

Experimente skalieren

Jan-Peter Meyn

Zusammenfassung

Bei der Skalierung von Experimenten gibt es oft einen Parameter, auf den es eigentlich ankommt, der aber nicht die Größe ist, mit der man im Unterricht gerade zu tun hat. An Beispielen aus verschiedenen Gebieten wird gezeigt, wie eine physikalisch begründete technische Optimierung aussehen kann.

Einleitung

Physikalische Experimente sollen im Unterricht ganz verschiedene Aufgaben erfüllen, von der Entdeckung eines Phänomens über die Förderung der sozialen Kompetenz bei arbeitsteiligen Schülerexperimenten bis zum Widerspruch zu bestimmten Alltagsvorstellungen. Ein Experiment muss immer auf die jeweiligen Ziele ausgerichtet sein. Die hier besprochene technische Optimierung ist eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung, dass die pädagogischen und didaktischen Ziele wirkungsvoll verfolgt werden können.

Es werden Beispiele gegeben, wie eine physikalisch begründete Optimierung aussehen kann. Oft kommt es darauf an, den richtigen Parameter zu finden, den man mit geringem Aufwand und gutem Ergebnis steuern kann. Es geht nicht darum, Experimente mit besonderen technischen Hilfsmitteln aufzuwerten, sondern sich bewusst zu machen, was man für den Versuch eigentlich braucht. Die Beispiele sollen anregen, bei weiteren Experimenten die richtigen Parameter zu finden und Unwesentliches wegzulassen. Technische Hintergründe und weitere Beispiele findet man in [1].

Mechanik

Länge: Elastischer Stab als Modell der Eisenbahnschiene

Ein bekanntes Alltagsbeispiel zur Wärmedehnung sind Dehnfugen in Eisenbahnschienen, welche *heute allerdings geschweißt sind*. Auf welche Weise die Wärmedehnung bei geschweißten Schienen zum Tragen kommt, ist weitgehend unbekannt. Tatsächlich sind die Schienen so im Gleisbett befestigt, dass sie nicht senkrecht zur Fahrtrichtung ausweichen können. In Längsrichtung sind die Schienen bei etwa 20°C im Gleichgewicht, bei anderer Temperatur werden sie elastisch gedehnt oder gestaucht. Das ist für viele Schüler (und auch für Lehramtsstudenten) schwer vorstellbar. Dabei lässt sich die Dehnung eines massiven Eisenstabes leicht

in der Schule zeigen, wenn man Länge und Durchmesser richtig aussucht. Zunächst mache man sich klar, dass bei gegebenem Durchmesser die Längsdehnung proportional zur Länge ist, welche daher zu maximieren ist. Im Physiksaal oder im Flur findet man eine Strecke von etwa zehn Metern für ein Dehnungsexperiment. Zweitens wählt man die Zugkraft so, dass ein Schüler mit kräftigem Zug den Stab gerade nicht zerreißt, da wäre 100 N ein sinnvoller Wert.

Die mechanische Spannung σ ist proportional zur relativen Längenänderung ε (Hookesches Gesetz); das Elastizitätsmodul E ist eine Materialkonstante; $\sigma = E\varepsilon$. Eine weitere Materialkonstante ist die Bruchspannung, bei der das Material auseinandergerissen wird.

Aus Bruchkraft F_B und Bruchspannung $\sigma_B = F_B/\pi r^2$ berechnet man den Durchmesser $2r$ zu 0,3 mm. Mit dem Elastizitätsmodul $E = 170 \text{ kN/mm}$ findet man, dass der 10 m lange Eisenstab – besser gesagt Eisendraht –, um etwa 1 cm gedehnt wird, wenn mit 10 N gezogen wird. Bleibt man einen Faktor zwei unter der Bruchgrenze, kann man den Draht mit 50 N um stattliche 5 cm dehnen. Dieser Weg ist durchaus vergleichbar mit einem Federkraftmesser und tatsächlich fühlt sich der Draht auch an wie eine richtige Feder. Abb. 1 zeigt den einfachen Aufbau.

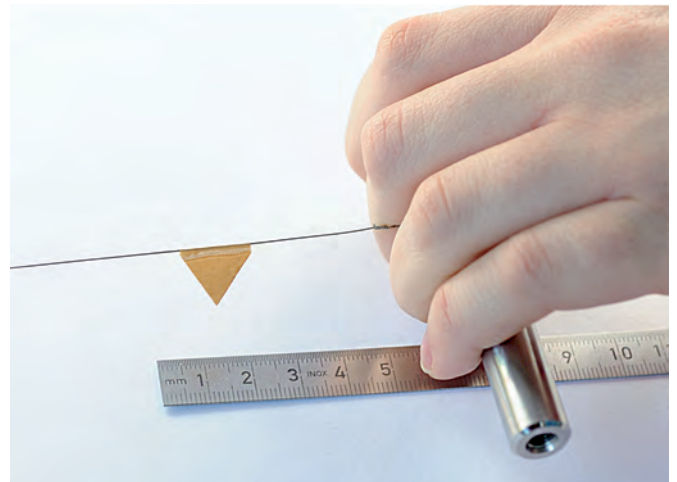


Abb. 1: Streckung eines Eisendrahtes mit der Hand.

Es lohnt sich, als Eisendraht eine Klaviersaite zu beschaffen, weil diese aufgrund des Herstellungsverfahrens eine etwa fünfmal höhere Bruchgrenze hat als geglühter Eisendraht. Im vorliegenden Fall wurde eine Cembalo-Saite mit Durchmesser 0,309 mm verwendet. Die Spule mit 50 m Draht kostet etwa 20 Euro und wird geliefert mit einem Messprotokoll, in dem Bruchgrenze, Elastizitätsmodul und ein Dehnungsdiagramm angegeben sind [2]. Damit kann man die eigene Messung (Abb. 2) überprüfen.

Prof. Dr. Jan-Peter Meyn, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Physikalisches Institut, Didaktik der Physik, Staudtstraße 7, D-91058 Erlangen. E-Mail: jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

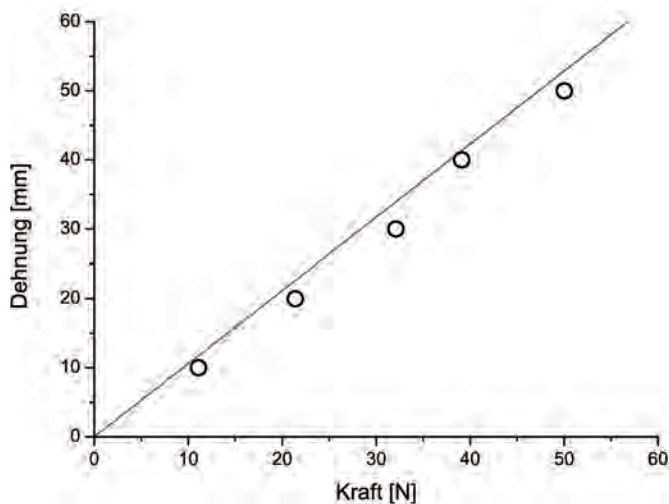


Abb. 2: Dehnung eines 13 m langen Drahtes als Funktion der Zugkraft. Die Gerade repräsentiert das Hookesche Gesetz, berechnet für das vom Hersteller [2] angegebene Elastizitätsmodul des Drahtes.

Ist so ein Draht ein gutes Modell für die Eisenbahnschiene? Bei 0,3 mm Durchmesser und 13 m Länge ist das Verhältnis 1:40000. Eine Eisenbahnschiene mit vergleichbarer Gestalt ist 70 mm breit und 3 km lang, so dass sich die Frage bejahen lässt. Einen zehninütigen Film über das Schienenschweißen, der sehr gut für den Unterricht geeignet ist, findet man bei [3].

Dämpfung: Schallpuls zur Zeitmessung

Für die Messung der Schallgeschwindigkeit und für die quantitative Analyse von Fallexperimenten (z.B. Fallschnur) benötigt man kurze prägnante Schallpulse, die man mit Mikrophon und Messwerterfassung bzw. PC und Audio software aufnimmt. Es liegt nahe, Metallteile wie Stativstangen aufeinander zu schlagen, doch die aufgenommenen Pulse enttäuschen: Die Amplitude ist vergleichsweise klein, weil die Stangen aufgrund ihrer geringen Größe schlecht abstrahlen und das Geräusch ist insgesamt recht lang, weil die Stangen mit geringer innerer Dämpfung lange nachschwingen. Mit der Einsicht in diese Mechanismen baut man sich einen Stoßkörper mit großer Oberfläche und großer innerer Dämpfung, beispielsweise ein Stück Spanplatte.

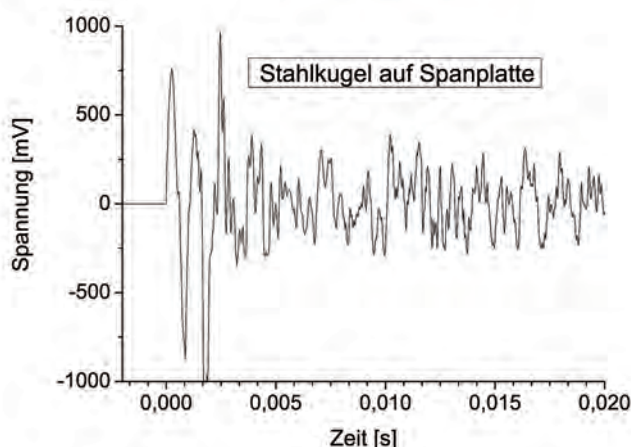
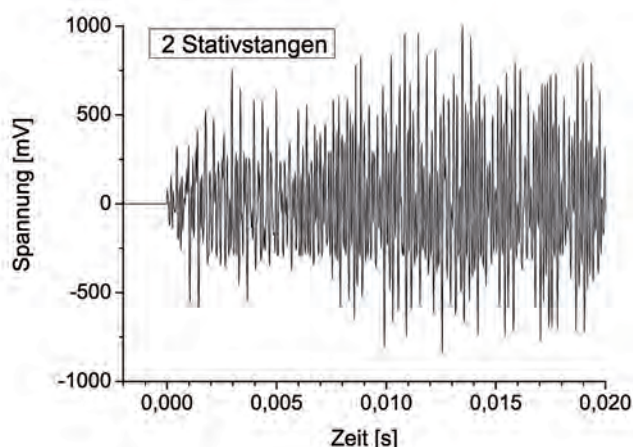


Abb. 3: Schallpulse mit unterschiedlichen Materialkombinationen. Entscheidend für eine gute Zeitauflösung ist die Höhe des ersten Maximums im Vergleich zum folgenden Signal, vor allem bei Mehrfachpulsen.

Der Stoß klingt dumpf und vergleichsweise leise, doch das elektrische Signal am Mikrophon lässt sich viel besser auswerten, weil es einen klaren Startpunkt gibt und das Geräusch schnell ausklingt, siehe Abb. 3.

Wärme

Volumen und Form: Thermische Ausdehnung

Bei vielen Experimenten zur Wärmelehre muss man lange warten, bis sich der gewünschte Effekt zeigt. Entscheidend für den Erfolg bei Experimenten zur Wärmelehre ist eine leistungsfähige Heizung, also ein Camping-Kocher mit Gaskartusche oder eine elektrische Herdplatte. Bei Temperaturen unterhalb 100°C verwendet man heißes Wasser als Wärmereservoir. Das Wasser kann man vor der Unterrichtsstunde erwärmen und in Thermoskannen aufbewahren, oder mit einem Haushaltswasserkocher in Minutenschnelle bereiten.

Thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten und Festkörpern ist ein kleiner Effekt. Daher sind verschiedene Tricks erdacht worden, die thermische Ausdehnung verstärkt darzustellen. Bei Flüssigkeiten nimmt man ein geschlossenes Gefäß mit großem Querschnitt A_1 und einem Steigrohr mit kleinem Querschnitt A_2 . Bei zylindrischer Geometrie wird die Ausdehnung Δx um den Faktor A_1/A_2 verstärkt (Prinzip des Thermometers). Nachteil dieser Anordnung ist der große Querschnitt A_1 , welcher oft als Rundkolben ausgeführt ist, und die damit verbundene langsame Erwärmung der gesamten Flüssigkeitsmenge.

Alternativ nimmt man einen relativ schmalen Zylinder (Reagenzglas) und verzichtet auf den Verstärkungseffekt. Die Gläser werden mit unterschiedlichen Substanzen gefüllt und der Stand der Flüssigkeitsspiegel wird markiert. Die nunmehr geringen Flüssigkeitsmengen nehmen schnell die Temperatur des Wasserbades an, welches sich bei hinreichendem Volumen kaum abkühlt. Bei einer Temperaturerhöhung um 50 K steigt der Flüssigkeitsspiegel im Reagenzglas um 3 mm bis 10 mm, und die Unterschiede zwischen verschiedenen Stoffen sind deutlich, siehe Abb. 4.



Abb. 4: Thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten im Reagenzglas. Oben: Bei Raumtemperatur ist der Meniskus jeweils an der Oberkante der Holzleiste. Unten: Nach Befüllung des großen Bechers mit 1 Liter Wasser von 75°C steigt die Flüssigkeit innerhalb von zwei Minuten auf die neue Gleichgewichtslage. Die Flüssigkeiten sind, von links nach rechts, Ethanol, Glycerin und Wasser. Das Wasser dehnt sich um 2%. Die Notwendigkeit des Volumenausgleiches in einer Heizungsanlage oder beim Autokühler wird unmittelbar einsichtig.

Abgesehen davon, dass dieses Experiment schneller und zuverlässiger funktioniert als die üblichen Glaskolben mit Steigrohr, ist diese Anordnung auch leichter zu durchschauen. Nicht zuletzt ist die Anordnung gut für Schülerexperimente geeignet. Einen Klassensatz Reagenzgläser hat man in jeder Schule zur Verfügung, doch wer kann schon auf einen Klassensatz Glaskolben mit Stopfen zurückgreifen? Abbau und Reinigung sind ebenfalls einfacher, vor allem wenn man mit Pflanzenöl gearbeitet hat.

Bei der thermischen Ausdehnung von Festkörpern wendet man das gleiche Prinzip an: Man sorgt dafür, dass ein langer Probekörper schnell und gleichmäßig erwärmt wird. Dann kann man auf ein Anzeigergerät mit Übersetzung (z.B. rollender Zahnstocher mit Zeiger) verzichten.

Eine zuverlässige Methode ist das Heizen von Röhren mit Wasserdampf. Die etwa 1 m langen Röhren werden an einem Ende fest eingespannt und am anderen Ende lose aufgelegt. Wasserdampf wird im Kolben mit dem Gasbrenner oder in einer Dampfente erzeugt und durch die Röhren geleitet. Aufgrund der hohen Verdampfungswärme des Wassers werden die Röhren effizient auf 100°C geheizt. Die thermische Ausdehnung 1 m langer Röhren beträgt bei Erwärmung um 80 K für Aluminium 1,85 mm, für Kupfer 1,3 mm und für Eisen 0,95 mm. Die Materialunterschiede sind also gut zu erkennen.

Temperaturgradient statt Temperatur: Konvektion

Konvektionströmung in Wasser wird gern mit farbiger Tinte markiert. Schon nach kurzer Zeit verteilt sich der Farbstoff im ganzen Becken und der Effekt ist schwierig zu erkennen, weil nach einiger Zeit der Zusammenhang von Temperatur und Färbung verloren geht. Mit der Schlierenmethode zeigt man Dichtegradienten, die direkt mit Temperaturgradienten zusammenhängen.

Dazu wird ein Aquarium vor einer Projektionswand aufgestellt und mit einer möglichst kleinen Lampe beleuchtet. Abb. 5 zeigt ein typisches Ergebnis. Man wähle das Aquarium nicht zu klein, denn mit der Größe nehmen die Trägheitserscheinungen gegenüber den Reibungserscheinungen zu (die Reynoldszahl ist größer) und die Verwirbelungen sind deutlicher.



Abb. 5: Konvektion sichtbar gemacht durch Schattenprojektion mit einer Halogenlampe ohne Kondensator. Links: Zwei Glaskolben mit heißem bzw. kaltem Wasser. Rechts: Konvektion in Luft oberhalb einer Kerze.

Elektrizität

Stromdichte: Elektromagnet

Der Elektromagnet ist ein attraktives Demonstrationsexperiment, wenn man ein Paket Nägel oder Schraubenmuttern auf einen Schlag entleert. Dazu braucht man die passende Spule. Das kann der in der Anleitung empfohlene Typ sein, oder eine Spule mit vielen Windungen, weil man noch eine Formel erinnert, nach der das Magnetfeld mit der Zahl der Windungen wächst. Das ist wohl richtig, doch ist die maximale Stromstärke in Spulen mit vielen Windungen viel kleiner als in Spulen mit kleiner Windungszahl. Die Formel für das B -Feld einer langen Spule lautet

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l} \quad (1)$$

mit der Windungszahl N , der maximalen Stromstärke I und der Länge l , die für die Spulen des Aufbautransformators immer gleich ist. Wertet man die angegebenen Werte für Lehrmittelspulen aus, so findet man, dass alle Spulen ähnlich gut geeignet sind. Das kann man so verstehen: Zwei benachbarte Wicklungen sind in Reihe geschaltet. Man kann Sie aber auch parallel schalten und zu einem dickeren Draht zusammenfassen. Am Ende kommt es nur auf die Stromdichte an.

Man kann sich also auf das Netzgerätekonzentrieren. Hier sollte man nicht den Gleichspannungsausgang des Stelltransformators nehmen, da dessen Ausgangsspannung periodisch einbricht, so dass ins Feld gehaltene Eisenteile vibrieren. Besser ist ein elektronisch stabilisiertes Netzgerät oder eine Batterie.

Nachdem der Aufbau elektrisch optimiert ist, kann man den Effekt weiter steigern durch bewusstes Überschreiten der angegebenen maximalen Stromstärke in der Spule. Diese ist nämlich für Dauerbetrieb ausgelegt und so angegeben, dass die Spule nicht übermäßig erwärmt wird. Wie weit man gehen kann, hängt von der Betriebsdauer und der Zahl der beabsichtigten Wiederholungen ab. Jedenfalls beachte man, dass die Leistung quadratisch mit der Stromstärke (und der magnetischen Feldstärke) wächst. Abb. 6 zeigt einen Elektromagneten, bei dem der Maximalstrom um einen Faktor zwei überschritten wurde. Mit der Stromstärkeanzeige am Netzgerät man eine gute Kontrolle.

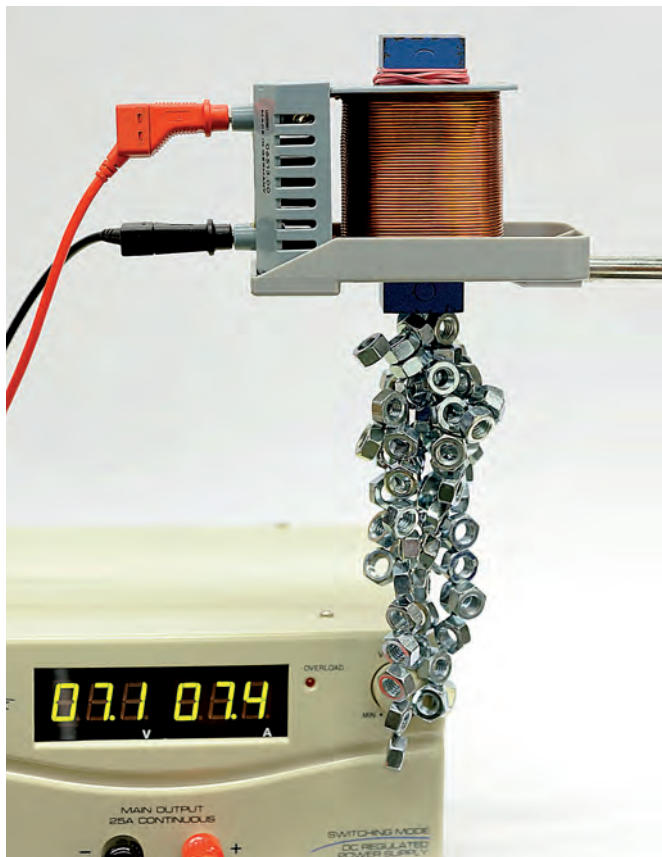


Abb. 6: Einfacher Elektromagnet mit Transformatorspule und sinnvoll ausgesuchtem Netzgerät

Leistungsanpassung: Elektromagnet für Schülerexperimente

Ein NiMH-Akku mit 2300 mAh Kapazität kann für kurze Zeit eine Stromstärke von etwa 7 A ermöglichen. Als Spulendraht dient Schalllitze mit 0,14 mm² Querschnitt. Man dimensioniert die Länge des Drahtes durch Berechnung und experimentelle Überprüfung so, dass bei Nennspannung 1,2 V die Stromstärke 7 A beträgt und lässt die Schüler den Draht um eine eiserne Schraube wickeln. Ein Schalter

macht den Aufbau noch besser. Zwar kann man mit diesem Elektromagneten keine größeren Lasten heben, doch ist die Freude der Schüler am eigenen Ergebnis ist abzuwägen gegen den Effekt des Demonstrationsexperiments.

Stromstärke: Oerstedt-Versuch

Eine Variation des Elektromagneten ist der Versuch von Oerstedt, mit dem man die magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters auf eine Kompassnadel zeigt. Dazu legt man ein etwa 20 m langes Kabel durch die Klasse. Es kommt nun darauf an, dass das Magnetfeld stark genug für das freie Experimentieren mit der Kompassnadel ist. Vorsichtig wird man verlangen, dass das Feld des Leiters in $r = 5$ cm Abstand dreimal stärker als das Erdmagnetfeld ($50 \mu\text{T}$) sein sollte. Aus der Formel für das Magnetfeld B eines geraden stromdurchflossenen Leiters

$$B(r) = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (2)$$

erhält man $I = 38$ A für die angegebenen Werte. Das ist mehr, als die meisten schulüblichen Netzgeräte hergeben. Vielfach wird versucht, mit einer kleineren Stromstärke auszukommen, doch das Naturgesetz schlägt gnadenlos zu: Der Effekt ist nicht überzeugend. Es keine Alternative, die Stromstärke muss aufgebracht werden. Neben einem Schaltnetzgerät, im Elektronikhandel erhältlich, ist auch eine Parallelschaltung von NiMH-Akkumulatoren geeignet. Bei gegebenem Widerstand des Kabels wächst die Spannung mit der Stromstärke, die Leistung wächst quadratisch. Daher muss man die Spannung umso geringer machen, je größer die Stromstärke ist und letztlich den Widerstand minimieren, indem man den Kabelquerschnitt groß wählt. Der Aufbau ist also ein bewusster Kurzschluss des Netzgerätes. Das ist ungefährlich, sofern das Gerät dafür ausgelegt ist und man den Stromkreis vorher durchgerechnet hat.

Manchmal findet man den Vorschlag, Kompassnadeln in einem Kreis um ein senkrecht aufgehängtes Kabel zu stellen. Da die Kompassnadeln als magnetische Dipole sich gegenseitig beeinflussen, müssen sie ausreichend Abstand haben, d.h. der Kreisradius muss viel größer sein als die oben diskutierten 5 cm. Mit einer Bleizelle oder einem Ultrakondensator erreicht man mehr als 300 A bis 600 A bei 2,2 V für mehrere Sekunden [4], so dass das Magnetfeld in 50 cm Abstand nachweisbar ist. Feldlinienbilder mit Eisenfeilspänen profitieren ebenfalls von einer so hohen Stromstärke, siehe Abb. 7.



Abb. 7: Feldlinienbild zweier Kupferleiter im Abstand von 120 mm, welche antiparallel mit einem Strom von 600 A durchflossen werden.

Optik

Ein Klischee besagt, dass für Optikexperimente die Raumverdunklung betätigt werden muss, weil man sonst nichts sieht. Der Tageslichtprojektor erzeugt eine helle, quadratische Fläche von etwa 1,5 m Kantenlänge mit einer Lampenleistung von 250 W bis 400 W, die unter Tageslichtbedingungen gut erkennbar ist – sonst würde man das Gerät so nicht nennen können. Dann kann man erwarten, dass mit schulüblichen Laborlampen (25 W – 40 W) wenigstens ein Zehntel der Fläche, also 40 cm Kantenlänge genauso hell ausgeleuchtet werden kann, wenn man alles richtig macht. Da man aber nicht mit optimierten optischen Komponenten arbeitet und Kompromisse eingehen muss, genehmigen wir uns einen Faktor zehn für Verluste, entsprechend einem Faktor drei in der Kantenlänge. Ein schultypischer Projektionsschirm von 10 cm bis 15 cm Kantenlänge kann demnach mit Laborlampen prinzipiell so hell beleuchtet werden, dass die zu zeigenden Strukturen bei normalem Umgebungslicht zu sehen sind.

Effizienzgewinne multiplizieren: Thermisches Spektrum

Die Demonstration des Spektrums eines thermischen Strahlers kann ästhetisch sehr ansprechend sein, doch der erste Versuch eines Aufbaus enttäuscht meist. An diesem Beispiel soll gezeigt werden, wie die Kombination mehrerer, für sich jeweils spitzfindiger Verbesserungen zu einer neuen Qualität führt.

Der Aufbau nach Anleitung wäre: Standard-Netzgerät (Kleinspannungsstelltransformator, "Würfel" mit Einstellung 12 V Gleichspannung, Laborleuchte 50 W mit Kondensator, variabler Spalt, Bikonvex-Linse, Prisma, Schirm. Es sind eine Reihe von Verbesserungen möglich:

1. Die Überprüfung der Spannung unter Last ergibt 8,9 V, obwohl die Leerlaufspannung $U = 12$ V korrekt eingestellt wurde. Ursache ist der Innenwiderstand des Netzgerätes. Die Spannung wird im belasteten Zustand gemessen und auf 12 V hochgeregelt. Gewinn an subjektiver Helligkeit: Faktor 3.
2. Der Reflexionsspiegel in der Laborlampe wird eingebaut bzw. richtig justiert: Gewinn: Faktor 1,5. Die korrekte Anordnung des Lampen-Spiegelbildes zeigt Abb. 8.
3. Der Abstand Lampe-Kondensator wird so eingestellt, dass das Lampenbild in der Projektionslinse erscheint. Damit ist der Spalt homogen ausgeleuchtet. Der Gewinn ist abhängig von der vorherigen Einstellung.
4. Die Bikonvexlinse wird durch eine achromatische Linse ersetzt. Man hat ein schärferes Bild und 10 Prozent mehr Licht aufgrund der AR-Beschichtung.
5. Die Halogenlampe wird durch eine spezielle Projektionslampe ersetzt, z.B. Osram Xenophot Nr. 64610. Die Lampe hat einen Lichtstrom von 1600 lm bei einer Leistung von 50 W Gewinn: Faktor 2

6. Der Spalt wird so weit verbreitert, dass die spektrale Auflösung im Bereich 50 nm bis 100 nm liegt. Eine schmalere Bandbreite bringt keinen nennenswerten Gewinn in der Farbsättigung, man verliert nur Intensität. Bei der optimalen Einstellung ist das Spektrum bis etwa 6 mal breiter als das Bild des Spaltes auf dem Schirm, denn das gesamte Spektrum ist 300 nm breit.

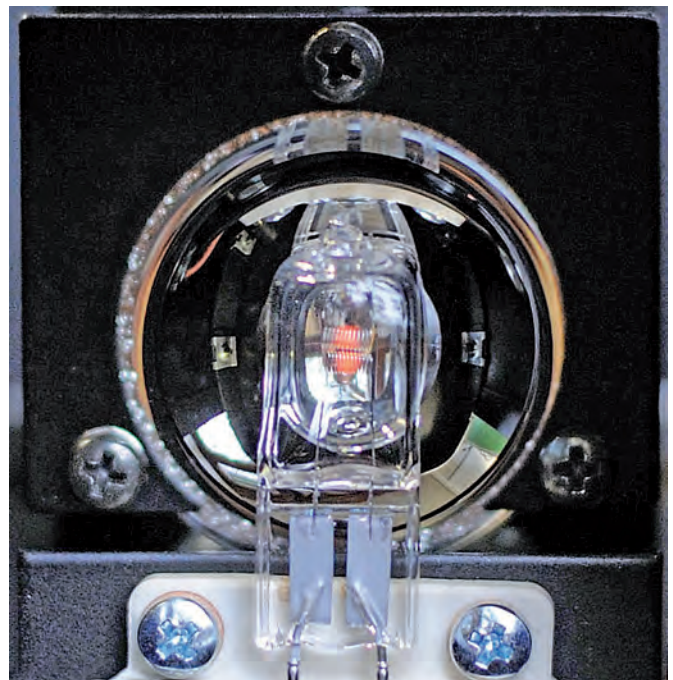


Abb. 8: Korrekte Anordnung von Lampenwendel und Spiegelbild mit Verdopplung der Leuchtfläche

Insgesamt steigt der Lichtstrom mindestens um einen Faktor 10, es ist aber je nach Ausgangslage auch erheblich mehr möglich. Die Fläche des rechteckigen Spektrums wird über das Abbildungsverhältnis der optischen Abbildung gesteuert. Die Breite des Spektrums steigt mit der Dispersion des Prismas bzw. Gitters. Bei konstanter spektraler Auflösung ist die Spaltbreite proportional zur Breite des Spektrums. Man verliert also keine Intensität mit bei stärkerer Dispersion, wenn man den Spalt nachregelt. Bei Reflexionsgittern [1] mit 600 oder 1200 Linien pro mm reicht die Öffnung der gewöhnlichen Lehrmittelspalte nicht aus, um die optimale Auflösung zu erreichen; man baut einen breiten Spalt aus Pappe.

Beobachter einbinden: Beugung

Durch die Verbreitung von Laser-Pointern ist es üblich geworden, diese für Beugungsexperimente zu verwenden. Dabei wird oft übersehen, dass Laser-Licht keine experimentelle Voraussetzung ist. Jede Lampe mit einer scheinbaren Größe von weniger als 10 Bogenminuten (Größe/Entfernung $< 1 : 1000$) ist hinreichend räumlich kohärent, um Beugungsfiguren zu zeigen. Die Projektion von Beugungsbildern mit konventioneller Halogenlampe liefert keine besonders hellen Bilder, so dass die gleichzeitige Beobachtung der Beugungsfiguren durch die ganze Klasse schwierig ist.

Man beachte, dass das Licht auf dem Schirm in alle Rich-

tungen gestreut wird und die Augen der Schüler nur einen sehr kleinen Anteil aufnehmen. Es ist viel effizienter, wenn man eine kleine Lampe in hinreichender Entfernung aufstellt und die Schüler diese durch verschiedene Beugungsobjekte anschauen. Die Netzhaut im Auge übernimmt dann die Rolle des Projektionsschirms, wie in Abb. 9 skizziert ist.

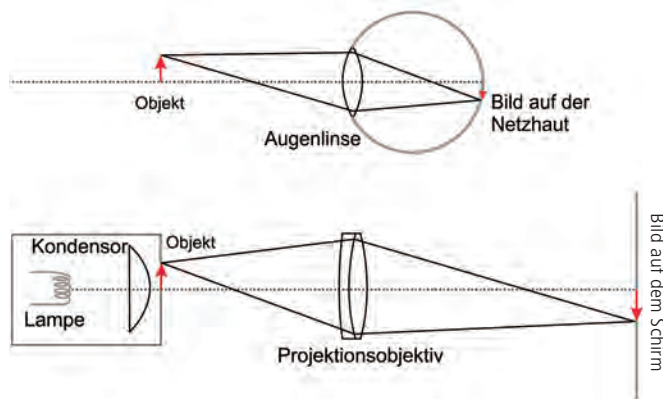


Abb. 9: Eingebundener Beobachter (oben) und Projektion auf einen Schirm (unten). Die Augenlinse des Beobachters entspricht dem Projektionsobjektiv, seine Netzhaut dem Schirm. Nach diesem Prinzip kann man alle Projektionsexperimente zu Experimenten mit eingebundenem Beobachter machen.

Eine Kerze mit 1 cm breiter Flamme muss mindestens 10 m von den Schülern entfernt sein, um hinreichend räumlich kohärent zu sein; das lässt sich im Physiksaal in der Regel realisieren. Nur bei besonderer Enge müsste man auf eine kleine Glühbirne oder einen beleuchteten Spalt ausweichen. Die Beobachtung von Beugungsmustern im Schülerexperiment ist nicht kompatibel mit der üblichen Schulausrüstung; wer hat schon einen Klassensatz Doppelspalte? Die Beugungsobjekte müssen also selbst hergestellt werden, durch Nadelstiche in starker Alufolie oder durch Ritzen von Oberflächenspiegeln [5] mit einer Schraubendreherklinge. Schüler, die auf diese Weise für Beugungsphänomene sensibilisiert sind, könnten im Alltag weitere entdecken [6].

Voraussetzungen minimieren: Michelson-Interferometer

Wenn Beugungsphänomene im Licht einer Kerze sichtbar sind, dann muss das auch für die Interferenz möglich sein. Das Michelson-Interferometer [7] kann in verschiedene Kontexte des Schulunterrichts eingebunden werden: historisch in Bezug auf die Entstehung der Relativitätstheorie, wegen seiner Bedeutung in der Präzisionsmesstechnik und nicht zuletzt als besonders eindruckliche Demonstration eines Interferenzphänomens. Das Michelson-Interferometer wird fast immer mit dem Laser gezeigt, obwohl die Justage im inkohärenten Licht prinzipiell einfach ist. An Stelle des Lasers und des Projektionsschirms tritt eine helle Fläche mit Markierung und der eingebundene Beobachter (Abb. 10).

Da die Kohärenzlänge von thermischen Licht nur wenige Mikrometer beträgt, müssen die Interferometerarme mit dieser Genauigkeit gleich lang sein. Dazu verschiebt man einen der Spiegel auf einem geeigneten Verschiebetisch [8].

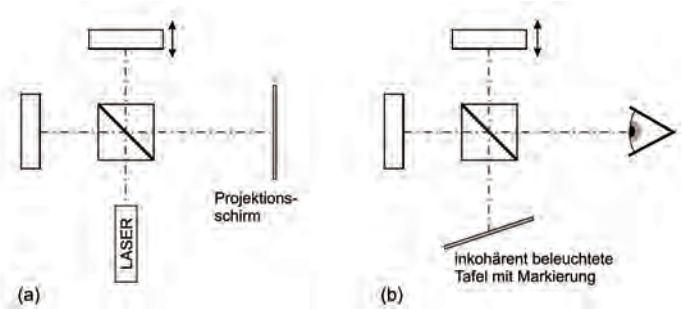


Abb. 10: Michelson-Interferometer. (a) mit Laser, (b) mit inkohärenter Beleuchtung durch Quecksilberdampf- oder diffuses Tageslicht auf einer weißen Tafel

Die Armlängen werden zuerst mit dem Maßstab ausgemessen. Die Genauigkeit reicht, um mit einer Spektrallampe Ringe zu sehen und die Justage wie in Abb. 11 durchzuführen.

Ohne Verschiebetisch zum präzisen Abgleich der Armlängen bräuchte man eine Spektrallampe mit großer zeitlicher Kohärenz (kleine Frequenzbandbreite), doch auf die räumliche Kohärenz kann man in jedem Fall verzichten. Das ist keine unwesentliche Verallgemeinerung im Bezug auf viele andere Experimente zur Wellennatur des Lichts, welche die räumliche Kohärenz tatsächlich voraussetzen!

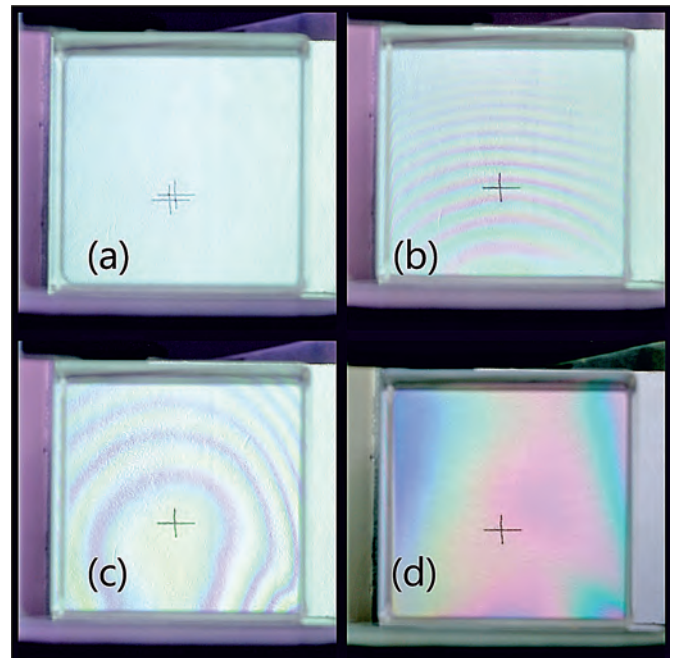


Abb. 11: Justage des Michelson-Interferometers mit diffuser Beleuchtung durch Quecksilberdampf- oder Tageslampe. (a) Die Kreuze der beiden Spiegelräume [6] werden durch Verkippen eines Spiegels übereinander gelegt. (b) Interferenzringe nach feinerer Justage. Das Zentrum der Ringe wird in die Mitte gebracht. (c) Bei geringer werdender Armlängendifferenz werden die Ringe größer. (d) Weißlichtinterferenz im Tageslicht.

Fazit

Den hier besprochenen Beispielen ist gemeinsam, dass die physikalisch begründete Optimierung nicht nach dem naheliegenden Muster erfolgt. Bei der mechanischen Dehnung eines Eisenstabes musste zuerst Abstand von der Vorstellung genommen werden, dass ein Eisenstab ein starrer Körper ist. Die Länge bestimmt die absolute Dehnung, der Durchmesser die dafür notwendige Kraft. Die Schallpulse zur Zeitmessung müssen möglichst gut gedämpft sein, was dem Alltagskonzept eines lauten Schlags widerspricht.

Beim Thermometer wird mit den länglichen Reagenzglas die Oberfläche vergrößert und damit die Erwärmung der Probe erleichtert. Bei der Wärmedehnung von Festkörpern macht man sich zusätzlich die sehr große Heizleistung von kondensierendem Wasserdampf zunutze. In beiden Fällen wird der Effekt so deutlich, dass man auf eine mechanische Übersetzung, welche für viele Schüler auch eine Verschleierung bedeutet, verzichten kann. Die Konvektion wird deutlicher, wenn man Temperaturunterschiede und nicht die absolute Temperatur markiert.

Die Beispiele Elektromagnet und Oerstedt-Versuch zeigen, dass der entscheidene Parameter verschieden sein kann, obwohl es in beiden Fällen um die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes geht. In der Spule entscheidet die Stromdichte, und nicht die Windungszahl oder die Stromstärke. Beim langen Draht muss die Stromstärke groß sein. Praktisch erfordert das nicht eine große, sondern eine geringe Spannung, weil sonst die Verlustleistung zu groß wird. Letztlich kommt es also darauf an, den Innenwiderstand der Stromquelle zu minimieren.

Das Spektrum des Lichts gelingt durch Zusammenwirken kleiner Änderungen, die nur als Produkt einen großen Unterschied machen, dieses Prinzip hilft natürlich auch in anderen Zusammenhängen. Die Beugung am Doppelspalt wird mit der Einbindung des Beobachters zu einem Frei-

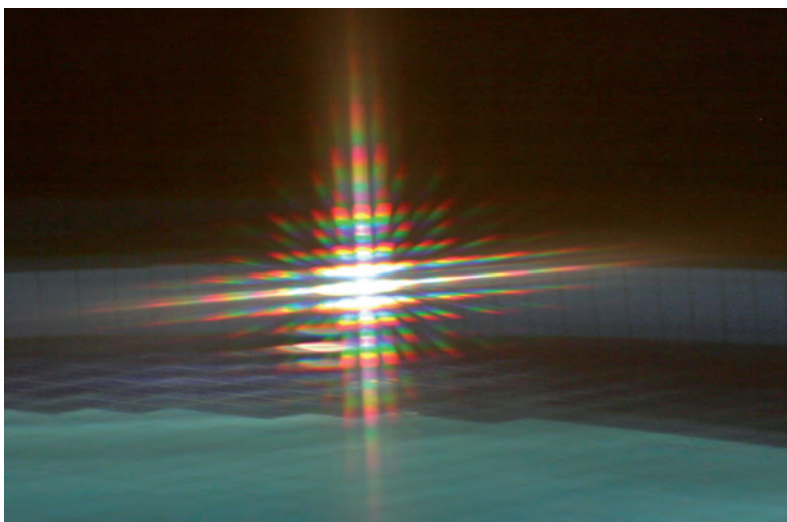
hand-Experiment, das Michelson-Interferometer funktioniert mit vollständig inkohärentem Licht als Überlagerung zweier ausgedehnter Spiegelräume.

Die beiden wichtigsten Frage beim Aufbau eines Experimentes sind: Was will ich zeigen? Was sieht man? Da gibt es oft schon unterschiedliche Antworten. Nach der Klärung folgt die technische Frage: Auf welchen Parameter kommt es an? Das ist oft nicht die physikalische Größe, die gerade Unterrichtsgegenstand ist, wie hier an Beispielen aufgezeigt wurde. Das Experimentieren erscheint deshalb zunächst als anspruchsvolle Aufgabe, die doch mit zunehmender Erfahrung und physikalischer Intuition immer mehr Freude macht.

Literatur

- [1] Jan-Peter Meyn: *Grundlegende Experimentiertechnik im Physikunterricht*. Oldenbourg, München, 2. Auflage, 2013.
- [2] Westfälisches Eisen Nr. 41-4578 bei: Marc Vogel GmbH, Talgasse 2, D-79798 Jestetten. www.vogel-scheer.de.
- [3] Isabel Hecker: Wieso verbiegen sich Eisenbahnschienen bei großen Temperatur-Unterschieden nicht? Bayerischer Rundfunk, Rundfunkplatz 1, D-80300 München. <http://www.wdr.de/tv/kopfball/sendungsbeitraege/2010/1121/schienenschweissen.jsp>.
- [4] Jan-Peter Meyn: Ultra-capacitor based current source for magnetic field demonstration. *European Journal of Physics*, 31:L1–L4, 2010.
- [5] AstroMedia-Versand, Zuckerdamm 15, D-23730 Neustadt in Holstein. www.astromedia.de.
- [6] Georg Maier: *Optik der Bilder*. Verlag der Kooperative Dürnau, Dürnau, 4. Auflage, 2003.
- [7] Albert Abraham Michelson: The relative motion of the earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 22:120–129, 1881.
- [8] Verschiebetisch PT1/M von Thorlabs GmbH, Hans-Boeckler-Str. 6, D-85221 Dachau. www.thorlabs.de.

Nächtlicher Blick aus dem Hotelzimmer



Beim Blick durch den Netzvorhang des Fensters auf einen Unterwasserscheinwerfer im Hotelpool klärt sich die Frage nach dem Leuchtmittel – kein thermischer Strahler. (Foto: Helmut Kühnelt)