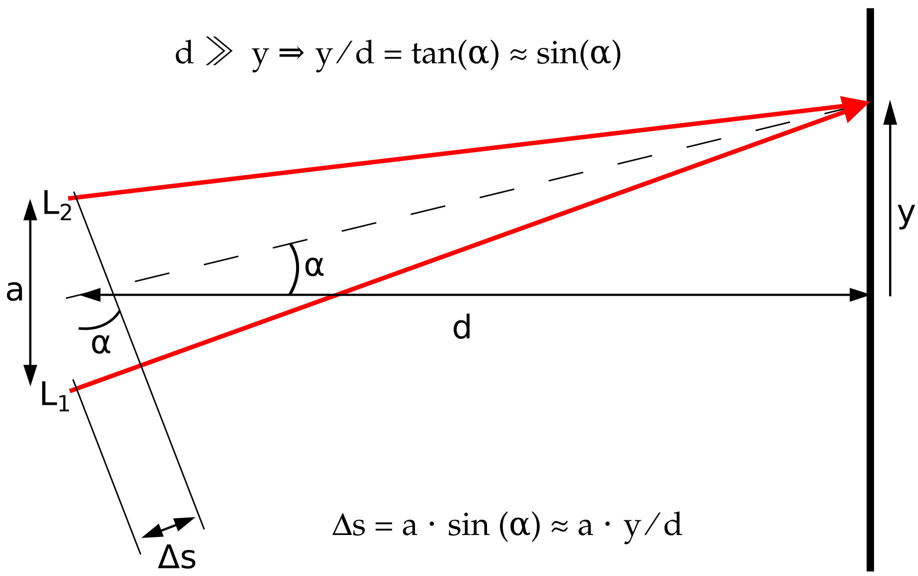
1. *Interferenz von Schallwellen* **(4 Bonuspunkte)**
Zwei Lautsprecher mit Abstand $a = 2\,\mathrm{m}$ zueinander und werden in Phase betrieben. Aus beiden Lautsprechern ertöne ein Sinuston mit $f = 600\,\mathrm{Hz}$ ('in Phase' bedeutet, dass der Sinuston aus beiden Lautsprechern gleichzeitig ein Maximum bzw. Minimum hat). Wir definieren das Koordinatensystem so, dass beide Lautsprecher bei $x = 0$ liegen, der eine bei $y = +1\,\mathrm{m}$, der andere bei $y = -1\,\mathrm{m}$. In großer Entfernung $d = 100\,\mathrm{m}$ steht auf der x-Achse (also bei $x = 100\,\mathrm{m}$ und $y = 0\,\mathrm{m}$) ein Mensch, der sich in y-Richtung bewegt. Dabei nimmt die Lautstärke zunächst ab. Bei welchen Werten von y kann er lokale Maxima der Lautstärke wahrnehmen?
Hinweise: Fertigen Sie zunächst eine Skizze an. Aufgrund der großen Entfernung können wir in Fernfeldnäherung rechnen: wir nehmen an, dass unabhängig von der y-Position der Schall beider Lautsprecher den Menschen mit gleicher Amplitude unter dem gleichen Winkel α erreicht.
Konstanten: Schallgeschwindigkeit $c = 343\,\mathrm{m/s}$
$\rightarrow$



Die Wellenlänge beträgt: $\lambda = c/f = 57{,}2\,\mathrm{cm}$

Maxima treten auf, sofern der Gangunterschied ganzzahlige Vielfache von λ beträgt. Daraus folgt folgende Bedingungen:

$a \cdot \sin\alpha = n \cdot \lambda \quad$ mit ganzen Zahlen n.

$\Rightarrow \sin\alpha = n \cdot \lambda/a = n \cdot 0{,}286$

Wenn wir also von dem trivialen Maximum bei $n = 0$ (in der Mitte) in + y-Richtung gehen, gibt es drei weitere Maxima bei $n = 1{,}2{,}3$. Da der Sinus nie größer als eins werden kann, gibt es keine Maxima mit $n > 3$ mehr.

Mit $y = d \cdot sin\alpha$ folgt:

$y_n = n \cdot \frac{d}{a} \cdot \lambda = n \cdot 28{,}6\,\mathrm{m}.$

Also hört der Mensch lokale Maxima bei:
$y_1 = 29\,\mathrm{m}$, $y_2 = 57\,\mathrm{m}$ und $y_3 = 86\,\mathrm{m}$

(Anmerkung: für den letzten Wert passt die gemachte Fernfeld-Näherung $d >> y$ nicht mehr besonders gut. Die tatsächliche Position des lokalen Maximums dürfte also deutlich abweichen.)

2. *Lautstärke* **(4 Bonuspunkte)**

Der Schallpegel in einem leeren Hörsaal habe die Lautstärke 40 phon. Mit 100 Studierenden im Hörsaal steige der Schallpegel auf 60 phon. Nehmen Sie zur Vereinfachung an, dass alle Studierenden genau gleich viel zum Geräusch beitragen. Geben Sie die Ergebnisse ohne Nachkommastellen an. Sie können sich im Rahmen dieser Genauigkeit durch sinnvolle Näherungen die Rechnung vereinfachen.

Hinweis zu den Einheiten Phon und Dezibel (dB): Wenn Sie bei dieser Aufgabe phon durch dB ersetzen, erhalten Sie genau die gleichen Zahlenwerte als Lösung. Denn die Einheit phon lässt sich als Spezialfall der Einheit dB interpretieren, wobei phon bei einer bestimmten Frequenz (1 kHz) auf einen bestimmten Referenzpegel normiert ist. In der logarithmischen Einheit dB werden allgemein Verhältnisse zwischen zwei Leistungsgrößen P_1 und P_0 angegeben (z.B. Schallpegel oder die Intensität von Radiowellen): $L = 10 \lg {}^{P_1}/_{P_0}$ dB. Diese zunächst komplizierte Definition hat den Vorteil, dass sich in dB einfach mit Summen und Differenzen statt mit Divisionen und Multiplikationen der Leistungsgrößen rechnen lässt (wer im Rechnen mit dB geübt ist, kann diese Aufgabe in wenigen Sekunden im Kopf rechnen).

a) Welchen Schallpegel erwarten Sie bei 200 Studierenden im Hörsaal?
$\rightarrow$ Mit der Definition aus der Vorlesung gilt für die wahrgenommene Intensität des Schallpegels: $I = I_{min} \cdot 10^{(L/10)}$ mit L der Lautstärke in phon und $I_{min} = 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}$ (Hörschwelle)
Die Intensität im leeren Hörsaal ist also $10^{-8}\,\mathrm{W/m^2}$ und im Hörsaal mit 100 Studierende $10^{-6}\,\mathrm{W/m^2}$.

Somit trägt jeder Studierende mit $(10^{-6}\,\mathrm{W/m^2} - 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2})/100 \approx 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2}$ bei.
Das Hintergrundgeräusch ist gegen die vielen Studierenden also vernachlässigbar.

200 Studierende erzeugen demnach einen Schallpegel von $2 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{W/m^2}$, was einer Lautstärke von $10 \cdot \lg(2 \cdot 10^{-6}/10^{-12})$ phon $=$ 63 phon entspricht.

Faustregel: Eine Verdoppelung des Schallpegels (der Intensität bzw. Leistung) entspricht +3 dB.

b) Welchen Schallpegel erwarten Sie bei 50 Studierenden im Hörsaal?
$\rightarrow$ Wir vernachlässigen wieder das Hintergrundgeräusch, da es auch bei 50 Studierenden nur etwa 2 % zum Gesamtschallpegel beiträgt.
50 Studierende erzeugen demnach ein Geräusch von $50 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2}$, was einer Lautstärke von 57 phon entspricht.

Faustregel: Eine Halbierung des Schallpegels (der Intensität bzw. Leistung) entspricht -3 dB.

c) Welchen Schallpegel erwarten Sie, wenn diese 50 Studierende in einem ähnlichen Hörsaal mit lauterer Lüftung (50 phon im leeren Zustand) sitzen?
$\rightarrow$ Hier wird das Hintergrund Geräusch nicht mehr vollständig vernachlässigbar sein, da 50 phon einer Intensität von $10^{-7}\,\mathrm{W/m^2}$ also dem Geräusch von etwa zehn Studierenden entspricht.
Für die Gesamtintensität gilt daher:
$I_{ges} = 10^{-7}\,\mathrm{W/m^2} + (10^{-6}\,\mathrm{W/m^2} - (10^{-8}\,\mathrm{W/m^2})/100 \cdot 50 = 5{,}95 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{W/m^2}$

Das entspricht $10 \cdot \lg(5{,}95 \cdot 10^{-7}/10^{-12})$ phon $=$ 58 phon.

Einen Unterschied von 1 dB bzw. 1 phon kann man in der Regel gerade so wahrnehmen.

3. *Massenverdrängung* **(3 Bonuspunkte)**
Ein Schiff mit der Ladung $m = 388\,\mathrm{t}$ fahre vom Meer in einen breiten Fluss zu einem Hafen mit Brackwasser. Aufgrund der geringeren Dichte des Brackwassers liegt das Schiff zunächst tiefer im Wasser. Nachdem die Ladung gelöscht ist, liegt das Schiff wieder so tief im Wasser wie zuvor auf dem Meer. Die Wände des Schiffs seien gerade und stehen senkrecht zur horizontalen Wasseroberfläche.
Konstanten: $\rho_{\text{Meer}} = 1{,}03\,\mathrm{g/cm^3}$; $\rho_{\text{Hafen}} = 1{,}01\,\mathrm{g/cm^3}$

Welche Masse M hat das Schiff?
$\rightarrow$ Wir bezeichnen mit A die ungekannte Querschnittsfläche des Schiffs und mit d den Tiefgang des Schiffs im Meer. Im Meer wird also das Wasservolumen $A \cdot d$ verdrängt, dass die Masse $\rho_{\text{Meer}} \cdot A\,d$ hat.

Da ein Körper genau so viel Masse verdrängt, wie er selbst hat, gilt im Meer bei noch vorhandener Ladung:
I: $m + M = \rho_{\text{Meer}} \cdot A\,d$

Im Hafen gibt es den gleichen Tiefgang d ohne Ladung, es gilt dort also:
II: $M = \rho_{\text{Hafen}} \cdot A\,d$

Wir bilden zunächst die Differenz I-II, um das unbekannte Volumen $A \cdot d$ zu bestimmen:
$m = (\rho_{\text{Meer}} - \rho_{\text{Hafen}}) \cdot A\,d \qquad \Rightarrow A\,d = m/(\rho_{\text{Meer}} - \rho_{\text{Hafen}})$

Das setzen wir in II ein, und erhalten die Formel um die Masse des leeren Schiffs M zu berechnen:

$M = m \cdot \rho_{\text{Hafen}}/(\rho_{\text{Meer}} - \rho_{\text{Hafen}}) = 20\,\mathrm{kt}$

4. *Aufzug* **(3 Bonuspunkte)**
Führen Sie das Experiment 'Aufzug' mit phyphox durch. Nehmen Sie beim Aufzugfahren Rücksicht auf andere, die einfach nur schnell nach oben oder unten wollen: Vermeiden Sie Stoßzeiten (z.B. Pausen zwischen Vorlesungsblöcken).

   a) Beschreiben Sie ihr Experiment in ca. fünf Zeilen.
   b) Bestimmen Sie die Geschwindigkeit v des Aufzugs nach der Beschleunigungsphase durch Integration über die Beschleunigung $a(t)$.
   c) Vergleichen Sie die Geschwindigkeit v aus Teil b) mit der aus der barometrischen Höhenformel von phyphox ermittelten Geschwindigkeit.

$\rightarrow$ Hier gibt es keine allgemeingültige Musterlösung, da jeder Aufzug anders sein wird.

Grundsätzlich gilt für die Geschwindigkeit v des Aufzugs, wenn dieser zunächst in Ruhe war:

$v(t) = \int a(t)\mathrm{d}t$

Die Integration lässt sich numerisch oder grafisch [Fläche unter der Kurve a(t)] durchführen, wobei der Zeitbereich ab Abfahrt des Aufzugs bis zur Fahrt mit konstanten Geschwindigkeit (also bis $a(t) \approx 0$) zu berücksichtigen ist.

Wenn die Messungen ausreichend genau und präzise ist, sollte sich für v etwa der gleiche Wert wie über die barometrische Höhenformel ergeben.