

Vorbemerkung

Im Physikunterricht – so wie wir ihn kennen – werden unsere Sinne häufig recht einseitig abwertend behandelt. Sie taugen anscheinend nicht dazu, die Natur objektiv zu beurteilen und müssen daher durch Instrumente ersetzt werden, wenn es darum geht, zuverlässige Ergebnisse zu gewinnen. Als Beispiel sei nur der Temperatursinn genannt, der oft in dieser Weise abqualifiziert wird. Eine solche Betrachtungsweise ist beim genaueren Hinsehen nur zum Teil richtig und in ganz wesentlichen Punkten verfehlt: In wichtigen, für unser Bestehen und Wohlbefinden in dieser Welt sogar entscheidenden Punkten weisen unsere Sinne erstaunliche Leistungsmerkmale auf, wie sie auch von Spitzenprodukten moderner Technik kaum erreicht werden. Zudem wird mit der oberflächlichen, abwertenden Betrachtungsweise der angeblich so wenig tauglichen Sinne leichtfertig eine Chance für den Physikunterricht vertan. Es ist nämlich gerade die Funktionsweise der eigenen Sinne und die genaue Beobachtung ihres Verhaltens, das den Schüler *persönlich* angeht und viel enger berührt als z.B. die Funktionsweise eines Drehspulamperemeters, mit dem er in seinem späteren Leben meist kaum mehr zu tun hat. Jedenfalls entspricht es unserer im Unterricht gewonnenen Erfahrung, daß Schüler bemerkenswertes Interesse zeigen, wenn es darum geht, die eigenen Sinne durch physikalische Experimente zu erkunden.

Ein zusätzlicher Aspekt ist, daß sich bei dieser Thematik fachübergreifende Elemente leicht in den Unterricht einbeziehen lassen. So spielt das *Weber-Fechnersche Gesetz* (psychophysisches Grundgesetz) in der Sinnesphysiologie eine wichtige Rolle. Dieses Gesetz postuliert, daß der Unterschied zweier Sinnesempfindungen (z.B. wahrgenommener Helligkeiten) proportional ist zum Logarithmus des Verhältnisses der Reize x_1 und x_2 (im Beispiel: der Strahlungsleistungen), von denen sie hervorgehoben werden. Das Gesetz, das auf verschiedene Sinnesempfindungen (z.B. Helligkeit, Lautstärke oder Tonhöhe) zutrifft, ist dem Physiker eher geläufig als das Gesetz der logarithmischen Empfindlichkeit unserer Sinne.

Massebestimmung nach Gefühl...

Experimente zur logarithmischen Empfindungsskala – das Weber-Fechnersche Gesetz

*Herrn Professor Dr. Walter Klinger,
Universität Erlangen-Nürnberg zum 60. Geburtstag
gewidmet*

Helmut Dittmann; Werner B. Schneider

ne. Es ist die Grundlage für Skalen, die in der Astronomie, der Akustik und in anderen Wissensgebieten benutzt werden. Weniger bekannt ist, auf welchen experimentellen Erfahrungen dieses Gesetz beruht und wie es sich daraus ableiten läßt.

Im folgenden werden zu dem Thema Sinne für den Unterricht geeignete Experimente und Überlegungen vorgestellt, bei denen der Physiker trotz des Übergriffs in ein anderes Fach den vertrauten Boden nicht verlassen muß. Die Physik und ihre Arbeitsweise stehen im Vordergrund. Anwendungsobjekt ist aber zur Abwechslung einmal nicht die leblose Natur, sondern der Mensch selbst. Gerade darin liegt das Besondere. Die vorgeschlagenen Experimente sind auf quantitative Ergebnisse und auf das Erkennen funktionaler Zusammenhänge angelegt und unterscheiden sich nicht von dem in der Physik üblichen Vorgehen.

Insgesamt ist das Thema für den Projektunterricht besonders geeignet, bei dem viele fachübergreifende Aspekte angesprochen werden können. Der eine oder andere der beschriebenen Versuche erscheint aber auch für sich allein geeignet, eine Physikstunde zu ergänzen oder in einer Vertretungsstunde das Interesse der Schüler zu wecken.

Einfache Versuche zur Ermittlung von Schwellwerten

Ein sehr einfacher Versuch, der etwa eine Stunde über Massenbestimmung durch Wägung abrunden könnte, betrifft unsere Fähigkeit, ge-

ringe Gewichtsabweichungen durch Anheben mit der Hand herauszufinden. Für entsprechende Versuche eignen sich z.B. leere Filmdöschen, die man mit Sand bis auf 50g auffüllt, wobei man aber absichtlich auch für einige „Ausreißer“ von 52g, 55g und 60g sorgt. Die Schüler bekommen die Aufgabe, durch Anheben mit der Hand die zu schwer geratenen Döschen herauszufinden. Es ist interessant zu beobachten, daß sie – auch wenn im Unterricht nicht darüber gesprochen wurde – zu wissen scheinen, daß man Massen nicht nur mittels ihrer Schwere, sondern auch durch ihre Trägheit bestimmen kann, denn sie wippen die Döschen in der Hand auf und ab. Mit einiger Sicherheit gelingt es ihnen die 60g-Dosen herauszufinden, oft auch noch die mit 55g. Die 52g-Dosen werden hingegen mit den leichteren so oft verwechselt, daß richtige Ergebnisse hier oft nur zufällig sind. Versuche mit größeren Massen, z.B. Waschmittelpaketen, die auf 1000g aufgefüllt werden, zeigen, daß hier ein Übergewicht von 10g keinesfalls zu bemerken ist und daß man schon mindestens 200g zugeben muß, um durch bloßes Anheben mit ähnlicher Sicherheit wie bei den kleinen Döschen das Übergewicht zu erkennen. Das Ergebnis solcher Versuche lautet: Ausschlaggebend dafür, ob eine Abweichung erkannt werden kann, ist nicht ihre absolute, sondern ihre prozentuale Größe. Gewichtsabweichungen können durch Anheben mit der Hand mit großer Sicherheit erst erkannt werden, wenn sie etwa bei 20 % liegen. Genauer untersucht hat dies zuerst der Physiologe und

Anatom *Ernst Heinrich Weber* (1795–1878), der am Anfang des vorigen Jahrhunderts Versuche zur Genauigkeit der Gewichtsempfindung durchführte.

Untersuchungen zur Fähigkeit unseres Auges, Schwankungen in der Beleuchtung eines Raumes wahrzunehmen, lassen sich entsprechend durchführen. Ein Gedankenversuch soll die Aufgabenstellung zunächst erläutern:

Angenommen, ein Raum ist durch 100 Glühlampen eines großen Leuchters beleuchtet. Plötzlich fällt eine davon aus, so daß die Strahlungsleistung um 1 % absinkt. Würde man davon etwas merken? Eine experimentelle Überprüfung scheint zunächst an dem großen Aufwand, 100 Glühlampen bereitzustellen, zu scheitern. Man kann aber dennoch einen entsprechenden Versuch in einfacher Form durchführen. Hierzu wird das verdunkelte Klassenzimmer über einen Overheadprojektor in der Weise beleuchtet, daß das ganze Projektionsfeld von einer Folie ausgefüllt wird, die in 100 gleich große Quadrate aufgeteilt ist, die gleichartige Lampen repräsentieren.

Durch plötzliches Abdecken einer gewissen Anzahl von Quadraten kann man das Erlöschen einer gleichen Anzahl von Lampen simulieren. Um herauszufinden, wie stark sich dies auf die vom Auge empfundene Helligkeit im Raum auswirkt, darf man natürlich nicht die Projektionsfläche anschauen, sondern am besten eine gegenüberliegende Wand, an der sich aber nichts Reflektierendes befinden darf – denn direkte Reflexe können die Vorgänge auf der Projektionsfläche verraten. Nach einigen Versuchen wird man feststellen, daß die Grenze, bei der man mit einiger Sicherheit das Verlöschen oder Aufleuchten einer Anzahl von Glühlampen bemerkt, bei fünf liegt.

Mit dieser Anordnung kann auch für das Helligkeitsempfinden gezeigt werden, daß es nicht auf den absoluten Betrag der sich ändernden Strahlungsleistung ankommt, sondern nur auf den prozentualen Wert. Hierzu wird die Strahlungsleistung des Overheadprojektors z.B. durch Auflegen einer Graurasterfolie oder durch Einschalten der Sparschaltung vermindert, um dann entsprechend die Grenze zum Erkennen des Verlöschens oder Aufleuchtens zu bestimmen. Auch hier erhält man als Grenze 5 bis 100 Flächen (Lampen), d.h. 5%.

Ein weiteres aufschlußreiches Experiment gibt Auskunft, über die Fähigkeit des Auges, Helligkeitsunterschiede in einer ungleichmä-

ßig beleuchteten Fläche zu detektieren.

Man benötigt dazu zwei Experimentierleuchten gleicher Leistung. Alle anderen Lichtquellen müssen ausgeschaltet werden. Die erste Leuchte wird in 20 cm Abstand vom Projektionsschirm aufgestellt, die zweite im 5fachen Abstand. Es ist einzusehen, daß sich die Leuchtdichten der beiden entstehenden Lichtkreise wie 1 : 25 verhalten, da im größeren Kreis die gleiche Strahlungsleistung auf die 25fache Fläche verteilt wird. Überlappt man den hellen und dunkleren Bereich, so entstehen nebeneinander drei Gebiete mit unterschiedlichen Leuchtdichten, die sich wie 100 : 104 : 4 verhalten. Beim Übergang vom ersten zum zweiten Gebiet empfindet man keinen Unterschied in der Helligkeit, was auf die Unschärfe des Schattenrandes der weiter entfernten Lichtquelle und auf den damit verbundenen kontinuierlichen Übergang zurückzuführen ist. Erzeugt man jedoch einen scharfen Schattenrand zwischen den beiden Gebieten, indem man in die Nähe des Schirmes einen schattengebenden Gegenstand geeignet anbringt, so wird der Helligkeitsunterschied deutlich erkennbar. Erst, wenn man das Entfernungsverhältnis der beiden Lampen bis auf 1 : 10 steigert und somit ein Verhältnis der Leuchtdichten von 100 : 101 einstellt, so verschwindet der Helligkeitsunterschied selbst bei einer scharfen Grenze.

Das Ergebnis dieser Versuche ist: Werden dem Auge gleichzeitig zwei Flächen dargeboten, deren Leuchtdichten sich um mehr als 1% unterscheiden, so nimmt es einen Helligkeitsunterschied gerade noch wahr, solange die beiden Gebiete unmittelbar benachbart und scharf gegeneinander abgegrenzt sind.

Dieses Ergebnis scheint zunächst im Widerspruch zu dem vorangegangenen Versuch zu stehen, in dem eine Grenze von 5% für die Wahrnehmbarkeit ermittelt wurde. Offenbar entsteht diese Diskrepanz aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungsbedingungen. In beiden Versuchen werden *Schwellwerte* der Helligkeitswahrnehmung ermittelt. Im ersten Versuch erfolgen die Lichtreize *sukzessiv*, im zweiten *simultan*, was offensichtlich zu unterschiedlichen Schwellwerten führt. Beim Helligkeitsempfinden muß man somit zwischen der *Sukzessivschwelle* und der *Simultanschwelle* unterscheiden, wobei die Sukzessivschwelle bei 5% und die Simultanschwelle bei 1% liegt.

Eine einfache Methode zur Bestimmung der Simultanschwelle ergibt

sich durch die Verwendung rotierender Scheiben /1; 2/. Bei der im Auge ausgelösten Empfindung kommt es auf die Strahlungsleistung des von der betrachteten Fläche zurückgestreuten Lichts an. Dieser Anteil kann eingestellt werden, indem man einen Sektor einer Kreisscheibe schwärzt und die Scheibe so schnell rotieren läßt, daß das Auge nur noch die mittlere Strahlungsleistung des gestreuten Lichts wahrnimmt. Über die Sektorgröße ist dann dieser Anteil in weiten Grenzen einstellbar. Bei einem schwarzen Sektor von z.B. 90° wird die Strahlungsleistung um 25% und bei einem Sektorwinkel von 90° : 25 = 3,6° um 1% reduziert. Diese Versuchsidee läßt sich im Unterricht mit recht einfachen Mitteln realisieren:

Eine Stricknadel wird am besten mit Heißkleber in der Mitte eines durchbohrten Bierfilzes befestigt, so daß ein Kreisel entsteht, den man mit den Fingerspitzen in rasche Drehung versetzen kann. Auf den Kreisel lassen sich dann verschiedene Papierscheiben mit unterschiedlich geschwärtzten Sektoren auflegen und in schneller Rotation betrachten. Die mit Tusche geschwärtzten Ringsektoren wählt man zu 1 · 3,6°, 2 · 3,6°, 4 · 3,6°, usw., so daß bei schneller Rotation Kreisringe entstehen, bei denen die mittlere Leuchtdichte um 1%, 2%, 4%, ... usw. abnehmen und überdies vom helleren angrenzenden Gebiet durch scharfe Grenzen abgeteilt sind (s. Bild 1). Aus der Nähe betrachtet kann man bei dieser Versuchsanordnung einen Unterschied von 1% gerade noch wahrnehmen, während 2% oder gar 4% ohne Mühe zu sehen sind.

Zusätzlich läßt sich hiermit zeigen, daß die Schwelle der Helligkeitsempfindung nicht durch die absolute Zunahme des Reizes sondern durch die prozentuale bestimmt ist. Es ist gleichgültig, ob man die Schei-

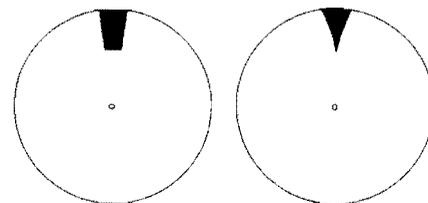


Bild 1 Beispiel einer Vorlage für die rotierende Scheibe zur Bestimmung des Schwellwertes für die Helligkeitsempfindung bei simultaner Darbietung von zwei Zonen unterschiedlicher Leuchtdichte. Die Scheibe ist in zwei konzentrische Bereiche eingeteilt, von denen der innere weiß bleibt.

- a) Übergang mit scharfer Kante
- b) Übergang ohne Kante

be bei hellem Tageslicht oder bei Kerzenschein betrachtet. Der Unterschied von 1% in den Leuchtdichten wird immer wahrgenommen, solange die Beleuchtungsverhältnisse nicht ganz extrem sind.

Auch für die Lautstärkeempfindung lassen sich Schwellwerte auf einfache Weise ermitteln, wenn ein Tonfrequenzgenerator mit einstellbarer Spannungsamplitude U_0 zur Verfügung steht.

Die an einen Lautsprecher abgegebene elektrische Leistung und die von diesem in den Raum abgestrahlte Schalleistung sind zu U_0^2 proportional. Im Experiment wählt man zunächst einen Ton der Frequenz 1000 Hz. Die Aufgabe besteht jetzt darin, den Faktor v zu ermitteln, um den U_0 erhöht werden muß, damit gerade noch eine Zunahme der Lautstärkeempfindung wahrzunehmen ist. Der Wechsel von U_0 auf $v \cdot U_0$ muß dabei ohne Pause erfolgen. Dies erreicht man dadurch, daß man dem Lautsprecher einen einstellbaren ohmschen Widerstand vorschaltet. Wird dieser kurzgeschlossen, so erhöht sich sofort die Spannung am Lautsprecher und damit auch die Schalleistung. Im Experiment verkleinert man den Vorwiderstand so lange, bis die Zuhörer den Unterschied gerade noch wahrnehmen.

Das Verhältnis der dann am Lautsprecher auftretenden Spannungsamplituden kann gemessen werden; für 1kHz erhält man $v = 1,12$, für andere Frequenzen ergeben sich Abweichungen von diesem Wert. Wegen der Proportionalität der Leistung zu U^2 ergibt sich daraus ein Verhältnis der Schallstärke von $v^2 \approx 1,25$. Die Leistung muß daher mindestens um etwa 25 % zunehmen, damit ein Lautstärkezuwachs empfunden wird. Dabei kommt es nicht auf den Abstand der Testperson vom Lautsprecher an, da das Verhältnis der Schallstärken bei wachsendem Abstand konstant bleibt, sofern sich nicht den Testtönen Störgeräusche überlagern. Anzumerken ist noch, daß viele Zuhörer die Änderung der Schalleistung nicht als eine Zunahme der Lautstärke, sondern eher als eine Änderung der Tonhöhe empfinden.

Alle bisher beschriebenen Versuche zeigen eine typische Eigenschaft der untersuchten Sinne: Sie melden uns nicht die absoluten Werte der Änderungen in den Reizen, sondern die relativen. Wenn der Reiz x groß ist, muß die Reizzunahme Δx groß sein, um wahrgenommen zu wer-

den. Bei einem kleinen Reiz x genügt bereits eine entsprechend kleinere Reizzunahme Δx . Diese Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Wenn zwei Reize x_1 und $x_2 = q \cdot x_1$ mit $q > 1$ einwirken, so löst x_2 erst dann eine stärkere Empfindung aus als x_1 , wenn der Faktor q einen bestimmten typischen Wert, den wir hier *Schwellfaktor* nennen, überschreitet. Schwellfaktor deshalb, weil bei einer Vergrößerung des jeweils vorliegenden Reizes um diesen Faktor die Schwelle überschritten wird, bei der gerade noch eine Zunahme der Empfindung wahrgenommen wird. Der Schwellfaktor hängt von dem betrachteten Sinn, den Versuchsbedingungen und der Testperson ab. Man erhält z.B. bei einer sukzessiven Darbietung der Reize für die Helligkeitsempfindung den Schwellfaktor $q = 1,05$, für die Lautstärkeempfindung hingegen $q = 1,25$, wobei es sich um über mehrere Testpersonen gemittelte Werte handelt.

Das Weber-Fechnersche Gesetz

Die Beurteilung einer Sinnesempfindung ist schwierig, da uns keine geeigneten objektiven Meßvorschriften zur Verfügung stehen. Ein Reiz hingegen ist mit physikalischen Meßverfahren objektiv erfaßbar. Es war der Mathematiker, Naturforscher und Psychologe *Gustav Theodor Fechner* (1801 – 1887), der im Anschluß an *Webers* Versuche auf geniale Weise einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Reiz x und der resultierenden Empfindung y konstruiert hat. Seine entscheidende Idee war, die zunächst fehlende Skalierung für die Empfindung y dadurch zu definieren, daß er die kleinsten, jeweils noch wahrnehmbaren Änderungen Δy der Empfindung, die sich durch Überschreitung der jeweiligen Schwelle ergeben, als gleich groß annahm und als Skaleneinheit verwendete. Dabei erhielt er einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Reiz x und zugehöriger Empfindung y /3; 4/:

$$y = c \cdot \log(x/x_0), \quad (1)$$

x_0 bedeutet hier jenen Reiz, bei dem eine Empfindung gerade einsetzt. Für $x = x_0$ erhält man die Empfindung

$y = 0$. Erst wenn $x > x_0$ ist, ergeben sich positive Werte für die Empfindung. Die Konstante c hängt von dem jeweils betrachteten Sinn und von der Skalierung ab.

Der Zusammenhang in Gleichung (1) ist als *Weber-Fechnersches Gesetz* oder auch als psycho-physisches Grundgesetz bekannt/3; 2/:

Üblicherweise wird das Gesetz durch Integration einer Differentialgleichung hergeleitet/3/. Für die Schule ist dieser Weg kaum geeignet. Eine einfache, der Sekundarstufe I gemäße Herleitung (vgl. /5/ und Bild 2) wird im folgenden vorgestellt.

Man geht dabei von einem Gedankenversuch aus: Der Reiz x soll zunächst vom Wert $x = 0$ kontinuierlich bis zu der Grenze $x = x_0$ anwachsen, bei der die Wahrnehmung gerade beginnt und dann in Sprüngen fortschreiten, die jeweils einer gerade wahrnehmbaren Empfindungszunahme Δy , d.h. dem Überschreiten einer Reizschwelle entsprechen. Dem *Weber-Fechnerschen Gesetz* zufolge muß der Reiz dabei jedesmal um dem gleichen Faktor q vergrößert werden, so daß eine geometrische Folge von Reizen

$$x_k = q^k \cdot x_0, \text{ für } k = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

entsteht. Bis zum Erreichen des Reizes x_k werden somit von x_0 an k Reizschwellen überschritten. *Fechners* Annahme zufolge nimmt die Empfindung y dabei von 0 an k -mal um den gleichen Betrag Δy zu, d.h.: also gehört zum Reiz x_k die Empfindung

$$y_k = k \cdot \Delta y. \quad (3)$$

Aus Gleichung (2) und (3) folgt:

$$\begin{aligned} y_k &= \frac{\Delta y}{\log(q)} \log(x_k/x_0) \\ &= c \cdot \log(x_k/x_0), \end{aligned} \quad (4)$$

also das *Weber-Fechnersche Gesetz* gemäß Gleichung (1) für diskrete Werte wie in Bild 2 skizziert. Gleichung (1) beinhaltet zusätzlich die Interpolation für Reize, die jeweils zwischen x_k und x_{k+1} liegen. Hier ist anzumerken, daß die zugehörigen interpolierten y -Werte zwar wahrgenommen aber nicht unterschieden werden können. Gleichung (4) zeigt ferner, wie der Proportionalitätsfak-

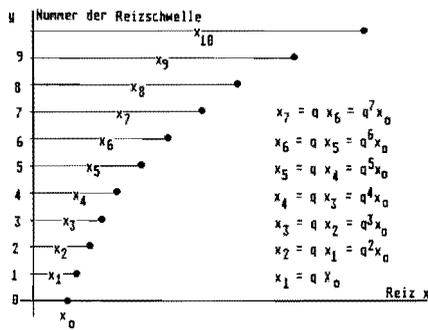


Bild 2 Zur Herleitung des Weber-Fechnerschen Gesetzes: Eine zum Schwellfaktor q gehörige geometrische Folge von Reizen x_k wird abgebildet auf eine arithmetische Folge von Empfindungen, wobei der Unterschied Δy aufeinanderfolgender Empfindungen gerade noch wahrnehmbar ist und als Skaleneinheit auf der y -Achse verwendet wird. Interpoliert man zwischen den markierten Punkten, so entsteht die „logarithmische Empfindungskurve“ entsprechend Gleichung (1).

tor c mit dem Schwellfaktor q und der elementaren Empfindungseinheit Δy zusammenhängt.

Zwei Beispiele sollen dieses Ergebnis noch etwas erläutern:

In der Akustik wird der Schallstärkepegel in dB (Dezibel), und die Lautstärke, die die Empfindung des Ohrs bei gegebener Schallstärke beschreibt, in Phon angegeben [6]. Die Phonskala berücksichtigt die Frequenzabhängigkeit der Lautstärkeempfindung; bei 1kHz gehen beide Skalen ineinander über.

Der elementaren Empfindungseinheit Δy , der eine gerade noch wahrnehmbare Lautstärkezunahme entspricht, ist 1dB zugeordnet. Der zugehörige Schwellfaktor q hat nach den Messungen im 2. Abschnitt den Wert $q = 1,25$. Für den Faktor c ergibt sich dann $c = \Delta y / \log(q) = 1\text{dB} / \log(1,25) \approx 10\text{dB}$ und das Weber-Fechnersche Gesetz geht in die Form

$$y = 10\text{dB} \log(x/x_0) \quad (5)$$

über, die in der Akustik üblich ist und die den Zusammenhang zwischen Lautstärke y und Schallstärke x beschreibt. Als Bezugsschallstärke x_0 wird in der Akustik üblicherweise die Hörschwelle mit $x_0 = 10^{-16}\text{W/cm}^2$ gewählt.

100dB kann das Ohr kurzzeitig, ohne Schaden zu nehmen, ertragen; 130dB entspricht der Schmerzgrenze. Von der Hörschwelle bei 0dB bis 100dB werden somit 10 Zehnerpotenzen überschritten. Dieser Bereich würde auf einer linearen Skala, bei der x_0 auf einen Millimeter abgebildet wird, einer Strecke von 10^4 km entsprechen. Dieser Vergleich veranschaulicht den Vorteil der logarithmischen Verarbeitung von Reizen durch unser Ohr. Der Schallstärkebereich von

10 Zehnerpotenzen, der in der Umwelt vorkommt und vom Ohr bewältigt werden muß, wird durch den Hörsinn auf die eng begrenzte Lautstärkekala von 10dB abgebildet.

Auch in der Astronomie begegnet man dem Weber-Fechnerschen Gesetz. Man kann sogar sagen, daß die Astronomen die Aussage dieses Gesetzes schon 2 000 Jahre vor seiner eigentlichen Entdeckung zur Beurteilung der Helligkeiten von Fixsternen durch das Auge gebrauchten. Seit Hipparch (190 – 120 v. Chr.) werden die Sterne in Größenordnungen, Magnitudines, eingeteilt. Erst im vorigen Jahrhundert hat man diese auf rein subjektiver, visueller Beobachtung beruhende Einteilung auf eine objektive, photometrische Basis bezogen. Hierzu definierte man die Differenz zweier Magnitudines durch den Ausdruck:

$$m_1 - m_2 = -2,5^m \cdot \log(\Phi_1/\Phi_2).$$

Dabei bedeuten Φ_1 und Φ_2 die von den Sternen ins Auge bzw. ins Photometer gelangenden Strahlungsleistungen. Der Zusammenhang mit dem Weber-Fechnerschen Gesetz wird sofort deutlich. Der Skalierungsfaktor $-2,5^m$ ist so festgelegt, daß für die meisten Sterne die seit Hipparch geltenden Größenklassen fast unverändert übernommen werden konnten. Gerade dieser Umstand ist ein sehr überzeugender Beweis dafür, daß auch beim Auge das Weber-Fechnersche Gesetz gilt. Hier beschreibt es die Helligkeitsempfindung als Funktion der einfallenden Strahlungsleistung (Reiz).

Generell ist anzumerken, daß das Weber-Fechnersche Gesetz nur näherungsweise in gewissen Grenzen und auf bestimmte Sinne bezogen den Zusammenhang zwischen Reiz und der daraus resultierenden Empfindung richtig beschreibt. Daß es nicht auf alle Sinne zutrifft, läßt sich sehr schnell am Beispiel des Wärmesinnes zeigen. Steckt man die Hand in einen Topf mit Wasser, der langsam erhitzt wird, so kann man beobachten, wie die Empfindung etwa ab 47° rapide zunimmt und schon ab 50° unerträglich zu werden beginnt. Die Empfindungskurve zeigt hier also – im Gegensatz zur Logarithmusfunktion – einen Anstieg mit zunehmender Steilheit. Dieser ganz andere Verlauf der Empfindungskurve des Wärmesinns ist wiederum an die Erfordernisse unseres Körpers besonders gut angepaßt. Er warnt uns unmißverständlich vor einer Grenze, die nicht überschritten werden darf, da sonst unser Körper Schaden erleiden würde.

Experimentelle Überprüfung des Weber-Fechnerschen Gesetzes

Will man das Weber-Fechnersche Gesetz experimentell überprüfen, so ist man auf die Bestimmung der Schwellfaktoren angewiesen, die naturgemäß nicht so genau bestimmt werden können, wie Größen, die physikalischen Meßverfahren direkt zugänglich sind. Unsere Unterrichtserfahrung zeigt, daß Schüler besonders gespannt darauf sind, das Weber-Fechnersche Gesetz mit den „eigenen“ Sinnen zu überprüfen und zu testen. Hierbei zeigt sich, daß die Bestätigung des Gesetzes unabhängig von den nur ungenauen bestimmbar Schwellfaktoren in einer Reihe von Fällen mit Schülern durchführbar ist und daß eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden kann.

Die Grundidee dabei ist, in einer Versuchsanordnung jeweils eine aufsteigende Folge von Reizen r_0, r_1, \dots, r_n zu erzeugen, der nach dem Weber-Fechnerschen Gesetz äquidistante Empfindungswerte zugeordnet sind. Die eigenen Sinne werden dann – bei Gültigkeit des Gesetzes – eine Folge von Empfindungen vermitteln, die in gleichen Stufen zunehmen.

Wie die Folge der Reize r_k beschaffen sein muß, damit die Differenz zweier aufeinanderfolgender Empfindungswerte jeweils konstant ist, erkennt man schnell anhand von Bild 2:

Soll die Differenz jeweils z elementare Empfindungseinheiten Δy betragen, so müssen von einem Reiz zum folgenden z Reizschwellen überschritten werden, woraus folgt, daß $r_{k+1} = q^z \cdot r_k$ sein muß. Die Reize r_k stellen somit eine geometrische Folge mit dem konstanten Faktor $q^z \geq 1$ dar. Selbstverständlich kann das Bildungsgesetz der Folge r_k auch aus dem Weber-Fechnerschen Gesetz (Gleichung (1)) direkt erhalten werden. Interessant erscheint aber für die Unterrichtspraxis, daß man in der beschriebenen Herleitung die Logarithmusfunktion nicht erkennen muß, um den Inhalt des Gesetzes verstehen und überprüfen zu können.

Soll das Helligkeitsempfinden des Auges geprüft werden, so hat man ihm eine Folge von Flächen darzubieten mit Leuchtdichten, die in geometrischer Progression ansteigen. Es wird dann in gleichen Stufen zunehmende Helligkeit wahrnehmen. Für die Durchführung entsprechender Versuche bieten sich drei Wege an: (1) Zur Erzeugung der Stufen mit einstellbarer Leuchtdichte (Graustufe) kann

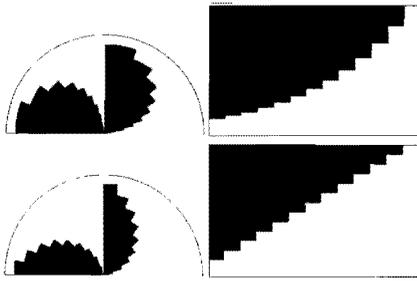


Bild 3 Vorlagen zur Erzeugung von abgestuften Graustufen mit Hilfe rotierender Scheiben (a, b) oder Zylinder (c, d). a, b: Vorlagen für Kreisscheiben mit je 10 Ringsektoren, deren Weißanteile in a) geometrisch und in b) arithmetisch zunehmen. Gezeigt ist jeweils nur eine Hälfte.

c, d: Zylindermäntel für 13 Zylinderringe mit geometrisch (c) und arithmetisch (d) zunehmendem Weißanteil. Falls der Mantel nicht ausreicht ist er durch ein schwarzes Stück Papier geeignet zu ergänzen.

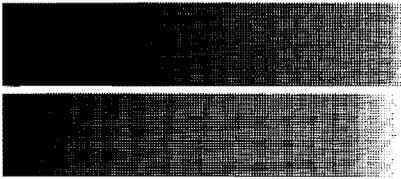


Bild 4 Beispiel für ein Computererzeugtes Raster zur Erzeugung von Graumustern. Im oberen Bild nimmt der Weißanteil von links nach rechts exponentiell und im unteren linear zu. Die Helligkeitszunahme erscheint oben gleichmäßiger.

man die bereits im 2. Abschnitt beschriebenen, rotierenden Kreisscheiben verwenden. Hierzu legt man auf der Scheibe eine Folge von konzentrischen Ringen an und schwärzt in jedem Ring einen Sektor soweit, daß die Sektorwinkel der komplementären, weißen Anteile eine geometrische Folge bilden. Bei schneller Rotation verschmelzen dann für das Auge die schwarzen und weißen Anteile zu gleichmäßig abgestuften Grautönen. Damit dies schon bei kleinen Rotationsfrequenzen geschieht, ist es zweckmäßig, die Scheibe – wie in Bild 3a dargestellt – aus vier gleichen Quadranten zusammensetzen. Der Versuch ist besonders überzeugend, wenn man zum Vergleich eine zweite Kreisscheibe verwendet, auf der die Sektorwinkel der weißen Anteile in Form einer arithmetischen Folge ansteigen (vgl. Bild 3b und /1/). Betrachtet man eine solche Scheibe in schneller Rotation, so hat man das deutliche Empfinden, daß die Stufen bei den dunkleren Grautönen größer sind als bei den hellen.

(2) Anstelle der rotierenden Scheiben lassen sich auch rotierende Zylinder verwenden. Diese haben gegenüber den Scheiben den Vorteil, daß auf dem abgewickelten Zylindermantel die Gesetzmäßigkeit, nach der die Weißanteile zunehmen, sehr gut zu erkennen (vgl. Bilder 3c und 3d) ist. Außerdem ist die Herstellung der Zylinder einfacher. Als Träger des auf Papier gezeichneten Zylindermantels kann man ein Stück einer Postversandröhre nehmen, auf deren offenen Enden passende Pappscheiben aufgeklebt werden. Durch die Mitte der beiden Kreisscheiben wird ein Holzstab (z.B. Schaschlikstab) gesteckt und fest verleimt. Der Antrieb kann mit einer kleinen Bohrmaschine erfolgen.

(3) Schwarz-Weiß-Raster, wie sie z.B. bei der Bildwiedergabe im Zeitungsdruck angewendet werden, eignen sich ebenfalls zur Erzeugung der gewünschten Graustufen. Die unterschiedlichen Helligkeitsempfindungen kommen dabei nicht durch eine zeitliche Mitteilung einer Folge von Lichtimpulsen zustande, sondern durch eine örtliche. Dies liegt daran, daß die hellen und dunklen Elemente im Raster so nah beisammen liegen, daß das Auge sie nicht auflösen kann.

Geeignete Raster lassen sich besonders einfach mit dem Computer erzeugen, was eine für Schüler reizvolle Aufgabe darstellt. Es ist eine Folge von Rastern zu erzeugen, in denen der Weißanteil in Form einer geometrischen bzw. arithmetischen Progression zunimmt. Ein geeignetes Raster /1/ besteht z.B. aus quadratischen Rasterelementen mit 10×10 Pixeln, von denen w Pixel auf weiß und der Rest $(100 - w)$ auf schwarz gesetzt werden. Man kann auf diese Weise auch Graukeile herstellen, die das *Weber-Fechnersche Gesetz* deutlich machen wie in Bild 4 gezeigt ist.

Zusammenfassung

Es wurden Experimente zur Erkundung der menschlichen Sinne vorgestellt, die zum größten Teil auch in der Sek. I durchgeführt werden können. Bei der Erprobung im Unterricht haben wir insgesamt folgende Erfahrungen und Beobachtungen gemacht: Experimente, bei denen die eigenen Sinne Objekt physikalischer Untersuchungen sind, sprechen die Schüler in besonderer Weise an. Sie lassen sich mit wenig Aufwand an Material und Zeit in den Unterricht (auch in Mathematik!) an geeigneter Stelle als Ergänzung einschleiben. Das *Weber-Fechnersche*

Gesetz kann aus den beschriebenen Experimenten sehr elementar hergeleitet werden, wobei auf die Logarithmusfunktion ohne Einbuße an Aussagekraft verzichtet werden kann.

Die dargestellte Thematik eignet sich gut für Projektarbeit, in die auch noch weitere Experimente zum Verhalten unserer Sinne eingebunden werden können. Für Anregungen dazu sei auf /1/, /3/ und /5/ hingewiesen. Die Versuche erfordern meist mehrere Testpersonen, wenn man zu einigermaßen gesicherten Ergebnissen kommen will, so daß sich Gruppenarbeit besonders anbietet. In den Gruppen können gleiche Ziele auf verschiedenen Wegen verfolgt werden. Die dabei von verschiedenen Schülergruppen erhaltenen Ergebnisse sind trotz unterschiedlichen Vorgehens vergleichbar oder stimmen überein. Die Versuche können mit einfachen Bastelarbeiten verbunden werden, die nicht nur eine Herausforderung an das handwerkliche sondern auch an das geometrische Können darstellen und damit viele Elemente des fächerübergreifenden Unterrichts ansprechen.

Literatur

- /1/ Dittmann, H.; Schneider, V.: Experimente zur Sinneswahrnehmung. – In: Wege in der Physikdidaktik Bd. 3. – Palm u. Enke, Erlangen 1993
- /2/ Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 Optik. – Berlin 1993
- /3/ Christoph von Campenhausen: Die Sinne des Menschen, Band II: Anleitungen zu Beobachtungen und Experimenten. – Thieme Verlag 1981
- /4/ Keidel, W.D.: Sinnesphysiologie, Teil I. Allgemeine Sinnesphysiologie - Visuelles System. – Heidelberger Taschenbücher, Springer-Verlag 1971
- /5/ Mach, E.: Analyse der Empfindungen. – Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1991
- /6/ Borucki, H.: Einführung in die Akustik B.I. – Wissenschaftsverlag, Mannheim 1989

Dr. Helmut Dittmann
Prof. Dr. Werner B. Schneider
Didaktik der Physik - Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg
Staudtstr. 7, 91058 Erlangen