

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Experimente zur Sinneswahrnehmung

1. Vorbemerkung

Erste Erfahrungen mit der Natur und daher auch mit der Physik vermitteln uns unsere Sinne. Wer würde sich schon für Physik interessieren, wenn er nicht Natur "wahrgenommen" hätte? Der offenkundigen Bedeutung unserer Sinne wird der Physikunterricht i.allg. kaum gerecht. Im Gegenteil: Häufig geht er von recht einseitig abwertenden Vorstellungen über die Unzuverlässigkeit unserer Sinne aus, um die Notwendigkeit der Einführung von Meßgeräten, die "besser und exakter" sind, zu begründen. Genaueres über die Sinne erfahren die Schüler im Biologieunterricht - wobei dort wiederum die Aspekte der Physik ausgeklammert werden. So bleiben viele interessante und wissenswerte Dinge, die uns und unsere Wahrnehmung unmittelbar angehen, im toten Winkel zwischen zwei Schulfächern verborgen.

Im Rahmen der allseits erhobenen Forderung, fächerübergreifende Aspekte in den Unterricht einzubeziehen, sind die Sinne des Menschen ein für den Physikunterricht durchaus geeignetes Thema. Ergeben sich doch viele Anknüpfungspunkte experimenteller und methodischer Art zu wichtigen Gesetzen der Sinnesphysiologie, die im Biologieunterricht nicht so einfach erarbeitet werden können - z.B. zum logarithmischen Verhalten unserer Sinne, zu erstaunlichen Leistungen unseres Auges bei der Mustererkennung oder unseres Ohres bei der Analyse von Klängen.

Zu der angesprochenen Thematik möchten wir im folgenden einige für den Physikunterricht aufbereitete Versuche vorstellen, die sich in unserem Unterricht vielfältig bewährt haben und die sowohl für die Sekundarstufe I als auch II geeignet sind. Sie bedeuten keine Ausweitung des Lehrstoffes, weil sie sich an geeigneter Stelle als interessante Ergänzung einschleiben lassen. Da sie keine speziellen Vorkenntnisse erfordern, eignen sie sich auch für eine sinnvolle Ausgestaltung von Vertretungsstunden. Im Zusammenhang dargeboten bieten sie sich als Thema für Projektvorhaben an.

Die Sinnesphysiologie ist ein weites und schwieriges Gebiet mit eigener Fachsprache und eigenen Methoden. Unser Vorschlag ist hier nur im Sinne einer Elementarisierung und Aufbereitung für den Physikunterricht zu verstehen. Den Anliegen der Sinnesphysiologie kann er nur ansatzweise gerecht werden. Bei der Aufbereitung geht es uns vor allem darum, mit leicht verfügbaren Hilfsmitteln einfach durchführbare, "physiknahe" Experimente zu realisieren.

2. Einführende Versuche zum Weberschen Grundgesetz

Der Physiologe und Anatom Ernst Heinrich Weber (1795 - 1878) befaßte sich am Anfang des vorigen Jahrhunderts mit der Genauigkeit der Gewichtsempfindung. Dazu machte er folgendes Experiment: Eine Testperson erhielt den Auftrag, zwei Säckchen mit den Gewichten G und G' durch Anheben mit der Hand zu vergleichen. Die ihn interessierende

Frage war: Wie groß muß die Differenz $G' - G$ sein, damit das größere Gewicht gerade noch mit Sicherheit erkannt werden kann? Er fand folgende Antwort: Nicht die Größe der Differenz ist entscheidend, sondern das Verhältnis $G'/G = q$, das einen bestimmten Wert überschreiten muß (Webersches Gesetz, 1834 [9]).

Bald wurde erkannt, daß das Gesetz nicht nur für die Gewichtsempfindung, sondern auch für andere Sinnesempfindungen zutrifft und in folgender Weise verallgemeinert werden kann: Wirkt auf einen Sinn ein Reiz x , der auf x' zunimmt, so kann die Zunahme erst dann erkannt werden, wenn $x'/x = q$ einen typischen Wert überschreitet, der innerhalb weiter Grenzen vom Reiz x selbst unabhängig und für die betreffende Sinnesempfindung typisch ist. Zur Vereinfachung der Sprechweise nennen wir den Wert q "Schwellfaktor", da er angibt, um welchen Faktor der Reiz x anschwellen muß, damit die Zunahme auf $x' = q \cdot x$ gerade noch wahrzunehmen ist.

Anzumerken ist, daß die Messung des Schwellfaktors für eine Sinnesempfindung nicht mit der gleichen Genauigkeit erfolgen kann, wie man sie von physikalischen Messungen gewohnt ist. Man ist immer auf das subjektive Empfinden eines Menschen angewiesen, welches wiederum allerlei Einflüssen unterworfen ist. Bei der Formulierung von physiologischen Gesetzen muß man daher von Meßergebnissen ausgehen, die über viele Einzelpersonen und deren Empfindungen gemittelt sind. Dies ist bei den folgenden Versuchen immer zu berücksichtigen.

Den Weberschen Versuch kann man - etwas abgewandelt - im Unterricht folgendermaßen nachvollziehen:

Versuch 1: Einige gleichartig aussehende Dosen (z.B. Filmdosen oder Kaffebüchsen) werden durch Einfüllen von Schrot oder Sand auf etwa 50g bzw. 500g gebracht. Zusätzlich sind einige Dosen soweit gefüllt, daß sie jeweils 1%, 2%, 5%, 10% und 20% Übergewicht besitzen. Die Aufgabe besteht nun darin, durch einfaches Anheben mit der Hand die Dosen mit Übergewicht herauszufinden. Es zeigt sich, daß bei den 50g-Dosen mit einiger Sicherheit noch jene herausgefunden werden kann, die 5g zuviel enthält, während bei den 500g-Dosen zusätzliche 5g nicht mehr erkannt werden. Hier können erst Zusatzgewichte ab 50g zuverlässig festgestellt werden, d.h. Gewichtsabweichungen lassen sich ab 10% durch Anheben mit der Hand detektieren.

Der Schwellfaktor der Gewichtsempfindung beträgt somit 1,10.

3. Schwellfaktoren der Helligkeitsempfindung

Das Webersche Grundgesetz kann mit einfachen Experimenten auch bei anderen Sinnen untersucht und bestätigt werden. Wenden wir uns zunächst dem Sehen zu, speziell der Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden.

Ein entsprechendes Experiment könnte folgendermaßen aussehen. Man untersucht bei einem durch 100 gleich helle Lampen erleuchteten Raum, ab welcher Zahl von plötzlich zusätzlich eingeschalteten Lampen die Helligkeitszunahme noch wahrgenommen wird. Allerdings ist es sehr aufwendig, eine so große Zahl von Lampen bereitzustellen. Hier hilft das folgende einfache Verfahren, das mit einem Tageslichtprojektor durchgeführt werden kann:

Versuch 2: Es wird eine Folie hergestellt, die das ganze quadratische Bildfeld des Projektors in 120 gleich große Teilquadrate zerlegt. Die Folie wird auf eine Leinwand projiziert, wobei 20 Teilflächen zunächst durch einen Karton abgedeckt werden. Schaltet man im Raum alle Fremdlichtquellen (Lüftungsschlitze im Projektor!) aus, so wird der Unterrichtsraum allein durch 100 etwa gleich helle Lichtquellen, die Bilder der nicht verdeckten Teilflächen, beleuchtet. Jetzt können mit dem Karton z.B. 20, 10 oder 5 der Teile zu- und wieder aufgedeckt werden. Durch dieses "Blinken" der "Lampen" wird ein Schwanken der Raumhelligkeit verursacht. Die Anzahl der blinkenden Lampen wird schrittweise reduziert, bis man im Raum die Helligkeitsschwankungen gerade noch wahrnehmen kann. Die dann festgestellte Zahl der auf- und wieder zugedeckten Teilflächen ist offenbar ein Maß für die Grenze, bei der unser Auge einen Helligkeitszuwachs gerade noch registriert. Man stellt fest, daß für 100 Lampen diese Grenze bei etwa 5 zusätzlichen Lampen erreicht wird, und zwar unabhängig von deren Helligkeit. Letzteres läßt sich dadurch zeigen, daß man die Lichtleistung des Projektors reduziert (Sparschaltung) oder eine Folie mit Grauraster über die erste Folie legt. Damit ist das Webersche Gesetz auch hier bestätigt. Unser Helligkeitssinn kann somit bis zu einer Grenze von 5% noch Unterschiede in der Helligkeit wahrnehmen. Der zugehörige Schwellfaktor beträgt $q = 1,05$. Abweichungen zu größeren q -Werten treten nur unter extremen Bedingungen auf, wie sie bei sehr geringer oder sehr großer Helligkeit vorliegen.

Zum Gelingen des Versuches sind noch folgende Hinweise zu beachten: Da die Raumhelligkeit des nur von der Leinwand beleuchteten Raums i.allg. viel geringer ist als unter normalen Verhältnissen, muß man dem Auge vor Durchführung des Versuches etwas Zeit zur Adaption geben. Außerdem ist zu beachten, daß sich das Auf- und Zudecken von "Lampen" durch Reflexe an glatten Flächen verraten kann. Solche Flächen dürfen also zur Beurteilung der Helligkeitsschwankungen nicht herangezogen werden.

Eine Variante dieses Versuches ist im folgenden dargestellt:

Versuch 3: Eine weiße Projektionsfläche wird mit einer einfachen Experimentierleuchte z.B. aus 0,20 m Entfernung angestrahlt. Eine zweite Leuchte gleicher Bauart und Helligkeit stellt man in größerer Entfernung auf und variiert über den Abstand die Beleuchtungsstärke (Bsp.: 2,0 m Abstand (10fache Entfernung) entspricht $1/100$ der Beleuchtungsstärke der ersten Leuchte). Überlappt man beide unterschiedlich beleuchteten Zonen, so kann man in der helleren die durch die dunklere verursachte Zunahme der Helligkeit entdecken. Die weiter entfernte Lichtquelle erzeugt allerdings einen Lichtkreis mit sehr unscharfen Rändern, so daß man in der Überlappungszone zunächst kaum eine Aufhellung bemerken kann. Hier hilft ein schattenwerfender Schirm, den man in den Lichtkegel der zweiten Leuchte und in die Nähe der Projektionswand bringt. Es entsteht dadurch ein scharfer Übergang zwischen den beiden Zonen, der die Beobachtung noch kleinster Aufhellungen ermöglicht. So stellt man fest, daß bei einer Vergrößerung des Abstands über den Faktor 10 hinaus, die Unterscheidung der Überlappungszone nicht mehr gelingt. Eine Zunahme der Beleuchtungsstärke um 1% wird daher von unserem Auge gerade noch detektiert. Dies ergibt den Schwellfaktor $q = 1,01$.

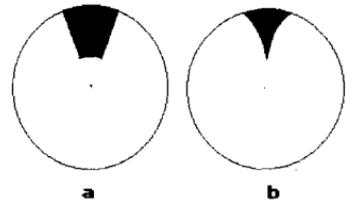
Man erwartet zunächst für die Versuche V2 und V3 den gleichen Schwellfaktor. Die Messungen zeigen jedoch einen signifikanten Unterschied. Die Ursache hierfür ist, daß die Bedingungen für das Auge in beiden Versuchen grundsätzlich verschieden sind. Im Versuch V2 werden die zu unterscheidenden Helligkeiten sukzessive, im Versuch V3 jedoch simultan angeboten, was den Wert für den Schwellfaktor ändert. Man unterscheidet daher zwischen **Sukzessiv-** und **Simultanschwellfaktor**.

Folgende Versuchsanordnung, bei der die beiden Helligkeitsstufen simultan angeboten werden, soll den in V3 gefundenen Wert für den Simultanschwellfaktor bestätigen.

Versuch 4: Hier verwendet man zur Einstellung eines bestimmten Helligkeitsreizes eine schnell rotierende weiße Scheibe, bei der ein Sektor schwarz bemalt wird. Bei gleichmäßiger Beleuchtung der rotierenden Scheibe und genügend schneller Rotation kann das Auge die Folge von weißen und schwarzen Sektoren nicht mehr zeitlich auflösen und erkennt einen Grauton, der dann von der Rotationsfrequenz unabhängig ist und bei einem größeren schwarzen Sektor dunkler erscheint als bei einem kleineren. Die Versuche gelingen am besten bei Tageslicht. Bei künstlicher Beleuchtung treten Störungen aufgrund des Stroboskopeffekts auf, der bei Leuchtstoffröhren besonders stark ist.

Versuch 4a: Man teilt die Kreisscheibe in zwei konzentrische Bereiche: in einen außen gelegenen Ring, von dem ein Sektor schwarz bemalt wird, und eine innen liegende kleinere Kreisscheibe, die weiß bleibt (siehe Abb. 1a). Bei Rotation verschmelzen die schwarz-weißen Sektoren des jeweiligen Bereichs, und es werden dem Auge zwei Helligkeitsstufen simultan angeboten, die durch eine scharfe Kante getrennt sind. Als günstig haben sich Scheiben mit Ringsektoren von 4° , 7° , 14° und 29° erwiesen, was ungefähr 1%, 2%, 4% und 8% von 360° bedeutet und bei Rotation zu entsprechenden Helligkeitsunterschieden zwischen den beiden Zonen führt.

Abb. 1: Scheiben zur Bestimmung des Simultanschwellfaktors der Helligkeitsempfindung;
a) Übergang mit Kante
b) Übergang ohne Kante



Die Versuche mit Scheiben unterschiedlicher Sektorengöße zeigen, daß es ohne Schwierigkeiten möglich ist, bei der 8%- und der 4%-Scheibe - selbst aus größerer Entfernung - den Helligkeitsunterschied wahrzunehmen. Bei einer 2%-Scheibe muß man schon genauer hinschauen und bei einer 1%-Scheibe ist das Erkennen des Unterschieds erst bei sehr genauem Hinschauen und nur aus der Nähe möglich. Der Simultanschwellfaktor ist somit 1,01 wie im Versuch V3.

Versuch 4b: Die scharfe Kante zwischen beiden Helligkeitsfeldern ist wesentlich für das Erkennen eines Unterschieds. Dies zeigt sich deutlich, wenn man eine Scheibe verwendet, bei der der schwarze Sektor gemäß Abb. 1b von 4% außen auf 0% innen abnimmt. Rotiert diese Scheibe, so tritt ein kontinuierlicher Übergang vom dunkleren Rand zum helleren

Zentrum auf. Es zeigt sich, daß jetzt - bei fehlender Kante - der Helligkeitsunterschied zwischen den beiden Ringen kaum zu detektieren ist. Selbst eine von 8% auf 0% abnehmende Helligkeitsminderung läßt sich nur mit Mühe erkennen.

Dieser Effekt erklärt auch, warum es bei der Entfernung von Flecken aus Kleidungsstücken mehr auf die Entfernung der scharfen Ränder als auf die restlose Beseitigung des eigentlichen Flecks ankommt.

4. Schwellfaktoren der Lautstärke- und Tonhöhenempfindung

In ähnlicher Form wie beim Auge lassen sich auch Sinnesempfindungen, die mit dem Gehör verbunden sind, untersuchen. Als erstes wird gezeigt, wie man den Sukzessivschwellfaktor für die Lautstärkeempfindung mit schulüblichen Geräten ermitteln kann:

Versuch 5a: Man benötigt dazu einen Tongenerator mit angeschlossenem Lautsprecher. Die Frequenz ist hier und im folgenden auf 1000 Hz eingestellt. Ein Maß für die Schallstärke ist der Strom durch die Lautsprecherspule, der mit Hilfe eines noch bei 1000 Hz zuverlässig arbeitenden Amperemeters gemessen wird. Die zugehörige Schallempfindung wird durch die Lautstärke beschrieben. Für die Feststellung der jeweiligen Schwelle ist es wichtig, daß die Schallstärke und damit die Stromstärke - ähnlich wie der Wechsel der Helligkeitsstufe - möglichst schnell um den jeweils interessierenden Prozentsatz geändert wird. Hierzu wird in den Lautsprecherstromkreis ein Einstellwiderstand geschaltet, der durch einen Schalter überbrückt werden kann, so daß der Strom um einen durch den Widerstand bestimmten Prozentsatz anwächst. Die Untersuchung sieht dann folgendermaßen aus:

Bei einer mittleren Einstellung der Amplitude des Tongenerators wählt man z.B. einen Widerstandswert, bei dem die Stromstärke durch das Überbrücken auf das 1,5fache zunimmt. Das damit verbundene Anschwellen der Lautstärke ist deutlich zu hören. Wählt man eine kleinere Amplitude des Tongenerators, so ist zwar die Lautstärke entsprechend kleiner, der Strom nimmt jedoch auch hier nach dem Überbrücken den 1,5fachen Wert an. Der Lautstärkesprung ist immer noch mit gleicher Deutlichkeit zu hören. In weiteren Versuchen wird über den Widerstandswert der Faktor für den Stromsprung soweit verkleinert, bis die Zuhörer das Anschwellen der Schallstärke gerade noch empfinden. Die Untersuchung ergibt als Grenzwert den Faktor 1,10 - 1,15. Weiter stellt man fest, daß die absolute Schallstärke diesen Wert praktisch nicht beeinflußt. Erst bei sehr geringer Schallstärke wird er größer. Damit findet man auch beim Hören das Webersche Grundgesetz gut bestätigt.

In der Literatur wird oft die vom Lautsprecher umgesetzte elektrische Leistung P zur Charakterisierung einer Schallquelle verwendet. Der entsprechende Schwellfaktor q , jetzt bezogen auf die Schalleistung, berechnet sich dann zu: $q = P'/P = (I'/I)^2$; er liegt entsprechend dem obigen Ergebnis zwischen 1,20 und 1,30.

Versuch 5b: Hinsichtlich der Wahrnehmung von Schallstärkeunterschieden ist unser Ohr offensichtlich nicht besonders leistungsfähig. Wie steht es aber mit der Wahrnehmung von Frequenzunterschieden? Hierzu wird für den entsprechenden Schwellfaktor 1,001 angegeben (s. [9]), was ein erstaunlich kleiner Wert ist. Der Nachweis ist mit den schulüblichen Tonge-

neratoren nicht so einfach durchzuführen, weil eine schnelle und genaue Änderung der Frequenz um einen so kleinen Betrag kaum zuverlässig eingestellt werden kann. Den erforderlichen kleinen Frequenzunterschied kann man aber unter Zuhilfenahme des Dopplereffektes erreichen. Die relative Frequenzänderung ist hier gleich dem Verhältnis von Quellengeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit. Wenn man eine Stimmgabel mit der Geschwindigkeit von 34cm/s (1/1000 der Schallgeschwindigkeit) auf die Zuhörer zubewegt, so können diese gerade noch eine Zunahme der Tonhöhe feststellen. In dieser Hinsicht ist unser Ohr also erheblich genauer als unsere übrigen Sinne. Das hat zur Folge, daß z.B. an den Gleichlauf von Plattenspielern und Tonbandgeräten besonders hohe Ansprüche zu stellen sind, wenn man auf gute Wiedergabe Wert legt.

Anzumerken ist, daß wir hier nicht auf das simultane Hören von zwei Schallsignalen unterschiedlicher Frequenz eingehen können. Über die damit verbundenen Besonderheiten und Beobachtungen werden wir an anderer Stelle berichten.

5. Überraschende Eigenschaften von Auge und Ohr

In Versuch V3 ist beschrieben, daß unser Auge geringe Helligkeitsunterschiede besonders gut detektieren kann, wenn zwischen beiden Helligkeitsfeldern eine scharfe Kante vorhanden ist. Die Sinneszellen unseres Auges sind in raffinierter Weise so zusammengesaltet, daß Kontraste verstärkt werden. Hierdurch wird unserem Bewußtsein klargemacht, daß an dieser Kante eine Fläche mit einer anderen Helligkeit beginnt. Nach dem Überscheiden der Grenze empfinden wir durch diese Kontrastüberhöhung die anschließende Fläche insgesamt heller bzw. dunkler. Diese Erscheinung ist von E. Mach zum erstenmal genauer untersucht worden [10].

Versuch 6: Um die Kontrastüberhöhung zu demonstrieren ist in Abb. 2 ein Graukeil dargestellt, der aus einem computererzeugten Punkteraster besteht. Die kleinen quadratischen Bereiche des Rasters setzen sich aus jeweils 10x10 Pixeln zusammen. In Abb. 2a sind von 0 bis P die Rasterquadrate gleich und zwar ist von den 100 Pixeln nur eines schwarz gesetzt. Von P nach Q nimmt die Zahl der pro Rasterquadrat schwarz gesetzten Pixel bis Q linear zu und erreicht in Q den Wert 80 von 100. Von Q bis E bleibt diese Zahl konstant. In Abb. 2b ist der entsprechende Helligkeitsverlauf dargestellt. Aus größerer Entfernung kann das Auge die einzelnen Pixel nicht mehr auflösen, es sieht einen Graukeil. Das Auffällige daran ist, daß an den beiden "Kanten" P und Q des Keils, dort wo jeweils der Bereich mit konstanter Helligkeit in einen mit veränderter Helligkeit übergeht, ein dunklerer bzw. hellerer Streifen erscheint, für den es keinen objektiven Grund gibt.

Ernst Mach beschreibt diesen Effekt in seinem Werk "Analyse der Empfindungen" [10] und zieht sinngemäß folgende Konsequenz: Bei der Lichtempfindung, die an einer Stelle der Netzhaut hervorgerufen wird, spielt nicht nur die Helligkeit an dieser Stelle eine Rolle, sondern auch die Abweichung derselben vom Mittelwert der Helligkeit der Umgebung. Unser Auge - oder vielmehr die nachgeschaltete "Verrechnungs- und Auswertungsinstanz" unseres Gehirns - übertreibt solche Abweichungen und versucht auf diese Weise - sehr zu unserem Nutzen - Strukturen in die Umwelt hineinzutragen. So ist manches, was wir gemein-

hin als Täuschung negativ abtun, eigentlich zu unserem Vorteil eingerichtet.

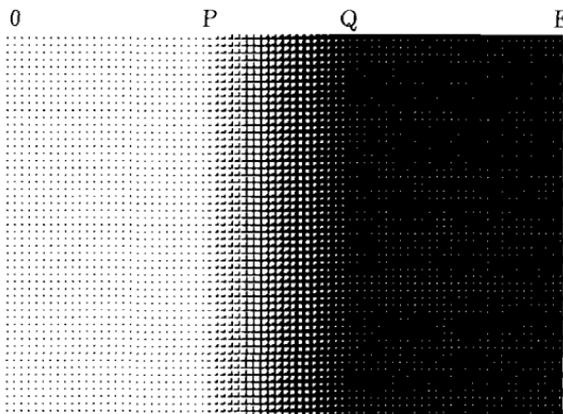


Abb. 2a

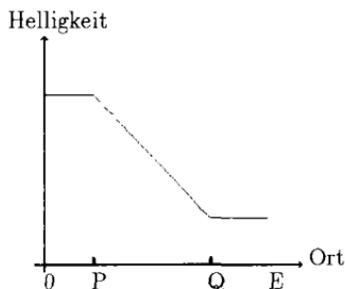
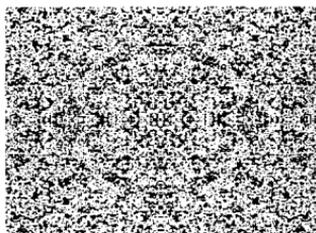


Abb. 2b

- Abb. 2a:** Graukeil zur Demonstration des Mach-Effekts. Die Kontrastüberhöhung ist gut zu erkennen, wenn man das Bild aus einer größeren Entfernung betrachtet, bei der die Punkte des Rasters nicht mehr mit dem Auge aufgelöst werden können.
- 2b:** Helligkeitsprofil längs des mit dem Computer erzeugten Graukeils.

Versuch 7: Das Bestreben unseres Gesichtssinnes, Strukturen zu finden, kann man durch folgenden, einfachen Versuch verdeutlichen. Er wird mit Hilfe des in Abb. 3 gezeigten, computererzeugten Musters durchgeführt.



- Abb. 3:** Zufallsmuster mit zwei orthogonalen Symmetrieachsen. Das Auge erkennt verschiedene Ornamente, obwohl die Punkte in jedem Viertel statistisch verteilt sind.

Das Muster besitzt zwei orthogonale Symmetrieachsen, die durch die Bildmitte gehen und parallel zu den Rechteckseiten sind. Für die Erstellung des ersten Viertels des Bildes werden mit einem Computerprogramm die Pixel des Bildschirmrasters nacheinander mit der Wahrscheinlichkeit 0,25 auf "schwarz" gesetzt. Durch wiederholte Spiegelungen des so erzeugten Muster wird schließlich die ganze Rechteckfläche ausgefüllt. Die Punkte sind zufällig verteilt und liegen insgesamt so dicht, daß das Auge sie nicht mehr trennen kann. Deckt man drei Viertel des Musters ab, so ist das erwartete Grau nicht zu erkennen. Es zeigen sich vielmehr dunklere und hellere Bereiche, die sich zu markanten Mustern zusammenschließen. Das Auge sucht offensichtlich nach lokal dichter bedruckten Bereichen und faßt sie zu Strukturen zusammen, die oft die Form von kleinen "Maden" haben. Noch deutlicher wird das Bestreben nach Mustererkennung, wenn man die ganze Fläche betrachtet. Jetzt erscheinen dem "Auge" in der Nähe der Symmetrieachse phantasievolle Ornamente.

Als Ergebnis dieses Versuchs ist festzuhalten, daß zufallsgenerierte Pixelmuster wenig geeignet sind, um abgestufte Grautöne aus Schwarz und Weiß aufzubauen. Sind die Pixel jedoch periodisch angeordnet (s. Abb. 2), so tritt der störende Strukturierungseffekt nicht auf. Druckereien berücksichtigen diese Erkenntnis und erzeugen Grautöne mit Hilfe periodischer Muster, die z.B. aus kleinen schwarzen Kreisflächen mit variablem Durchmesser zusammengesetzt sein können.

Versuch 8: Auch beim Hören treten überraschende Effekte auf, die mit dem beschriebenen Mach-Effekt eine gewisse Ähnlichkeit haben. So kann z.B. bei der Durchführung des Versuchs V5 zur Bestimmung des Schwellfaktors für die Lautstärkeempfindung zusätzlich beobachtet werden, daß man bei einer nur sehr kleinen, sprunghaften Zunahme der Schallleistung einen etwas helleren, d.h. höheren Ton zu hören glaubt, obwohl die Frequenz des Generators nicht geändert wurde. Diese vermeintliche Tonerhöhung ist es, die unsere Aufmerksamkeit eher weckt, als die zunehmende Lautstärke selbst.

6. Das Weber-Fechnersche Gesetz

Aus den bisher beschriebenen Versuchen geht hervor, daß ein Reiz x (z.B. Gewicht, Lichtleistung, Schalleistung) physikalisch quantifizierbar ist, aber die von ihm hervorgerufene Empfindung nicht. Unsere Wahrnehmung kann zwar zwischen mehr oder weniger entscheiden, eine quantitative Angabe zu den Empfindungen ist jedoch nicht möglich, da eine Skalierung der Empfindungen zunächst nicht gegeben ist.

Es war der Mathematiker, Naturforscher und Psychologe Gustav Theodor Fechner (1801 - 1887), der im Anschluß an Webers Versuche einen funktionalen Zusammenhang zwischen Reiz x und Empfindung y konstruiert hat. Dazu mußte er zunächst eine Skalierung der Empfindung vornehmen. Ausgangspunkt seiner Überlegung war, daß er die zur Skalierung notwendigen Empfindungsschritte Δy dadurch festlegte, daß er den Reiz vom Überschreiten einer Schwelle bis zum Überschreiten der nächstfolgenden Schwelle anwachsen ließ und registrierte. Die entscheidende Idee war nun, zu postulieren, daß die so erhaltenen Empfindungsschritte Δy alle gleich sind und daß Δy als Empfindungseinheit dienen kann. Die Empfindungsskala entsteht dann durch wiederholtes Aneinandersetzen der Einheit, wobei für Δy ein beliebiger Maßstab gewählt werden kann.

Konkret bedeutet dies, daß z.B. der Empfindungszuwachs, der durch eine Reizzunahme $\Delta x = 5\text{g}$ an der leichten Dose von 50g spürbar wird, ebenso groß ist, wie jener, der durch eine Zunahme $\Delta x = 50\text{g}$ an der 500g-Dose hervorgerufen wird.

Damit war es möglich, das Webersche Gesetz folgendermaßen zu formulieren:

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

In dieser Form nennt man es Weber-Fechnersches Gesetz oder auch psycho-physisches Grundgesetz. Dabei ist x_0 jener Reiz, bei dem die Empfindung gerade einsetzt ($x = x_0$ ergibt $y = 0$). Die Konstante "c" hängt von dem jeweils betrachteten Sinn (z.B. Ohr, Auge) und einem Skalierungsfaktor ab.

Üblicherweise wird das Gesetz durch Integration einer Differentialgleichung hergeleitet. Es ist jedoch auch eine einfachere, der Sekundarstufe I gemäße Herleitung möglich, die von

dem folgenden, in Abb. 4 erläuterten Gedankenversuch ausgeht:

Der Reiz x soll zunächst vom Wert $x = 0$ kontinuierlich bis zu der Grenze $x = x_0$ zunehmen, bei der die Wahrnehmung gerade beginnt. Ab dieser Schwelle markiert man diejenigen x -Werte, die jeweils einer gerade noch wahrnehmbaren Empfindungszunahme - also dem Überschreiten einer Reizschwelle - entsprechen.

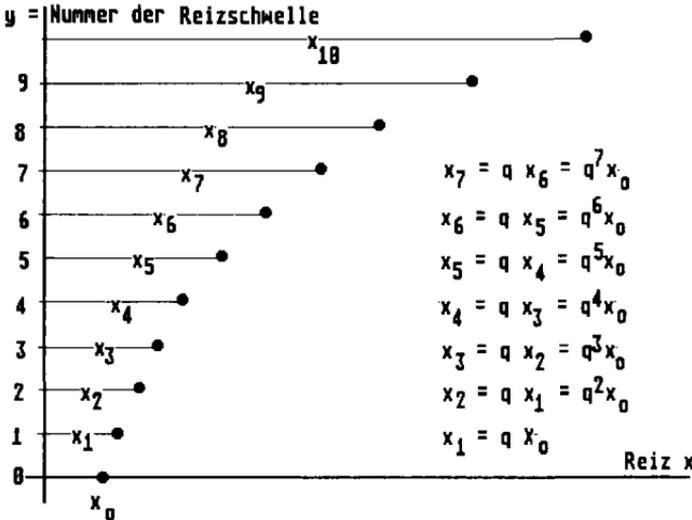


Abb. 4: Zur Herleitung des Weber-Fechnerschen Gesetzes

Dem Weberschen Gesetz zufolge muß der Reiz dabei jedesmal um den gleichen Faktor q vergrößert werden. In Abbildung 4 sind hierzu die aufeinanderfolgenden Reize x_1, x_2, \dots, x_n nach rechts aufgetragen, wobei sich ein Reiz x_k jeweils aus dem vorherigen Wert gemäß $x_k = q \cdot x_{k-1}$ ergibt. Dem Reiz x_k wird die Empfindung $y = k \cdot \Delta y$ zugeordnet, wobei Δy die elementare Empfindungseinheit darstellt, die zum erstenmal beim Überschreiten der ersten Schwelle auftritt und nach Fechner beim Überschreiten der jeweils folgenden Schwellen gleich bleibt. Für den Zusammenhang zwischen dem Reiz x und der Nummer k der jeweils überschrittenen Schwelle ergibt sich:

$$x = q^n \cdot x_0 \quad (2)$$

Diese Gleichung beinhaltet das Weber-Fechnersche Gesetz in einer für die Sekundarstufe I passenden Form. Sie ermöglicht auch eine experimentelle Überprüfung des Gesetzes (vgl. dazu Abschnitt 7).

Falls die Logarithmusfunktion bereits bekannt ist, kann durch beidseitiges Logarithmieren und nachfolgendes Umstellen Gl (2) in folgender Form geschrieben werden:

$$n = (1/\log(q)) \cdot \log(x/x_0) \quad (3)$$

Mit $n = y/\Delta y$ folgt unmittelbar:

$$y = (\Delta y/\log(q)) \cdot \log(x/x_0) \quad (4)$$

Aus der Akustik ist die Gleichung (4) in der folgenden Form bekannt:

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

Dabei ist y die in Dezibel (dB) gemessene Lautstärke und x die Schalleistung. Mit dem in Versuch V5 gefundenen Wert für den Schwellfaktor $q = 1,25$ gilt in guter Näherung für den Vorfaktor in Gl. (4) $\Delta y / \log(q) \approx 10 \cdot \Delta y = 10 \text{ dB}$. Für die Einheit der Empfindung erhält man somit $\Delta y = 1 \text{ dB}$ (Anmerkung: in der Literatur wird neben dem dB häufig die Einheit "Phon" gebraucht. Beide Einheiten sind näherungsweise gleich [11]).

Auch in der Astronomie spielt das Gesetz (4) eine Rolle: Schon Hipparch teilte die für ihn sichtbaren Sterne aufgrund von Helligkeitsabschätzungen mit dem Auge in 6 Klassen ein, zwischen denen bei seinen Beobachtungen gleiche Helligkeitsunterschiede lagen [3]. Dem heller erscheinenden Stern ordnete er die niedrigere Helligkeitsklasse zu. Mit dem Aufkommen photometrischer Messungen um die Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde die scheinbare Helligkeit zu einer meßbaren Größe. Sind z.B. Φ_1 und Φ_2 die von zwei Sternen ins Auge bzw. Photometer gelangenden Strahlungsleistungen, so läßt sich der Unterschied der scheinbaren Helligkeiten nach dem Weber-Fechnerschen Gesetz folgendermaßen berechnen:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot 1^m \cdot \log(\Phi_1 / \Phi_2) \quad (6)$$

Der Wert $-2,5$ des Proportionalitätsfaktors in Gl. (6) ergibt sich durch die Anpassung der modernen, auf objektiven Messungen und Gl. (4) beruhenden Skala an die historische, durch Hipparch begründete. Die Tatsache, daß die nach (6) berechneten Helligkeitswerte mit Hipparchs durch rein visuelle Beobachtung erhaltenen Größenklassen in den meisten Fällen gut übereinstimmen, ist ein überzeugender Beweis für die Gültigkeit des Weber-Fechnerschen Gesetzes.

7. Versuche zur Bestätigung der Empfindungsskalen

Das Weber-Fechnersche Gesetz fordert nach unserer Erfahrung beim Schüler eine Reihe von Fragen heraus. Es sieht nämlich wie ein physikalisches Gesetz aus, beruht aber - von der Seite der Physik aus gesehen - zunächst auf zweifelhaft erscheinenden Voraussetzungen, wenn man an die Unsicherheit bei der Bestimmung der Schwellfaktoren denkt. Wir stellten fest, daß die Schüler besonders neugierig darauf waren, das Weber-Fechnersche Gesetz mit den "eigenen" Sinnen zu überprüfen und zu testen.

Im folgenden werden daher einige einfache Experimente und Anregungen zur Überprüfung des Weber-Fechnerschen Gesetzes angegeben.

Die Grundidee dabei ist, in einer Versuchsanordnung jeweils eine Folge von Reizen $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ zu erzeugen, die eine Folge von Sinnesempfindungen hervorruft, welchen auf der Fechnerschen Skala äquidistante Werte $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ zugeordnet sind. Dann versucht man zu beurteilen, ob die hervorgerufenen Sinneseindrücke wirklich als äquidistant empfunden werden. Bei der Erzeugung der Reize gehen wir von der in Gl. (2) gegebenen Form des Weber-Fechnerschen Gesetzes aus.

Versuch V9: Für die Schallempfindung läßt sich eine Folge von Reizen dieser Art mit einem Tongenerator und angeschlossenem Lautsprecher erzeugen. Man muß nur die Strom-

stärke bei fester Frequenz durch geeignete Maßnahmen sprunghaft über mehrere Stufen um einen festen Faktor, z.B. 2, erhöhen. Die jeweilige Schalleistung nimmt dann jeweils um den Faktor 4 zu, dem $6,2$ elementare Empfindungsschritte ($1,25^{6,2} = 4$) oder $6,5$ dB entsprechen. Bei der Überprüfung beschränkten wir die Zahl der Folgenglieder n (Stufen) auf $n = 6$.

Die erwartete Gleichmäßigkeit der Lautstärkezunahme kann allerdings nur dann bestätigt werden, wenn die Schalleistung sprunghaft anwächst. Um dies zu garantieren schaltet man, wie in Versuch 5a beschrieben, passende Widerstände in den Lautsprecherkreis und überbrückt sie der Reihe nach über einen mehrstufigen Drehschalter, so daß der Strom und damit die Schalleistung in der oben geforderten Weise sprunghaft zu- oder abnehmen kann.

Eine andere, die Schüler zu eigenem Tun herausfordernde Lösung ist, die Folge der Signale auf Tonband aufzunehmen. Beim Abspielen läßt sich dann leicht beurteilen, ob die Lautstärke gleichmäßig zunimmt. Dabei ist allerdings darauf zu achten, daß insgesamt der übliche Aussteuerbereich eines Tonbandgeräts von 65 dB nicht überschritten wird, da sonst Verzerrungen auftreten [2]. Eine noch elegantere und vielseitigere Methode ist, Töne und verschiedene Tonfolgen mit einem Computer zu generieren und über einen D/A-Wandler hörbar zu machen, wie es mit Hilfe eines heute vielen Schülern zur Verfügung stehenden Sound Samplers leicht möglich ist [11].

Versuch V10: Gleichmäßig zunehmende Helligkeitsstufen können folgendermaßen erzeugt werden:

a) Erzeugung von Helligkeitsstufen durch Beleuchtung: In einem verdunkelten Raum lassen sich auf einem Schirm die erforderlichen, unterschiedlich hellen Felder mit Hilfe gleichartiger Experimentierleuchten erzeugen. Die gewünschte Abstufung wird über den um einen konstanten Faktor zunehmenden Abstand zum Schirm eingestellt. Die auf diese Weise ausgeleuchteten Flächen müssen gleiche Größe haben und sich dicht aneinander reihen, was durch Aufstellen geeigneter Blenden erreicht werden kann. Die Felder dürfen auch nicht zu groß sein, weil hauptsächlich die hellen Felder die Raumhelligkeit vergrößern und damit die Ausleuchtung insbesondere der dunkleren Felder verfälschen. In einem Klassenzimmer üblicher Größe kann man etwa 4 Stufen auf diese Weise erreichen.

b) Durch Bewegungsverschmelzung: Hierzu verwendet man schnell rotierende Scheiben mit hellen und dunklen Sektoren (s. Abb. 1), wie sie bereits in Abschnitt 3 beschrieben wurden.

Die Experimente lassen sich von jedem Schüler selbst durchführen. Auch die Scheiben kann sich jeder Schüler selbst herstellen. Die dazu notwendige Bastelarbeit erfordert nur geometrisches Grundwissen, Genauigkeit und Sorgfalt. Die einfachste Möglichkeit, die Scheibe in schnelle Drehung zu versetzen, ist die Scheiben auf einen Kreisel zu befestigen, den man aus einem zentrisch durchbohrten Bierfilz - oder besser aus einer größeren Scheibe aus starker Pappe - herstellt. Als Achse verwendet man einen Holzstab (Mikado- oder Schaschlik-Stäbchen) oder eine Stricknadel. Die Achse wird am besten mit Heißkleber befestigt, der es gestattet, noch innerhalb der Aushärtezeit die Achse senkrecht zur Ebene der

Scheibe zu justieren. Der Vorteil dieses Kreisels besteht darin, daß einmal keine Lagerprobleme auftreten und zum anderen der Antrieb recht einfach ist. Günstig ist, den Kiesel durch Drehen der Achse zwischen der Handflächen anzuwerfen und auf einem Teller auslaufen zu lassen.

Die Frage nach einem Dauerantrieb stellte sich allerdings bei unseren Versuchen sehr bald. Er läßt sich leicht mit Hilfe eines kleinen Elektromotors realisieren. .

Die jeweils erforderlichen Schwärzungen der Ringsektoren können auf unterschiedlichem Weg erzeugt werden. Da viele Schüler oft keine sinnvolle Verwendungsmöglichkeit für ihren Computer kennen, regen wir hiermit die Herstellung der Scheiben mit Hilfe des Computers und Druckers an. In Abb. 5 und 6 sind zwei Beispiele angegeben. Es ist jeweils nur ein Viertel der Scheibe gezeigt. Die volle Scheibe erhält man, indem man vier identische Kopien herstellt und die Teile zusammenfügt.

Das Beispiel in Abb. 5 zeigt eine Kreisscheibe für 12 äquidistante Helligkeitsstufen. Bei der Herstellung haben wir uns von Gl. (2) leiten lassen. Für den inneren Ring ist der Anteil der weißen Fläche $x_0 = a = 0,1$ (Winkel des weißen Sektors $0,1 \cdot 90^\circ$), während für den äußeren $x_{11} = 1$ ist. Die dazwischen liegenden Bruchteile errechnen sich aus :

$$x_n = a \cdot r^n \text{ mit } r = a^{-1/11} = 1,232847.$$

Bei rotierender Scheibe gelangt dann eine von Ring zu Ring um 23% zunehmende Strahlungsleistung ins Auge. Die gleichmäßige Zunahme beobachtet man allerdings nur dann, wenn der von dem geschwärzten Teil eines Rings herrührende Lichtanteil gegenüber dem vom weißen Sektor aus ins Auge gelangende Anteil vernachlässigbar ist.

Das Beispiel in Abb. 6 ist für jene gedacht, die das Weber-Fechnersche Gesetz nicht kennen oder anzweifeln. Man läßt die Sektoren x_i , so wie es zunächst plausibel erscheint, in Form einer arithmetischen Folge zunehmen. In Abb. 6 ist die Folge $x_n = a + m \cdot n$ mit $m = 0,9/11$ gewählt. Für eine entsprechend hergestellte Scheibe nimmt bei Rotation der Weißanteil beim Übergang von Ring Nr. 0 (innen) zu Nr. 1 um 100% zu und von Ring Nr. 10 zu Nr. 11, dem äußeren, ganz weißen Ring, nimmt er nur noch um 9% zu. Entsprechend sieht man innen größere Helligkeitsstufen als außen.

Es ist jedoch auch möglich, für alle Schüler gleichzeitig die entsprechenden Versuche mit Hilfe eines Tageslichtprojektors zu demonstrieren. Man verwendet hier am besten eine Scheibe aus dünnem Plexiglas mit einer Achse aus Metall durch das Zentrum, so daß insgesamt ein Kiesel entsteht. Die jeweils erforderlichen dunklen Sektoren werden einfach durch passend ausgeschnittene Pappe erzeugt.

Auch mit rotierenden Zylindern läßt sich die Bewegungsverschmelzung von schwarzen und weißen auf dem Zylindermantel liegenden Flächen herbeiführen. Die Herstellung eines Mantels, der bei Rotation entsprechend abgestufte Ringe zeigt, ist eine einfachere geometrische Aufgabe, als die Ring-Sektorenscheibe herzustellen. Das Ergebnis ist auch "einsichtiger": Der abgewickelte Zylindermantel zeigt schwarze "Säulen", welche die Gesetze der Zunahme (der geometrischen bzw. arithmetischen Folge) deutlicher zeigen. Der Zylinder kann in genügend schnelle Rotation versetzt werden, indem man ihn mit einer Achse versieht, die sich auf eine Bohrmaschine aufstecken läßt. Er muß aber sehr präzise gebaut werden, sonst wird er bei der Rotation durch Unwucht zerstört.

Abb. 5:

Quadrant einer Ring-Sektorenscheibe zur Demonstration von 12 gleichmäßig zunehmenden Helligkeitsstufen. Der Weißanteil x_n ($n = 0, 1, \dots, 11$) der Ringe nimmt von innen nach außen zu. Er kann festgelegt werden durch einen Bruchteil des Winkels 90° . Es gilt: $x_n = x_0 \cdot r^n$, $n = 0, 1, 2, \dots, 11$ mit $x_0 = 0,1$ und $r = 0,123$.

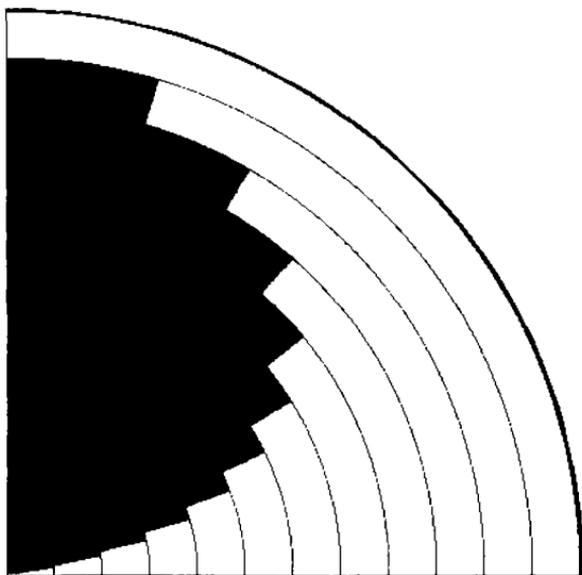
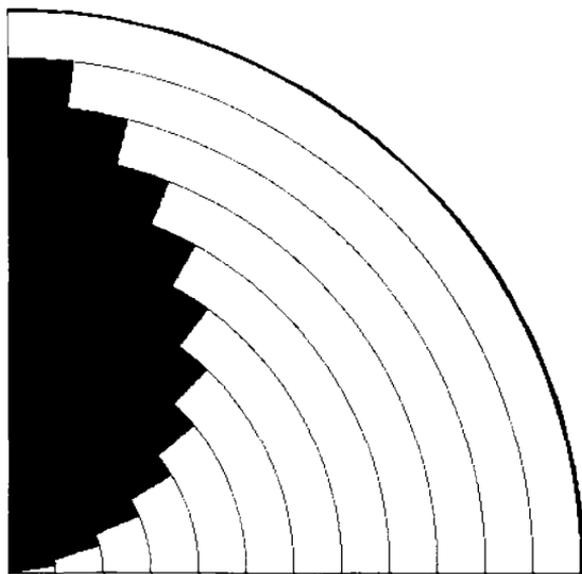


Abb. 6:

Quadrant einer Ring-Sektorenscheibe für 12 Helligkeitsstufen, die in Form einer arithmetischen Folge zu nehmen. Für die Weißanteile der Ringe gilt:

$x_n = x_0 + m \cdot n$, $n = 0, 1, \dots, 11$ mit $x_0 = 0,1$ und $m = 0,9/11$



c) **Erzeugung von Helligkeitsstufen durch Schwarz-Weiß-Raster:** Hierzu bieten sich die in Abschnitt 5 erwähnten computererzeugten Schwarz-Weiß-Raster an, die man leicht selber herstellen kann. Die Verschmelzung von Schwarz und Weiß geschieht dabei durch das Überschreiten der Auflösungsgrenze des Auges. Die Muster müssen, wie in Abschnitt 5 erläutert, aus periodisch angeordneten Elementen, z.B. kleinen quadratischen Elementarbereichen, zusammengesetzt sein, in denen ein definierter Anteil der Fläche weiß bleibt.

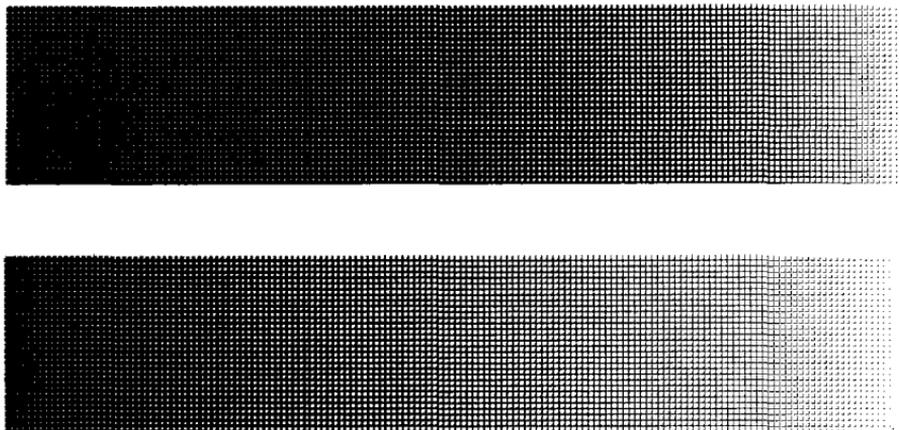


Abb. 7: Computererzeugte Graukeile, oben exponentiell und unten linear

Die Herstellung der Graumuster in verschiedenen, aufeinander abgestimmten Helligkeitsstufen stellt eine besondere Herausforderung zur Computeranwendung dar. In Abb. 7 sind zwei Beispiele gezeigt, in denen als "Elementarzellen" der Muster Quadrate aus 12x12 Pixeln dienen, von denen links 134, rechts nur noch 1 auf schwarz gesetzt wurde. Die Anzahl der auf weiß gesetzten Pixel steigt im oberen Keil exponentiell nach rechts an, im unteren linear. Dem Weber-Fechner-Gesetz entsprechend wächst die Helligkeit beim oberen Keil nach rechts gleichmäßig an, beim unteren nimmt sie dagegen erst rasch, dann immer langsamer zu.

Die Voraussage des Weber-Fechnerschen Gesetzes läßt sich gut in Abb. 7 bestätigen. Der exponentielle Graukeil, in dem der Helligkeitswert nach rechts also gleichmäßig zunimmt, kann für ein weitere interessante Untersuchung dienen, nämlich zur Beantwortung der Frage, wieviele deutlich verschiedene Grauwerte das Auge in einem Bild gleichzeitig wahrnehmen kann. Dazu zerschneidet man den Graukeil in so kurze Streifen, daß man innerhalb einer Streifenbreite keine Helligkeitsunterschiede mehr erkennen kann.

Die angegebenen Versuche sollen insgesamt nur erste Anregungen geben, um durch eigene Initiative das Weber-Fechnersche Gesetz zu entdecken und um weitere Untersuchungen durchzuführen.

8. Zusammenfassung

Für ein Aufgreifen der physikalischen Aspekte der Sinneswahrnehmung im Unterricht spricht nach unserer Meinung das Interesse, das wir immer wieder bei den Schülern an diesem Thema feststellen konnten. Die hier vorgestellten Versuche und die daraus resultierenden Erkenntnisse können im Physikunterricht nur eine Randstellung einnehmen. Teilaspekte lassen sich jedoch da und dort im normalen Unterricht behandeln, etwa in Form des themenübergreifenden Lernens [12] oder in Vertretungsstunden, um sie interessanter zu machen. In geschlossener Form ist die Thematik sicher nur im Rahmen eines Projekts zu erarbeiten. Der neue Bayerische Fachlehrplan [8] sieht für die 9. Jahrgangsstufe z.B. das Projekt "optische Wahrnehmung" vor, für dessen Verwirklichung ein Teil der geschilderten Experimente gut geeignet ist. Bei einem solchen Projekt werden natürlich auch die additive Farbmischung und die Farbeffekte bei den sogenannten Benham-Scheiben [5], die wir in dieser Arbeit ausgeklammert haben, zu thematisieren sein.

9. Literatur

- [1] Christoph von Campenhausen: Die Sinne des Menschen, Band I: "Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung"; Band II: "Anleitungen zu Beobachtungen und Experimenten"; Georg Thieme Verlag Stuttgart 1981
- [2] E. E. David jr.: "Aufzeichnung und Wiedergabe von Klängen". In: die Physik der Musikinstrumente, Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg 1988
- [3] F. Gondolatsch, G. Groschopf, O. Zimmermann: "Astronomie II", Klett Verlag Stuttgart 1979
- [4] R.L. Gregory: "Auge und Gehirn - Zur Psychophysiologie des Sehens" Kindlers Universitäts-Bibliothek
- [5] A. Maelicke (Hrsg.): "Vom Reiz der Sinne", VCH Verlag, Weinheim 1990
- [6] Bernhard Hassenstein: "Biologische Kybernetik", Quelle & Meyer Verlag, Heidelberg 1967
- [7] Inge Klebe - Joachim Klebe: "Durch die Augen in den Sinn", Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln 1984
- [8] Lehrplan für das bayerische Gymnasium, Fachlehrplan Physik, KWMBI I 1991 So.-Nr. 9 S. 1271
- [9] Wolf D. Keidel: "Sinnesphysiologie, Teil I: Allgemeine Sinnesphysiologie, Visuelles System", Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York, 1971
- [10] Ernst Mach: "Analyse der Empfindungen", Nachdruck der 9. Auflage, Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt 1991
- [11] M.V. Mathews u.a.: "Der Computer als Musikinstrument". In: Die Physik der Musikinstrumente, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg 1988
- [12] H. Dittmann, W. B. Schneider: "Ein Plädoyer für themenübergreifendes Lehren und Lernen im Physikunterricht", in Wege in der Physikdidaktik, Band 2, Erlangen 1991
- [11] F. Scheminzky: "Die Welt des Schalls", 2. Auflage, Salzburg 1943