

Sinneswahrnehmung und Naturwissenschaft

Physik

Naturwissenschaftliches Praktikum

(v2.1)

0. Einführung

- 1.0 Das Klangröhrenprojekt – didaktische Vorbemerkungen**
- 1.1 Das Klangröhrenprojekt – Aufgabenstellung**
- 1.2 Der Bau eines Monocords**
- 1.3 Untersuchungen mit einem Monocord**
- 1.4 Smartphone, Tablet oder PC als Frequenzmesser**
- 1.5 Der Zusammenhang von Tonintervallen und Frequenzen**
- 1.6 Der Zusammenhang von Frequenz und Länge einer Klangröhre**
- 1.7 Das Herstellen einer Klangröhre nach vorbestimmtem Ton**

- 2.0 Der Zusammenhang von Reiz und Empfindung**
- 2.1 Der Zusammenhang der Schwereempfindung und Masse**
- 2.2 Der Zusammenhang von Lautstärke und Schallintensität**
- 2.3 Der Zusammenhang von Helligkeit und Lichtintensität**

- A1 Beispiele von Tagebüchern zum Klangröhrenprojekt**
- A2 Zur Physik von Klangröhren**
- A3 Schülerprotokoll zur Untersuchung der Schwereempfindung**

Dieter Plappert

Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien)

Freiburg

Problemstellung:

„Wenn jemand z.B. die linke Hand in heißes Wasser, die rechte in kaltes taucht und daraufhin beide in lauwarmes, so hat er nicht in beiden Händen dasselbe Wärmegefühl, d.h. für ein und dieselbe Temperatur haben wir manchmal zwei verschiedene Wärmeempfindungen. Unser Wärmesinn ist unzuverlässig, er lässt sich leicht täuschen. Deshalb benutzen wir in der Physik Messgeräte die vom Sinneseindruck des Menschen unabhängig sind. Thermometer stellen den Wärme-Zustand eindeutig fest.“

So oder ähnlich beginnen viele Physikbücher der Sekundarstufe I das Kapitel Wärmelehre, vermutlich wird der oben beschriebene Versuch häufig als Einstieg im Unterricht eingesetzt. Die Botschaft dieses Versuches können wir folgendermaßen beschreiben: Die Sinne des Menschen täuschen sich bzw. lassen sich täuschen; sie gaukeln uns eine nicht wirklich vorhandene sondern nur subjektiv empfundene Welt vor. Wir dürfen ihnen nicht trauen, sondern nur den mit rationalem Verstand entwickelten Messgeräten; nur auf diese Weise können wir die Welt objektiv erfahren. Durch diese Art der Betrachtungsweise wird unsere eigene Erfahrung abgewertet. Viel reizvoller und vermutlich viel zeitgemäßer wäre es jedoch, das oben beschriebene Phänomen ernst zu nehmen, es zu problematisieren und den Zusammenhang von der Gleichheit des äußeren Reizes (lauwarmes Wasser) und der unterschiedlichen Empfindung zu studieren. Dann würde deutlich werden, dass sich nicht ein „Sinn täuscht“, sondern vielmehr derjenige, der die zum Verständnis dieses Phänomens notwendigen Zusammenhänge nicht durchschaut.

Die im Folgenden beschriebenen Versuche sollen in erster Linie die Schülerinnen und Schüler dazu anregen, ihre Sinne zu schulen, genauer wahrnehmen zu lernen. Sie sollen Vertrauen bekommen in das, was sie selber empfinden, sie sollen erleben, dass es im subjektiven Empfinden für manche Fragestellungen objektive Gesetzmäßigkeiten gibt. Dies scheint mir gerade in der heutigen Zeit, in der die Heranwachsenden immer weniger eigene primäre Erfahrungen machen können, besonders notwendig zu sein.

Im ersten Teil wird das „Klangröhrenprojekt“ beschrieben: um eine konkrete Aufgabe zu lösen, ein „Windspiel“ zu bauen, müssen Gesetzmäßigkeiten aus verschiedenen Bereichen der Physik, Mathematik und Musik erarbeitet werden. Dieses fächerübergreifende Projekt kann, so wie dargestellt, in der Klasse 11 durchgeführt werden; einzelne Praktikumsversuche zur Akustik können auch früher sinnvoll eingesetzt werden. Bei diesem Projekt wird exemplarisch die „Tagebuchmethode“ angewendet. Im zweiten Teil stehen Versuche und Betrachtungen zum „psycho-physikalischen Grundgesetz“ von Weber und Fechner im Mittelpunkt, das den Zusammenhang von einer Empfindungsgröße („psychische“ Größe) mit einer „physikalischen“ Größe beschreibt. Wir wissen zwar heute, dass der Gültigkeitsbereich dieser Beziehung im

Gegensatz zum Stevenschen Ansatz beschränkt ist. Das Weber-Fechnersche Gesetz spielt jedoch in vielen Bereichen der Technik (z.B. bei der Messung von Lautstärke etwa bei der Phon- und Dezibelskala und bei Helligkeitsmessungen) eine zentrale Rolle und kann durch Praktikumsversuche, die in der Schule durchgeführt werden können, für die Schülerinnen und Schüler erlebbar gemacht werden. Ein Reiz der hier behandelten Fragestellungen ist auch, dass sie von sich aus weit über die Naturwissenschaften hinaus fächerübergreifend sind. Neben Biologie, Chemie und Physik spielt besonders auch die Mathematik eine große Rolle; ein Teil der hier dargestellten Inhalte kann im Mathematikunterricht im Rahmen einer Lehrplaneinheit „Mathematik in der Praxis“ gewinnbringend eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang sei auch bemerkt, dass die im ersten Teil behandelten akustischen Untersuchungen auch „psycho-physikalische“ Untersuchungen sind, sofern es um Zusammenhänge wie etwa von Tonhöhe („psychischer Größe“) und z.B. Frequenz („physikalischer“ Größe) geht.

Literatur:**Zur Tagebuchmethode:**

Getrost, Gabriele/ Würker, Achim: Mathematik erzählen; MNU 52/3 (15.4.99)
S.146-151

Zur Sinnesphysiologie:

Campenhausen von, Christoph: Die Sinne des Menschen; Thieme Verlag Stuttgart
Schmidt, R.F.: Grundriss der Sinnesphysiologie; Springer-Verlag Berlin
Schmidt, R.F./Thews, G.: Physiologie des Menschen; Springer-Verlag Berlin
Hajos, Anton: Wahrnehmungspsychologie; Kohlhammer-Verlag Stuttgart

1.0 Das Klangröhrenprojekt – didaktische Vorbemerkungen

„Bauen Sie ein Windklangspiel aus Aluminiumröhren, so dass ein von Ihnen vorbestimmter Klang zum Erklingen kommt!“

Diese ganz konkrete Aufgabenstellung kann von Schülerinnen und Schülern der 11. Klasse mehr oder weniger selbständig durchgeführt werden. Dabei erscheinen Gesetzmäßigkeiten, die im Physik-, Mathematik- und Musikunterricht behandelt worden sind, in einem neuen, für die Schülerinnen und Schüler ungewohnten Zusammenhang und müssen miteinander kombiniert werden. Eine Stärke des Projektes ist, dass die Messungen und theoretischen Überlegungen am Ende zu einem praktischen Ergebnis führen und somit „gnadenlos“ auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden können.

Es folgen Bemerkungen zu den einzelnen Abschnitten:

1.1.: Nicht das Ergebnis sondern der Weg ist oft das Entscheidende. Das von den Schülerinnen und Schülern selbständig angefertigte Tagebuch gibt Zeugnis von den Überlegungen, den Gefühlen und den Taten auf diesem Weg. Das Schreiben verlangsamt die Gedankenentwicklung und hilft dadurch zu einer tieferen eigenen Beschäftigung.

1.3.: Der Bau des Monocords sowie die mit dem Monocord durchgeführten Untersuchungen können in jeder Klassenstufe durchgeführt werden. Bei der Durchführung der Versuche zum Auffinden der „harmonischen Punkte“ sollte darauf geachtet werden, dass die Schülerinnen und Schüler selbständig diese besonderen Punkte finden und bei diesen Untersuchungen die Möglichkeit haben, unvoreingenommen die Qualität der größeren und kleineren Harmonie der Intervalle zu erleben. So wird vielleicht das Erstaunen der Pythagoräer nacherlebbar, dass das Tonerlebnis sich beim gleichmäßigenkontinuierlichen Verkürzen einer Saite sprunghaft, d.h. in Quanten, verändert und dass dies durch einfache Zahlenverhältnisse mathematisch beschrieben werden kann.

1.5.: Je nach Möglichkeit und Interesse können hier musiktheoretische Grundlagen behandelt werden.

1.6.: Je nach der zur Verfügung stehenden Zeit können Röhren verschiedener Wandstärken aus unterschiedlichen Materialien oder massive Stäbe untersucht werden.

Danksagung:

Dieses Projekt geht auf Anregungen von Herrn StD U. Hocke vom Droste-Hülshoff-Gymnasium Meersburg zurück; dafür möchte ich Herrn Hocke herzlich danken!

Ziele:

Aus drei bis sechs Röhren oder Metallstäben soll ein Klangspiel gebaut werden, so dass einen Klang erklingt, den Sie selbst gewählt haben.

Tagebuchmethode:

Jedes Team führt während der Bearbeitung des Projekts eine Art Tagebuch, in dem nicht nur alle wesentlichen Schritte und Ergebnisse festgehalten werden sollen, sondern in dem auch auf Fragen der folgenden Art eingegangen werden soll:

- Welche Vorstellungen zum Thema gingen mir durch den Kopf?
- Wo ist mir das Thema bereits schon einmal begegnet?
- Welche Fragen haben sich mir zum Thema gestellt?
- Wie habe ich versucht, die Fragen zu beantworten?
- Welche Schwierigkeiten ergaben sich dabei?
- Wie bin ich mit diesen Schwierigkeiten umgegangen?
- Woran wurde ich während der Arbeit erinnert?
- Was habe ich dabei gelernt?
- Welche Fragen blieben offen, die ich in der nächsten Stunde in Angriff nehmen muss?

Jedes Team führt ein gemeinsames Tagebuch; jeder Mitarbeiter des Teams fertigt einzelne Teile des Tagebuchs selbständig an, kennzeichnet sie mit seinem Namen. Die Verantwortung für das entstandene Tagebuch trägt das **Team gemeinsam**, d.h. für die Qualität der Inhalte, des Layouts, usw.

Das Tagebuch muss spätestens eine Woche nach Ende der Unterrichtseinheit bzw. des Projektzeitraums abgegeben werden.

Es soll soweit ausgearbeitet sein, dass es von der äußeren Form her als wissenschaftlicher Artikel in einer Zeitschrift veröffentlicht werden könnte.

Aufgabe:

Um das Ziel dieses Projektes zu erreichen, müssen verschiedene Fragestellungen und Teilaufgaben gelöst werden.

- Erstellen Sie eine Liste der Arbeitsschritte, die Sie dabei bearbeiten müssen.
- Planen und beschreiben Sie, wie Sie die jeweiligen Schritte durchführen wollen.
- Erstellen Sie eine Liste mit Informationen, die Sie benötigen.
- Geben Sie an, wie Sie sich die Informationen beschaffen wollen.
- Erstellen Sie eine Liste der Experimente, die Sie durchführen wollen.
- Ermitteln Sie auch, welche Hilfsmittel Sie dazu benötigen.

Ziele:

Es soll ein Monocord gebaut werden, das für spätere Versuche als Experimentiergerät dienen soll.

Material:

Holzlatte (z.B. Dachlatte), etwa 70 cm lang, mit vorgebohrten Wirbellöchern (1)

2 Dreieckleisten aus Holz, etwa 4 cm lang (2)

2 dünne Gitarrensaiten (3)

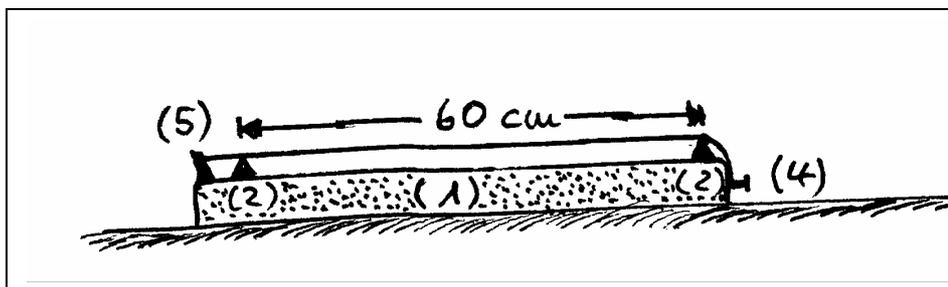
2 Nägel (4)

Hammer

Lineal oder Meterstab

2 Zitterwirbel (5)

Stimmschlüssel bzw. 5er-Schraubenschlüssel



- Stecken Sie jeweils einen Nagel durch die Ösen einer Saite und schlagen Sie den Nagel so in eine der Stirnkanten der Holzlatte, dass die beiden Saiten am Ende einen Abstand von etwa 3 cm voneinander haben.
- Schlagen Sie mit dem Hammer die beiden Stimmwirbel in die vorgebohrten Löcher.
- Fädeln Sie die Saiten in die Wirbel ein und spannen Sie die Saiten mit dem Stimmschlüssel leicht.
- Schieben Sie nun zwei Dreieckleisten als „Steg“ unter die Saiten, dass ihre Oberkanten einen Abstand von genau 60 cm haben.
- Spannen Sie nun die erste Saite bis sie angezupft einen schönen Ton ergibt.
- **Achtung: Spannen Sie die Saite behutsam, damit sie nicht reißt!**
- Stimmen Sie anschließend die zweite Saite so, dass sie denselben Ton wie die erste Saite ergibt.

Bezugsquellen:

Stahlsaiten, Stimmschlüssel und Zitterwirbel sind in jedem Musikgeschäft erhältlich oder auch bei

Opitec

Hohlweg 1

97232 Giebelstadt-Sulzdorf

Die restlichen Bauteile sind im Baumarkt zu finden.

(Anstelle einzelner Saiten kann auch Stahldraht bzw. Klaviersaitendraht von der Rolle verwendet werden (empfehlenswerte Stärke etwa 0,5–0,7 mm))

1.3**Untersuchungen mit einem Monocord****Ziele:**

Zunächst sollen nach der pythagoreischen Methode am Monocord die besonderen Tonintervalle gefunden und bestimmt werden. Danach soll der Zusammenhang der Intervalle und der Saitenlänge ermittelt werden.

Material:

Monocord

5 Klebepunkte

Meterstab

1 Dreieckleiste aus Holz, etwa 4 cm lang, (wie in 1.2.)

Stimmschlüssel bzw. 5er-Schraubenschlüssel

Der Zusammenhang von Saitenlänge und Tonhöhe:

- Nehmen Sie den beweglichen Steg, schieben Sie ihn unter eine der Saiten und zupfen Sie den „verkürzten“ Teil der Saite an! Bewegen Sie den Steg so, dass die Saite immer kürzer wird. Zupfen Sie immer von neuem an.
- Beschreiben Sie, wie sich die Höhe des Tons ändert, wenn die Länge einer Saite kürzer wird.

Der Zusammenhang der Länge zweier Saiten mit dem erklingenden Tonintervall:

- Stimmen Sie zunächst beide Saiten auf denselben Ton. Diesen Ton nennen wir im Weiteren den „Grundton“.
- Nehmen Sie nun wieder den beweglichen Steg und schieben Sie ihn wieder unter **eine** der Saiten. Zupfen Sie den „verkürzten“ Teil der Saite und gleichzeitig auch die zweite ungekürzte Saite (Grundton) mit an. Es werden Zweiklänge (=Intervalle) hörbar. Bewegen Sie wieder den Steg so, dass die Saite immer kürzer wird.
- Die hörbaren Intervalle sind nicht nur verschieden groß, sondern haben verschiedene Qualitäten. Versuchen Sie diese zu beschreiben!
- Ermitteln Sie die Punkte, an denen besonders harmonisch klingende Intervalle entstehen. Kennzeichnen Sie diese besonderen Stellen durch einen Klebestreifen (=harmonische Punkte).
- Die harmonischen Punkte ergeben besondere Intervalle; nennen Sie die Namen dieser Intervalle.
- Messen Sie für diese Intervalle die Länge der verkürzten Saiten und vergleichen Sie diese mit der Länge der ganzen Saite, die den Grundton ergibt. Welche Gesetzmäßigkeit ergibt sich?
- Stimmen Sie die Saiten so um, dass sich ein neuer Grundton ergibt. Suchen Sie wieder die Saitenlängen, bei denen sich die besonderen Intervalle ergeben.
- Formulieren Sie die Gesetzmäßigkeit, die den Zusammenhang der Intervalle und der Länge zweier Saiten beschreibt („Längen-Intervall-Gesetz“).

Ziel:

Verwendung eines Smartphones oder Tablets zur Bestimmung der Frequenz in Praktikumsversuchen.

Material:

Smartphone oder Tablet
App zur Frequenzanalyse

Musikinstrument (z.B. Monochord)

Darstellung des Frequenzspektrums und Bestimmung der (Grund)-Frequenz :

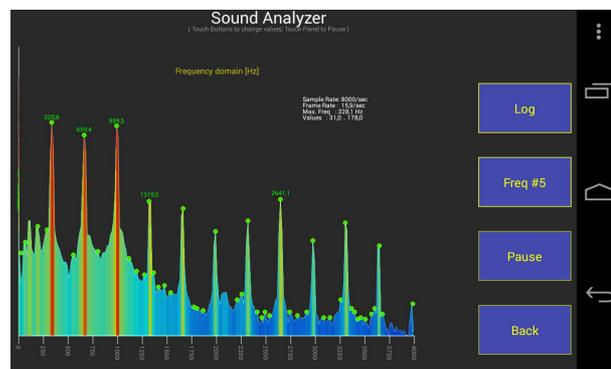
Mit einer „Stimmgerät“-App zur Stimmung von Instrumenten lässt sich die Frequenz eines Tones einfach ablesen. In den unten aufgeführten Apps kann das ganze Frequenzspektrum eines Klangs dargestellt werden, woraus die Grundfrequenz ermittelt werden kann. In den einschlägigen Stores wird eine Vielzahl unterschiedlicher Programme hierfür angeboten. Die Grundfrequenz wird im Folgenden mit „Sound Analyzer“ auf einem „Android“-Smartphone ermittelt.

- Laden Sie zunächst eine zur Messung der Frequenz von Tönen geeignete App auf ihr Smartphone herunter.
- Öffnen Sie die App und lassen Sie sich den Frequenzbereich anzeigen (*Frequency Domain*)

Das interne Mikrofon nimmt den Schall der Umgebung auf und in der App werden die Frequenzen bis 4000 Hz entsprechend ihrer Intensität (qualitativ) dargestellt.

- Erzeugen Sie mit dem Musikinstrument einen Ton. Schlagen Sie bei einem Saiteninstrument (Monochord) ggf. mehrmals hintereinander die Saite an.
- Betrachten Sie das Frequenzspektrum.

Sie werden, abhängig vom Instrument, eine charakteristische Verteilung der Intensitätsmaxima (*Peaks*) beobachten, die sich vom sonstigen „Frequenzgemisch“ abheben. Durch Wahl der Option „*Freq #5*“ werden die Frequenzen der fünf größten Maxima in Echtzeit angegeben. Die Grundfrequenz ist die unterste Frequenz der Maxima.



- Bestimmen Sie die Grundfrequenz.

Bezugsquelle:

- „Audio Kit“ (iOS, 6,99 €): <https://itunes.apple.com/de/app/audio-kit/id376965050>
- „Speedy Spectrum Analyzer“ (Android, 4,99 €): <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.electronchaos.SpeedySpectrumAnalyzer>
- „Sound Analyzer“ (Android, kostenfrei): <https://play.google.com/store/apps/details?id=processing.test.soundanalyzer>

Ziel:

Einsatz eines PCs zur Bestimmung der Frequenz in Praktikumsversuchen.

Material:

PC

Mikrofon

Musikinstrument (z.B. Monochord)

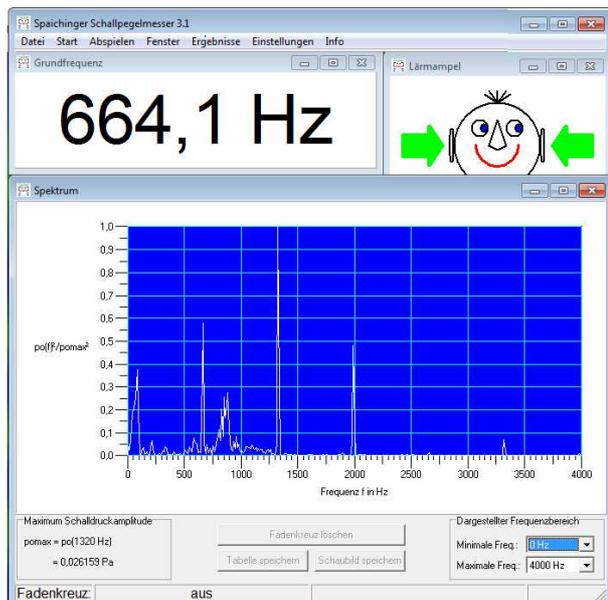
Programm zur Frequenzanalyse

Darstellung des Frequenzspektrums und Bestimmung der (Grund)-Frequenz :

Mit dem „Spaichinger Schallpegelmesser“ kann die Grundfrequenz in Echtzeit am PC ausgegeben werden, sowie (neben vielen weiteren Ausgaben) auch ein Frequenzspektrum.

- Öffnen Sie das Programm „Spaichinger Schallpegelmesser“ und klicken Sie in der Menüleiste unter *Start* auf *Messung (schnell oder langsam)*.
- Erzeugen Sie mit dem Musikinstrument einen Ton.
- Lesen Sie die Grundfrequenz ab und betrachten Sie das Frequenzspektrum.

In der Menüleiste unter *Einstellungen* kann ggf. das externe Mikrofon ausgewählt werden.



Mit der freien Software „Audacity“ lassen sich ebenfalls umfassende Analysen durchführen.

Anmerkung:

Die kostenfreien Programme reagieren zum Teil sehr sensibel und ungedämpft. Sollte die Bestimmung der Grundfrequenz nicht zweifelsfrei möglich sein, kann jede beliebige „Stimmgerät“-App mit Frequenzanzeige verwendet werden. Dass hierbei jedoch auch die einer Tonhöhe zugeordneten, normierten Frequenz (z.B. $a^1 = 440$ Hz) mit angegeben wird, kann die Unterscheidung von „Empfindungsgröße“ und „physikalischer Größe“ erschweren.

Bezugsquelle:

- „Spaichinger Schallpegelmesser“ (Freeware, Windows) und umfassende Dokumentation: <http://www.spaichinger-schallpegelmesser.de/>
- „Audacity“ (Freeware, Windows/Mac/Linux): <http://audacity.sourceforge.net>

Das Erproben des Frequenzmessers:

- Starten Sie Ihren Frequenzmesser (auf Smartphone, Tablet oder PC)

Bestimmen Sie im Folgenden jeweils die Frequenz der erzeugten Töne (es genügt die Grundfrequenz).

- Singen Sie einen gleichbleibenden Ton in das Mikrofon. Versuchen Sie möglichst gut die Tonhöhe zu halten.
- Ändern Sie nun die Tonhöhe.
- Schlagen Sie eine Stimmgabel an, drücken Sie den Stimmgabelfuß und das Mikrofon auf den Tisch. Messen Sie so die Frequenz der Stimmgabel.
- Erzeugen Sie einen Ton, indem Sie auf einem Reagenzglas oder einer Weinflasche blasen. Messen Sie die Frequenz.
- Füllen Sie Wasser in die Weinflasche, blasen Sie wieder an und messen Sie die Frequenz des entstehenden Tones.
- Erzeugen Sie mit einem Musikinstrument einen Ton und messen Sie dessen Frequenz.

Protokoll:

- Beschreiben Sie, wie Sie das Frequenzmessgerät einsetzen können und worauf Sie bei den Frequenzmessungen achten müssen.

Ziele:

Der Zusammenhang von Tonhöhe und den Intervallen mit der Frequenzen soll ermittelt werden.

Material:

Selbstgebautes Monocord mit beweglichem Steg und markierten harmonischen Punkten

Frequenzmessgerät

Stimmschlüssel

Musikinstrumente, z.B. Blockflöte

Der Zusammenhang der Tonintervalle mit den Frequenzen der Töne :

- Ermitteln Sie für verschiedene Intervalle mit dem Frequenzmesser die Frequenzen der beteiligten Töne.
- Vergleichen Sie die Messergebnisse mit den zuvor gefundenen „Längen-Intervall-Gesetz“.
- Stellen Sie die für die einzelnen Intervalle charakteristischen Verhältniszahlen in einer Tabelle zusammen (=Intervallverhältnis).
- Formulieren Sie das entsprechende „Frequenz-Intervall-Gesetz“.
- Spielen Sie verschiedene Intervalle auf einem Musikinstrument, z.B. auf einer Blockflöte, messen Sie die dabei beteiligten Frequenzen und überprüfen Sie so Ihr „Frequenz-Intervall-Gesetz“.

Der Zusammenhang der Tonhöhe mit der Frequenzen des Tones:

- Um die Frequenz eines Tones f_1 zu erhalten, der um einen bestimmten Intervallschritt höher liegt als der Ton mit einer vorgegebenen Frequenz f_0 , muss f_0 mit dem entsprechenden Intervallverhältnis multipliziert werden. Berechnen Sie auf diese Weise die Frequenzen der entsprechenden Töne, wenn a mit $f = 440$ Hz als Grundton gewählt wird. Sie erhalten so die Frequenzen der „reinen“ Stimmung.
- In der europäischen Musik wird die Oktave in 12 gleichgroße, elementare Intervalle, die Halbtöne, unterteilt. In dieser „temperierten“ Stimmung haben die elementaren Intervalle alle dasselbe Intervallverhältnis. Begründen Sie, dass dieses $\sqrt[12]{2}$ betragen muss.
- Berechnen Sie mit diesem Verhältnis die Frequenzen der Töne, die mit a eine Quinte, Quarte, große und kleine Terz ergeben und vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen der „reinen“ Stimmung.

1.7 Das Herstellen einer Klangröhre nach vorbestimmtem Ton

Ziele:

Nachdem die Frequenz-Längen-Funktion bestimmt wurde, soll nun eine Klangröhre hergestellt werden, die einen selbstgewählten Ton bzw. ein Klangspiel, das einen selbstgewählten Klang zum Erklingen bringt.

Material:

Aluröhren	Meterstab
Frequenzmessgerät	Metallsäge
Gehrungsschneidlade	Feile bzw. Schleifpapier
Bohrmaschine mit 3 mm Bohrer	etwa 30 cm Schnur
Dübelholz	Etwa 10 cm Blumendraht

Die Wahl eines Tones:

- Wählen Sie sich einen Ton aus, den Sie erklingen lassen wollen.
- Berechnen Sie die Frequenz des Tones. (Anleitung: a habe die Frequenz 440 Hz; bei temperierter Stimmung erhalten Sie die Frequenz eines Halbtons höher jeweils durch Multiplikation mit dem Faktor $\sqrt[12]{2}$.)
- Bestimmen Sie mit Hilfe Ihrer Frequenz-Längen-Funktion die für Ihren gewählten Ton benötigte Röhrenlänge.

Das Herstellen der Klangröhre:

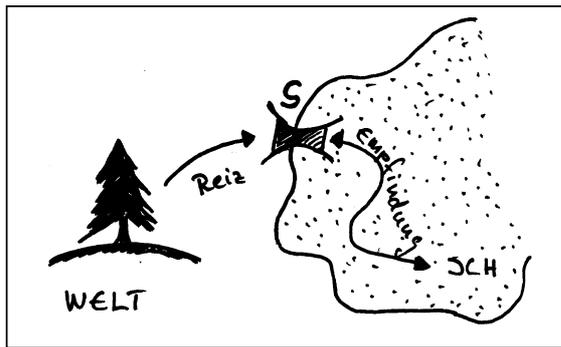
- Damit der Schnitt rechtwinklig wird, benutzen Sie die Gehrungsschneidlade.
- Umwickeln Sie die Röhre mit Papier, um sie gegen das Verkratzen zu schützen.
- Entgraden Sie die Ränder vorsichtig mit der Feile bzw. dem Schleifpapier.
- Suchen Sie die Stelle für die Bohrungen, indem Sie die Röhre zwischen zwei Finger halten und sie mit dem Dübelholz anschlagen bis sie am besten klingt. Markieren Sie diese Stelle.
- Bohren Sie durch die Röhre hindurch und entgraden Sie anschließend die Bohr-
löcher.
- Fädeln sie die Schnur durch die Bohrung und verknoten Sie die Enden der Schnur. Mit einem Stück Blumendraht können Sie eine „Nadel“ zum Einfädeln biegen.
- Die Röhren können anschließend mit sehr feiner Stahlwolle, Wasser und Seife zum Glänzen gebracht werden.

Das Überprüfen der Frequenz:

- Messen Sie die Frequenz Ihrer Klangröhre.
- Vergleichen Sie das Ergebnis mit Ihrer Voraussage.
- Bewerten Sie Ihr Ergebnis.

Das Fertigstellen des Tagebuchs:

- Lesen Sie noch einmal alle Aufgabenblätter durch, insbesondere die Anleitung zum Erstellen des Tagebuches; prüfen Sie Ihre Ausarbeitung auf Vollständigkeit.
- Beenden Sie Ihre Ausarbeitung durch eine abschließende Betrachtung und Bewertung des Projektes.

Problemstellung:

Durch das Sinnesorgan S steht die „innere“ mit der „äußeren“ Welt in Verbindung

„Die Sinne sind das Tor, durch das wir die „äußere“ Welt mit unserer „inneren“ Welt in Beziehung setzen können.“

Dieser Satz kann Anlass zu tiefgreifenden erkenntnistheoretischen und philosophischen Überlegungen sein. Darauf wollen wir an dieser Stelle verzichten und im Weiteren von den folgenden Grundannahmen ausgehen:

Ein physikalischer Reiz der Stärke p erregt ein Sinnesorgan. Das hat beim

Beobachter eine Empfindung der „Stärke“ E zur Folge. Die Stärke des Reizes p

können wir äußerlich mit einem physikalischen Messinstrument bestimmen, die „Stärke“ E der Empfindung kann nur der jeweilige Beobachter selbst innerlich beobachten. Wie diese beiden Größen, die physikalische Größe p und die psychische Größe E zusammenhängen, wird seit über 150 Jahren in der „Psychophysik“ untersucht. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Verfolgung der physikalischen Reize im Sinnesorgan selbst und in den daran anschließenden Bahnen, immer äußerlich bleibt und nichts wesentlich Neues zu der hier angesprochenen Fragestellung beiträgt. Es werden zwei grundsätzlich verschiedene Größenarten miteinander in Beziehung gebracht, eine *äußerlich messbare physikalische Größe p* und eine *nur innerlich bestimmbare psychische Größe E* , die ohne einen empfindenden Menschen keinen Sinn hätte. Es gibt verständlicherweise viele Zweifel, ob diese Fragestellung überhaupt sinnvoll ist. Die reproduzierbaren Ergebnisse, die jedoch durch diese Art der Fragestellung gefunden wurden, rechtfertigen nachträglich dieses Vorgehen.

Die Konstruktion der Empfindungsgröße E :

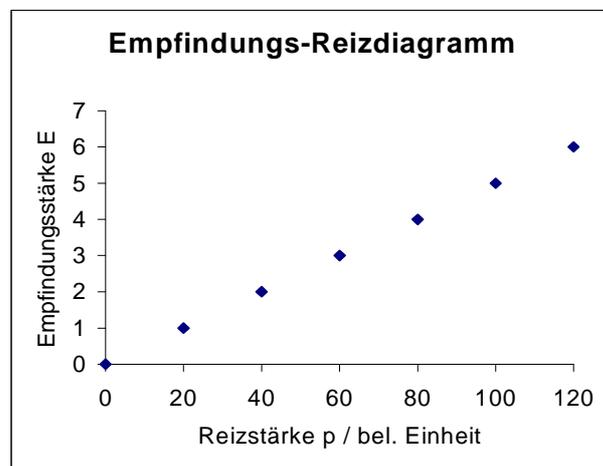
Das Problem, der Empfindung eines Menschen Zahlenwerte zuzuordnen, d.h. eine Empfindungsskala festzulegen, kann auf verschiedene Weise gelöst werden. Wir wollen hier den Weg nachvollziehen, den G. T. Fechner 1850 eingeschlagen hat:

Zunächst werden zwei Reize p_0 und p_1 gleicher Stärke, d.h. $p_0 = p_1$, beobachtet. Diese Reize lösen zwei Empfindungen E_1 und E_2 derselben Stärke aus, d.h. $E_1 = E_2$. Dann wird die Stärke des Reizes p_1 so lange vergrößert, bis der Beobachter die Empfindung, die die beiden Reize auslösen, gerade unterscheiden kann, d.h. bis $E_1 \neq E_2$ erstmals erlebt wird. Die Differenz der beiden Reize $\Delta p = p_1 - p_0$, die gerade einen wahrnehmbaren Unterschied in der Empfindungsstärke ΔE auslöst, wird „**Unterschiedsschwelle**“ genannt. Experimentell kann nun untersucht werden, ob und gegebenenfalls wie diese Unterschiedsschwelle Δp von der absoluten Stärke des Ausgangsreizes p_0 abhängig ist. Auch kann die „Reizschwelle“ $\Delta p = p(0)$ ermittelt werden, die angibt, wie groß ein Reiz p mindestens sein muss, um erstmals eine Empfindung auszulösen. Sind diese verschiedenen Reizschwellen Δp ermittelt, so können wir die Skala der Empfindungsstärke E auf die folgende Weise konstruieren:

- Eine Reizänderung um die gerade noch unterscheidbare Reizstärke („Unterschiedsschwelle“) Δp hat eine Änderung der Empfindungsstärke $\Delta E = 1$ zur Folge. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da wir kleinere Reizunterschiede durch unsere Empfindung nicht unterscheiden können.
- Als Nullpunkt der Empfindung, d.h. $E = 0$ wählen wir die gerade noch wahrnehmbare Empfindung mit $p = p(0)$.
- $E = 1$ gilt dann für alle Reize, deren Stärke größer als $p(0)$ und kleiner als $p(0) + \Delta p(1) = p(1)$ sind.
Allgemein gilt dann:
- $E = n$ gilt für alle Reize, deren Stärke größer als $p(n-1)$ und kleiner als $p(n-1) + \Delta p(n) = p(n)$ sind.

Mit diesen Festlegungen erhalten wir je nach dem Verhalten der experimentell ermittelten Reizschwellen $\Delta p(E)$ einen bestimmten Empfindungs-Reiz-Zusammenhang, d.h. mathematisch ausgedrückt, eine ganz bestimmte Empfindungs-Reiz-Funktion $E(p)$.

Haben die Untersuchungen z.B. ergeben, dass die gerade noch unterscheidbare Reizschwelle Δp unabhängig von der Reizstärke p immer denselben konstanten Wert z.B. $\Delta p = 20$ hat, so ergibt sich der im nebenstehenden Schaubild dargestellte lineare Zusammenhang: Eine gleichmäßige Steigerung des äußeren Reizes p nimmt der Beobachter als gleichmäßige Steigerung der Empfindungsstärke E wahr.



Betrachten wir einen größeren Zahlenbereich der Empfindungsgröße E , so können wir $E(p)$ als kontinuierliche Funktion darstellen.

Das Weber-Fechnersche Gesetz:

In 2.1. wird beschrieben, wie wir in einem Praktikumsversuch einige Reizschwellen für den Schweresinn ermitteln können. Vermutlich ging E. H. Webers 1834 ähnlich vor. Er stellte bei seinen Untersuchungen fest, dass bei **allen** Sinnesorganen, die er untersucht hatte, die Unterschiedsschwelle Δp nicht konstant ist, sondern von der absoluten Größe der Reizstärke p abhängig ist: je größer die Stärke des Reizes p ist, desto größer muss der Unterschied Δp sein, damit zwei Reize verschieden stark empfunden werden. Webers experimentelle Untersuchungen führten ihn zu dem Schluss, dass Δp gleichmäßig mit p steigt, dass gilt $\Delta p = c \cdot p$, bzw. dass der Quotient

$$(1) \quad \frac{\Delta p}{p} = c$$

konstant ist.

Dieser Quotient, der sogenannte Weberquotient, ist, wie wir heute wissen, bei vielen Sinnesorganen in gewissen Bereichen annähernd konstant.

Mit den von Weber ermittelten Zusammenhängen, leitete Fechner durch die folgenden Überlegungen eine Reiz-Empfindungs-Funktion $p(E)$ her:

Aus der allgemeinen Bedingung bei der Festlegung der Empfindungsgröße E (siehe vorige Seite), können wir folgern:

$$(2) \quad \Delta p(n) = p(n) - p(n - 1).$$

Da hierbei aber $E = n$ ist, gilt

$$(2') \quad \Delta p(E) = p(E) - p(E - 1).$$

Damit können wir Gleichung (1) schreiben durch

$$(3) \quad \frac{\Delta p(E)}{p(E-1)} = \frac{p(E) - p(E-1)}{p(E-1)} = \frac{p(E)}{p(E-1)} - 1 = c,$$

wobei $\Delta p(E)$ den Reizunterschied angibt, der bei einer Empfindung der Stärke $E - 1$ notwendig ist, damit die Empfindungsstärke sich um eine Einheit, also auf E , vergrößert.

Aus (3) folgt also, dass der Reizzuwachs pro Empfindungsstärkeneinheit konstant ist.

Dem Mathematikunterricht entsprechend wollen wir aus dieser Bedingung das zugehörige exponentielle Wachstumsgesetz die Reiz-Empfindungs-Funktion $p(E)$ herleiten. Dazu erinnern wir an die Herleitung der Kapital-Zeit-Funktion $K(t)$, die für Zinseszinsaufgaben verwendet werden kann:

- t sei die Zeit in z.B. Jahren seit einem gewählten Nullpunkt $t = 0$.
- $K(t-1)$ sei das Kapital zur Zeit $t-1$.
- $\Delta K(t)$ sei die Kapitalzunahme während einer Zeiteinheit Δt , hier 1 Jahr.
- p sei der Prozentsatz, um den das Kapital in einer Zeiteinheit Δt wächst.

Es gilt dann:

$$(4) \quad \frac{\Delta K(t)}{K(t-1)} = \frac{p}{100} = c.$$

Daraus kann gefolgert werden.

- $K(t) = K(0) \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^t,$

wobei $K(0)$ das Kapital zum gewählten Zeitpunkt $t = 0$ ist.

Entsprechend erhalten wir die Empfindungs-Reiz-Funktion $E(p)$:

- E sei die Empfindungsstärke oberhalb eines gewählten Nullpunkt $E = 0$.
- $p(E-1)$ sei die Stärke eines Reizes, der zur Empfindung der Stärke E notwendig ist.

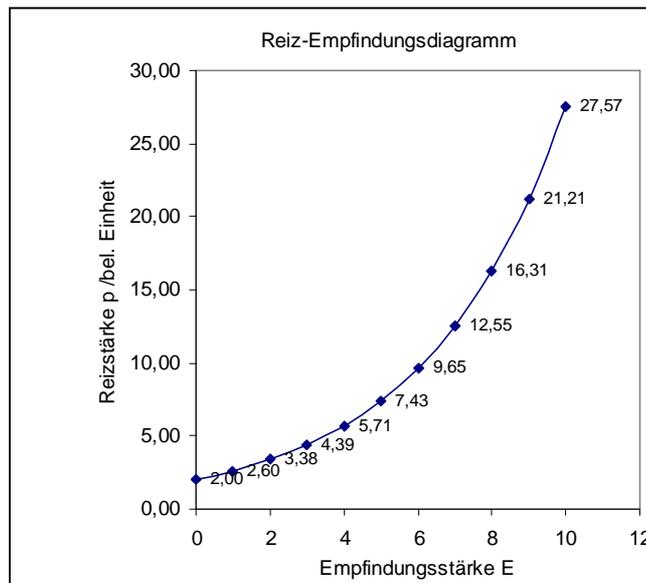
- $\Delta p(E)$ sei die Reizzunahme die für die Empfindungszunahme $\Delta E = 1$ notwendig ist.
- c sei der Faktor, um den der Reiz von einer zur nächsten Empfindungsstufe vergrößert werden muss.

Es gilt dann:

$$(5) \quad p(E) = p(0) \cdot (1 + c)^E,$$

wobei $p(0)$ die Reizstärke bei dem gewählten Nullpunkt der Empfindungsstärke, z.B. die absolute Reizschwelle und c die Weberkonstante darstellen.

Im nebenstehenden Diagramm ist dieser Zusammenhang für willkürlich gewählte Werte für p und c dargestellt. Es wird deutlich, dass Δp mit wachsender Empfindungsstärke zunimmt. Das hat zur Folge, dass bei großen Empfindungsstärken, der äußere Reiz sehr stark vergrößert werden muss, um eine weitere Zunahme der Empfindungsstärke zu bewirken; soll beispielsweise die Helligkeit in einem Zimmer vergrößert werden, kann bei dämmeriger Beleuchtung eine Kerze eine große Wirkung haben; bei gleißend heller Beleuchtung wird der Beleuchtungsanteil einer Kerze dagegen überhaupt nicht bemerkt.



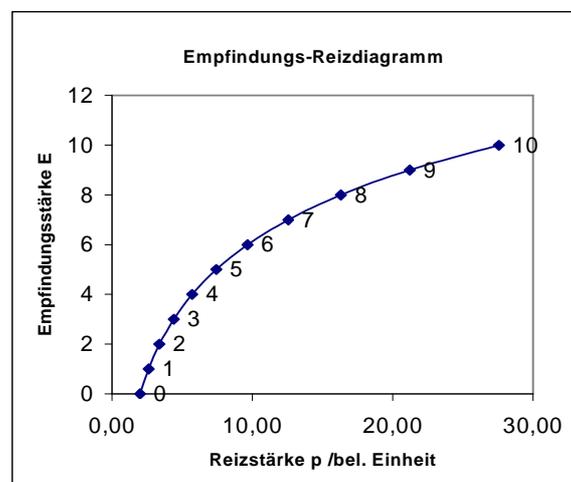
In der Praxis spielt statt des oben dargestellten Reiz-Empfindungs-Zusammenhanges oft die Frage eine Rolle, wie groß die Empfindungsstärke E bei einer gegebenen Reizstärke p ist. Die hierfür benötigte $E(p)$ -Funktion ist die Umkehrfunktion der oben beschriebenen Funktion.

Diese lautet:

$$(7) \quad E(p) = \frac{1}{\log(1+c)} \log \frac{p}{p(0)},$$

wobei $p(0)$ die absolute Reizschwelle ist.

Das Schaubild dieser Funktion ist im nebenstehenden Diagramm dargestellt. Der Verlauf des Schaubildes



macht deutlich, dass bei kleinen Reizstärken die Sinnesorgane sehr empfindlich, bei großen Reizstärken dagegen sehr unempfindlich sind. Die Sinnesorgane sind dadurch in gewissen Grenzen gegen Überbelastung geschützt.

Auf diese Weise können die Sinnesorgane den sehr großen Intensitätsbereich der Reize adäquat wahrnehmen.

Der Zusammenhang von Tonhöhe und Frequenz:

Der Zusammenhang der Tonhöhe T und der Frequenz f (vgl. 1.5) wird sehr genau nach dieser Gesetzmäßigkeit beschrieben:

Dazu können wir für die Tonhöhe auf die folgende Weise eine Skala festlegen:

- Zwei Töne mit dem Abstand von einer Oktave haben einen Tonhöhenunterschied $\Delta T = 1$.
- Der als Grundton gewählte Ton hat die Tonhöhe $T = 0$.

Experimentelle Untersuchungen (vgl. 1.5.) zeigen, dass die Verdopplung der Frequenz der akustischen Schwingung die Zunahme der Tonhöhe $\Delta T = 1$ um eine Stufe, der Oktave, zur Folge hat.

Für den Weberquotienten gilt demnach:

$$(8) \quad \frac{\Delta f(T)}{f(T-1)} = \frac{f(T) - f(T-1)}{f(T-1)} = \frac{f(T)}{f(T-1)} - 1 = 2 - 1 = 1 = c,$$

und damit folgt aus (6)

$$(9) \quad f(T) = f(0) \cdot (1 + c)^T = f(0) \cdot (1 + 1)^T = f(0) \cdot 2^T,$$

wobei $f(0)$ die Frequenz des der jeweiligen Grundtones ist. Entsprechend folgt

$$(10) \quad T(f) = \frac{1}{\log 2} \log \frac{f}{f(0)},$$

wobei auch hier $f(0)$ die Frequenz des der jeweiligen Grundtones ist.

Der Zusammenhang von Lautstärke und Intensität:

Als physikalische Größen werden in der Praxis der Schalldruck p und die Intensität I der akustischen Schallwelle verwendet. Wir wollen für unsere Betrachtungen die Intensität I , d.h. die Energiestromdichte der Schallwelle mit der Maßeinheit W/m^2 , wählen.

Wir beginnen damit, den Bereich zu untersuchen, innerhalb dessen die Intensitäten I reiner Schallwellen liegen, die unser Ohr empfindet. Es gibt zwei Empfindungsgrenzen für einen Ton mit gegebener Frequenz:

1. Eine untere Grenze die Hörschwelle, die die gerade hörbare Intensität darstellt und
2. eine obere Hörgrenze, oberhalb welcher physiologischer Schmerz hervorgerufen wird (was letztlich zu physikalischer Beschädigung des Hörmechanismus führen kann).

Diese beiden Grenzen sind von Mensch zu Mensch recht verschieden und hängen besonders von der betrachteten Frequenz ab. Allgemein ist bei einem Ton von etwa 1000 Hz (eine Tonhöhe zwischen den Noten h^2 und c^2) der Zwischenraum zwischen den beiden Grenzen am weitesten. Der gewaltige Umfang an Intensitäten, die zwischen diesen beiden Hörgrenzen liegen, ist überraschend. Bei einem 1000-Hz-Ton liegt die durchschnittliche Schwellenintensität nahe bei 10^{-12} W/m², während die Schmerzgrenze bei etwa 1 W/m² liegt. Dies stellt ein Verhältnis der Intensitäten von 1 000 000 000 000 : 1 dar, die das Ohr empfindet! Bei 1000 Hz erstreckt sich der Umfang der Intensitäten von musikalischer Bedeutung von etwa 10^{-9} bis 10^{-2} W/m². Das stellt immer noch die Änderung um einen Faktor 10 Millionen dar!

Experimentelle Untersuchungen ergeben (vgl. 2.3.), dass in einer ersten Näherung die Intensität I verzehnfacht werden muss, um eine Steigerung der Lautstärkeempfindung L um eine Einheit $\Delta L = 1$ zu erhalten, d.h., dass 10 Geiger zusammen nur „doppelt so laut“ klingen wie ein Geiger allein.

Damit gilt:

$$(11) \quad \frac{\Delta I(L)}{I(L-1)} = \frac{I(L) - I(L-1)}{I(L-1)} = \frac{I(L)}{I(L-1)} - 1 = 10 - 1 = 9 = c$$

und

$$(12) \quad L(I) = \frac{1}{\log(1+c)} \log \frac{I}{I(0)},$$

wobei $I(0)$ die Intensität des gewählten Nullpunktes, z.B. der Hörgrenze ist.

Bel und Dezibel:

Wegen des logarithmischen Zusammenhangs von Empfindungs- und Reizgröße, wurde für den Gebrauch in der Praxis die logarithmische „Maßeinheit“ Bel (B) eingeführt:

Eine Reizgröße p_1 ist um 1 B größer als eine Vergleichsgröße p_0 , wenn gilt

$$\log \frac{p_1}{p_0} = 1 \quad ; \quad \text{dann ist } p_1 = 10 \cdot p_0.$$

Entsprechend ist p_1 um 2 B größer als die Vergleichsgröße p_0 , wenn gilt

$$\log \frac{p_1}{p_0} = 2 \quad ; \quad \text{dann ist } p_1 = 100 \cdot p_0.$$

Allgemein gilt:

Eine Reizgröße p_1 ist um n B größer als eine Vergleichsgröße p_0 , wenn gilt

$$\log \frac{p_1}{p_0} = n \quad ; \quad \text{dann ist } p_1 = 10^n \cdot p_0.$$

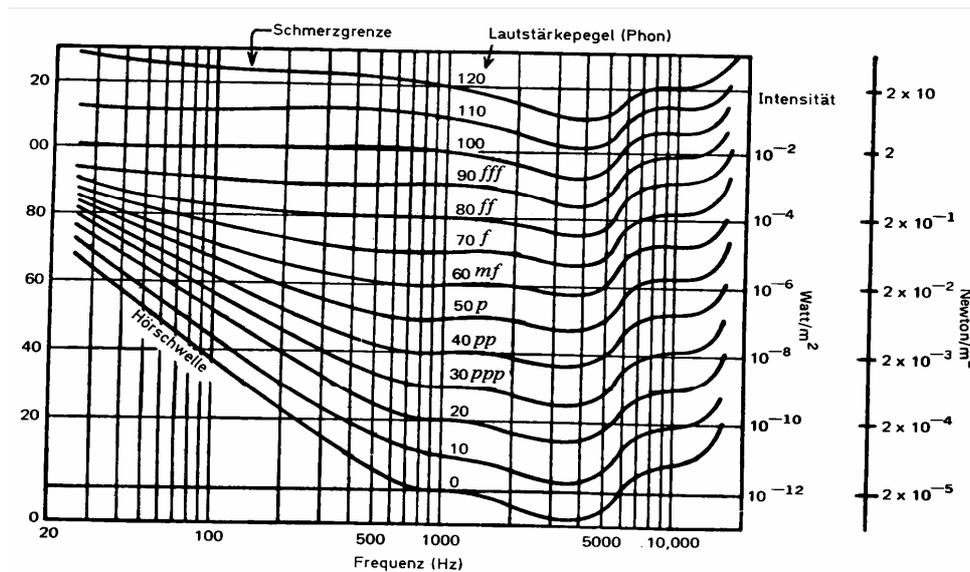
Da 1 B = 10 dB („Dezibel“) ist, ist p_1 um 1 dB größer als die Vergleichsgröße p_0 , wenn gilt

$$\log \frac{p_1}{p_0} = 0,1 \quad ; \quad \text{dann ist } p_1 = 10^{0,1} \cdot p_0 = 1,26 \cdot p_0.$$

2.0 Der Zusammenhang von Reiz und Empfindung

Der Zusammenhang von Dezibel und Phon:

Töne derselben Intensität I werden bei unterschiedlicher Frequenz verschieden laut empfunden. Im untenstehenden Diagramm sind die Intensitätswerte der Töne, die gleichlaut gehört werden, durch „Kurven gleicher Lautstärke“ (Isophone) miteinander verbunden. Diese psychophysikalische Eigenschaft wird in einer weiteren Messgröße, der „Lautheit L_N “ berücksichtigt. Die Maßeinheit dieser Größe ist 1 Phon. Alle Töne einer Isophonen haben dieselbe Lautheit. Für Töne mit 1000 Hz entspricht die Intensität I des Tones, üblicherweise in dB angegeben, der in Phon angegebenen Lautheit.



Bei den in der Schallmesstechnik verwendeten Geräten zur Lärmmessung, ist meist auch die dB(A)-Messung möglich, bei der die physikalischen Messwerte durch einen an der Phonskala orientierten Faktor bewertet werden, so dass diese Skala die Lautstärkeempfindung des Menschen bis zu einem gewissen Maß berücksichtigt.

Der Zusammenhang von Helligkeit und Intensität:

Analog dem zuvor dargestellten, kann der Zusammenhang von Helligkeit H und Intensität I für Licht dargestellt werden. Dies würde aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Als Einführung sei auf das in 2.3. Dargestellte verwiesen.

Ziele:

Durch das Vergleichen der Schwereempfindung von Körpern verschiedener Masse soll der Zusammenhang von Masse und Schwereempfindung untersucht werden.

Material:

6 Milchflaschen

6 selbstklebende Aufkleber

Tuch zum Verbinden der Augen

Präzisionswaage

Schraubenmuttern M 10

Vorbereitungen:

- Kennzeichnen Sie die Flaschen durch verschiedene Nummern zwischen 1 und 6 mit Hilfe der Aufkleber.
- Füllen Sie alle Flaschen so mit Wasser, dass sie alle eine Masse von 500g (=Grundmasse m_0) haben.
- Ermitteln Sie die Masse einer Schraubenmutter.
- Erhöhen Sie mit Hilfe Schraubenmuttern die Masse der Flaschen Nr.3 bis Nr.6 so, dass die Masse von Nr.3 etwa 10 g, die von Nr. 4 etwa 15 g, die von Nr.5 etwa 20 g und die von Nr. 6 etwa 25 g größer ist.

Durchführung:**Serie 1:**

- Verbinden Sie die Augen der Versuchsperson.
- Der Versuchsleiter gibt nun der Versuchsperson immer eine der Flaschen mit der Grundmasse, also Nr.1 oder Nr.2 in die eine Hand und eine der übrigen in die andere Hand; die Versuchsperson kann also auch zwei Flaschen der Grundmasse erhalten. Der Versuchsleiter stellt dann die folgende Frage: „Ist eine Flasche schwerer, wenn ja welche oder sind beide Flaschen gleich schwer?“ Der Versuchsleiter notiert die Nummern der von der Versuchsperson gehaltenen Flaschen und ihre Antwort. Die Versuchsperson kann zum besseren Wahrnehmen vor der Antwort die Flaschen abstellen und wiederaufnehmen, auch mit verschiedenen Händen.
- Es werden mindestens 10 Stichproben durchgeführt. Der Versuchsleiter soll die Kombination der Flaschen so wählen, dass die Massendifferenz Δm , die von der Versuchsperson sicher unterschieden werden kann, deutlich wird. Sollte sich herausstellen, dass die vorgegebenen Masseunterschiede der Flaschen ungeschickt gewählt sind, müssen sie entsprechend neu gewählt und die 1. Versuchsserie von neuem durchgeführt werden.

Serie 2 - 4:

- Erhöhen Sie nun schrittweise die Grundmasse aller Flaschen auf 750g, 1000g und 1250 g und führe den oben beschriebenen Versuch in drei neuen Serien durch. Die Massendifferenz der Flaschen Nr. 3 bis Nr. 6 muss neu gewählt werden. Bitte prüfen Sie durch entsprechende Vorversuche, ob deine Wahl geschickt erfolgt ist.
- Führen Sie die Versuche entsprechend der Beschreibung der 1. Serie durch.

Wiederholung mit vertauschten Rollen:

- Tauschen Sie die Rollen, der Versuchsleiter wird Versuchsperson und umgekehrt; wiederholen Sie den Versuch um mehr Messwerte zu erhalten.
Achtung: Tauschen Sie erst die Rollen, wenn eine Versuchsperson alle vier Serien durchgeführt hat.

Auswertung:

- Bestimmen Sie für jede Versuchsperson getrennt bei den einzelnen Grundmassen m_0 die sicher wahrgenommene Massendifferenz Δm .
- Stellen Sie fest, ob Sie eine Gesetzmäßigkeit finden, wie m_0 und Δm zusammenhängen: stellen Sie diesen Zusammenhang gegebenenfalls graphisch dar und erläutern Sie ihn.

Ziele:

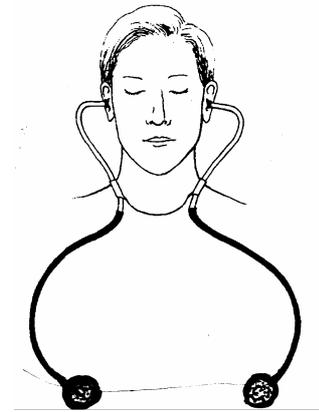
Das zur Ermittlung des Zusammenhangs der Schwereempfindung und der Masse beschriebene Verfahren soll hier auf die Lautstärkeempfindung übertragen werden.

Material:

Stethoskop mit zwei Membranen
 Stativmaterial
 Zentimetermaß
 Schallpegelmesser

Radioempfänger
 Kartonstreifen 5 cm x 8 cm
 Tuch zum Verbinden der Augen

- Stellen Sie das Radio so ein, dass es möglichst gleichmäßig rauscht.
- Schließen Sie mit zwei gleichlangen Schläuchen zwei Hörmembranen an einem Stethoskopbügel an.
- Befestigen Sie die Hörmembranen so mit Stativmaterial, dass Sie die Membranen vor einem Lautsprecher des Radios aufstellen können.
- Stellen Sie eine mittlere Lautstärke ein.
- Verbinden Sie der Versuchsperson die Augen.
- Positionieren Sie die Hörmembranen in einer Entfernung s vom Lautsprecher. Die Versuchsperson soll dabei das Rauschen auf beiden Ohren mit gleicher Lautstärke wahrnehmen.

**Versuch 1:**

- Heben Sie die eine Membran vom Tisch ab und nähern Sie sie so lange dem Lautsprecher, bis die Versuchsperson sicher einen Lautstärkeunterschied wahrnimmt.
- Wiederholen Sie diesen Versuch so lange, bis die zur Lautstärkeänderung Δs benötigte Verschiebungsstrecke sicher ermittelt werden kann.
- Führen Sie diesen Versuch bei unterschiedlichen Lautstärken durch.
- Ermitteln Sie den Quotienten $\Delta s/s$ und interpretieren Sie Ihr Ergebnis.

Versuch 2:

- Der Versuchsleiter verdeckt mit dem Kartonstreifen langsam die Fläche der einen Membran, bis die Versuchsperson sicher wahrnimmt, dass sich die Lautstärke auf einem Ohr verringert.
- Der Versuch wird so lange wiederholt, bis eindeutig bestimmt werden kann, wie viel Prozent der Membrane „beschattet“ sein müssen, damit eine Lautstärkedifferenz sicher wahrgenommen werden kann.
- Wiederholen Sie diesen Versuch bei verschiedenen Lautstärken.
- Interpretieren Sie Ihr Ergebnis; ermitteln Sie gegebenenfalls aus dem Verhältnis der abgeschatteten Fläche den „Weberquotienten“.
- Versuchen Sie mit Hilfe eines Schallpegelmessers den „Weberquotienten“ zu bestimmen

Ziele:

Das zur Ermittlung des Zusammenhangs der Schwereempfindung und der Masse beschriebene Verfahren soll hier auf die Helligkeitsempfindung übertragen werden.

Material:

Tageslichtprojektor

Objektträger

dunkler Karton

Graufilter

Solarmeter oder Luxmeter (Smartphone-App)

- Bedecken Sie die Arbeitsfläche des Projektors vollständig mit dem dunklen Karton, in dessen Mitte sich zwei Löcher mit etwa 5 mm Durchmesser im Abstand von 1 cm befinden.
- Richten Sie den Umlenkspiegel auf eine nahe Bildwand.
- Stapeln Sie auf das eine Loch so viele Objektträger, bis Sie sicher einen Helligkeitsunterschied wahrnehmen.
- Wiederholen Sie den Versuch, nachdem Sie unter die Löcher einen bzw. mehrere Graufilter gelegt haben.
- Interpretieren Sie Ihr Ergebnis.
- Ermitteln Sie mit Hilfe des Solarmeters (oder der App, s. u.) den Anteil der Lichtintensität, die von dem Stapel der Objektträger absorbiert wird.
- Beschreiben Sie, wie Sie den „Weberquotienten“ für die Helligkeitsempfindung ermitteln könnten.

Verwendung eines Smartphones zur Messung der Lichtintensität:

Zur Anpassung der Displayhelligkeit an das Umgebungslicht sind Smartphones meist mit einem Lichtsensor ausgestattet. In den einschlägigen Stores erhältliche Apps geben die gemessene Lichtintensität in Lux aus. Da der Sensor nicht kalibriert ist, können nur relative Intensitäten gemessen werden, was aber für die Ermittlung der Weberkonstanten ausreichend ist. Der von den Objektträgern absorbierte Anteil kann jedoch gut durch Bildung der Differenz von beiden gemessenen Werten (einmal ohne und einmal mit Objektträgern auf dem Tageslichtprojektor) erfasst werden.

Übersichtlich gestaltet ist beispielsweise die rechts dargestellte App „Light Meter“, die auch einen zeitlichen Verlauf der Lichtintensität ausgibt.

**Bezugsquellen:**

- „Light Meter“ (Android, kostenfrei):
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.keuwl.lightmeter>
- „LuxMeter“ (iOS, kostenfrei):
<https://itunes.apple.com/de/app/luxmeter/id526675593?mt=8>

A1: Beispiele von Tagebüchern zum Klangröhrenprojekt

Das Tagebuch zweier Schülergruppen zum Klangröhrenprojekt ist im Internet zu finden. (www.plappert-freiburg.de/Tagebuch.pdf).

A2: Zur Physik von Klangröhren

Aufgrund der unten zitierten Literatur zur Physik von Klangröhren, ergibt sich der folgende Sachverhalt:

Bei Klangröhren (Glockenröhren, engl. chimes) entstehen Eigenschwingungen von Transversalwellen. Die Frequenzen der entstehenden verschiedenen Eigenschwingungen erhält man als Lösung einer Differenzialgleichung 4. Ordnung:

$$f_n = \frac{\pi \cdot K \cdot c}{8l^2} \cdot [3,011^2, 5^2, 7^2, \dots, (2n+1)^2],$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit und K ein „Geometriefaktor“ ist.

Für Röhren kann K berechnet werden durch:

$$K = \frac{\sqrt{r^2 + s^2}}{2},$$

wobei r der Außen- und s der Innenradius der Röhre ist.

Aufgrund unserer Messungen ergibt sich für Aluminiumröhren mit Durchmesser 25 mm und einer Wandstärke von 1 mm (Opitec) für die erste hörbare Eigenschwingung die Gleichung:

$$f(l) = 148,01 \cdot l^{-2}.$$

Errechnen wir aus dem Wert des Parameters die Schallgeschwindigkeit, so erhalten wir 4895 m/s. Ein typischer Literaturwert für Aluminium ist dagegen 5100 m/s. Diese Abweichung können wir zunächst nicht verstehen.

Wenden wir den experimentell gefundenen Zusammenhang an, so erhalten wir die folgenden beiden Beziehungen:

$$f(l) = 148,01 \cdot l^{-2} \quad \text{und} \quad l(f) = 12,166 \cdot f^{-0,5}.$$

***Literatur:**

Neville H. Fletcher / Thomas D. Rossing: The Physics of Musical Instruments, 1991, Springer-Verlag

Herzlichen Dank für den Hinweis von Herrn Prof. Friedrich Gönnenwein, Universität Tübingen.

Die Berechnung der Länge einer Klangröhre für einen Ton einer gewünschten Tonhöhe:

Die Frequenz eines bekannten Tones muss mit dem Faktor $\sqrt[12]{2}$ multipliziert werden, um die Frequenz des Tones zu erhalten, der einen Halbtonschritt höher ist.

Beispiel: Berechnen Sie die Frequenz des Tones c, wenn der Ton a die Frequenz 440 Hz hat!

Der Ton c liegt 3 Halbtonschritte höher als a; somit gilt:

$$f_c = \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot 440 \text{ Hz} = (\sqrt[12]{2})^3 \cdot 440 \text{ Hz} = 523,3 \text{ Hz.}$$

Setzen Sie nun die gewünschte Frequenz in die Gleichung $l(f) = 12,166 \cdot f^{-0,5}$ ein, so erhalten Sie die Länge der Röhre, die diesen Ton ergibt, hier $l = 0,532 \text{ m}$.

A3: Der Schwere Sinn - Psychophysikalische Untersuchung des LK Physik 1999/2000

Versuchsprotokoll : Der Schwere Sinn

Fragestellung und Versuchsbeschreibung:

Das Schwereempfinden von Menschen soll untersucht werden. Dabei interessiert uns die Frage, welche Masseunterschiede ein Mensch mit seinem Schwere Sinn unterscheiden kann.

Hierfür werden einer Testperson zwei unterschiedlich schwere Milchflaschen in die Hand gegeben. Die Testperson muss mit verbundenen Augen entscheiden, welche der Flaschen sie als schwerer wahrnimmt oder ob sie beide als gleich schwer empfindet. Da die Flaschen äußerlich gleich sind, hat die Testperson keine Möglichkeit die Flaschen zu unterscheiden, außer mit ihrem „Schwere Sinn“. Der Testperson ist es freigestellt, wie sie die Flaschen vergleicht (z. B. ob sie zwei Hände oder nur eine Hand verwendet). Sie hat die Möglichkeit, die Flaschen abzustellen und in Ruhe mehrmals anzuheben.

Die kleinste Massedifferenz Δm , bei der die schwerere Flasche sicher erkannt wird, wird durch systematisches Variieren der Masseunterschiede immer näher bestimmt.

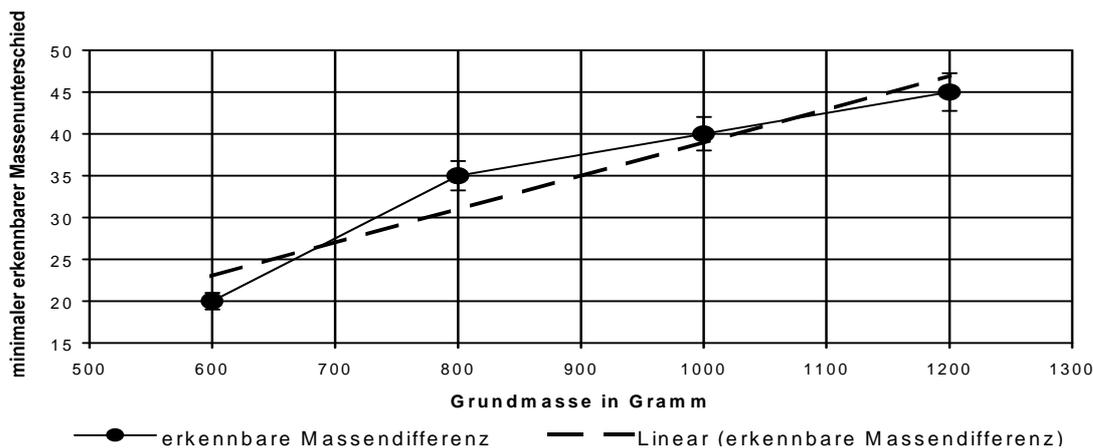
Um einen Zusammenhang zwischen Grundmasse m_0 und minimaler unterscheidbarer Massedifferenz Δm zu erforschen, werden von uns die Grundmassen 600g, 800g, 1000g und 1200g untersucht. Mit jeder Grundmasse wird eine Serie von 20 bis 30 Vergleichen durchgeführt, bis sich Δm herauskristallisiert hat.

Ergebnisse

m_0 : Grundmasse in g, Δm : minimale sicher erkannte Massedifferenz zu m_0 in g,

r : relative Empfindlichkeit = $\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100$ in %

m_0	600	800	1000	1200
Δm	20	35	40	45
r	3,3	4,4	4,0	3,8



Im Diagramm sind Fehlerindikatoren mit $\pm 5\%$ eingezeichnet, um Messungenauigkeiten auszugleichen.

Außerdem ist eine lineare (gestrichelte) Trendlinie hinzugefügt.

Interpretation der Ergebnisse

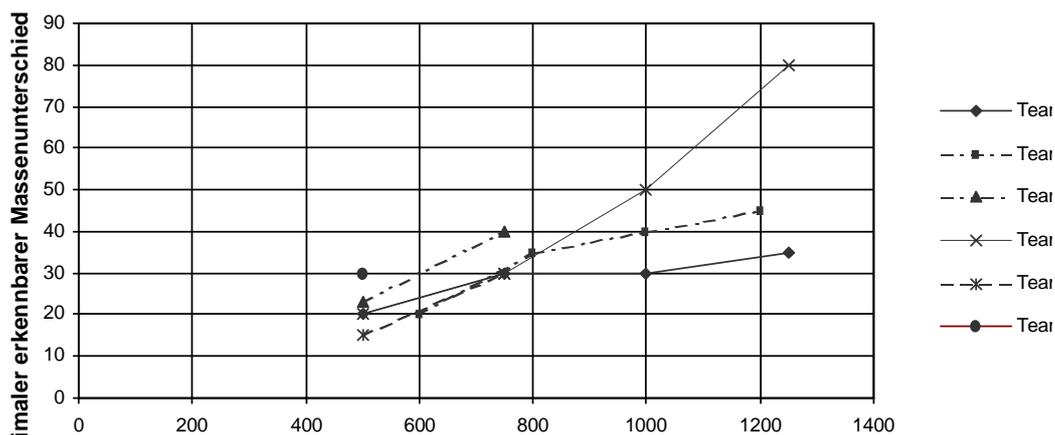
Vergleicht man die Ergebnisse mit den Untersuchungen von E. H. Weber aus dem Jahre 1834, so ähneln sich die Ergebnisse doch sehr, obwohl Weber sicherlich mehr Messungen durchführen konnte. Weber stellte seinerzeit fest, dass der Quotient $\Delta m / m_0$ eine Konstante ist. Weber kam auf den Faktor von etwa 3%, wir auf einen Mittelwert von 3,9%. Die Konstanz des „Weberquotienten“ $\Delta m / m_0$ hat, wie Fechner ausführte, zur Folge, dass der Zusammenhang von der Masse und ihrer Schwereempfindung einem exponentiellen Gesetz unterliegt.

Da die gewissenhafte Versuchsdurchführung sehr zeitaufwendig ist (genaues Abwiegen der Flaschen; häufige Wiederholungen, um das Raten des Probanden auszuschließen), haben wir nur vier Grundmassen untersuchen können. Diese erstrecken sie zudem nur über den äußerst kleinen Bereich von 600g bis 1200g (Gewicht einer leeren Milchflasche 550g, einer vollen 1300g).

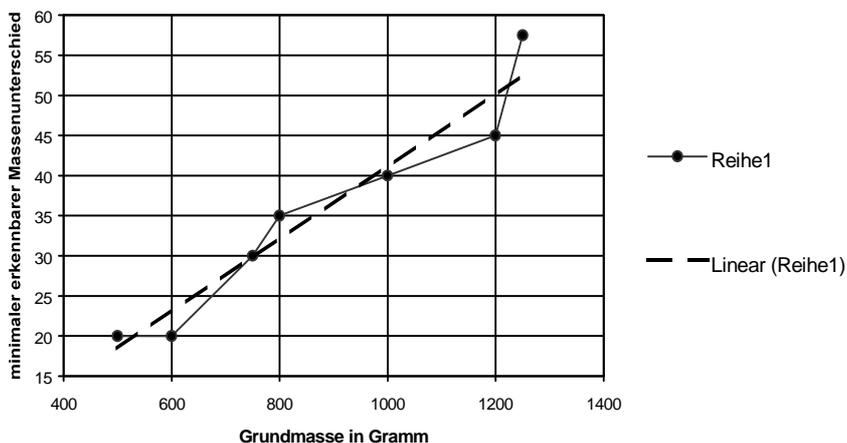
Weiter hängen die Ergebnisse offenbar von der aktuellen Verfassung der Testperson (Konzentration, kalte Hände,...) und davon ab, ob sie z. B. steht oder sitzt, eine oder zwei Hände benutzt (Ein Mitglied unseres Teams konnte mit einer Hand deutlich genauer unterscheiden) und wie sie die Flasche greift und hält.

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse de Klasse

Nun werden die Ergebnisse aller Messgruppen der Klasse aufgetragen:



Die Ergebnisse der Teams 3,4,5 und 6 werden für die weiteren Überlegungen nicht mehr herangezogen, da die Teams nur 1-2 Meßwerte haben bzw. die Versuche unter anderen Bedingungen durchgeführt wurden und damit nicht repräsentativ sind. Mittelt man nun die Werte der Teams 1 und 2 so ergibt sich folgendes Schaubild, bei dem sich in linearer Näherung eine relative Empfindlichkeit $r = 4\%$ sich ergibt:



Zusammenfassung der Ergebnisse

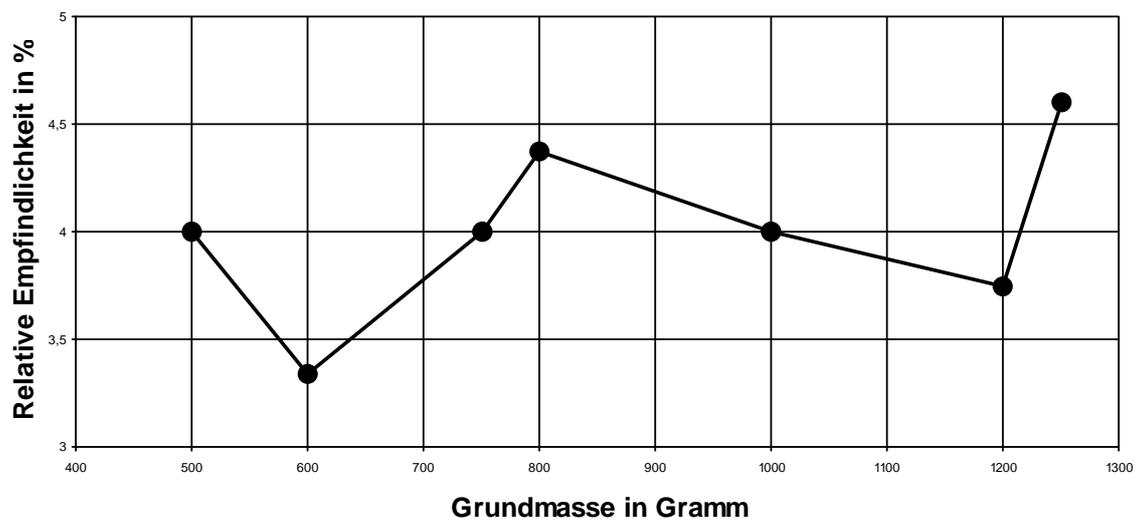
Obwohl es sich hierbei um ein psychophysikalisches Experiment handelt, bei dem wir den Zusammenhang zwischen einer physikalischen Größe und einer psychischen Empfindung untersuchen, sind die Ergebnisse der einzelnen Gruppen erstaunlich gleich.

Und dies, obwohl viele Faktoren die Untersuchung erschweren, die Tagesform der Versuchsperson, die abbauende Konzentration mancher Testpersonen im Laufe der Versuchsreihe, sowie der aus Zeitgründen nur sehr kleine untersuchte Messbereich.

Nimmt man allerdings die Ergebnisse der Teams 1,2 und 4 zusammen, so erhält man doch ein relativ klares Bild. Die relative Empfindlichkeit $\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100$ liegt zwischen

3,3 und 4,8%.

Betrachte man diese bei verschiedenen Grundmassen so ergibt sich folgendes Schaubild:



Aus den Messungen unserer Klasse können wir folgende Schlüsse ziehen:

- je größer die Grundmasse m_0 wird, desto größer muss der Massenunterschied Δm sein, damit er von unserem Schwere Sinn sicher festgestellt werden kann
- wenn wir unsere Messergebnisse linear annähern („Weberscher Ansatz“), dann liegt der von uns ermittelte Wert erstaunlich nahe dem von Weber ermitteltem Wert.