Raum und die Zeit, erklärt er weiter:

„Die zitierten Zeilen zeigen, daß Mach die schwachen Seiten der klassischen Mechanik klar erkannt hat und nicht weit davon entfernt war, eine allgemeine Relativitätstheorie zu fordern, und dies schon vor fast einem halben Jahrhundert!“ (S. 103) [10]

Die oben angeführten Stellen unterstreichen eindeutig Machs signifikanten Einfluss auf Einsteins Denken. Doch wie konnte Mach allein durch seine Fähigkeit zur konstruktiven Kritik seiner Zeit derart voraus sein? Oder mit anderen Worten: Welchen Hinweisen von Mach ist Einstein wohl genau gefolgt und hat versucht bei seinen eigenen Konzepten umzusetzen?

2. Ernst Mach und die Geschichte der Speziellen Relativitätstheorie (SRT)

Bekanntlich ist die SRT (nach Einsteins eigenen Worten) eine Zusammenführung der Gebiete Mechanik und Elektrodynamik [11, S. 245 und 12]. Das Doppler'sche Prinzip war durch die Arbeiten von Christian Doppler und Ernst Mach bereits vor der SRT in beiden Gebieten (Mechanik und Elektrodynamik) anerkannt. Dies führte unmittelbar zu der Frage, wie diese Analogie zwischen Licht- und Schallwellen nun zu verstehen war. Prinzipiell musste ebenso darüber nachgedacht werden, ob die Analogie zwischen Luft und Äther gerechtfertigt war [13, S. 218-220 u. 14]. Bei genauerer Untersuchung von Machs Werken ist erkennbar, dass er beim optischen Dopplereffekt [15] auf das spekulative Ausbreitungsmedium (= Äther) des Lichts gar nicht eingeht und allgemein nur die relative Bewegung zwischen Empfänger und Sender bespricht.

Darüber hinaus beschäftigt er sich sowohl mit dem Modell von Teilchen [15, S. 8] als auch mit dem mathematischen Modell von Wellen. Auch in seinen anderen Arbeiten zur Optik wird Äther nicht behandelt [16]. Da Mach es ablehnte, einen absoluten Raum in der Physik zu vertreten, dürfte ihm wohl auch ein Äther, der diesen absoluten Raum – mit seinen widersprüchlichen Eigenschaften – ausfüllt, nicht ganz geheuer gewesen sein. Seine Position war es, dass Wissenschaftler möglichst ökonomisch vorgehen sollten, weshalb er es wohl als das Beste ansah, dem Äther keine wichtige Bedeutung zu geben. Diese Sichtweise hatte natürlich Einfluss auf die Physikergemeinschaft. Deshalb versuchte Emil Cohn (ab 1900) [17] eine Elektrodynamik ohne einen absoluten Raum und Äther zu entwickeln.

Dieser Zugang dürfte auf Einstein einen wichtigen Einfluss gehabt haben. Obwohl er zu Beginn an einem Äther festhielt [18, S. 230, 233] begann er wohl aufgrund der negativen Ergebnisse von Michelson und Morley [19] und dem Zugang von Mach und Cohn, ebenfalls den Äther aus seinem Konzept auszulassen. Das mag heute vielleicht nicht als ein besonders großer Schritt erscheinen, verglichen mit jener Zeit war es jedoch ein großer Sprung ins Unbekannte. Heute wissen wir, dass das, was die Schallwellen von Lichtwellen unterscheidet, gerade die „Beziehung“ zu ihrem Medium ist, in dem sie sich ausbreiten. Kurz zusammengefasst: Im Vakuum sind Schallwellen unmöglich, da sie keine Ausbreitung finden. Im Gegensatz dazu bedarf das Licht gemäß dem relativistischen Doppler-Effekt keines Mediums für seine Ausbreitung. Das Licht entfaltet seine unveränderliche Natur, die Lichtgeschwindigkeit, gerade dort, wo keine Schallwellen existieren – im luftleeren Raum bzw. Vakuum [13, S. 218-220]. (Deswegen können beispielsweise die Photonen von der Sonne durch das Vakuum bis zu uns auf die Erde gelangen.) Und wenn es keinen Äther gibt, dann kann der relativistische Doppler-Effekt eigentlich nur ein raumzeitliches Phänomen [20] sein. Ein bemerkenswertes Werk, das die Verbindung zwischen Raum, Zeit und der SRT untersucht, ist Emil Cohns Buch *Raum und Zeit* [21]. Cohn widmete diese Erläuterung und Verteidigung der SRT dem Andenken von Mach [22]. Es ist erwähnenswert, dass Einstein selbst auf dieses Buch [21] aufmerksam gemacht hat und es als „eine vorzügliche Darstellung“ (S. 546) [23] bezeichnete. Dies unterstreicht womöglich erneut indirekt die Relevanz von Machs und Cohns Arbeiten und ihre Anerkennung durch Einstein.

Wenn wir nun auf unsere Diskussion zurückblicken und Machs Einfluss auf die SRT zusammenfassen möchten, können wir folgende Schlussfolgerungen ziehen: Mach betonte die Notwendigkeit, dass die (theoretische) Physik stets experimentell überprüfbar sein sollte. Daher sollten in der Physik vorzugsweise nur Begriffe verwendet werden, die eine physikalische Wechselwirkung miteinander eingehen können. Dies gilt auch für grundlegende Konzepte wie Raum, Zeit und Materie, die daher eher relationale oder relative Charakteristika aufweisen sollten. Wenn ein Konzept, wie zum Beispiel der Äther, nicht

überprüfbar ist, sollte man (aus Gründen der Einfachheit) versuchen, die Physik ohne dieses Konzept zu beschreiben. In diesem Sinne wird auch Einsteins Aussage verständlich: „*Ich hegte keinen Zweifel daran, dass sie auch vom philosophischen Standpunkt aus richtig ist. Sie stimmt auch mit der MACHschen Theorie überein.*“ (S. 275) [24]

3. Ernst Mach und die Geschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

In Bezug auf die Geschichte der ART scheint Machs Einfluss mannigfaltig gewesen zu sein. Wir wollen hier lediglich auf drei Punkte eingehen: Die Allgemeine Kovarianz, das Äquivalenzprinzip und die relativistische Kosmologie.

3.1. Die Allgemeine Kovarianz

Mit der SRT gelang es Einstein auf eine sehr elegante und ökonomische Weise, unterschiedliche Gebiete der Physik zu vereinen – doch das Programm „Relativität“ war für ihn noch nicht abgeschlossen. Spätestens im Jahre 1907 [24] zeigte Einstein seine Unzufriedenheit, weil das Konzept der Relativität – gemeint ist die hier die SRT – die beschleunigten Bezugssysteme nicht einbezog. Gemäß seinen Äußerungen wurde er offensichtlich durch Machs Kritik darauf aufmerksam: „*MACH war derjenige, der behauptete, daß alle Systeme, die Beschleunigung aufweisen, einander gleichwertig seien.*“ (S. 276) [24]. Auch durch andere Quellen kann das einfach belegt werden [25]. In Bezug darauf sprach Hans Reichenbach, Schüler und Freund von Einstein, daher von der Existenz eines Mach'schen Programms bzw. vom „Anfang eines Programms“ (S. 252) [26].

3.2. Das Äquivalenzprinzip

Es ist nicht eindeutig festzustellen, ab welchem Zeitpunkt sich Einstein mit dem Problem der Äquivalenz von schwerer und träger Masse auseinandersetzte. Er las (September 1899) die Arbeit [27] von Wilhelm Wien, die eine der ursprünglichen Anregungen für Einstein bei der Entwicklung der Relativitätstheorie war [18, S. 233f.]. Bemerkenswerterweise bespricht Wien in seiner Schrift sowohl die Ausnahmestellung der Gravitation als auch die theoretisch nicht begründete Äquivalenz der trägen und der schweren Masse [27, S. XVI]. Zu jener Zeit (September 1899) begann Einstein auch, Machs Bücher zu lesen [18, S. 230]. Es lässt sich vermuten, dass er aufgrund der Arbeit von Wien [27] und Machs Buch *Mechanik* [8] mit der theoretischen Herausforderung vertraut war und diese möglicherweise bewusst oder unbewusst in Erinnerung behielt.

Wahrscheinlich entschied Einstein erst im Jahr 1907, sich zu diesem Thema zu äußern, weil er höchstwahrscheinlich von Plancks Abhandlung „Zur Dynamik bewegter Systeme“ [28] beeinflusst wurde; in dieser Schrift ging Planck auf die Äquivalenz von schwerer und träger Masse sowie Energie ein [28, S. 32].

Dank der SRT war es nämlich möglich zur Äquivalenz von (träger) Masse und Energie ($E = m \cdot c^2$) zu gelangen. Wenn es physikalisch zulässig ist, die Masse durch die Energie zu definieren, verliert die konzeptionelle Unterscheidung zwischen träger und schwerer Masse ihre ursprüngliche Bedeutung. Aus diesem Grund tritt in Einsteins Schrift „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“ [29] erstmals das Äquivalenzprinzip [29, S. 454] in Erscheinung. (Sobald diese Akzeptanz erfolgt, besteht nun die Möglichkeit, ein homogenes Gravitationsfeld als äquivalent zu einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem zu betrachten.) Einstein bezeichnete das Gedankenexperiment, das ihn zu diesem Prinzip führte, als der „*glücklichste Gedanke meines Lebens*“ (S. 265) [11]. Dabei stellt er sich „*vom Dach eines Hauses frei herabfallenden Beobachter*“ vor, „für“ den „*während seines Falles – wenigstens in seiner unmittelbaren Umgebung – kein Gravitationsfeld*“ (S. 265) [11] existiert. Durch die Anwendung von verschiedenen Gedankenexperimenten, wo das Äquivalenzprinzip vorausgesetzt wird, ist es schließlich möglich durch verschiedene Szenarien auf „*spekulativem Wege*“ (S. 266) [11] unterschiedliche Vorhersagen abzuleiten, wie beispielsweise die *Lichtablenkung am Gravitationsfeld* [11, S. 266; 29, S. 461] oder die *gravitationsbedingte Rotverschiebung* [30, S. 904].

Die wechselseitige Verbindung zwischen dem Äquivalenzprinzip und Machs Überlegungen wurde bereits von Hans Reichenbach betont: „Die Äquivalenz von Trägheit und Schwere ist die strenge Formulierung des Machschen Prinzips im engeren Sinne.“ (S. 240) [26]. In den Arbeiten von Mach fehlt jedoch ein mathematisch-physikalisches Konzept, das die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = m \cdot c^2$) deutlich macht.

Ein weiterer, potenzieller Einfluss von Mach auf Einstein in diesem Zusammenhang besteht vielleicht darin, dass Einstein für sein Gedankenexperiment, das für die Entwicklung des Äquivalenzprinzips von großer Bedeutung war, möglicherweise durch Mach inspiriert wurde. Dieser Gedanke ist besonders naheliegend, da Mach einer der Wegbereiter bei der Erforschung und Anwendung von Gedankenexperimenten war [31]. Tatsächlich findet sich in Machs Buch *Mechanik* [8, S. 234] ein ähnliches Gedankenexperiment, wie bereits von mehreren Autoren angemerkt wurde. Aus wissenschaftshistorischer Sicht gibt es keinen überzeugenden Grund, diese Perspektive abzulehnen. Die genauen Daten erlauben es uns jedoch bedauerlicherweise nicht, eindeutig festzustellen, ob Einstein tatsächlich von Mach für sein Gedankenexperiment inspiriert wurde.

3.3. Relativistische Kosmologie

Es ist allgemein bekannt, dass sich Einstein ab 1915/16 unter anderem mit kosmologischen Problemen befasste. In diesem Zusammenhang beschäftigte er sich mit den Randbedingungen des Universums in der relativistischen Kosmologie und insbesondere mit dem Trägheitskonzept von Mach, das heute als das *Mach'sche Prinzip* bekannt ist. Es sei angemerkt,

dass Einstein den Begriff des Mach'schen Prinzips (1918) zwei Jahre nach Machs Tod (1916) selbst in die theoretische Physik einführte [32, S. 241, Fn. 1]. Gemäß Mach kann die Trägheitsbewegung eines Körpers auf die übrigen Massen im Universum zurückgeführt werden: „*Das Verhalten der irdischen Körper gegen die Erde lässt sich auf deren Verhalten gegen die fernen Himmelskörper zurückführen. Wollten wir behaupten, dass wir von den bewegten Körpern mehr kennen als jenes durch die Erfahrung nahe gelegte hypothetische Verhalten gegen die Himmelskörper, so würden wir uns einer Unehrlichkeit schuldig machen. Wir müssen sogar dem Gedanken Raum geben, dass die Massen, die wir sehen und nach welchen wir uns zufällig orientieren, vielleicht gar nicht die eigentlich entscheidenden sind.*“ (S. 262) [8]

Aufgrund der neueren Entwicklung in der Kosmologie – zum Beispiel die Dunkle Materie und die Dunkle Energie [33] – müssen wir inzwischen solchen Gedanken Raum geben. Offensichtlich verstand Mach seinen Vorschlag als ein hypothetisches Konzept, welches die empirische Erfahrung nahelegt, oder zumindest nicht ausschließen kann. Er betrachtet seine Darstellung daher nicht als eine unumstößliche Gewissheit, sondern vielmehr als eine mögliche alternative Erklärung, die dazu dient, Argumente gegen die Idee eines absoluten Raumes, einer absoluten Zeit oder einer absoluten Bewegung vorzulegen. Sein Ziel ist es, die Physik von dogmatischen Ansichten zu befreien und einen vorurteilsfreien Fortschritt zu ermöglichen.

Über einen gewissen Zeitraum hinweg versuchte Einstein, das Mach'sche Prinzip entsprechend seiner eigenen Interpretation in seine kosmologischen Überlegungen zu integrieren [34]. Die Frage, inwieweit die endgültige Allgemeine Relativitätstheorie im Einklang mit Machs Vorstellungen steht, war und ist Gegenstand anhaltender Diskussion [36]. Es scheint vorerst

eine persönliche Entscheidung zu sein, ob man das Mach'sche Prinzip als ein Auswahlprinzip akzeptieren möchte oder nicht.

4. Fazit

Von einer didaktischen Perspektive aus betrachtet, könnte sich Machs ursprüngliche Vorstellung möglicherweise über die Grenzen der Relativitätstheorie hinaus erstrecken – vielleicht kann sie sogar als eine wissenschaftliche Methode betrachtet werden, die bei der Gestaltung unseres Weltbildes hilft, wie er erklärt: „In der Tat kann die Naturwissenschaft durch bloße Beachtung des *Einzelnen* nichts erreichen, wenn sie nicht zeitweilig auch den Blick ins Große richtet.“ (S. 486) [8]. In ähnlicher Weise vollzog Einstein eine Verbindung zwischen den *einzelnen* Gebieten der Physik, indem er Elektrodynamik und Mechanik zu einem umfassenderen Konzept vereinte (SRT). Anschließend dehnte er die Relativitätstheorie auf die Gravitation aus (ART) und ermöglichte somit eine Beschreibung des Kosmos. Das Ziel war stets das *Große und Ganze* zu erfassen. Diese Zugangsweise ist mittlerweile zu einem wesentlichen Bestandteil des wissenschaftlichen Weltbildes geworden, in dem man ständig bemüht ist, die Elementarteilchenphysik und die Kosmologie miteinander in Einklang zu bringen.

Auf diese Weise wird auch Machs historisch-kritische Herangehensweise verständlich, bei der spezifische Themen aus verschiedenen geschichtlichen Perspektiven betrachtet werden, um ein umfassenderes Bild zu erhalten. Das Duo – Mach als Kritiker der klassischen Mechanik und Einstein als Begründer der Relativitätstheorie – hat zweifellos eine äußerst erfolgreiche Physikgeschichte geschrieben, die hoffentlich kommenden Generationen als inspirierende Quelle [13] dienen kann.

Eren Simsek Österreichische Auslandsschule Querétaro, Mexiko

Literatur

- [1] Reich, K. (1977). Theorien der Allgemeinen Didaktik. Zu den Grundlinien didaktischer Wissenschaftsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland und in der Deutschen Demokratischen Republik. Stuttgart: Ernst Klett Verlag.
- [2] Klafki, W. (2019). Kritisch-konstruktive Didaktik und Hermeneutik. In: Allgemeine Erziehungswissenschaft. Systematische und historische Abhandlungen. Wiesbaden: Springer VS, S. 85-99.
- [3] Woitkowski, D. & Vogelsang, C. (Hrsg.) (2021). Zentrale Themen der Ideengeschichte physikdidaktischer Forschung in Deutschland anhand ausgewählter Originalquellen. Berlin: Logos Verlag, S. 55-58.
- [4] Höttecke, D. & Schecker, H. (2021). Unterrichtskonzeptionen für Nature of Science (NOS). In: Wilhelm, T., Schecker, H., Hopf, M. (Hrsg.) Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- [5] Zeilinger, A. (2004). Einsteins Schleier: Die neue Welt der Quantenphysik. München: C. H. Beck.
- [6] Mach, E. (1872). Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Vortrag gehalten in der k. böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften am 15. November. Prag: Calve.
- [7] Mach, E. (1896). Die Prinzipien der Wärmelehre: Historisch-kritisch entwickelt. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- [8] Mach, E. (2012). Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt. Berlin: Xenomoi.
- [9] Wolters, G. (1987). Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Berlin: Walter de Gruyter, S. 149-153.
- [10] Einstein, A. (1916). Ernst Mach. Physikalische Zeitschrift. 17. Jahrgang.
- [11] Janssen, M., et al. (2002). The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 7: The Berlin Years: Writings, 1918-1921. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2002.
- [12] Das erkennt man bereits aus den Prinzipien der SRT. Das 1. Postulat (Relativitätsprinzip) hat ihren Ursprung in der Mechanik und das 2. (Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) kommt aus der Elektrodynamik. (Wobei man natürlich sagen kann, dass vor allem das mechanische Weltbild durch die SRT aufgehoben wurde.)
- [13] Simsek, E. (2022). Einsteins Relativitätstheorie – ihre Entstehung und Machs Einfluss darauf. Berlin, Heidelberg: B. Metzler.

- [14] Wieso es diese Analogie überhaupt gab, ist natürlich ebenso eine wichtige und interessante Frage, die man näher untersuchen könnte. Meine Vermutung ist, dass es dafür (unter anderem) zwei wichtige Punkte gab: I.) Sowohl Licht- als auch Schallwellen zeigen Beugungs- bzw. Interferenzmuster auf. II.) Man ging wohl von einer Analogie zwischen Hör- und Sehsinn aus.
- [15] Mach, E. (1873). Beiträge zur Doppler'schen Theorie der Ton- und Farbänderungen durch Bewegung. Gesammelte Abhandlungen. Prag: J.G. Calve'sche Buchhandlung.
- [16] z. B. Mach, E. (1904). Objektive Darstellung der Interferenz des polarisierten Lichtes. In: S. Meyer, ed. Festschrift. Ludwig Boltzmann gewidmet: zum 60. Geburtstage. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, S. 441-447.
- [17] z. B. Cohn, E. (1904). Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Jahrgang 1904a. Zweiter Halbband. Juli bis December. Berlin: Verlag der königlichen Akademie der Wissenschaften, S. 1294-1303.
- [18] Stachel, J. et al. (1987). The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 1: The Early Years, 1879-1902. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- [19] Sexl, R. U. (1985). Der unerschöpfliche Albert Einstein. In: A. P. French, ed. Albert Einstein Wirkung und Nachwirkung. Braunschweig: Vieweg & Sohn, S. 36-37.
- [20] Embacher, F. (o.J.). Spezielle Relativitätstheorie. <https://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/SRT/Lorentztransformation.html> [Zugriff am 3. August 2020].
- [21] Cohn, E. (1913). Physikalisches über Raum und Zeit. Zweite, verbesserte Auflage ed. Leipzig/Berlin: B.G. Teubner.
- [22] Seine Geste ist kohärent, da Ernst Mach in seinen Veröffentlichungen zu Lebzeiten die SRT als wegweisend betrachtete und sie mit seinen eigenen Ansichten in Verbindung brachte – siehe z. B.: Mach, E. (1910). Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe. In: Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere. Bonn: Martin Hager, S. 264, Fn. 1.
- [23] Klein, M. J., et al. (1995). The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 4: The Swiss Years: Writings, 1912-1914. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- [24] Haubold, H. J. & Yasui, E. (1986). Jun Ishiwaras Text über Albert Einsteins Gastvortrag an der Universität zu Kyoto am 14. Dezember 1922 (Eine Übersetzung aus dem Japanischen). Archive for History of Exact Sciences, 36(3).
- [25] z. B.: Einstein, A. (1983). Autobiographisches. In: P. A. Schilpp, ed. Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher – eine Auswahl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, S. 10, 24-26.
- [26] Reichenbach, H. (1928). Philosophie der Raum-Zeit-Lehre. Berlin/Leipzig: Walter de Gruyter & Co.
- [27] Wien, W. (1898). Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen. Annalen der Physik, S. I-XVIII.
- [28] Planck, M. (1908). Zur Dynamik bewegter Systeme. Annalen der Physik, Volume 26, S. 1-32.
- [29] Einstein, A. (1907). Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, Volume 4.
- [30] Einstein, A., 1911. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. Annalen der Physik, Volume 35.
- [31] Mach, E. (1897). Über Gedankenexperimente. Sonder-Abdruck aus der: Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht. Zehnter Jahrgang. Berlin: Julius Springer.
- [32] Einstein, A. (1918). Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie. Annalen der Physik, Volume 55.
- [33] Ironischerweise besteht eine historische Verbindung zwischen dem Mach'schen Prinzip und der kosmologischen Konstante, die zur Beschreibung der dunklen Energie verwendet wird – siehe [13, S. 298-302].
- [34] z. B. Einstein, A. (1919). Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle? Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, S. 353-356.
- [35] z. B. Barbour, J., Pfister, H. (1995). Mach's principle: From Newton's bucket to quantum gravity. Boston, Basel, Berlin: Birkhäuser, S. 214-236; und [13, S. XVII-XXII].

Variationen eines Themas

Peter Schmid

Jeder kennt den Doppler-Effekt! Wirklich?

Mehr als 150 Jahre bevor Christian Doppler den nach ihm benannten Effekt beschrieb und ihn in Formeln fasste, bestimmten O. Römer und seine Kolleg:innen damit die Lichtgeschwindigkeit.

Es ist physikalisches Allgemeinwissen, dass der Doppler Effekt Frequenzänderungen von Wellen beschreibt, wenn sich Sender und Empfänger der Welle gegeneinander bewegen. Das Ergebnis der Beobachtung ist also die Beschreibung eines kinematischen Phänomens.

Braucht es dazu unbedingt eine Welle als Kommunikationsmittel zwischen Sender und Empfänger? Nein: es geht auch anders und zwar mit dem „Leuchtturm Doppler-Effekt“. Auf einem Leuchtturm dreht sich ein Scheinwerfer mit fester Umlaufgeschwindigkeit. Ein:e stationärer:e Beobachter:in in einiger Entfernung sieht dann mit regelmäßiger Frequenz einen kurzen Lichtpuls. Nähert oder entfernt sich der:die Beobachter:in vom Leuchtturm, so wird sich die Empfangsfrequenz des Lichtpulses erhöhen oder vermindern – genau so wie beim „klassischen“ Doppler Effekt die Frequenz der Welle. In der Praxis wird dies kaum auffallen, da sich der:die Beobachter:in (z. B. Schiffe) nur langsam bewegen.

Wie schon oben erwähnt, wird dieser „Leuchtturm Doppler-Effekt“ aber in der Astronomie seit langem benutzt. Hier ist das erste, etwas ungewöhnliche Beispiel: Zu Romers Zeit, d. h. am Ende des 17. Jahrhunderts, waren mit Hilfe der Kepler-Gesetze die Umlaufgeschwindigkeiten der Planeten um die Sonne und damit auch die relativen Entfernungen und Geschwindigkeiten der Planeten zueinander gut bekannt. Galilei hatte die vier größeren Jupiter-Monde entdeckt. Im Besonderen konnte die Umlaufzeit von Io, des innersten dieser vier Monde, durch das regelmäßige Verschwinden oder Auftauchen hinter Jupiter gemessen werden [1]. Nach einigen Jahren genauer Beobachtung stellte sich jedoch heraus, dass diese Umlaufgeschwindigkeit während eines Jahres auf der Erde schwankte! Da aber die Newton-Mechanik außer Zweifel stand, brauchte es eine andere Erklärung dieses Phänomens.

Römer hatte nun die gloriose Idee, dass das Licht, das ja das Verschwinden oder Auftauchen von Io („das Signal“) vermittelt, eine endliche Geschwindigkeit haben könnte und das Phänomen durch die bekannte Relativgeschwindigkeit der Erde relativ zu Jupiter erklärt werden könnte, die ja während eines Jahres schwankt. Die Erde ist näher an der Sonne und dreht sich daher rascher um sie als Jupiter. In bestimmten Zeiten nähert sich die Erde Jupiter, später entfernt sie sich wieder von

ihm. Die Beobachtungen von Io unterliegen dem Leuchtturm-effekt! Die erste Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit war zwar nicht sehr genau, aber von der richtigen Größenordnung, was manche damalige Physiker:innen schockierte.

Ein zweites Beispiel aus neuerer Zeit ist ebenfalls sehr beeindruckend. Der Pulsar PSR1913+16 dreht sich 17 Mal pro Sekunde um sich selbst und sendet dabei Radioimpulse in einem wohldefinierten Kegel aus. Wenn dieser Kegel die Erde kreuzt, so empfangen unsere Radioteleskope einen wenige Millisekunden dauernden Radiopuls. Wäre der (etwa 22000 Lichtjahre entfernte) Pulsar stationär, so würde die Frequenz der Pulse nur im Takt des Umlaufs der Erde um die Sonne variieren. Die Variation der Empfangszeiten der Pulse und die Variation ihrer Frequenz ist aber wesentlich rascher, größer und häufiger.

Was die Physiker:innen am Ende des 17. Jahrhunderts leisteten, wiederholten R. Hulse und J. Taylor in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Sie konnten die Ankunftszeiten der Pulse und deren Schwankungen damit erklären, dass PSR1913+16 mit einem anderen Neutronenstern ein Binärsystem bildet und dass sich die beiden Sterne mit großer Geschwindigkeit elliptisch um ihren gemeinsamen Schwerpunkt drehen, wobei ein voller Umlauf nur 7,75 Stunden dauert [2]. Die Bahngeschwindigkeit der beiden Sterne ist dabei im Punkt ihrer größten Nähe viermal höher als im Punkt größter Entfernung – ideal für eine Beobachtung durch die Änderung der Intervalle zwischen den Radiopulsen, die das „Leuchtfeuer“ für diesen Doppler Effekt darstellen. Die Messungen sind inzwischen so genau, dass das Binärsystem ein Testobjekt für die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellt, darunter die rasche Präzession der Umlaufbahnen und die Verminderung der Bahnparameter des Pulsars durch die Abstrahlung von Gravitationswellen. Mit Recht erhielten Hulse und Taylor für ihre Messungen und deren Interpretation 1993 den Nobelpreis für Physik. Inzwischen half diese super-präzise Uhr der Radiopulse, die Geschwindigkeit der Bewegung der Sonne um das Zentrum unserer Milchstraße genauer zu vermessen.

Auf einen ersten Blick hin mag der Unterschied zwischen einem „klassischen“ und einem „Leuchtturm“ Doppler-Effekt nicht offensichtlich sein. Dass beim Leuchtturm Effekt in den meisten Fällen das Signal auch durch eine elektromagnetische Welle geliefert wird (sichtbares Licht von Io, ein Breitband-Radiosignal von PSR1913+16), mag zur Verwirrung beitragen. Was aber beim Leuchtturm Effekt gemessen wird, ist nicht die (auf Grund des breiten Spektrums der Radiowellen praktisch unmessbare) Frequenzänderung der Strahlung, sondern die genaue Ankunftszeit der Signale (Pulse). Um aussagekräftig

zu sein, muss die Pulsdauer wesentlich kürzer sein, als das Zeitintervall zwischen aufeinander folgenden Signalen. (Dies ist in den beiden oben beschriebenen Beispielen der Fall.) Wenn sich ein:e Beobachter:in mit fixer Geschwindigkeit einem Leuchtturm nähert (oder der Signalsender dem:der Beobachter:in), so werden die Intervalle zwischen zwei aufeinander folgenden Signalen kürzer sein, als wenn er sich in Ruhe befindet, da ja das Licht dann zwischen zwei Signalen kürzere Distanzen zurücklegen muss.

Die Astronom:innen bezeichnen diese Variationen der Intervalle zwischen aufeinander folgenden Signalen in Abhängigkeit von den Relativgeschwindigkeiten von Sender und Empfänger seit langer Zeit ungeniert als „Doppler-Effekt“. Manche Physiker:innen zögern, weil sie meinen, dass man nur Frequenzänderungen von Wellen als „Doppler-Effekt“ bezeichnen dürfe. Ein Streit um Definitionen ist aber müßig. Da der Endzweck

die Messung von Relativgeschwindigkeiten zwischen Sender und Empfänger ist, ist es irrelevant, ob dafür die Veränderung der Frequenz einer Welle („klassischer“ Doppler-Effekt) oder der zeitlichen Intervalle sukzessiver Signalpulse („Leuchtturm-Effekt“) gemessen werden. Die Bezeichnung „Doppler-Effekt“ ist wohl für beide passend, auch wenn Doppler selbst noch nicht an diese Verallgemeinerung dachte.

In seiner Originalveröffentlichung von 1842 sprach Doppler aber selbst von „Wellenschlägen“ und leitete aus dem Unterschied der Schlagzahlen pro Zeiteinheit bei Sender und Empfänger die Formeln für den Dopplereffekt ab. Die Formeln gelten daher für beliebige Quellen von „Schlagzahlen“, also auch für „Leuchtturm“-Signale.

Peter Schmid *Christian Doppler Fonds*

Literatur

[1] Shea, J. H. (1998) Ole Rømer, the speed of light, the apparent period of Io, the Doppler effect, and the dynamics of Earth and Jupiter. *American Journal of Physics* 66, 561-569

[2] https://de.wikipedia.org/wiki/PSR_J1915%2B1606 (Juli 2023).

Elektronische Weihnachtskarten

Joe Cossette, Sara-Elizabet Maksim, Geza Papp und Martin Hopf

1. Einführung und Material

Haben Sie schon einen Plan für die Weihnachtsstunde? Wie wäre es mit einer Bastelei? Im Folgenden werden wir beschreiben, wie Sie ganz leicht mit einer ganzen Klasse beleuchtete Grußkarten herstellen können. Einer von uns (JC) hat das schon mit einer ganzen Schule gemacht, die Kosten lagen bei etwa 50 US-Cent pro Karte. Wir haben die Idee auf seinem Blog gesehen [1] und eine österreichische Version davon ausprobiert.

Sie brauchen:

- Vorlagen, auf dickes Papier oder Karton kopiert. (Wir haben weißen Fotokarton verwendet, das kann aber nicht jeder Kopierer oder Drucker verarbeiten; dünnerer Karton geht auch.) Auf der Homepage von Joe Cossette finden Sie viele verschiedene Vorlagen [1].
- Knopfzellen (CR2032, 3 Volt)
- 3mm-LEDs. (Es gibt günstige Sortimentspackungen; man kann aber auch blinkende LEDs verwenden)
- Leitfähiges Klebeband. Achten Sie hier darauf, dass das Band beidseitig und durchgängig leitet. Wir haben etwas gesucht, bis wir geeignetes Band gefunden haben. Am besten hat sich bei uns LLPT Kupferband mit 6 mm Breite bewährt.

2. Der Bau

- Es ist sinnvoll, zunächst die Karten zu bemalen und/oder zu gestalten. (Nach dem Einbau von LEDs und Batterie ist die Karte ziemlich „klumpig“.)
- Die Vorlagen enthalten je zwei kleine Punkte, durch die die LEDs gesteckt werden müssen. Es ist zwar möglich, die LED-Anschlüsse selbst dazu zu verwenden, um sie durchzustechen, aber es ist viel besser, diese Löcher vorzustechen. Wir empfehlen dazu, die Karte auf ein Stück Pappe zu legen und mit einer Stecknadel an den gewünschten Stellen durch den Karton zu stechen.
- LEDs funktionieren nur in eine Richtung, daher ist es wichtig, dass der längere Anschluss der LED mit dem Pluspol der Batterie verbunden wird. Die Vorlagen enthalten ein „L“ („long“) und ein „S“ („short“), um die Lage der langen und der kurzen Anschlüsse anzugeben.
- Da verschiedenfarbige LEDs für unterschiedliche Spannungen vorgesehen sind, beeinflussen sie den Rest der Schaltung, auch wenn sie parallel geschaltet werden. Aus diesem Grund können rote, grüne und gelbe LEDs gleichzeitig leuchten; auch blaue und weiße LEDs können gleichzeitig leuchten. Aber diese verschiedenen „Farbsätze“ können nicht gemischt werden. Man kann das natürlich



Abbildung 1: Eine beleuchtete Weihnachtskarte (Foto Merry and Bright im Betrieb)

mit zusätzlichen Widerständen verändern, aber es ging hier darum, die Karten so einfach wie möglich zu gestalten. Das „Merry and Bright“-Beispiel (Abb. 1) funktioniert mit allen Farben, weil sie nie gleichzeitig leuchten.

- Bei einigen Vorlagen ist ein Diagramm beigelegt, das darauf hinweist, dass die Batterie mit einem Ring aus Klebeband auf den unteren „Draht“ geklebt werden sollte. Dazu schneidet man ein kleines Stück ab und wickelt einen außen klebenden Ring.
- Eines der häufigsten Probleme ist, dass die Verbindungen zwischen dem Klebeband und den LEDs nicht stark genug sind. Dieses Problem lässt sich in den meisten Fällen lösen, indem man ein Stück Tesafilm auf die Unter- und Oberseite der LED-Leitungen legt. Die Vorlagen enthalten ein kleines Diagramm für die Stellen, an denen diese Anordnung empfohlen wird.
- Hinzufügen eines Schiebeschalters
Einige der Vorlagen schließen den Schalter, wenn die Karte geschlossen wird, indem der Platz auf der anderen Seite des Falzes genutzt wird, um etwas Klebeband anzubringen. Andere Vorlagen erfordern einen Schiebeschalter. Dazu schneiden Sie einen Streifen Karton zurecht und schieben ihn unter die Batterie. Der Schalter unterbricht die Verbindung mit dem Klebeband unter der Batterie. Sie können auch einen Teil des Schiebers mit Tesafilm umwickeln, damit er nicht vollständig entfernt werden muss, um den Stromkreis zu schließen.

3. Vorlagen

Man braucht keine Vorlage, um eine leuchtende Grußkarte zu basteln, aber sie kann ein guter Leitfaden sein, wenn man nur begrenzte Ressourcen, Fachkenntnisse oder Zeit hat. JC hat bestehende Ideen weiterentwickelt und mehr LEDs und Schalter in die Designs eingefügt. Diese Vorlagen können kostenlos heruntergeladen werden [1]. Die Schaltungsvorlage sollte sich beim Ausdruck auf der Innenseite der Karte befinden. Auf [1] sind auch Demo-Videos zu sehen.

Joe Cossette *Minnetonka High School, Minnesota.*

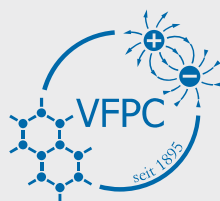
Sara-Elizabet Maksim *Universität Wien, Didaktik der Physik*

Geza Papp *Universität Wien, Didaktik der Physik*

Martin Hopf *Universität Wien, Didaktik der Physik*

Literatur

[1] <https://passionatelycurioussci.weebly.com/>



Neues aus dem Verein

Einladung zur Generalversammlung 2023

Zeit: Mittwoch, 13. Dezember 2023, 18:00 Uhr

Ort: ZOOM

Über diesen Link können Sie direkt dem Zoom-Meeting beitreten
<https://univienne.zoom.us/j/64215383095?pwd=VlVjYm9FcktvR2F1bHNzZ0U2U3cvQT09>

Tagesordnung:

1. Begrüßung, Beschlussfassung der Tagesordnung
2. Bericht des Obmanns
3. Bericht der Kassierin
4. Bericht der Rechnungsprüfer, Entlastung des Vorstands
5. Wahl des Vorstands und der Kassaprüfer für das Vereinsjahr 2023/24
6. Festsetzung des Mitgliedsbeitrags 2023/24
7. Fortbildungswoche 2024
8. Allfälliges

Um zahlreichen Besuch ersucht der Vorstand!

8. Werner-Rentzsch-Fotowettbewerb

Wir suchen auch dieses Jahr wieder das schönste Foto eines selbstausprobierten Experiments! Senden Sie uns bitte ein besonders gelungenes Foto eines Experiments, das im Rahmen des Physik- bzw. Chemieunterrichts selbst ausprobiert wurde.

Aus allen österreichweit eingesendeten Fotos werden die besten Fotos durch unsere Jury ausgewählt. Als Prämien gibt es Gutscheine für Experimentiermaterialien für Ihre Schule.

Alle Informationen unter Mehr Infos auf www.pluslucis.org



Österreichische Post AG
SM 17Z041123 S

Verein zur Förderung des physikalischen
und chemischen Unterrichts,
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien

DVR 0558567
VRN 668472729