



Ursula Schröter

Physiksammlung



Impressum

Texte und Bilder: © 2017 Ursula Schröter

Vertrieb: epubli - ein Service der neopubli GmbH, Berlin

Einleitung

Lieber Leser,

dieses Buch ist keine Aufzählung der für den Physikunterricht üblichen Standardversuche. Es ist ein Sammelsorium einiger mehr oder weniger spezieller Versuche sowie einiger meiner Ideen, erzählt entspannt und im Plauderton. Es ist in der Formulierung so geschrieben, dass es andere Physik-Lehrpersonen als Leser annimmt, aber selbstverständlich richtet es sich an alle Interessierten.

Soweit ich in der Ausbildung und vor meiner derzeitigen noch an einer anderen Schule Physiksammlungen gesehen habe, schwingt immer der Eindruck eines status quo mit. Eine Reihe von funktionierenden Standardversuchen ist gut, hegt sie. Jedoch ist es nicht meistens so, dass man nie wirklich alles hat, was man gern hätte und was für die Unterrichtsthemen toll wäre? Abgesehen davon, dass das auch eine Geldfrage ist, kann das Gefühl aufkommen, dass man nie wirklich fertig werden kann, die Sammlung perfekt aufzustellen. Hinzu kommen bei mehreren Kollegen eventuell Ordnungsstrukturen für Geräte und Versuchsbeschreibungen. Neben einigem modernen kürzlich Erworbenen hat man in der Regel viel nicht so moderne Ausrüstung. Und es liegt eine Menge Zeug in Schränken herum, das da eben schon lange herumliegt.

Klar ist das Folgende meine Herangehensweise, und andere mögen es anders angehen und handhaben, aber falls ihr meiner Empfehlung folgen möchtet - gerade falls ihr neu an eine Schule kommt: Keine Panik, keine Hektik. Zunächst vorhandene, funktionierende Versuchsaufbauten benutzen. Falls möglich, von einem Kollegen vorführen lassen, der es auch verwendet. Aber auf jeden Fall auch selber, auf sich allein gestellt, durchprobieren (Dinge, die durch den sogenannten Vorführeffekt im Unterricht dann doch nicht so rauskommen, wie sie sollten, gibt es immer noch genug).

Wenn etwas Luft in der Unterrichtsvorbereitung ist, unverbindlicher weiter zu denken: Kommen euch Ideen, wie man vorhandene Materialien und Geräte anders kombinieren könnte, um weitere Effekte zu zeigen? So, wie es bis jetzt vielleicht nicht in einer Versuchsliste steht oder die Sachen im Schrank zusammenstehen. Erst schauen, was machbar ist und sich dann fragen, ob und wo das, natürlich in Einklang mit dem Lehrplan, in den Unterricht einer Klasse passen könnte, ist auch ein Vorschlag zum Wechsel der Sichtweise, der Kreativität anregen kann.

Eine Etappe, die ich dem Leser ans Herz legen möchte und die ein wesentlicher Anlass ist, dieses Buch zu schreiben: Schmeißt altes Zeug nur weg, wenn es irreparabel kaputt ist. Und erforscht, was das ist, das da in Schrankfächern und Kisten herumliegt, das keiner der Kollegen benutzt. In meiner früheren Schule hatte sich da z.B. eine Box mit Messsensoren irgendwie angesammelt, die nur keiner der Kollegen kannte, die ich jedoch zufällig in einem Praktikum schonmal gesehen hatte. Das Know-how ließ sich neu aufbauen, da auch ein alter Laptop mit einer RS232-Schnittstelle zu retten war (ja, an so etwas hängt es mitunter). Es können auch einigermaßen wertvolle "Schätze" darunter sein, wie der Statik-Bausatz, von dem ich in einem Kapitel berichten werde. Und nicht zuletzt: OK, als Physiklehrer hat in Regel jeder von uns Physik studiert. Aber ehrlich, habt ihr jeden x-beliebigen Schulversuch auf Anhieb drauf? Ich habe festgestellt, dass es kleine Tücken gibt, die einem nicht alle erzählt worden sein können, die man nur durch Ausprobieren findet, von denen Schüler bei Vorführversuchen aber nichts wissen sollen; siehe hierzu die Abschnitte über die Phasenlage der Spannungen an einem RC-Glied und über die Spannungs- und Stromübersetzung eines Transformators. Traut euch, als ausgewachsener Lehrer wieder Babyschritte zu machen, für euch selbst zu lernen beim Ausprobieren von gar nicht so komplexen Versuchen.

Gelegentliche Anschaffungen und Erneuerungen gehören dazu, und das Budget bzw. mögliche Bewilligungen der Schulleitung gilt es zu nutzen. Hierzu ein paar hoffentlich hilfreiche Fragen: Was brauchen wir unbedingt neu und wo können wir uns mit Vorhandenem behelfen? Das gilt auch für Teile von Versuchen. Auch die Qualität ist abzuwägen; es muss nicht das Teuerste sein, jedoch bei auffallend günstigen Angeboten kritisch die Haltbarkeit abschätzen (ob z.B. Plastikteile leicht abbrechen werden).

Meine Situation mit der Physiksammlung an meiner Schule ist ein wenig speziell, woraus recht rasch dieses Buch entstanden ist. Durch Ausscheiden von Kollegen etwa zeitgleich mit einem Umzug in ein neues Schulgebäude war kein Überblick und System mehr vorhanden. Wir sind an der Schule auch derzeit nur zwei Physiklehrerinnen. Meine Kollegin, die nicht lange vor mir an die Schule gekommen war, hatte Mechanik-Utensilien sortiert zugänglich gemacht, ansonsten war alles recht wahllos in die Schränke verstaut und zum Teil noch im Keller eingelagert. Hier war also ein komplettes Neuordnen und Entdecken wirklich nötig. Zum anderen ist es die Zeit, an der an unserer Berufsschule gerade Zweige beruflicher Gymnasien neu aufgebaut werden. Erbstücke auch aus der Vorgängerschule des heutigen Schulzentrums passen also nicht eins zu eins auf Oberstufenlehrpläne.

Macht etwas aus dem, was da ist! Das Sortiment und auch die einzelnen

Geräte werden an verschiedenen Schulen etwas anders aussehen. Jetzt fragt ihr vielleicht, warum ich dann ein ganzes Buch über teilweise recht spezielle Versuchsaufbauten mit den Materialien aus der Sammlung meiner Schule schreibe, wo ihr doch nicht die gleichen Teile habt, um genau diese nachzubauen, sondern dafür andere tolle Sachen. Es soll einiges Know-how sichern. Es soll Tipps geben, auf welche Art Aspekte und Tücken man achten sollte. Und es soll zum Kreativsein anregen, wie man doch so einiges möglich machen kann, natürlich immer noch so einfach und sicher, dass es für den Schulunterricht geeignet ist. Und ein wenig status quo sollte immer bleiben, das hält es lebendig.

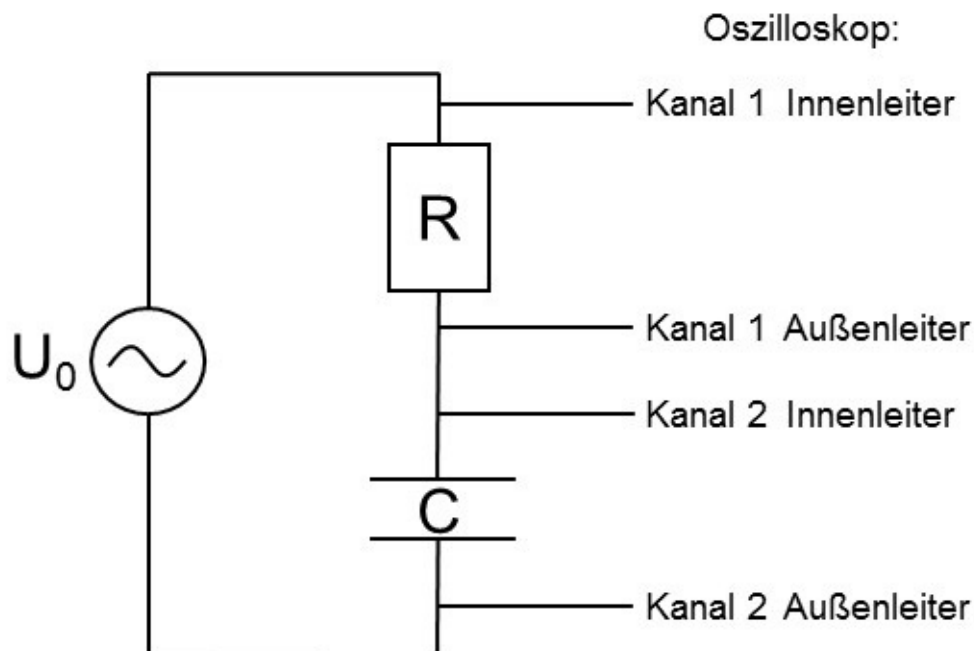
Konstanz, im Sommer 2017

Ursula Schröter

Tücken bei Standardversuchen

Oszilloskop-Nullleiter

Da bei Induktivitäten und Kapazitäten Strom und Spannung nicht in Phase sind, gibt es in Schaltungen, die Spulen oder Kondensatoren enthalten, bei Verwendung von Wechselspannung Phasenversätze zwischen Teilspannungen. Nur den einfachsten Fall wollte ich einmal in einer Stunde zeigen: Bei der Kapazität eilt die Spannung dem Strom hinterher. In einer Reihenschaltung aus einem Widerstand und einem Kondensator sind also die Spannungen an Widerstand und Kondensator um 90 Grad versetzt. Es bietet sich an, die zwei Kanäle eines Oszilloskops für die beiden Spannungen über dem Widerstand und über dem Kondensator zu benutzen. Auch bei Wechselspannung von oben nach unten von plus nach minus gedacht, habe ich übersichtlicherweise die Kabel wie in der folgenden Zeichnung angeschlossen.

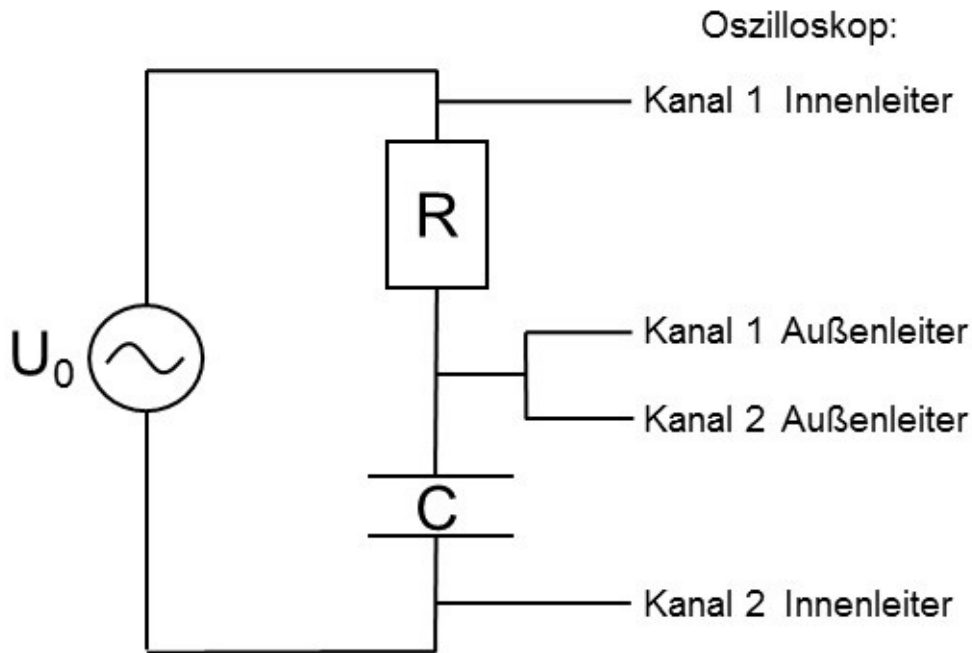


Messaufbau, der keine Spannung über C zeigt.

War da etwas kaputt? Man sah zwar die Spannung über dem Widerstand als

Sinuskurve auf dem ersten Kanal, aber für die Spannung über dem Kondensator auf dem zweiten Kanal wollte das Oszilloskop einfach nichts anzeigen; es blieb eine Nulllinie, wie sehr man die Voltskala auch aufdrehte. Wenn der Kondensator oben ist und der Widerstand unten, sieht man ebenfalls nur ein Signal auf dem ersten Kanal. Durch wilde Umsteckversuche bin ich dann eine rausgeflogene Sicherung später darauf gekommen, wo es einen Kurzschluss gibt. Offenbar liegen die Außenleiter der beiden Oszilloskopkanäle im Oszilloskop auf einem Potenzial (Oszilloskop-“Erde”). In meinem Aufbau war also der Kondensator über das Oszilloskop kurzgeschlossen.

Man muss die Außenleiter an ein und demselben Punkt in der Schaltung anschließen und von diesem aus alle Spannungen messen. Eine Erdverbindung zwischen dem Spannungsnetzteil und dem Oszilloskop über die Steckdosen gab es im Hinblick auf ausgegebene bzw. gemessene Signale dann nicht, so dass der Punkt zwischen dem Widerstand und dem Kondensator als Referenzpunkt für zwei “erdfreie” Messungen geeignet ist. Es sind daher lediglich die Messkabel am Kondensator umzutauschen. Das kehrt allerdings das Signal um. So erscheint das Bild der Kondensatorspannung auf dem Oszilloskop nicht mehr um 90 Grad hinterherilend zur Spannung am Widerstand, sondern um 90 Grad vorausilend. Die Umkehrung der Kurve ist entweder beim Erklären zu bedenken, oder falls das Oszilloskop über eine Invert-Taste verfügt, kann man das Vertauschen der Messleitungen damit ausgleichen.

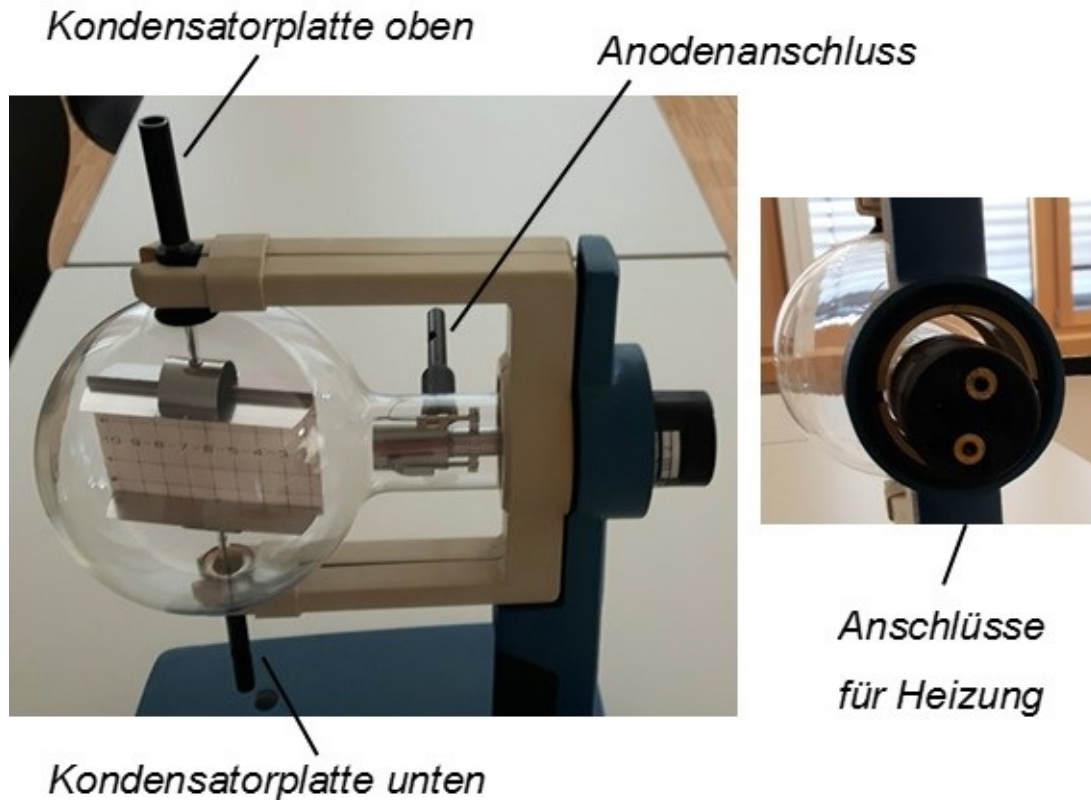


Messaufbau, der die Teilspannungen beide zeigt.

Und noch als Tipp für diesen Demonstrationsversuch, was man vorher überschlägig berechnen sollte: Die Spannungen über dem Widerstand und dem Kondensator sollten grob in derselben Größenordnung liegen. Natürlich geht es hier um die Phasenlage und man kann die Spannungsskalen der Oszilloskopkanäle verschieden wählen. Aber wenn die Spannungen nicht allzu verschieden groß sind, ist eine gute Anzeige leichter zu finden. Diesen Aufbau hatte ich noch an meiner früheren Schule erstellt, wo kein Frequenzgenerator vorhanden war, jedoch ein einziges Netzgerät, das auch Wechselspannung lieferte. Ich beschränke mich hier also auf den einen Wert 50 Hz für die Frequenz. Welche Kombination von R und C aus vorhandenen Widerständen und Kondensatoren soll man wählen? Meinen ersten Versuch habe ich mit 10 k Ω und 10 μ F gemacht. Die Spannung am Kondensator ist dabei fast zwei Größenordnungen kleiner als am Widerstand, denn der Blindwiderstand des Kondensators ist hier $1/(i\omega C) = -i/(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 10\mu\text{F}) = -i \cdot 318 \Omega$. Mit 1 k Ω und 10 μ F ergeben sich hingegen Spannungamplituden an Kondensator und Widerstand im Verhältnis etwa 1:3. Mit einer Amplitude der angelegten Wechselspannung von 10 V erhält man die Amplituden 9.5 V für den Widerstand und 3.0 V für den Kondensator.

Definiertes Potenzial

Ein Teil der Physiksammlung, die es wie gesagt, neu zu entdecken galt, besteht aus den guten alten "Röhren", diesen Glaskolben mit dem Hochspannungszeugs drin. Die meisten erwiesen sich sogar als funktionsfähig, u.a. die Elektronenstrahl-Ablenkröhre. In dieser wird ein Elektronenstrahl aus einer Heizwendel auf Geschwindigkeit gebracht und dann durch ein Kondensatorfeld quer zur Strahlrichtung geschickt. Auf einem Fluoreszenzschirm in der Röhre kann man die Ablenkung des Elektronenstrahls nach oben bzw. unten sehen. Unsere Ausführung bietet sogar noch die Möglichkeit, ein Helmholtzspulenpaar an der Vorder- und Rückseite der Röhre aufzustecken, um neben der Ablenkung im elektrischen Feld außerdem wie im Fadenstrahlrohr eine Ablenkung durch ein magnetisches Feld machen zu können. Darum geht es jedoch hier nicht. Eine gefundene Beschreibung zur Elektronenstrahl-Ablenkröhre erklärte mit Rechenbeispielen zur Parabelform der Bahn sehr schön die Physik, war aber nicht für Dummies gemacht, wie die Verkabelung vorzunehmen ist. Wir brauchen eine Heizspannung für die Kathode (6.3 V Wechselspannung), eine Hochspannung zur Beschleunigung der Elektronen und eine Hochspannung am Kondensator für die Ablenkung. Am Kathodenende befinden sich zwei nicht unterschiedene Eingänge für die Heizspannung. Die Anschlüsse des Kondensators sind offensichtlich oben und unten an der Röhre. Aber seitlich vor dem Kondensator ist nur noch ein Anschluss, die Anode.

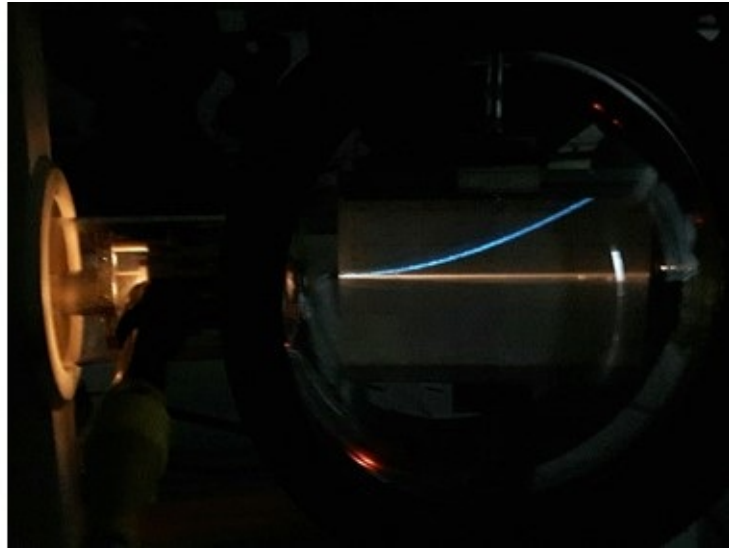


Anschlüsse an der Elektronenstrahl-Ablenkröhre

Also habe ich die Heizspannung angeschlossen, ein Hochspannungsnetzteil an den Kondensator (oben plus und unten Erde) und von einem zweiten Hochspannungsnetzteil den Pluspol an die Anode. Wohin mit dem anderen Pol bzw. der Erde des zweiten Hochspannungsnetzteils? Wenn nichts vorgesehen ist, dann vorsichtshalber mit der Erde des anderen Hochspannungsnetzteils zusammenstecken. Auch nach Anlegen genügend hoher Spannungen war so aber kein Strahl zu sehen!

Im Internet habe ich zufällig ein Foto der Apparatur mit Kabeln dran gesehen. Man muss den Minuspol bzw. die Erde des zweiten Hochspannungsgeräts, also den zur Anode gehörigen Gegenpol, an die Elektronen emittierende Kathode anlegen. Wie sonst sollen die emittierten Elektronen wissen, dass die Anode gegenüber ihrem Ursprungsort deutlich positiv ist und dorthin beschleunigt werden? Da kein separater Anschluss vorhanden ist, muss man dreisterweise eben den zweiten Pol der Beschleunigungsspannung einfach auf einen Anschluss der Heizung mit draufstecken (egal auf welchen von beiden). Dann kommt der Elektronenstrahl auch, wie er es soll. Als Anodenspannung eignet sich ca. 5 kV, die Spannung an den Kondensatorplatten sollte im

Bereich bis 5 kV regelbar sein.

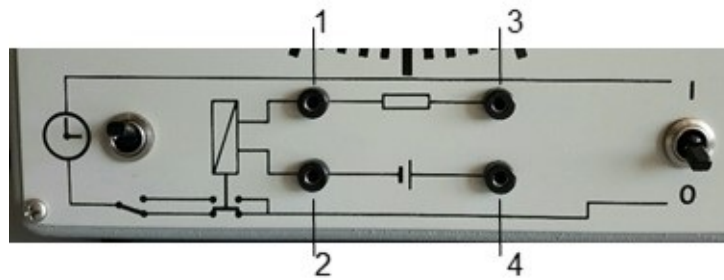


links: Minuspol der Hochspannung an Heizung

rechts: abgelenkter Elektronenstrahl

Verbindung durch die Spannungsquelle

Heutzutage kann man mit einem Ultraschallsensor beim freien Fall die gesamte Bewegung aufnehmen. Ein Ultraschallsensor und ein zugehöriges Computerprogramm sind auch an unserer Schule vorhanden und werden genutzt. Unter den etwas älteren Geräten findet sich jedoch auch eine magnetische Haltevorrichtung für eine Kugel sowie eine Aufprallplatte, und so die Zeit für verschiedene Fallhöhen zu messen, ist sehr anschaulich. Per Sicht und Hand ist die Messung hier natürlich nicht möglich, sondern sie muss vom Auslösen der Haltevorrichtung und der Aufprallplatte gestartet und gestoppt werden. Dazu vorhanden ist eine recht eindrückliche Stoppuhr. Ihr seht sie auf zwei Fotos weiter unten im Ganzen, das folgende Foto zeigt nur ihre Anschlüsse. Ich schreibe diesen Abschnitt auch nicht wegen des Fallversuchs, sondern wegen der Ansteuerung der Stoppuhr, die sich eben als Teil einer weiteren Schaltung zunächst als nicht ganz einfach erwies.

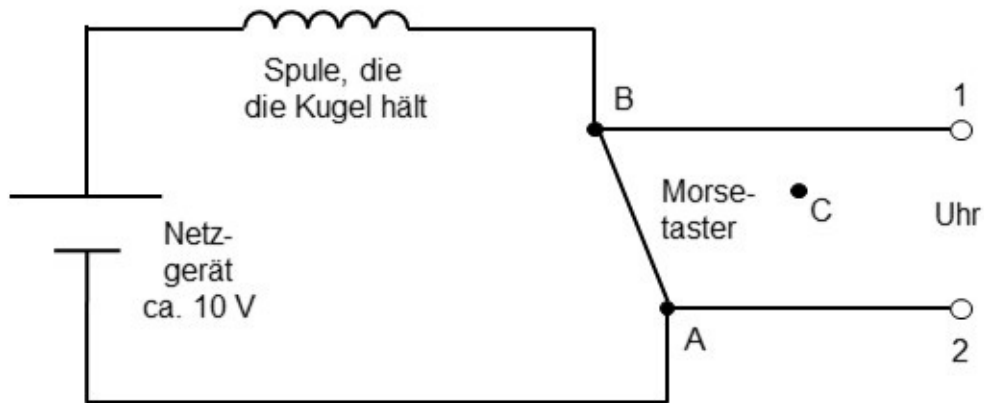


Anschlüsse der elektrischen Stoppuhr

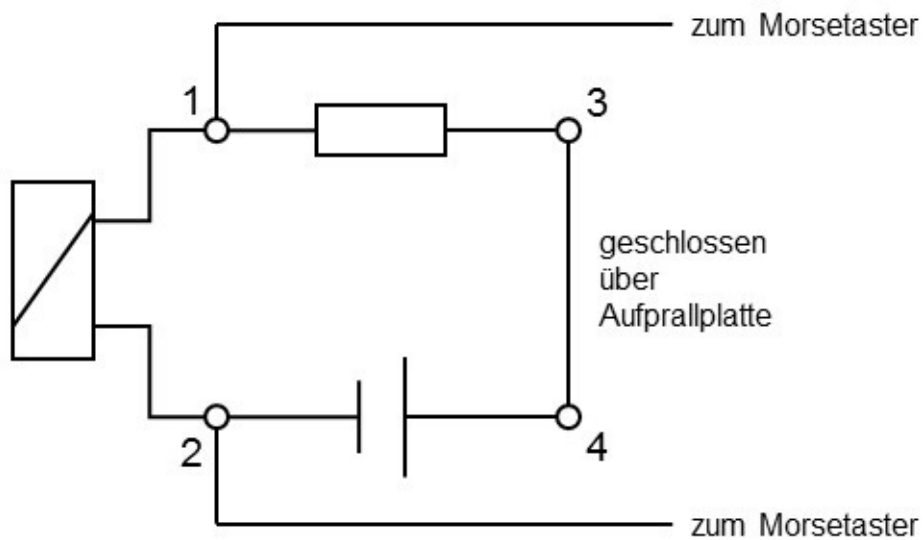
Anders als auf dem Foto muss die Uhr natürlich mit dem Schalter ganz rechts grundsätzlich eingeschaltet sein. Und für den Schalter links habe ich die obere Stellung gewählt, d.h. der schräg dargestellte Kontakt links unten befindet sich in der anderen Stellung als aufgemalt. Es gibt zwei Buchsenpaare 1/2 und 3/4. Dahinter verbirgt sich, wie vereinfacht aufgezeichnet, eine Schaltung mit einer Spule (das rechteckige Symbol mit dem Schrägstrich). Bei Stromfluss durch die Spule zieht sie den Kontakt unter sich nach oben. Mit meiner Stellung des linken Schalters läuft die Uhr also bei Stromfluss durch die Spule, sonst läuft sie nicht bzw. stoppt.

Die Kugelhalterung für den Fallversuch besteht ebenfalls aus einer Spule. Bei Stromfluss durch die Spule zieht ihr Magnetfeld die Kugel an. Wird der Strom abgeschaltet, fällt die Kugel herunter. Ebenfalls offenbar zwecks solcher Versuche in der Physiksammlung enthalten ist ein Morsetaster. Das ist eigentlich ein Umschalter, der aber als kleiner Kippbalken viel leichter und schneller geht. In meinen Schaltskizzen ist der Morsetaster als Umschalter dargestellt. Kontakt A ist die Mittelbefestigung des Balkens, also an jeder Verbindung beteiligt. Unbetätigt sind A und B verbunden. Ist der Taster gedrückt, sind A und C verbunden, und die Verbindung von A nach B ist geöffnet. Die Aufprallplatte hat auch zwei Anschlüsse. Der Kontakt zwischen diesen ist geschlossen, wenn die Platte noch hochgekippt ist, er wird geöffnet, wenn die Platte ausgelöst, also heruntergedrückt wird. Die Platte bleibt dann in dieser Stellung, bis sie manuell zurückgekippt wird. Der Kontakt 3/4 muss geschlossen sein, damit die Uhr läuft. Ich benutze also die unausgelöste Aufprallplatte, um darüber 3/4 zu verbinden. Dann ist der Stromkreis mit der Spule in der Uhr eigentlich geschlossen und die Uhr müsste laufen. Um das bis zum Start des Falls zu verhindern, schließe ich mit dem unbetätigten Morsetaster den Kontakt 1/2 kurz. Der Strom geht also nur durch den Widerstand, und wird an der Spule in der Uhr vorbeigeleitet. Mit dem Betätigen des Morsetasters fällt die Kugel herunter und an der Uhr wird 1/2 geöffnet, so dass diese losläuft. Das zeigen Schaltskizze 1 (Fallmaschine vor

Betätigen des Tasters) und Schaltskizze 2 (Uhr nach Betätigen des Tasters).



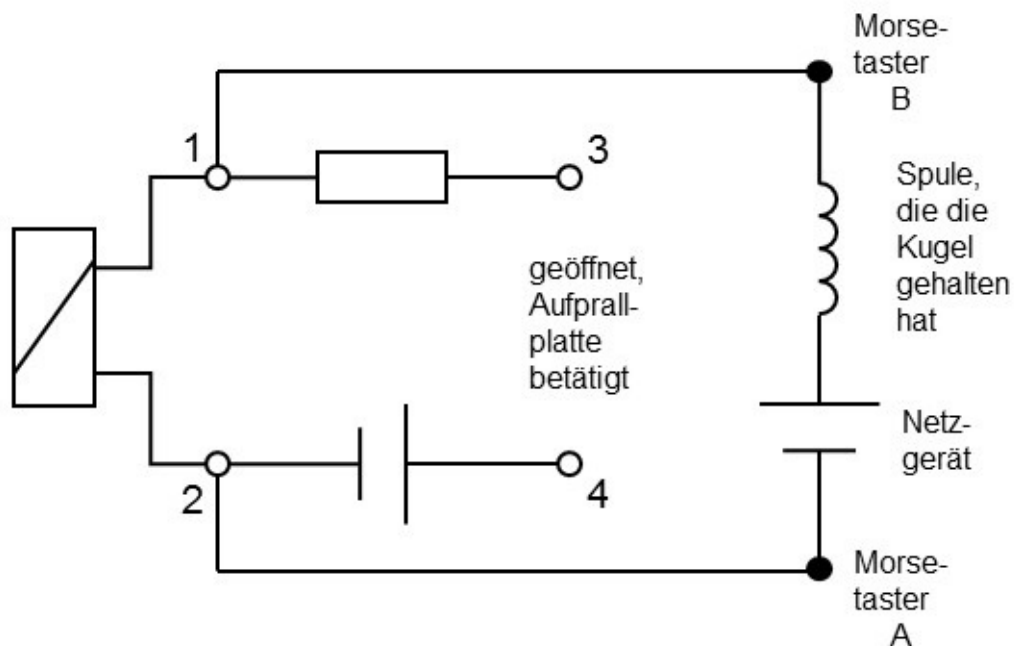
Schaltskizze 1 (Fallmaschine und Verbindung zur Uhr)



Schaltskizze 2 (Uhr nach Betätigen des Morsetasters, Uhr läuft).

Wenn die Kugel auf die Aufprallplatte trifft, wird der Kontakt 3/4 geöffnet. Nur verwunderlicherweise stoppt die Uhr dann nicht! Was ich vermute, woran das liegt, zeigt Schaltskizze 3. Die direkte Verbindung 1/2 durch den

Morsetaster gibt es nicht mehr, aber die mit 1 und 2 verbundenen Kontakte B und A des Morsetasters hängen nach wie vor am Netzgerät mit der Halterungsspule. Wenn man sich das einmal wie in Schaltskizze 3 aufzeichnet, sieht man, dass jetzt das Netzgerät die Spule in der Uhr mit Strom versorgen kann. Dass man gar nicht so schnell sein kann, den Morsetaster noch während eines Falls von einigen zehn Zentimeter wieder loszulassen, versteht sich.

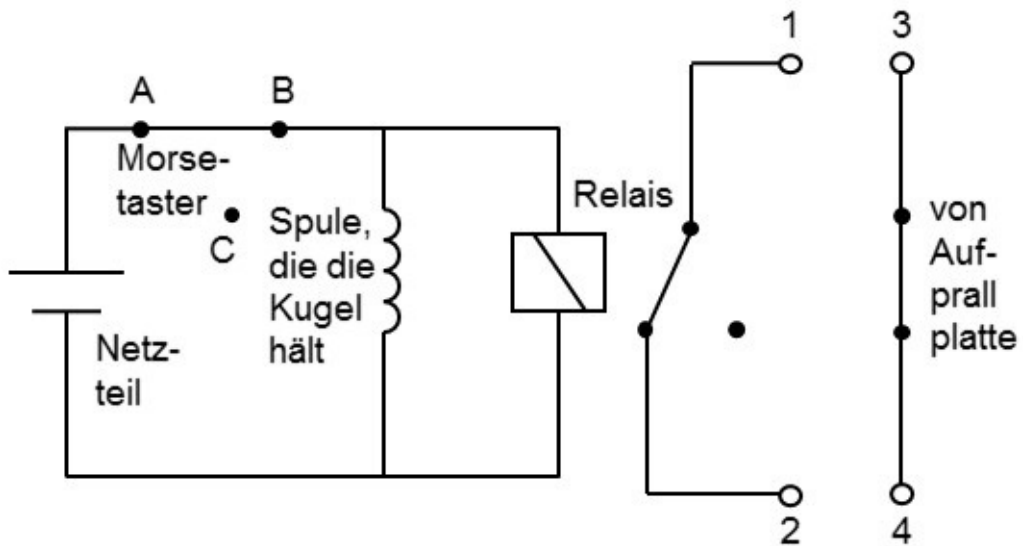


Schaltskizze 3 (nach Aufprall)

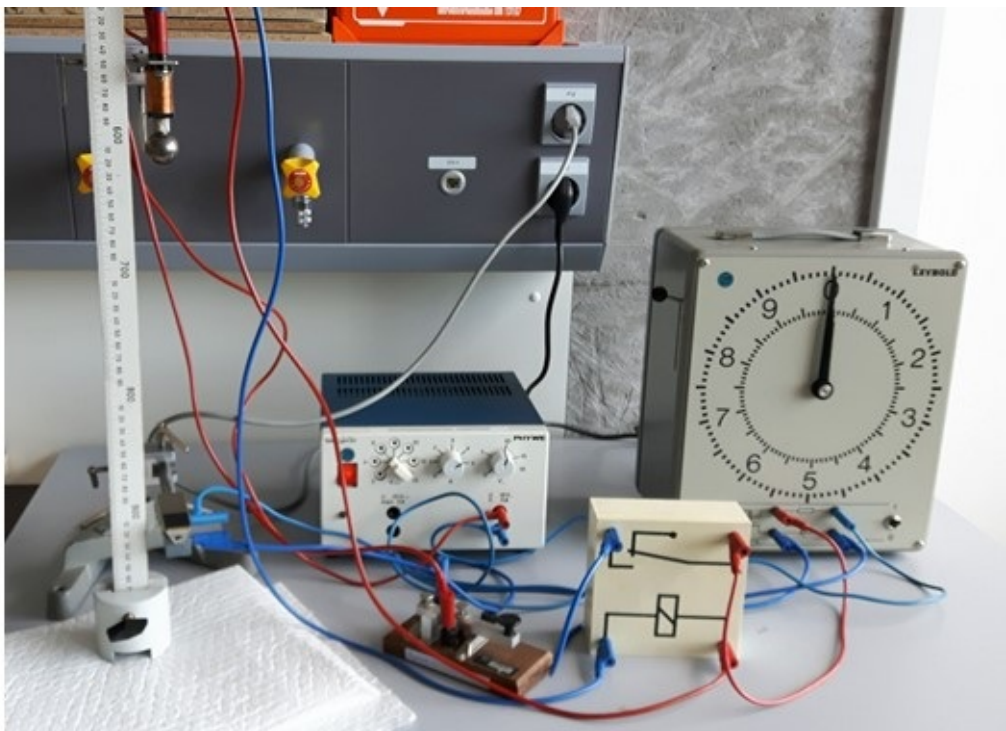
Der Stromfluss muss auch durch die Halterungsspule. Wieso ist die Kugel dann heruntergefallen? Das Netzgerät war so eingestellt, dass die Kugel gerade gehalten wird mit der Spannung vom Netzgerät allein über der Halterungsspule. Muss sich die Spannung auf beide Spulen aufteilen, sinkt der Strom und reicht in der Halterungsspule nicht mehr aus. Die Spule in der Uhr kommt wohl mit geringerem Strom aus, ihren Schalter oben zu halten.

Der Kontakt 1/2 sollte also wirklich ganz geöffnet werden, nicht noch an einem Stromkreis hängen, sondern von dem Kreis, der die Halterung versorgt, entkoppelt werden. Aber das Ausschalten der Halterung mit dem Morsetaster muss den Kontakt 1/2 zeitgleich öffnen. Zum Entkoppeln habe ich ein Relais benutzt, wie auch auf den Fotos zu sehen. Jetzt startet die Uhr mit dem

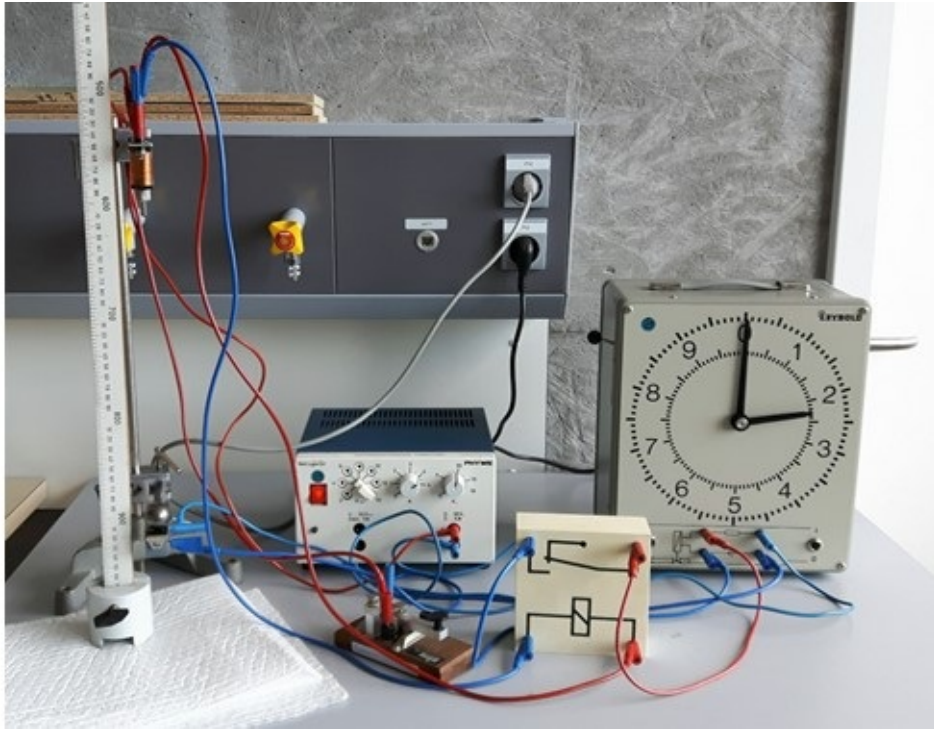
Betätigen des Morsetasters und stoppt mit dem Aufprall der Kugel auf die Platte.



Schaltskizze 4 (funktionierender Fallversuch)



vor dem Fall

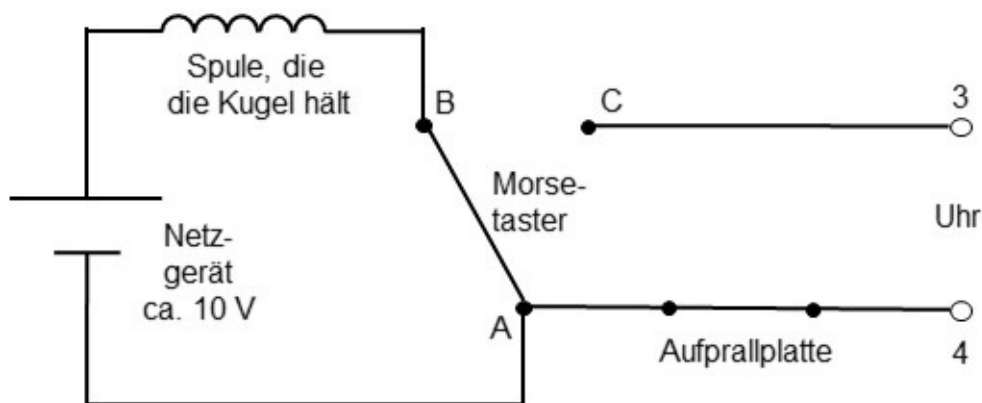


nach dem Fall

An der Uhr macht der kleine Zeiger in einer Sekunde eine ganze Umdrehung. Der große Zeiger würde für einen Umlauf 100 Sekunden brauchen und kommt bei diesem Versuch nicht zum Einsatz. Auf dem Foto haben wir eine Fallzeit von 0.23 Sekunden entsprechend einer Fallhöhe von 26 cm, die natürlich auch nachgemessen werden sollte. Ein ziemliches Gewurschtel mit der Verkabelung noch über das Relais, aber so tut der Versuch, was er soll; und einmal mehr ein Beispiel dafür, dass man das auf jeden Fall rechtzeitig vorher ausprobiert und überlegt haben sollte, ehe man einen Versuch zum Einsatz bringt.

Die Geschichte mit der Uhr hat bereits eine Fortsetzung bekommen. Im Schrank befinden sich auch zwei Ordner mit der Aufschrift Leybold Gerätekartei, die von ca. 1980 stammen. Sahen beim Einarbeiten in die Physiksammlung lange nicht so aus, als ob das Anschauen lohnt. Von vielen Geräten fanden sich einzelne lose Bedienungsanleitungen und von anderen

wurden die Anleitungen eben verloren geglaubt. Die Gerätekartei enthält auch anscheinend Karten zu allen Geräten, die der Hersteller damals im Angebot hatte, und von denen wir die meisten sowieso nicht haben. Dann habe ich jedoch zur Identifizierung, was und wozu das ist, von Teilen, die in diesem Buch nicht erwähnt sind, doch mal langsamer darin geblättert und zufällig auch die Bedienungsanleitung der Uhr gefunden. (Manchmal findet man Gebrauchsanweisungen von älteren Geräten im Internet, hat dort aber oft auch kein Glück.)



Schaltskizze 5 (einfachere Schaltung zur Uhr für den Fallversuch)

Ohne es vorher selber probiert zu haben und gemerkt zu haben, dass das gar nicht so einfach ist, hätte ich die genannten Anschlussmöglichkeiten nicht so sorgfältig gelesen und für so wertvoll gehalten. Das Schaltschema auf der Uhr hatte mir irgendwie suggeriert, dass bei einem Ein- und einem Ausschalten für eines das Kontaktpaar 1/2 und für das andere das Kontaktpaar 3/4 genutzt werden muss. In der Bedienungsanleitung der Uhr fand sich nun eine Möglichkeit, den Fallversuch ohne ein zwischengeschaltetes Relais aufzubauen. Man kann eben auch nur das Kontaktpaar 3/4 nutzen (die Verbindung 1/2 bleibt immer offen). Und die beiden "Schalter" müssen nicht auf völlig getrennten Wegen kommen, sondern in diesem Fall lassen sie sich in Reihe schalten (für den Fallversuch wie in Schaltskizze 5). Der Schalter links an der Uhr steht nach wie vor in der oberen Stellung. Wird der Morsetaster betätigt, wird der Stromkreis mit der Kugelhalterung geöffnet und der Uhrstromkreis geschlossen. Die Kugel fällt und die Uhr startet. Der Kontakt C spielt jetzt eine Rolle, der Taster ist bis zum Ende des Falls

gedrückt zu halten. Das Aufschlagen auf der Platte öffnet den Uhrstromkreis wieder, die Uhr stoppt. Jegliche Verbindung zum Netzgerät ist mit Betätigen des Tasters von B weg offen, so dass sich dort kein alternativer Stromweg ergeben kann.

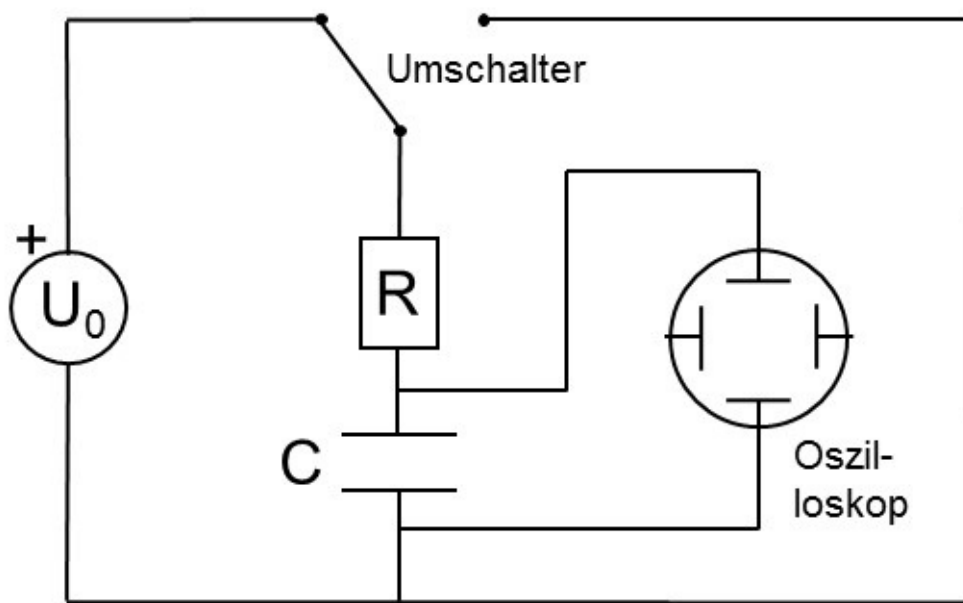
Ich finde, das war ein berechtigter Lerneffekt auch für Lehrer oder gerade für Lehrer. Die Zeit Herumzuprobieren und bei Schaltungen mit Zeichnungen genau zu überlegen, was passiert, ist es wert, wenn man sie sich nehmen kann. Und Bedienungsanleitungen sind gut, wenn das, was man wirklich braucht, einfach findbar drinsteht.

Manchmal geht's auch ohne

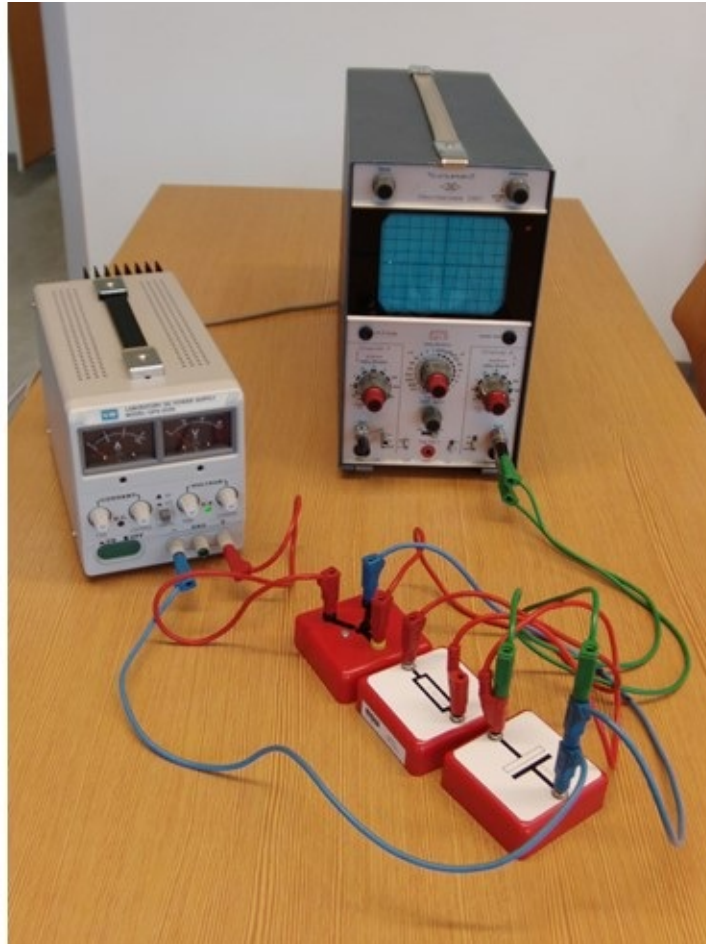
Kondensator-Aufladung

Dieser dann doch ganz schöne Versuchsaufbau ist an meiner früheren Schule entstanden. Das Problem bestand darin, dass kein Frequenzgenerator vorhanden war, um die Auf- und Entladung eines Kondensators zu zeigen. Kondensatoren im Gleichstromkreis standen allerdings durchaus auf dem Lehrplan. Es war üblich, die Auf- und Entladung über einen Widerstand mit zusätzlich einer Leuchtdiode im Stromkreis zu zeigen, die beim Ladestrom kurz aufleuchtete, und natürlich konnte man die Spannung am Kondensator mit einem Multimeter anzeigen. Soweit, so gut. Zufällig stand noch ein Oszilloskop in der Physiksammlung, das im vorhandenen Versuchekatalog jedoch nicht benutzt wurde (siehe auch Kapitel Tücken). Da auch im Mathematikunterricht die gegen eine waagerechte Asymptote strebenden Exponentialfunktionen in Aufgaben vorkamen, wäre es doch schön, wenn sich diese direkt im Versuch zeigen ließen.

Mit einem manuellen Schalter die anliegende Spannung an- und auszuschalten ist möglich. Die Schaltzeit ist dann jedoch lang gegen Zeitkonstanten von RC-Gliedern, wie man sie von Demonstrationen mit Rechteckspannungen aus Frequenzgeneratoren kennt. Aber so eingeschränkt sind wir nicht, was die machbaren Zeitkonstanten mit üblicherweise vorhandenen Widerständen und Kondensatoren angeht. Mit $R = 1 \text{ k}\Omega$ und $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$ bekommt man eine Zeitkonstante von 1 s. Das ist lang genug im Vergleich zu einer manuellen Umschaltzeit. Eine praktisch vollständige Auf- oder Entladung des Kondensators vollzieht sich in 5 s. Eine halbe Sekunde pro Kästchen als Einstellung für die Zeitachse am Oszilloskop passt dazu. Für die Gleichspannungsquelle reichen wenige Volt und die vertikale Achse des Oszilloskops wird dementsprechend eingestellt. Die folgende Schaltskizze zeigt den Umschalter in der Stellung, in der der Kondensator aufgeladen wird. Wird der Schalter umgelegt, entlädt sich der Kondensator. Darunter findet sich ein Foto meines Aufbaus.



Schaltskizze



*Aufbau aus Kondensator, Widerstand und Schalter
mit Spannungsquelle und Oszilloskop*

Wenn die Auf- bzw. Entladung mehrere Sekunden dauert, sieht man halt keine ganze Kurve in Form einer Exponentialfunktion auf dem Oszilloskop, sondern einen Leuchtpunkt, der sich über den Bildschirm bewegt. (Manche Oszilloskope leuchten etwas nach, da kann man doch von Nahem ganz gut schwach einen Teil der Kurve sehen. Aber es tut der Versuchsanordnung keinen Abbruch, wenn das nicht der Fall ist.) Ich habe mit dem Aufbau dann auch die Erfahrung gemacht, dass es gut ankam bei den Schülern und interessant gefunden wurde, dass sich auf dem Oszilloskopschirm verfolgen lässt, wie der Punkt die steigende oder fallende Exponentialkurve abfährt. Die Schüler sahen, dass da nach dem Umschalten ohne weiteres Eingreifen von allein etwas im Laufe der Zeit passiert.

Die genaue Bewegung des Leuchtpunkts auf dem Oszilloskop sieht man

natürlich in einer Klasse nicht von jedem Platz aus oder von den hinteren Reihen aus gut. Deshalb hier noch der Tipp dazu, z.B. nach Erklären der Theorie die Schüler zum Thema etwas lesen oder Aufgaben bearbeiten zu lassen und währenddessen kleine Gruppen nacheinander den Versuch von Nahem anschauen zu lassen.

Schonmal so gemacht?

In diesem Kapitel geht es nicht um Tücken oder Machbarkeit mit Vorhandenem, es sind nur kleine Anmerkungen, zwei Versuche marginal anders zu machen als Schulbuchbilder es vorgeben. Und wenn ich das für die eigene Know-how-Sicherung aufschreibe, kann ich es auch in dieses e-book mit hineintun.

Auftrieb auf der Waage

Zum Auftrieb findet man üblicherweise in Physikbüchern Abbildungen, die zeigen, wie ein Körper an einem Federkraftmesser hängt, einmal in Luft und einmal so, dass der Körper in eine Flüssigkeit eingetaucht ist. Im zweiten Fall zeigt der Federkraftmesser wegen des Auftriebs eine geringere Haltekraft an. Und klar errechnet man als Differenz zu vorher die Auftriebskraft. Der Körper sei in ein Becherglas mit Wasser eingetaucht. Er hängt aber nach wie vor an dem Kraftmesser, und man sollte auch einen Körper nehmen, der nicht schwimmt, sondern ohne Aufhängung zum Boden sinken würde. Aus welchem Nichts kommt diese wundersame Auftriebskraft oder muss auch das Wasser sie irgendwo hernehmen? Es lastet entsprechend schwerer auf der Unterlage, wie wir sehen werden. Im Physikbuch von Höfling findet sich dazu folgende Aufgabe:

Ein Körper hängt an einem Kraftmesser, der Kraftmesser zeigt die Gewichtskraft 10 N an. Auf einer Waage steht eine mit Wasser gefüllte Schale. Die Waage zeigt die Gewichtskraft 20 N an. Der Körper wird nun - an dem Kraftmesser hängend - vollständig in das Wasser eingetaucht. Der Kraftmesser zeigt nach dem Eintauchen 6 N an. Welche Kraft zeigt nun die Waage an?

Die Antwort ist natürlich 24 N. Und theoretischerweise ist hier eine Waagenanzeige in Newton angenommen. Reale Waagen zeigen in Gramm oder Kilogramm an, so dass noch mit dem Faktor 9.81 in Newton umgerechnet werden muss zum Gegenrechnen mit der Anzeige eines Kraftmessers. Im Folgenden Fotos von einem solchen Versuch (die Werte sind andere als in der Aufgabe, aber man könnte ja die Zahlen in der Aufgabe dem eigenen Versuch anpassen).



Aluminiumklotz an Federkraftmesser in Luft



Gefäß mit Wasser auf der Waage



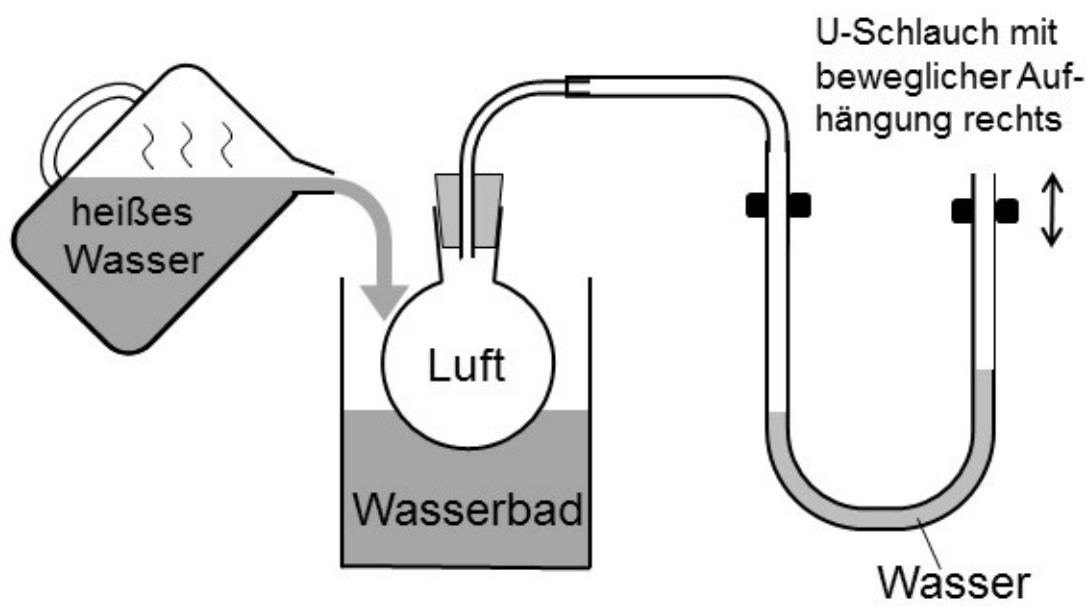
mit Klotz ins Wasser abgesenkt

Im Physikbuch Dorn/Bader wird eine Versuchsanordnung mit dem Flüssigkeitsglas auf einer Waage gezeigt. Allerdings ist hierbei das Glas als Überlaufgefäß ausgelegt und randvoll gefüllt, bevor der Körper eintaucht. Es wird außerdem ein Körper verwendet, der schwimmt. Er taucht also nur zum Teil ein und der Federkraftmesser zeigt schließlich Null. Die dem Körpergewicht entsprechende Wassermenge ist durch den Überlauf in ein Auffanggefäß neben der Waage geflossen, so dass die Waage bei derselben Anzeige geblieben ist. Das ist gut, um das Archimedische Prinzip beim Schwimmen nachzuweisen, dass nämlich ein schwimmender Körper soviel Wasser verdrängt wie seinem Gewicht entspricht, aber eigentlich ein anderer Versuch als mit der oben wiedergegebenen Aufgabe verlangt, dass auch ein im Wasser hängender Körper mit soviel Gewicht im bzw. auf dem Wasser liegt, wie der Wassermenge seines Volumens entspricht, und dieser Gewichtsanteil jetzt mit auf die Unterlage drückt statt an der Aufhängung zu ziehen. Hat man kein Überlaufgefäß und möchte auch seine Waage nicht beim Randvollfüllen eines Becherglases nass machen, kann man auch den Versuch mit dem schwimmenden Körper mit einem nicht randvoll gefüllten

Becherglas, sondern mit genug Platz im Glas nach oben machen. Die Anzeige der Waage steigt dann beim teilweisen Eintauchen mit dem Steigen des Wasserspiegels.

Gasthermometer denkbar einfach

Für den Demonstrationsversuch des Gasthermometers muss ein abgeschlossener Kolben mit Luft darin erwärmt werden. Dafür befindet sich dieser in einem Wasserbad. In dem Schulbuch, in dem ich eine Abbildung des vollständigen Versuchsaufbaus gefunden habe, steht das Glas mit dem Wasserbad über einem Bunsenbrenner, der zum Aufheizen dient. Zunächst habe auch ich den Versuch so nachgebaut. Vielleicht lag es an der Gestellaufgabe, die das Glas hielt, oder meiner als Physikerin und eben nicht Chemikerin mangelnden Erfahrung mit Bunsenbrennern, es war einfach mühsam und dauerte lange, auf diese Weise Wasser zu erwärmen. Und alles was benötigt wird, ist heißes Wasser. Für einen anderen Versuch mit Wasser verschiedener Temperaturen hatte meine Kollegin gerade einen zuhause nicht mehr benötigten Wasserkocher mitgebracht. So lassen sich durch Zusammenschütten von im Wasserkocher erhitztem Wasser mit solchem aus dem Hahn natürlich auch verschiedene Wassertemperaturen herstellen. Und so ist die Durchführungsvariante entstanden, beim Gasthermometer das Wasserbad zunächst nur teilweise mit Wasser aus dem Hahn zu füllen und dann welches aus dem Wasserkocher dazuschütten. Die Temperaturänderung ist so deutlich schneller und die Handhabung des Versuchs weniger umständlich als mit dem Bunsenbrenner. Auf die gleiche Weise kann man im Kühlschrank gelagertes kaltes Wasser für eine Abkühlung dazuschütten oder, sofern ein Eisfach z.B. in einer Küchenecke im Lehrerzimmer zur Verfügung steht, Eiswürfel benutzen. In der folgenden Zeichnung ist der Aufbau wiedergegeben. Es sollte noch ein Kontrollthermometer ins Wasserbad getaucht sein. Noch als Anmerkung und Nachtrag: Für eine Prinzip- bzw. Empfindlichkeitsdemonstration braucht der Kolben mit der Luft übigens gar nicht in ein Wasserbad getaucht zu werden. Es reicht, ihn mit den Händen gut umschlossen zu berühren.



Versuch Gasthermometer mit heißem Wasser aus dem Wasserkocher

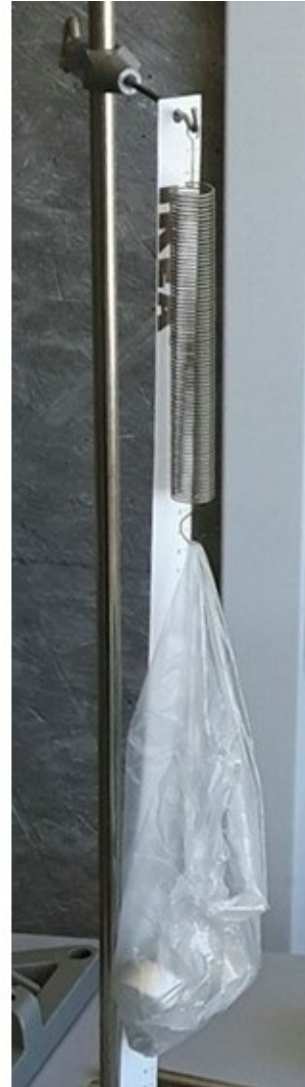
Was geht günstig?

Teelichter für den Hooke-Versuch

Zu gutem Physikunterricht gehört, dass Schüler wenigstens ab und zu Experimente selber machen. An manchen Schulen gibt es dafür sogenannte Laborstunden in Halbklassen, entsprechend vorhandene Ausstattung und eine Kartei der Schülerversuche. Wo das nicht der Fall ist, so wie an meiner Schule derzeit (noch?), ist es das Bemühen wert, Schülerversuche in den Unterricht einzubauen. Das offensichtliche Problem ist, dass alle Utensilien in fünf- bis siebenfacher Anzahl benötigt werden, um eine Klasse von etwa zwanzig Schülern Experimente zumindest in Dreier- oder Vierergruppen, wenn schon nicht wie idealerweise in Zweiertteams, machen lassen zu können.

Das Hookesche Gesetz bietet einen ungefährlichen Schülerversuch und auf der Klassenstufe 11 kann man ihn gleich mit der Mathematik verbinden, indem zur Auswertung das Verfahren der linearen Regression eingesetzt wird. Für einen Demonstrationsversuch waren in der Physiksammlung offensichtlich einige kleine Gewichte geeignet, die sich schön mit Haken untereinander hängen ließen an einer Feder. Federn waren bereits in mehrfacher Anzahl vorhanden. Meine Kollegin hatte sie bereits im Hinblick auf Schülerversuche gekauft, zwei verschiedene Härten, je sechs Stück. Nur von den kleinen Gewichten mit Haken und Ösen sind nur acht da und auch sonst keine Gewichte in passender Anzahl und Staffelung für Schülerversuche zum Hookeschen Gesetz. Man braucht pro Versuchsaufbau acht bis zehn Gewichte in einer Größenordnung um 20 g. Sollte man jetzt suchen, ob es bei einem Lehrmittelvertrieb die Gewichte mit Haken noch gibt und etwa 50 gleiche kaufen? Das würde vermutlich teuer und es gibt vorrangigere Anschaffungen für die Sammlung. Was wir brauchen sind eigentlich nur Dinge etwa in der Größenordnung dieser Gewichte, die genormt gleich schwer sind. Wo gibt es so etwas vielleicht im Alltag? Es ging gerade auf Weihnachten zu, als ich mir diese Frage stellte, und so kam ich auf Teelichter. Haben Teelichter hinreichend genau die gleiche Masse? Ja, solche von derselben Sorte schon. Teelichter haben allerdings keine Haken und Aufhänger. Nun, wichtig ist nicht, in welcher Anordnung die Gewichte an der Feder hängen, sondern nur, welches Gesamtgewicht jeweils dranhängt. Die Ästhetik leidet jetzt eventuell ein bisschen, der Physik tut es jedoch keinen Abbruch. Hängen wir einfach eine kleine Plastiktüte an die Feder, in die man

nach und nach die Teelichter als Gewichte hineintun kann. So erforderte das Ermöglichen des Schülerversuchs zum Hooke'schen Gesetz in dieser Situation lediglich den Kauf einer Großpackung Teelichter.



Demoversion mit Gewichten und Schülerversion mit Teelichtern

Fazit zum Material: Stativmaterial sollte genug vorhanden sein, damit alle Schülergruppen die Federn aufhängen können. Falls nicht, wäre zu überlegen, ob das nicht die Anschaffung lohnt, da man es für viele Aufbauten verwenden kann. Sonst überlegen, wie man sich mit ein paar Schraubzwingen, Brettern und Haken aus dem Baumarkt behelfen kann. Bei Einkäufen dieser Art ist vorher zu erfragen, ob die Schule die Ausgaben erstatten kann. Meist ist das unkompliziert möglich. Die Federn sind der Teil des Versuchs, die die

Investition beim Lehrmittelvertrieb wert sind. Aber man muss eben nicht den kompletten Versuch in mehrfacher Ausfertigung kaufen; hier kann man sich für die dranzuhängenden Gewichte schon etwas einfallen lassen.

Alt kann anschaulicher sein

Schwefelstaubbahn

Für die gleichförmige und die gleichmäßig beschleunigte Bewegung hat man in der Regel eine Luftkissenbahn. Die Beschleunigung eines Gleiters darauf erreicht man, indem man den Gleiter mit einer Schnur über eine Rolle am Ende der Bahn mit einem Gewicht verbindet, das man dann fallen lässt und so den Gleiter anzieht. Oder man kann die Bahn einfach leicht schräg stellen. Die Luftkissenbahn hat auch den Vorteil, dass sie sich ebenfalls zur Demonstration der Impulserhaltung bei elastischen und inelastischen Stößen von Gleitern eignet. Aber zurück zur beschleunigten Bewegung. Man sollte die Beschleunigung so moderat einstellen, dass man im Gegensatz zum freien Fall von Dingen aus der Hand bis auf den Boden das Schnellerwerden sehen kann. Zum Messen an der Luftkissenbahn dienen Lichtschranken. Diese messen die Durchfahrtszeit von auf den Gleitern montierten Aufbauten definierter Länge und somit die Geschwindigkeit. Übliche Systeme bieten zwei Lichtschranken mit Anschlüssen zum Auslesen per Computer. Während eines Versuchslaufs kann man also an zwei Punkten der Bahn die Geschwindigkeit messen. Für Messungen zum quantitativen Auswerten ist das auch auf jeden Fall zu empfehlen. Ich möchte hier gerade mehr auf die direkte Geschwindigkeitsmessung hinaus, die komplette Weg-Zeit-Funktion kann man natürlich mit dem Ultraschallsensor aufzeichnen.

In unserer Physiksammlung findet sich außer der Luftkissenbahn noch ihre Vorgängerin, die Schwefelstaubbahn. Auf ihr markiert ein rollender Wagen mit fester Frequenz Streifen. Die Streifen sind schmaler und liegen dichter beieinander, wenn der Wagen langsamer fährt, und sind breiter und liegen weiter auseinander, wenn er schneller fährt. Nur aus Neugier für altes Gerät hatte ich das einmal ausprobiert. Zum Glück waren beim Vorfinden der Bahn im Schrank die Streifen vom letzten Lauf noch gerade erkennbar, so dass ich eine Idee bekam, was man sehen soll. Dann wollte ich einmal in einer überblickartigen Stunde nur das Phänomen Beschleunigung zeigen, ohne quantitativ auswertbare Messungen. Und weil es weniger aufwändig war, nur einen Wagen mit Schnur über die Rolle und Gewicht daran auf die Schwefelstaubbahn zu setzen als die Luftkissenbahn mit Gebläse hervorzuholen, Lichtschranken aufzusetzen und anzuschließen sowie den Computer hochzufahren und das Programm auf das Auslesen zu initialisieren,

nur um einmalig den qualitativen Effekt zu zeigen, habe ich in diesem Fall eben die Schwefelstaubbahn verwendet. Der Effekt kam bei den Schülern überraschend gut an und sie wollten gleich durch eigenes Diskutieren klarstellen, was das Breiterwerden des Streifenmusters bedeutet. Die Bewegung hat eben im wahrsten Sinne des Wortes Spuren hinterlassen, die man nachträglich in aller Ruhe analysieren kann. Dabei ist auch das allmähliche Schnellerwerden festgehalten, nicht nur die Geschwindigkeiten zu zwei Zeitpunkten. Die Verteilung des Pulvers auf der Bahn ist nicht nur eine Zahl im Computer. Wie man es früher gemacht hat, könnte man die Streifen auch auszählen, so ziemlich alle für eine Zeit zwischen einem Punkt am Anfang und einem anderen am Ende der Bewegung für die Zeit, die es für diesen Weg gebraucht hat, wenige Streifen um jeweils einen dieser Zeitpunkte herum mit Messung von deren Breite zur Bestimmung der Geschwindigkeiten. Bei der Auswertung liegt sicherlich eine Schwierigkeit darin, dass die Streifen nicht plötzlich, sondern stets allmählich breiter werden. Das Auswerten ist hier so eine Sache, für die man sicher mit Muße sich Erfahrung aneignen und Geschick entwickeln muss. Mein Fazit ist erst einmal, da wir nicht unter Lagerplatzmangel leiden, behalten wir die Schwefelstaubbahn und gelegentlich hole ich sie wieder hervor.



Schwefelsstaubbahn

Wie eine Schwefelstaubbahn funktioniert, wusste ich auch nicht, bis ich eben in unserer Physiksammlung auf sie gestoßen bin. Sie funktioniert nach demselben Prinzip wie die Spurenplatte. Genutzt wird die Wechselfspannung

aus der Steckdose. Durch einen zwischengeschalteten $1\text{M}\Omega$ -Schutzwiderstand ist sie berührungsungefährlich. Die Räder des Wagens rollen auf einer Metallschiene, an der ein Pol der Spannung angeschlossen ist. Die Bahn zwischen den Rädern besteht aus isolierendem Kunststoff. Unter dem Wagen hängt ein Kontaktstreifen, der auf der Bahn fast schleift. Die Bahn ist mit dem anderen Pol der Spannung verbunden. Vor dem Versuch wird die Bahn gleichmäßig mit Schwefelpulver bestreut. Je nach Polarität der Spannung wird dieser Schwefelstaub von dem unter dem Wagen hängenden Kontaktstreifen angezogen bzw. abgestoßen, so dass er jede Halbwelle auf der Bahn liegenbleibt. Wieso Schwefel elektrisch ist bzw. sich gern in eine Richtung elektrisch auflädt, dem könnt ihr selber mal nachgehen. Bei der Netzfrequenz von 50 Hz beträgt die Zeit, die der Wagen beim Fahren von einem hellen zum folgenden dunklen Streifen gebraucht hat, 10 ms. Im Bild ist der Wagen durch das fallende Gewicht von rechts nach links beschleunigt worden.

Schätze

Statik-Lehrgerät



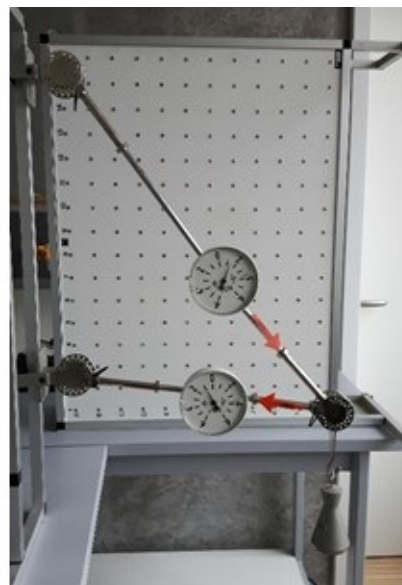
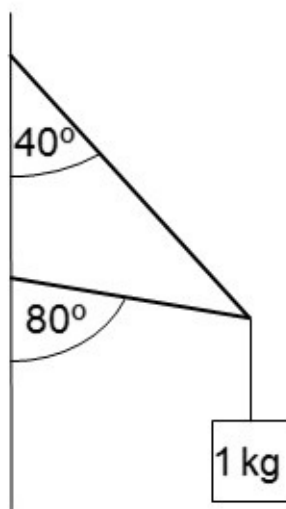
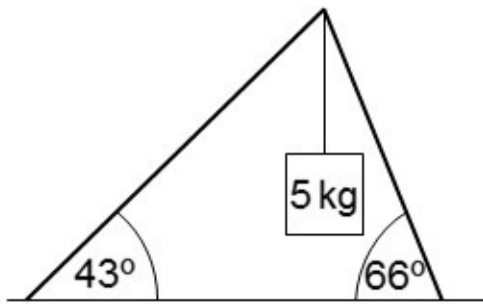
Koffer Statik-Lehrgerät

Dieser Bausatz ist offenbar ein historischer Schatz. Das Gerät wird auf der Seite deerbe.com unter Technik und Photographica, Wissenschaftliche Instrumente, Laborgeräte geführt und ist im heutigen Lehrmittelkatalog so nicht mehr findbar. Dabei tut es wunderbar genau das, was jeder sich wünscht, der schon einmal versucht hat, Federkraftmesser in eine Seilkonstruktion einzufügen, um Teilkräfte anzuzeigen. Erstens können Seile und Federkraftmesser nur auf Zug und nicht auf Druck belastet werden und zweitens gibt ein Aufbau wie auf dem folgenden Bild gezeigt nur eine sinnvolle Demonstration, wenn das eigentlich angehängte Gewicht recht groß gegenüber dem Eigengewicht der Kraftmesser ist.



*Figur, die wie Spiderman an zwei Fäden hängt
(in das Stofftier hier sind Münzen als Gewicht eingenäht)*

Das Statik-Lehrgerät bietet die Möglichkeit, ein Gerüst aus Stangen aufzubauen, die auf Zug oder Druck belastet werden. Vor dem Einhängen einer Last jedoch, deren Wirkung auf die Konstruktion angezeigt werden soll, lässt sich an allen Kraftmessern das Eigengewicht des Gestells herausnullen. Im Mathematikunterricht in der Vektorgeometrie werden typischerweise Aufgaben zu solchen Konstruktionen gestellt, bei denen die Kräftezerlegung ermittelt werden soll. Der hier vorgestellte Bausatz-Koffer ist wirklich durchdacht zur Demonstration.

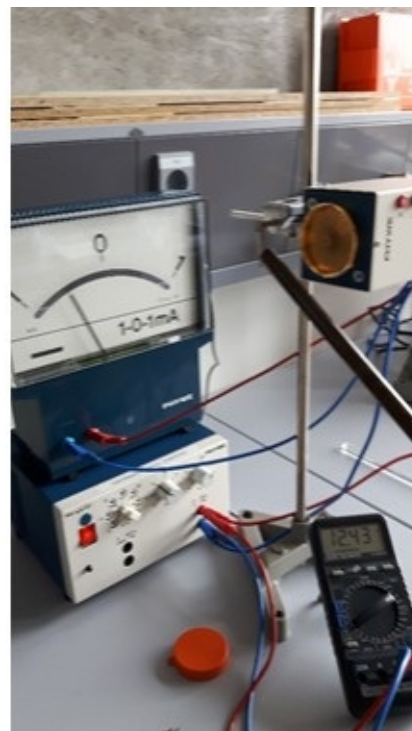


*Zwei Konstellationen aus Mathematikaufgaben,
bei denen jeweils die Kräfte in den beiden Streben zu berechnen sind,
und Realisationen mit dem Statik-Messgerät (Anzeigen sind $\times 10$ N)*

Elektrofeldmeter

Dass es das gibt, habe ich erst mit der vorgefundenen Physiksammlung gelernt. Ob man es neu kaufen würde, ist fraglich, aber wenn es da ist, ist es ein Schatz. Besonders für die Reibungselektrizität, finde ich. Allseits bekannt ist der einfache Versuch, einen Stab mit einem Tuch oder Fell zu reiben und dann den Stab in die Nähe der Kugel oder Platte oben an einem Elektroskop

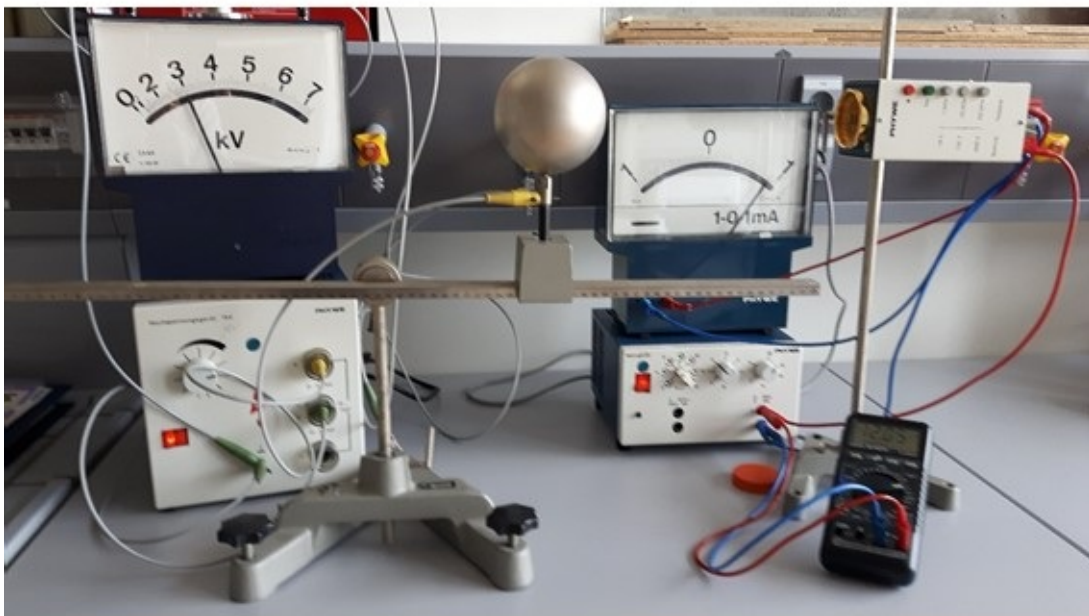
zu bringen oder diese sogar zu berühren. Das Elektroskop schlägt aus, zum Nachweis der Ladung auf dem Stab. Dann fragen die Schüler auch schon, ob denn der Stab nun positiv oder negativ aufgeladen wurde, und man muss passen, da das Elektroskop das Vorzeichen der Ladung nicht anzeigen kann und außerdem ausholend erklären, dass ein positiv oder ein negativ geladener Stab, Berühren oder nicht Berühren, zu derselben sichtbaren Wirkung führen, nämlich dass der Zeiger des Elektroskops ausschlägt. Ich möchte den Elektroskopversuch keineswegs abwerten, ist es doch ein Ladungsnachweis mit einem genial einfachen, weil rein mechanischen Messgerät. Das Elektrofeldmeter ist eine Blackbox, wo man nicht sieht, was darin geschieht. Aber zur Anzeige, ob ein in die Nähe gehaltener Körper positiv oder negativ aufgeladen wurde, kann es dann gerade im Anschluss an die Versuche mit dem Elektroskop eingesetzt werden. Das Elektrofeldmeter zeigt das elektrische Feld vorzeichenrichtig an. Die Ausgabe erfolgt allerdings in Form eines Stroms entsprechender Richtung. Für einen Demonstrationsversuch eignet sich ein Zeigeramperemeter mit mittigem Nullpunkt. Die folgenden Fotos zeigen, dass beim Reiben ein Plexiglasstab positiv und ein Hartgummistab negativ aufgeladen wurde.



Aufladung vom geriebenen Stäben angezeigt mit dem Elektrofeldmeter

Ein weiterer einfacher Demonstrationsversuch mit dem Elektrofeldmeter zeigt

den Abfall des elektrischen Feldes mit dem Abstand von einer aufgeladenen Kugel. Die Kugel wird an Hochspannung gelegt. Der Abstand zum Elektrofeldmeter wird entlang einer Schiene definiert verändert. Die Kugel mit Verbindung zur Hochspannung auf der einen Seite und das Elektrofeldmeter mit seiner Versorgungsspannung und seinem Anzeigegerät auf der anderen Seite sind "kabelmäßig" völlig getrennt. Man weist also nach, da ist eine Wirkung von der aufgeladenen Kugel in der Luft, obwohl man sie ohne Messgerät nicht sehen kann. Die Abhängigkeit $E \sim r^2$ kann natürlich am Versuch auch quantitativ aufgestellt werden.



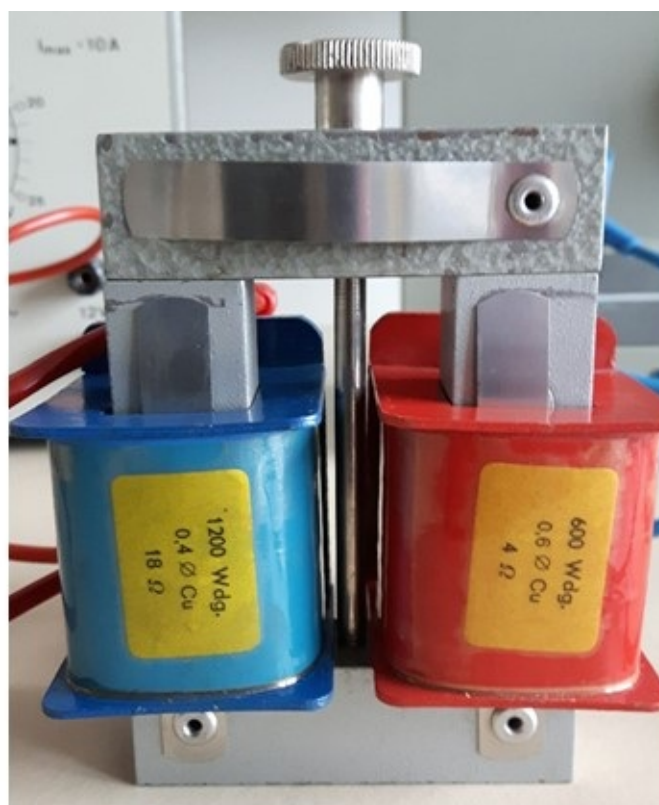
Feld einer geladenen Kugel angezeigt mit dem Elektrofeldmeter

Das Elektrofeldmeter arbeitet über Trennung von Ladungen zwischen Sensorplatten und Gegenplatte durch Influenz vom externen elektrischen Feld. Die Ladung der Gegenplatte wird als Spannung gemessen. Daher kann das externe elektrische Feld richtungs- bzw. vorzeichenrichtig abgebildet werden. Ein vorgeschaltetes Flügelrad zerschneidet als Chopper das Eingangssignal und im Gerät befindet sich eine zugehörige Verstärkerschaltung. Genauere Erklärungen der Funktionsweise eines Elektrofeldmeters sind im Internet zu finden, für die Bedienung im Schulversuch jedoch nicht relevant. (Das Multimeter, das jeweils mit im Bild ist, dient nur der Kontrolle der Versorgungsspannung.)

Auf Anhieb gewusst?

Wie man den Trafo für die einfachen Formeln vorführt

Hättet ihr auf Anhieb gewusst, wenn ihr nicht gerade in dem Thema drin seid, dass die einfachen Formeln, dass sich beim Trafo die Spannungen wie die Windungszahlen und die Ströme umgekehrt verhalten, gar nicht in jedem Fall so gelten? Insbesondere wenn vom Lehrplan vorgesehen ist, nur diese Verhältnisformeln zu zeigen und nicht Differenzialgleichungen für Schaltkreise zu lösen, ist bei einem kleinen Versuch Aufpassen bzw. vorher Ausprobieren geboten. Das Schulequipment bietet die Möglichkeit Spulenwindungszahlen verschieden zu kombinieren.

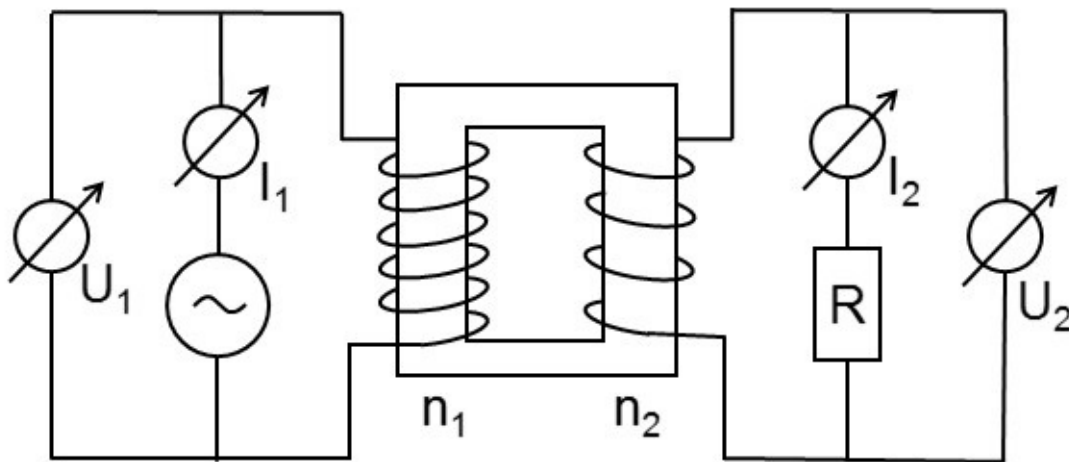


Joch mit zwei Spulen für Trafoversuche

(Die Anschlüsse der Spulen befinden sich auf der Rückseite.)

Wozu braucht man Transformatoren? Weil die von einer Quelle gelieferte

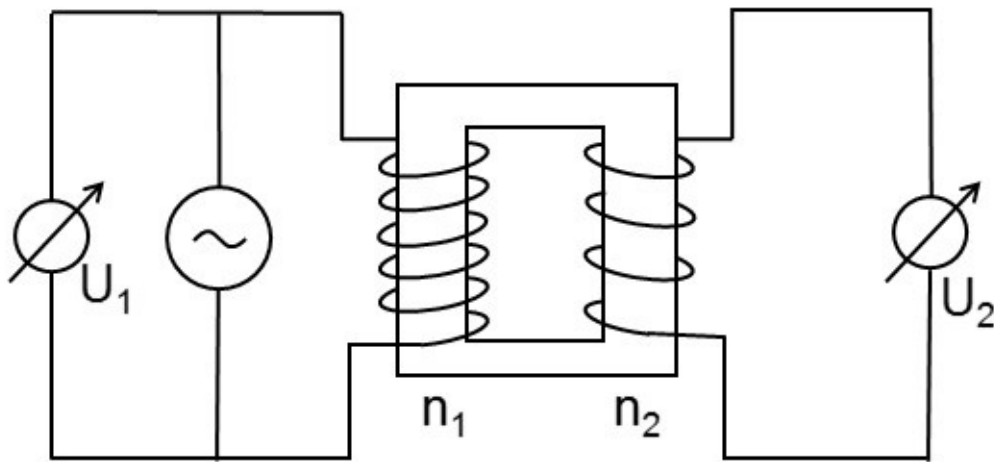
Spannung nicht die richtige ist, sondern ein Verbraucher eine andere Voltzahl benötigt. Realistischerweise und logischerweise ist die Idee für einen einfachen Demonstrationsversuch, die Primärspule an die Quelle anzuschließen und sekundärseitig einen Kreis mit einem Verbraucher (einem Widerstand) zu bauen. In beiden Kreisen werden dann noch Messgeräte für Spannung und Strom hinzugefügt. Und natürlich ist hier Wechselspannung zu nehmen. Mit den gemessenen Spannungen und Strömen sind die Effektivwerte gemeint (nachher in der Theorie rechnen wir mit Amplituden).



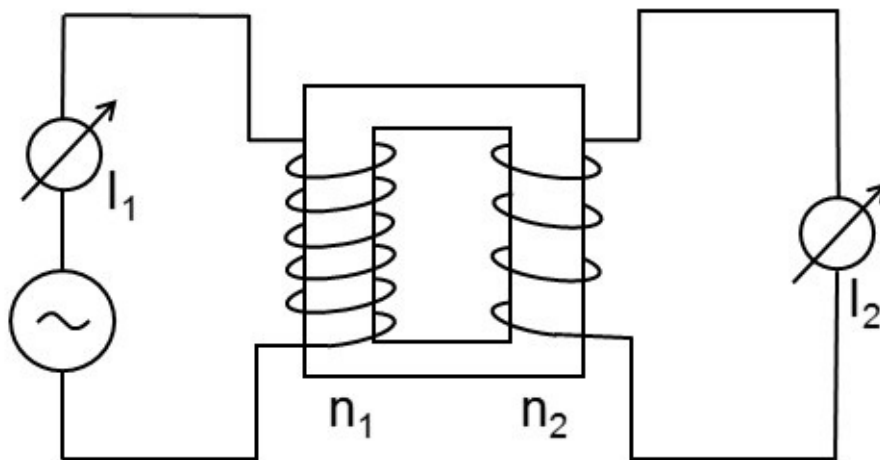
Trafo an Spannungsquelle primärseitig und mit Verbraucher sekundärseitig sowie Strom- und Spannungsmessgeräten

So bestätigen sich die Formeln $U_1/U_2 = n_1/n_2$ und $I_1/I_2 = n_2/n_1$ aber keineswegs. Man darf nicht Strom und Spannung gleichzeitig messen wollen und auch nicht irgendeinen Widerstand daranhängen. Klar, die Formeln fallen ins Auge. Aber man sollte in einem guten Physikbuch hier genau den Text dazu lesen. Im Schülerduden Abitur Physik steht z.B. “bei einem unbelasteten idealen Transformator” im Zusammenhang mit der Spannungsformel und “im Kurzschlussfall” bei der Herleitung der genannten einfachen Stromformel. Kenner werden jetzt wissen, dass man korrekterweise Phasenverschiebungen in beiden Kreisen zwischen Strom und Spannung zulassen und in eine Leistungsanpassung einbeziehen muss. Hier geht es jedoch darum, in einfachen Schulversuchen, das Verhältnis der Windungszahlen in den Verhältnissen der Spannungen und Ströme wiederzufinden. Und das geht genau wie mit den Schlüsselwörtern beschrieben. Für die Spannungsmessung hängen wir an die Sekundärseite nur das Spannungsmessgerät; ein Voltmeter

ist ein sehr großer Widerstand, da fließt also praktisch kein Strom. Für die Strommessung hängen wir an die Sekundärseite nur das Strommessgerät; ein Amperemeter ist ein sehr kleiner Widerstand, die Sekundärspule ist damit praktisch kurzgeschlossen. Im Rahmen eines Physikunterrichts, wo nur der Trafo vorgestellt werden soll ohne tiefgehende Rechnungen zu Wechselstromkreisen ist es kein Schummeln, den Spannungsversuch und den Stromversuch so nacheinander zu machen ohne Gründe dafür auszuführen. Aber um es als Lehrer machen zu können, muss man eben wissen, warum.

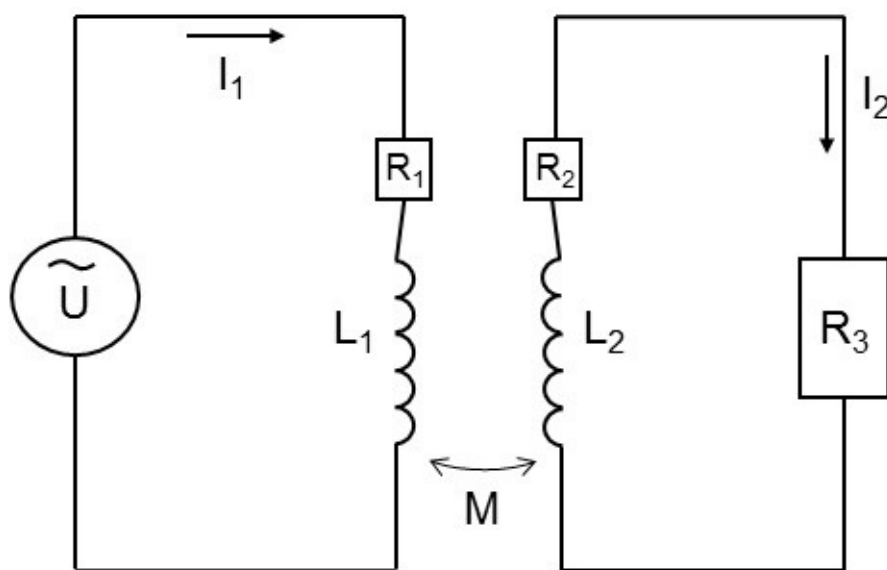


Trafobeschaltung zum Zeigen des Verhältnisses der Spannungen



Trafobeschaltung zum Zeigen des Verhältnisses der Ströme

Ich bin nicht so der Typ, der für Weiteres nach Praktikeranleitungen sucht, sondern eher der Theoretiker (siehe jedoch den Versuch "Transformator mit Last" auf ursaminor.jimdo.com/laborstunde). Und ich erinnere mich an eine wechselseitige Induktivität M aus dem Studium. Deshalb gestattet mir hier, den allgemeinen Fall von dieser theoretischen Seite aus zu behandeln und daraus die Legitimität der Grenzfälle (unbelastet bzw. kurzgeschlossen) zu diskutieren. In der Realität haben auch die Spulen ohmsche Widerstände, R_1 und R_2 in meinem Schema (oft stehen diese freundlicherweise drauf). In Reihe mit einem kleinen Verbraucherwiderstand kann das eine Rolle spielen. Beim Lösen der Gleichungen werde ich die Spulenwiderstände der Einfachheit halber doch wieder weglassen. M sei die wechselseitige Induktivität zwischen den Spulen, die durch das Joch vermittelt wird. R_3 sei der Lastwiderstand (Verbraucher).



Schaltskizze für die folgenden Rechnungen

U , I_1 und I_2 sind jetzt komplexe zeitabhängige Größen.
Im Primärkreis besagt die Kirchhoffsche Maschenregel:

$$U = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \quad (1)$$

Und im Sekundärkreis:

$$0 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} + R_3 I_2 \quad (2)$$

Jetzt $R_1 = R_2 = 0$ und $U = U_0 e^{i\omega t}$, $I_1 = I_{10} e^{i\omega t}$, $I_2 = I_{20} e^{i\omega t}$
 I_{10} und I_{20} sind komplex, aber zeitunabhängig.
Einsetzen in (1) und (2) liefert:

$$U_0 = i\omega L_1 I_{10} + i\omega M I_{20} \quad (1)$$

$$0 = i\omega L_2 I_{20} + i\omega M I_{10} + R_3 I_{20} \quad (2)$$

(2) kann nach dem Verhältnis der Ströme aufgelöst werden:

$$\frac{I_{20}}{I_{10}} = \frac{-i\omega M}{R_3 + i\omega L_2}$$

Und Beträge genommen ergibt:

$$\left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \frac{\omega M}{\sqrt{R_3^2 + \omega^2 L_2^2}}$$

Bei Strommessung interessiert $R_3 = 0$. Außerdem nehmen wir $M = \sqrt{L_1 L_2}$ an.
Und es ist $L_1 \sim n_1^2$ und $L_2 \sim n_2^2$. (Spulen haben gleiche Querschnittsflächen.)
Damit wird im Kurzschlussfall:

$$\left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

q.e.d.

Im Falle von $R_3 \rightarrow \infty$ wird $I_2 \rightarrow 0$. Das heißt nicht, dass I_1 auch Null sein muss. (2) sagt dann nichts mehr, da $R_3 I_{20} = \infty \cdot 0$ jeden Term $i\omega M I_{10}$ ausgleichen kann.

Als Ausgangsspannung U_2 wird dann $M dI_1/dt$ gemessen. Der Strom I_1 in der Primärspule induziert in der Sekundärspule eine elektromotorische Kraft, aber es fließt im unbelasteten (offenen) Fall kein Strom I_2 , der eine Gegeninduktion macht.

Aus (1) holen wir uns in diesem Fall $I_{10} = U_0/(i\omega L_1)$. Wir stellen U_2 auf:

$$U_2 = M \frac{dI_1}{dt} = i\omega M I_{10} e^{i\omega t} = i\omega M \frac{U_0}{i\omega L_1} e^{i\omega t}$$

U_0 ist hier U_1 , da der Primärkreis nur die Spule enthält.

Mit M und L_1 wie oben folgt:

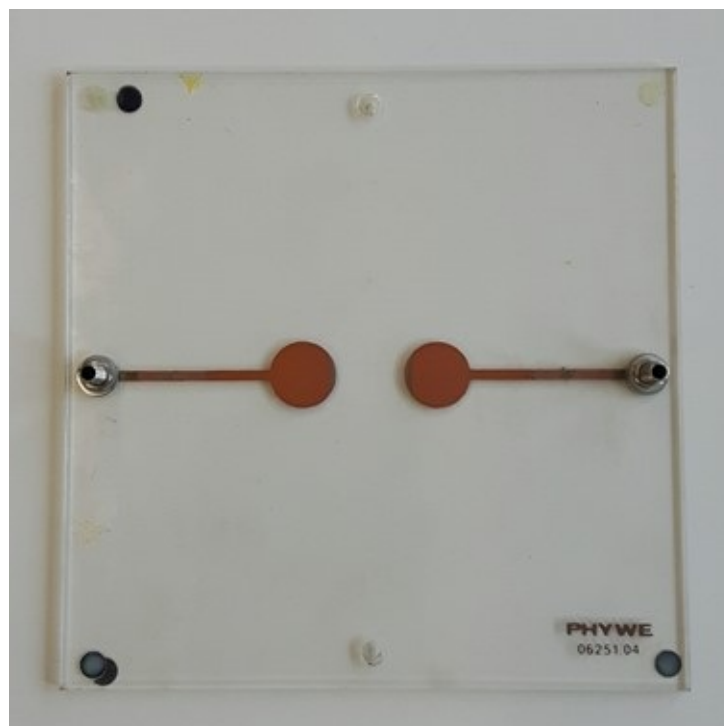
$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{M}{L_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

q.e.d.

Dann eben nicht

Es gibt aber auch Versuche, die wollen eben nicht klappen. Obwohl es angeblich Standardversuche sind, man eine Anleitung hat und andere sagen, dass das bei ihnen geht. Mag sein. Kein Bühnenkünstler nimmt eine Nummer ins Programm, die er beim Proben nicht hinbekommen hat. Das Publikum weiß das nicht und die Show ist gut. Bei Physikversuchen gibt es trotz gelungenen Proben immer noch genug "Vorführeffekte". Dafür muss man sich als Lehrer nicht schämen oder dabei nervös werden (obwohl schwer vermeidbar). Diese Momente vermitteln den Schülern einen Hauch Realismus über wissenschaftliche Experimente. Aber zurück zu Schulversuchen, die nicht gehen. In meiner Sammlung sind das z.B. das Abbilden elektrischer Feldlinien mit Grießkörnern und das Abbilden magnetischer Feldlinien für Leiterschleife und Spule mit Eisenfeilspänen.

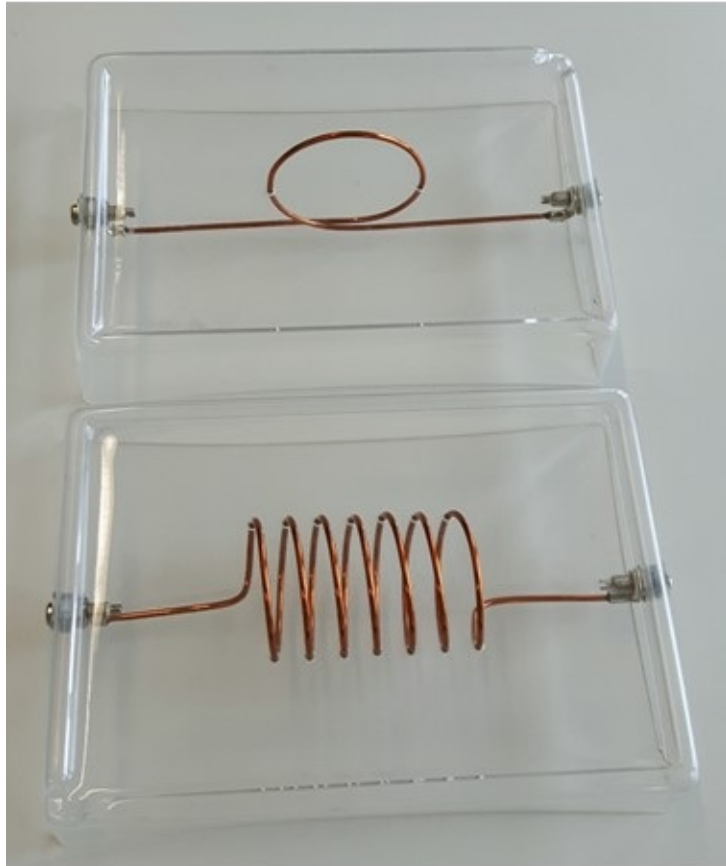
An die Elektroden vom folgenden Bild soll man eine mit dem Bandgenerator erzeugte Hochspannung anlegen. Man stellt eine Schale mit Rizinusöl darauf, in die Grießkörner getreut werden. Die Körner sollen sich entlang der Feldlinien, also hier entlang Bögen von einem kreisförmigen Pol zum anderen ausrichten.



Platte mit Elektroden

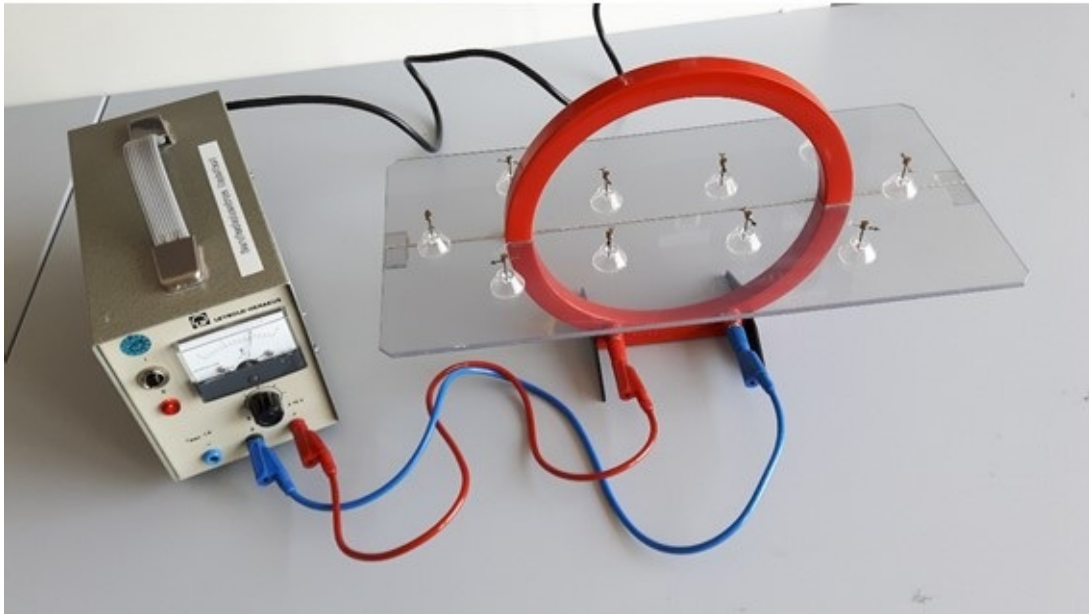
Da hat sich eigentlich nichts bewegt an Körnern, sich kein schönes Bild ergeben. Ich habe es mehrmals, auch mit Platten mit Elektroden verschiedener Form probiert. Mag sein, dass es daran liegt, dass in der Schule das Zeug wirklich sehr lange, viele Jahre vermutlich, im Schrank gestanden hat. Vielleicht sind die Elektroden oxidiert, das Öl etwas eingetrocknet und zähflüssig geworden und der Gieß hat Feuchtigkeit eingezeichnet. Das Material zu erneuern ist hier noch eine Option für einen nächsten Versuch hinter den Kulissen. Bis auf Weiteres gibt zu elektrischen Feldlinien eben keinen Versuch in meinen Stunden. Es muss nicht zu allem, was in Physik vorkommt oder zu lernen ist, ein Experiment geben.

Die Leiterschleife und die Spule mit wenigen Windungen und großen Abständen auf dem folgenden Bild sind in Ebenen aus Kunststoff eingelassen. Wenn Strom durch die Leiterschleife bzw. durch die Spule fließt, sollen Eisenfeilspäne darauf gestreut werden, um den Verlauf der magnetischen Feldlinien sichtbar zu machen.



in Kunststoffebenen einglassene Leiterschleife und Spule

Laut Anleitung braucht man einen hohen Strom, mindestens 15 A. Ich habe sogar ein Netzgerät verwendet, das das gerade leisten kann. Und die Kabel und Stecker wurden ganz schön warm dabei. Trotzdem war von einer einzelnen Leiterschleife bzw. von einer so lose gewickelten Spule mit wenigen Windungen das Magnetfeld nicht stark genug, die Eisenfeilspäne in deutlichen Mustern anzuordnen. Dann eben nicht. Stabmagneten sind stark genug, um mit Eisenfeilspänen Feldlinienbilder zu zeigen. Es gibt in der Sammlung noch eine andere Version von Leiterschleife (Bild) und Spule mit einer Platte in der Mittelebene. Kleine Kompassnadeln aufzustellen funktioniert mit diesen gut, um die Form der Magnetfelder sichtbar zu machen. Also zeige ich das Feld der Leiterschleife und der Spule mit den Kompassnadeln und die für die Eisenfeilspäne vorgesehenen Bauteile stehen im Schrank herum.



stromdurchflossene Leiterschleife mit Magneten

In jeder Sammlung steht etwas herum, das keiner oder keiner mehr benutzt. Auch das ist völlig normal. Einiges sollte man doch aufheben, weil man es vielleicht einmal in anderem Zusammenhang gebrauchen kann. Absoluter Kruscht kann bei einem Generalaufräumen allerdings weg.

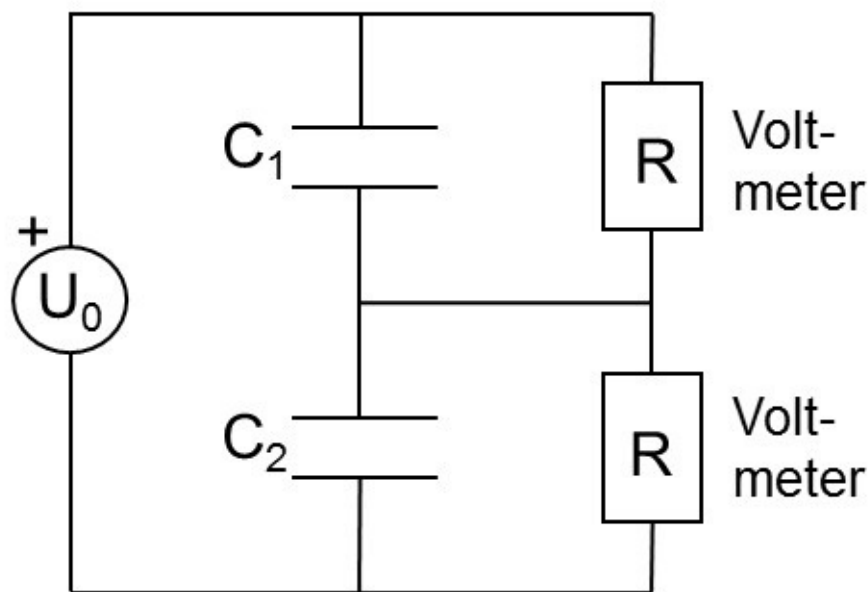
Worauf ich jedoch in diesem Kapitel eigentlich hinauswollte ist der Punkt, dass eventuell auch nach Ausprobieren manche Lehrbuchexperimente nicht gehen, d.h. nicht den gewünschten sichtbaren Effekt liefern. Bei dem einen in der einen Schule ist es dies, bei dem anderen woanders ist es das. That's life. Und in der Regel ein länger anhaltender status quo. Ich glaube, ich habe klargemacht, wie es ganz normal und in Ordnung ist, damit umzugehen.

Wie zeigt man eigentlich ... ?

Reihenschaltung von Kondensatoren

Bei den elektrischen Schaltungen behandelt man für gewöhnlich die Reihen- und die Parallelschaltung von Ohmschen Widerständen. Und dann folgen eventuell ebendiese Schaltungen mit Kondensatoren. Bei der Reihenschaltung von Widerständen kann man gut mit Voltmetern die Spannungen über den einzelnen Widerständen messen, um zu zeigen, dass sich die angelegte Spannung im Verhältnis der Widerstände aufteilt. Und es sei hier im ganzen Kapitel von Gleichspannung die Rede. Für die Reihenschaltung von Kondensatoren lernt man, dass sich die Spannung im umgekehrten Verhältnis der Kapazitäten aufteilt. Bauen wir also eine Reihenschaltung aus Kondensatoren, lassen eine angelegte Gleichspannung die Kondensatoren aufladen und schalten Voltmeter über die Kondensatoren, um die einzelnen Spannungen zu messen. Die angezeigten Werte sind nicht stabil. Mit zwei Voltmetern (wir nehmen sie als identisch in Bauart und Bereichseinstellung) zeigen nach einer Weile beide die gleiche Spannung an, obwohl Kondensatoren unterschiedlicher Kapazität verwendet wurden. Wird nur ein Voltmeter angeschlossen, kann man zusehen, wie die Anzeige auf Null herunterläuft. Was ist da los? Niederspannungsvoltmeter sind zwar große, aber Widerstände, die einen Stromfluss durch sie hindurch erlauben. Mit beiden Voltmetern ist bei Gleichspannung der Weg durch diese der einzige für einen Stromfluss. In diesem Zweig teilt sich die Spannung nach der Regel für Widerstände auf, also zu gleichen Teilen bei gleichen Widerständen. Die Kondensatoren laden sich entsprechend auf. Es gibt ja eine Leitung vom Punkt zwischen den Widerständen (Voltmetern) und der "Insel" zwischen den Kondensatoren. Dort fließt solange Strom, bis jeder Kondensator die richtige Ladung zur Spannung trägt. In dieser Konstellation tragen die Kondensatoren (wenn sie verschieden sind) jedoch nicht die gleiche Ladung, wie man es für die Reihenschaltung lernt. Die Insel muss nicht insgesamt neutral sein, mit gleich viel positiver Ladung auf einem wie negativer Ladung auf dem anderen Kondensator. Mit den beiden Voltmetern wurde die Schaltung wesentlich verändert und wir haben gar nicht mehr die bloße Reihenschaltung der Kondensatoren, an der wir messen wollten. Mit nur einem angeschlossenen Voltmeter (einem Widerstand) wird die Schaltung ebenfalls wesentlich verändert. Ein Widerstand schließt einen Kondensator kurz, der andere bildet aber weiterhin für Gleichstrom einen unendlichen Widerstand. Daher wird einfach der Kondensator ohne Voltmeter durch den Widerstand des

Voltmeter auf die angelegte Spannung aufgeladen. Zu Beginn kann sich eventuell der Kondensator mit Voltmeter, da dieses ja ein sehr großer Widerstand ist, etwa gemäß der Reihenschaltung der Kondensatoren aufladen. Aber dann wird er sich durch den Widerstand entladen, bis die gesamte angelegte Spannung auch an dem anderen Kondensator liegt und der Stromfluss durch das Voltmeter aufhört. So einfach geht es also nicht. Und bemerkenswerterweise vermeidet ein Handbuch, das wir zu Aufbauten mit einem Stecksystem von Elektrokomponenten haben, geflissentlich eine Reihenschaltung zweier Kondensatoren unterschiedlicher Kapazität.

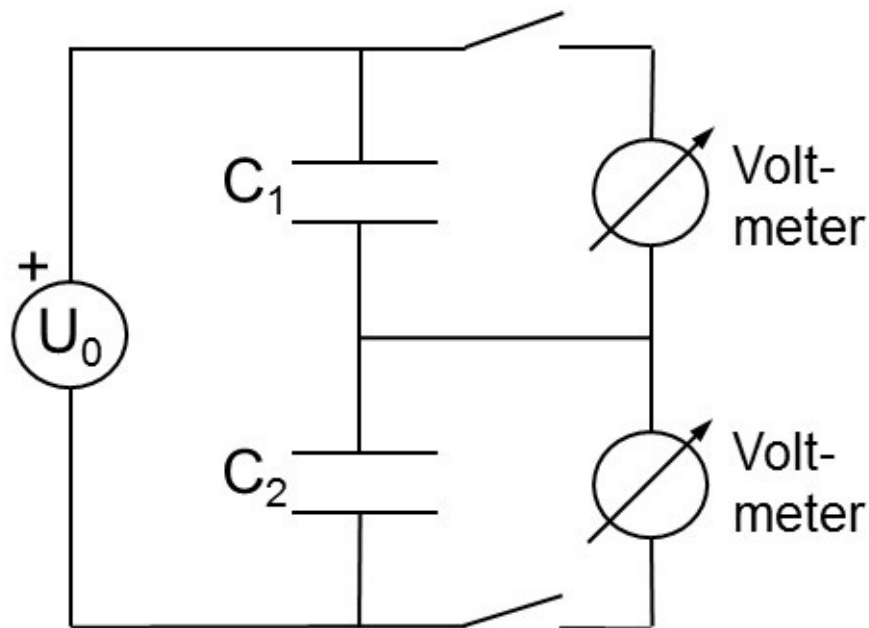


Kondensatorreihenschaltung mit fest angeschlossenen Voltmetern

Wie zeigt man nun aber Schülern, dass die Spannungsaufteilung in der Reihenschaltung von Kondensatoren dem gelernten Gesetz folgt? Soll man sagen, das kann man nur berechnen und der Logik der Rechnung müsst ihr glauben? Messungen bzw. Anzeigen auf Messgeräten sollten doch möglich sein und haben stets eine gewisse Überzeugungskraft.

Ein großer Widerstand in Kombination mit einem Kondensator bedeutet eine große Zeitkonstante, was man in den oben beschriebenen naiven Versuchen daran sah, dass die Anzeigen nicht sofort nach dem Einschalten der Quellspannung die Hälfte der angelegten Spannung bzw. Null anzeigten,

sondern in einem Tempo darauf zuliefen, bei dem man zuschauen kann. Dann messen wir doch nur kurz! Mein Vorschlag besteht darin, die Reihenschaltung von Kondensatoren mit beiden Voltmetern aufzubauen, aber in die Abzweigungen der Voltmeter Taster einzubauen, die den Stromfluss durch diese Wege zunächst nicht gestatten. Jetzt schalte man die Quellspannung an bzw. drehe sie hoch und lasse die Kondensatoren sich aufladen, was man natürlich so nicht sieht. Wenn man jetzt kurz einen Taster drückt, zeigt das zugehörige Voltmeter die richtige erwartete Spannung zum entsprechenden Kondensator (schnell schauen halt). Man kann die Taster nacheinander oder gleichzeitig drücken, das spielt keine Rolle. Aber nur kurz. Und bevor man einen Taster nochmals drückt, solle man die Anordnung zurücksetzen. Sonst kann durch die Vorgeschichte die Insel zwischen den Kondensatoren noch eine Netto-Ladung tragen. Das Netzgerät braucht man nicht auszuschalten, nur die angelegte Spannung auf Null herunterdrehen. Dann beide Taster solange gedrückt halten, bis beide Voltmeter Null zeigen, die Kondensatoren also entladen sind. Für die Wiederholung des Versuchs selbstverständlich mit nicht-gedrückten Tastern die Quellspannung wieder hochfahren.



*Kondensatorreihenschaltung mit Voltmetern über Taster
(die Taster sind hier durch Schalter symbolisiert)*

Plattenabstand verändern

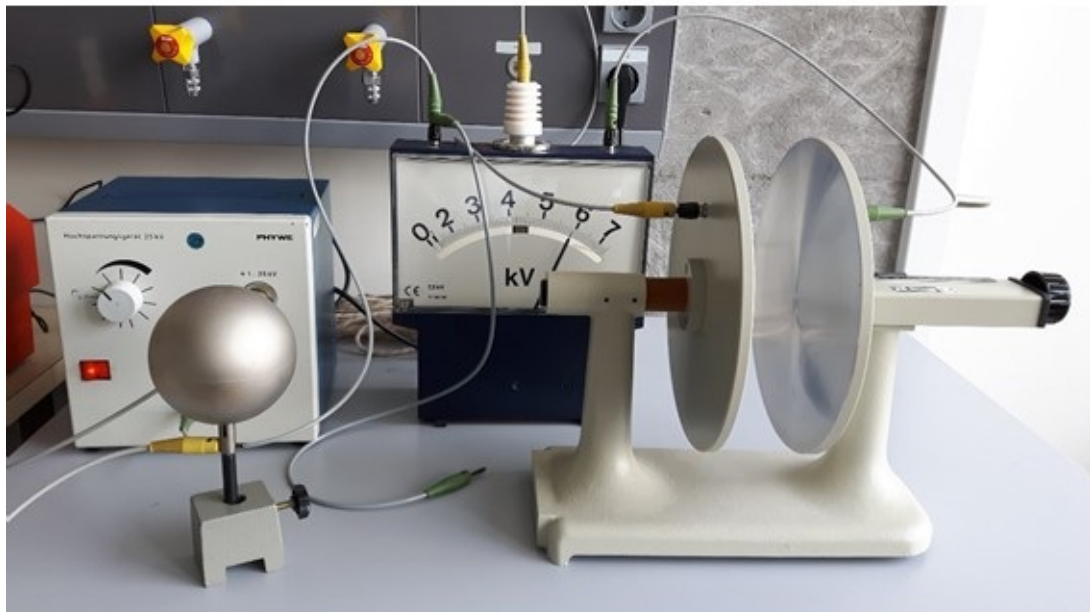
In Physikbüchern findet sich folgende Aufgabe: Ein Plattenkondensator wird aufgeladen und dann von der Spannungsquelle getrennt. Dann wird der Plattenabstand verändert und man soll angeben, ob und wie sich die Spannung zwischen den Kondensatorplatten ändert. Als Rechenaufgabe wird das mit den benötigten Zahlenwerten gegeben. Man hat es hier mit dem Fall zu tun, dass die Ladung auf dem Kondensator konstant bleibt. Kann man die Änderung der Kondensatorspannung mit dem Plattenabstand bei konstanter Ladung vorführen? Die erste Idee ist, einen Plattenkondensator an eine Gleichspannungsquelle anzuschließen und parallel noch ein Voltmeter zu schalten, denn man möchte ja die Kondensatorspannung auch später noch anzeigen. Wir laden den Kondensator auf und das Voltmeter zeigt die Spannung der Quelle. Jetzt wird die Quelle an ihrem Netzschalter plötzlich ausgeschaltet. Dabei geht leider auch die Kondensatorspannung bzw. die vom Voltmeter angezeigte umgehend auf Null zurück. Auch ein Kabel an der Quelle rausziehen kann man versuchen; auch so behält der Kondensator seine Ladung nicht. Ein Voltmeter ist normalerweise ein Widerstand, wenn auch ein sehr großer. Es bietet dem Kondensator einen Weg zur Entladung. Auch ein Netzgerät bietet beim Ausschalten zumindest kurzzeitig einen Kurzschluss für den Kondensator zum Entladen.

Ein Voltmeter, das keinen Weg für Strom bietet, ist in unserer Sammlung ein Hochspannungsvoltmeter. Es stellt auch gleichzeitig eine Sicherung dar. Bei über 7 kV würde ein Funke zwischen zwei Metallkugeln im Gerät überspringen. Also benutzen wir Hochspannung. Jetzt sei also das Hochspannungsnetzgerät mit dem Kondensator verbunden und das Hochspannungsvoltmeter noch parallel geschaltet. Bei einer Hochspannungsquelle kam die Variante, ein Kabel herauszuziehen für mich nicht mehr in Betracht. Ausschalten der Hochspannungsquelle, ohne vorher die Spannung herunterzudrehen, hatte den oben beschriebenen Effekt, dass sich der Kondensator doch noch schnell durch das Netzgerät entlud. Auch so ist also keine Ladung nach Abtrennen der Quelle auf dem Kondensator zu halten.

Ladungen auf Körpern zu halten kennen wir von Versuchen, wo diese mit Kugeln an isolierenden Stielen durch Berühren übertragen werden. Und so geht es auch hier. Die Hochspannungsquelle wird nicht an den Kondensator angeschlossen, sondern mit ihr wird eine Metallkugel aufgeladen (die Quelle bleibt eingeschaltet). Der Kondensator ist lediglich mit dem

Hochspannungsvoltmeter verbunden. Um den zweiten Pol für die Hochspannungsquelle zu definieren, wird in meinem Aufbau wie unten auf dem Foto der Erdungsanschluss des Hochspannungsvoltmeters benutzt.

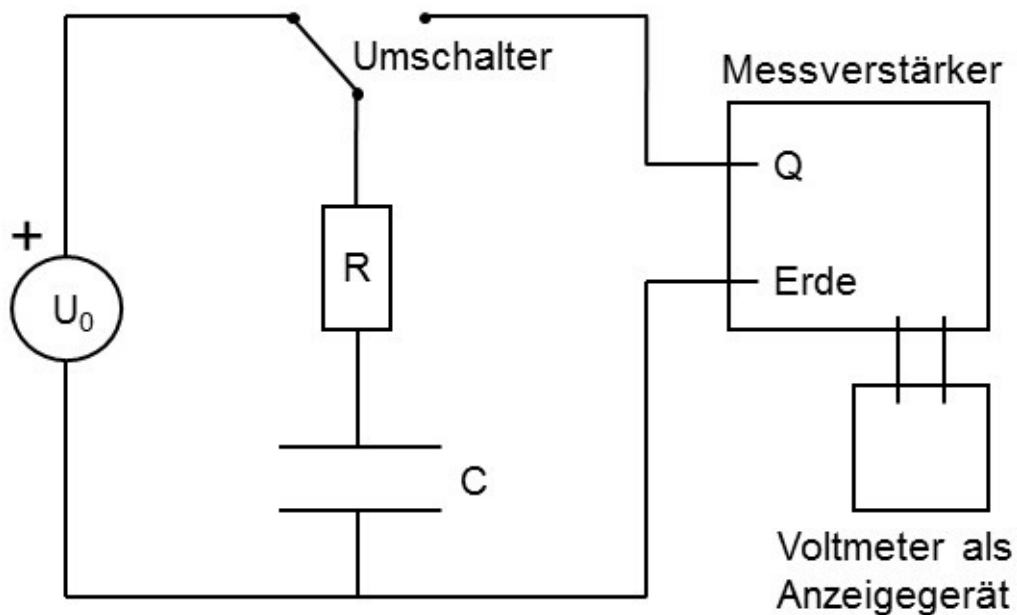
Zunächst zeigt das Voltmeter Null und die Kugel wird aufgeladen. Dann wird mit der Kugel eine Kondensatorplatte berührt. Es macht gar nichts, dass die Kugel nicht zwischen die Kondensatorplatten passt. Man kann die Platte von der Außenseite berühren, sie ist ja aus Metall. Dabei geht die Anzeige des Voltmeters hoch und bleibt danach. Als verschiebbare Platte des Kondensators habe ich die andere gewählt, die auf Erde liegt. Diese kann man jetzt beliebig bewegen und die Voltanzeige folgt entsprechend. Wenn im Bild z.B. der Plattenabstand verringert wird, erhöht sich die Kapazität und die Spannung fällt. Nutzt dabei das Verschieben direkt von Hand, mit der Schraube ist man zu lange unterwegs. Zum Beenden des Versuchs wird natürlich die Hochspannungsquelle heruntergedreht und ausgeschaltet. Die aufgeladene Kondensatorplatte - und die Kugel auch noch - werden mit einem zusätzlich an der Erde des Voltmeters parat angeschlossenen Kabel berührt, um sie zu entladen.



Aufbau zur Demonstration der Spannungsänderung mit dem Plattenabstand bei konstanter Ladung auf dem Kondensator

Man hat bei diesem Versuch keinen Messwert für die auf den Kondensator übertragene Ladung. Das hat man aber sonst bei Kondensatorschaltungen meist auch nicht, es sein denn, man kann eine Stromkurve aufnehmen oder einen integrierenden Messverstärker zwischenschalten. Das Wichtigste ist hier, dass die Ladung auf dem Kondensator konstant bleibt. Um den Schülern einen Wert zu geben, kann man die Ladung dann ja aus Plattenfläche, Plattenabstand und Spannung berechnen.

Jedoch bringt es uns zu der Frage, in welchem Versuch gemessen wird, dass sich bei einer Spannung U und festem Plattenabstand wirklich die und die Ladungsmenge auf jeder Kondensatorplatte befindet. Solch ein Versuch ist in einem Heft zum Messverstärker zu finden. Ich bilde den Aufbau hier schematisch ab.



Messung der Ladung von einem Kondensator

Der Kondensator wird mit einer Spannungsquelle aufgeladen und dann über den auf Ladungsmessung eingestellten Messverstärker entladen. Man kann einen Umschalter verwenden. Im Messverstärkerheft sagt die Anleitung tatsächlich, man solle nach Aufladen des Kondensators das Kabel an der positiven Platte des Kondensators herausziehen und stattdessen dort das Kabel zum Messverstärker einstecken. Hier wird allerdings nicht mit

Hochspannung, sondern nur mit 50 V gearbeitet. Auch das habe ich ausprobiert und man behält tatsächlich die Ladung auf dem Kondensator, wenn man das Kabel herauszieht. Sie fließt dann über den Messverstärker ab. Es ist allerdings in diesem Versuch kein Voltmeter am Kondensator. Und es wird die Ladung bei eingestellter Spannung und eingestelltem Plattenabstand gemessen; das kann man natürlich nacheinander für verschiedene Werte tun. Mein von den Rechenaufgaben motivierter Versuch ist ein anderer Versuch, da nicht jedesmal die Ladung abfließen soll, sondern bei Änderung des Plattenabstands die Spannung festgestellt werden soll.

Nachwort

Die in Schulversuchen zu zeigenden Effekte mögen mit dem Wissen eines Physikstudiums nicht so schwierig zu erklären zu sein. Trotzdem können auch Schulversuche keineswegs einfach plug and play sein. Beschäftigt euch rechtzeitig und in Ruhe mit den Geräten, die an der Schule vorhanden sind, wo ihr unterrichtet. Macht sie zu euren Instrumenten, die ihr sicher spielen könnt.

Sollten sich einzelne weitere Kapitel in der Art dieses Buches ergeben, sehe ich vor, diese zunächst auf meine Webseite ursaminor.jimdo.com zu stellen.

Inhaltsverzeichnis

- **Einleitung**
- **Tücken bei Standardversuchen**
 - Oszilloskop-Nullleiter
 - Definiertes Potenzial
 - Verbindung durch die Spannungsquelle
- **Manchmal geht's auch ohne**
 - Kondensator-Aufladung
- **Schonmal so gemacht?**
 - Auftrieb auf der Waage
 - Gasthermometer denkbar einfach
- **Was geht günstig?**
 - Teelichter für den Hooke-Versuch
- **Alt kann anschaulicher sein**
 - Schwefelstaubbahn
- **Schätze**
 - Statik-Lehrgerät
 - Elektrofeldmeter
- **Auf Anhieb gewusst?**
 - Wie man den Trafo für die einfachen Formeln vorführt
- **Dann eben nicht**
- **Wie zeigt man eigentlich ... ?**
 - Reihenschaltung von Kondensatoren
 - Plattenabstand verändern
- **Nachwort**