0.0.1 „Ausdrücke" für die magnetische Flussdichte

$B := \frac{F}{I \cdot l}$ ←Definition, also eine willkürliche (aber natürlich sinnvolle) Festlegung
$B = \frac{F}{q \cdot v}$aus der Definition abgeleitet für bewegte Ladungen
$B = \frac{E}{v}$aus der Gleichgewichtsbedingung el. und magn. Kraft ($F_{el} = F_{magn} \iff qE = q \cdot v \cdot B$)
$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi r}$Flussdichte eines geraden stromdurchflossenen Leiters
$B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{n}{l}$Flussdichte im innern einer „langen" Spule

0.0.2 Magnetfeld einer Spule

$BILD
l= Spulenlänge
n= Windungszahl
I= Spulenstrom
Innerhalb der Spule ist das Magnetfeld näherungsweise homogen, außerhalb näherungsweise Null, wenn es sich um eine „*lange Spule*" handelt, d.h. die Länge viel größer als ihr Durchmesser ist.

Im Prinzip lässt sich der Ausdruck für B aus dem für den geraden Leiter herleiten (s. Buch S. 248f). Es gilt $B = \mu_0 I \frac{n}{e}$. $\frac{n}{e}$ kann als Windungsdichte interpretiert werden.

Beispiel: $l = 40\text{cm} = 0,4\text{m}$; $n = 30$; $I = 2\text{A}$
$B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{n}{e} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 2\text{A} \cdot \frac{30}{0{,}4\text{m}} = \frac{4\pi \cdot 30 \cdot 2}{0{,}4} \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 1900 \cdot 10^{-7} T = 1,9 \cdot 10^{-4}\text{T} = 0,19\text{mT}$

0.0.3 Induktion (qualitativ)

Induktion bedeutet, dass mit Hilfe eines Magnetfeldes in einem Leiter ein Strom erzeugt wird bzw. zwischen den Leiterenden eine Spannung messbar wird.

Mögliche Situationen

- Der Leiter bzw. die Spule wird quer zum Magnetfeld bewegt (bei Spulen insbesondere auch Rotation im Feld→Generator). Die vom Leiter mitgeführten Elektronen erfahren eine Lorentzkraft <u>*in Richtung*</u> des Leiters⇒Strom.
- Innerhalb einer Spule (bzw. in der Nähe eines Leiters) <u>ändert</u> sich das Magnetfeld. Hier kann die Induktion *nicht* mit der Lorentzkraft erklärt werden.

0.0.4 Induktion (quantitativ)

Versuch/Idee: In eine stromdurchflossene Spule (*Feldspule*) wird eine kleine Spule (*Induktionsspule*) gebracht. $BILD Die Feldspule ist an einen Sägezahngenerator angeschlossen, der die Stromstärke linear an– und absteigen lässt, wodurch die magnetische Flussdichte in der Spule entsprechend an– und absteigt: $B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{n}{l}$ $BILD ($B$-$t$-Diagramm der Sägezahnspannung) Die Induktionsspannung hängt ab von:

- Induktionsspannung hängt ab von$\dot{B}(t)$(Magnetfeldänderung) ($\dot{B}(t)$hängt ab von I_{max}und$f$)
- U_{ind}hängt ab von der Querschnittsfläche$A$der Ind.–Spule
- U_{ind}hängt ab von der Windungszahl der Ind.–Spule

Messungen $n_{ind} = 1000$; $I_{max} = 1\text{A}$; $f = 0.15\text{Hz} n_{Feld} = 665 \Rightarrow \dot{B}\ U_{ind}$Insgesamt ergibt sich also $U_ind\ n \cdot A \cdot \dot{B}$. Wie groß ist der Proportionalitätsfaktor?

1. Einheit des Prop.–faktors:$[n] = 1 [A] = \text{cm}^2\ [B] = \text{T} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}\ [\dot{B}] = \frac{\text{V}}{\text{m}^2}$

   $\Rightarrow [n \cdot A \cdot \dot{B}] = V = [U_{ind}]$ selbe Einheit, d.h. der Prop.–faktor ist dimensionslos (d.h. hat keine Einheit)

2. Wir zeigen anhand der Messwerte, dass der Prop.–faktor 1 ist, dass also gilt: $U_{ind} = n \cdot A \cdot \dot{B}$

In weiteren Versuchen stellt man fest, dass Verallgemeinert ausgedrückt die *Änderung* der von dem magnetischen Fluss durchsetzten Spulenfläche eine Induktionsspannung bewirkt. Dies kann hervorgerufen werden durch

1. Zusammendrücken/Auseinanderziehen der Spule im Feld $BILD
2. Herausziehen/Hineinschieben d. Sp. aus dem/in das Feld $BILD
3. Rotation der Spule im Feld

Es gilt hier: $U_{ind} = n_{ind} \cdot \dot{A}_{ind} \cdot B_{Feld}$, wobei $[\dot{A}] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ die „*Flächenänderungsrate*“.

Wir legen fest: Der *magnetische Fluss* durch eine Fläche ist (bei homogenem Feld) das Produkt aus mgn. Flussdichte mal betrachteter Fläche: $\Phi = A \cdot B$ (so ist die Flussdichte $B = \frac{\Phi}{A}$) Damit lässt sich das Induktionsgesetz ganz kompakt schreiben: $U_{ind} = n \cdot \dot{\Phi}$(Induktionsspannung ist n mal Änderungsrate des magnetischen Flusses)

($\dot{\Phi} = A \dot{\cdot} B = \dot{A} \cdot B + A \cdot \dot{B}$ (Produktregel))

0.0.5 Differentialgleichung

Fall: Entladung/Ausschalten; Schaltung: C oder L parallel zu R geschalten, also U_C bzw. U_L und U_R

	Kondensator	Spule
„Konstanten“	R;C	R;L
Zeitabhängige Größen	$Q(t)=\mathcal{Q}$;$U(t)=\mathcal{U}$; $I(t)=\mathcal{I}$	$U(t)=\mathcal{U}$; $I(t)=\mathcal{I}$
	$U_C+U_R=0$	$U_L+U_R=0$
	$\frac{1}{C}\mathcal{Q}+R\cdot\mathcal{I}=0$	$L\cdot\dot{\mathcal{I}}+R\cdot\mathcal{I}=0$
	$\frac{1}{C}\mathcal{Q}+R\dot{\mathcal{Q}}=0$	$\dot{\mathcal{I}}+\frac{R}{L}\cdot\mathcal{I}=0$
	$\frac{1}{RC}\mathcal{Q}+\dot{\mathcal{Q}}=0$	$\dot{\mathcal{I}}=-\frac{R}{L}\cdot\mathcal{I}$
	$\dot{\mathcal{Q}}=-\frac{1}{RC}\mathcal{Q}$	
	$\mathcal{Q}=Q(t)=Q_0\cdot e^{-\frac{1}{RC}\cdot t}$	$\mathcal{I}=I(t)=I_0\cdot e^{-\frac{R}{L}\cdot t}$
	entsprechend auch für$U(t)$und$I(t)$	entsprechend auch für$U(t)$
„Probe“:	$\dot{Q}=Q_0\cdot e^{-\frac{1}{RC}\cdot t}$	$\dot{I}(t)=I_0\cdot e^{\frac{R}{L}\cdot t}\cdot -\frac{R}{L}$
	Q/I/U-t-Diagramm	I/U-t-Diagramm

Einheitenbetrachtung: $[\frac{1}{RC}]=\frac{1}{\Omega\cdot\mathrm{F}}=\frac{1}{\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}\cdot\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}}}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{C}}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{As}}=\frac{1}{\mathrm{s}}$; $[\frac{R}{L}]=\frac{\Omega}{\mathrm{H}}=\frac{\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}}{\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}\cdot\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}}}=\frac{\mathrm{V\cdot Am\cdot m}}{\mathrm{Vs\cdot A\cdot m^2}}=\frac{1}{\mathrm{s}}$

1 Mechanik – Schwingungen und Wellen

1.1 Die Schwingung einer Schraubenfeder

Physikalische Größen:

- *Frequenz* f Hz (Hertz) $=\frac{1}{\mathrm{s}}$
- *Schwingungsdauer* T s $f=\frac{1}{T}$
- *Amplitude* $\hat{y}$ m
- *„Kreisfrequenz“* $\omega=2\pi f$ $\frac{1}{\mathrm{s}}$
- *Auslenkung* $y(t)$ m
- *Federkonstante* D $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$
- *Masse* m kg

In der Gleichgewichtslage gilt Kräftegleichheit: $F_D=F_G\rightarrow m\cdot g=D\cdot s_0$

1.1.1 Versuch: Masse an einer senkrecht aufgehängten Feder

Aufbau An einem Stativ wird eine Schraubenfeder senkrecht befestigt. An ihrem unteren Ende befestigt man eine Schnur, an deren Ende wiederum eine Masse von 200 Gramm. Die Schnur berührt dabei das sich frei drehende Rad eines Messgerätes. Auf einem Bildschirm wird mithilfe des Messgerätes die Auslenkung der Feder angezeigt und grafisch ($y(t)$) dargestellt.

Beobachtung Wenn man die Feder in Schwingung versetzt, sieht der Funktionsgraph der Auslenkung über der Zeit wie eine Sinusfunktion aus.

1.1.2 Beschreibung der Schwingung durch eine Differentialgleichung

Auftretende Kräfte: Außerhalb der Gleichgewichtslage$s_0$ist die Federkraft $F_D$größer oder kleiner als $F_G = m \cdot g$, die konstant ist. Diese resultierende Kraft ist die sogen. *rücktreibende Kraft*, die immer in richtung Ggl. zeigt. Es gilt: $F_R = F_D + F_G = -Ds + mg = -D(y + s_0) + mg = -Dy - Ds_0 + mg = -Dy$ $F_R = -Dy$

$F_R$ist proportional zur Auslenkung aus der Gleichgewichtslage$y = 0$! (*lineares Kraftgesetz*). $F_R$ist damit die die Masse m beschleunigende Kraft $F = m \cdot a$. Also: $F = F_R \rightarrow m \cdot a(t) = -D \cdot y(t)$. Da $\dot{y}(t) = v(t)$ und $\dot{v}(t) = a(t)$ gilt $m \cdot \ddot{y}(t) = -D \cdot y(t)$. Geteilt durch m ergibt sich $\ddot{y}(t) = -\frac{D}{m} \cdot y(t)$

Diese DGL hat die Struktur $f''(x) = -k \cdot f(x)$. Diese wird gelöst durch die trigonometrischen Funktionen$\sin(x)/\cos(x)$ bzw. genauer $f(x) = \sin(\sqrt{k}x)$. Denn $f'(x) = \sqrt{k}\cos(\sqrt{k}x)$ und $f''(x) = -\sqrt{k}^2 \sin(\sqrt{k}x) = -k\sin(\sqrt{k}x)$

Lösung: $y(t) = \hat{y} \cdot \sin(\sqrt{\frac{D}{m}}t)([\hat{y}] = \mathrm{m}; [\sqrt{\frac{D}{m}}][t] = \mathrm{s} \rightarrow [\sqrt{\frac{D}{m}}] = \frac{1}{\mathrm{s}}$

$[\frac{D}{m}] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m \cdot kg}} = \frac{1}{\mathrm{s}^2} \rightarrow [\sqrt{\frac{D}{m}}] = \frac{1}{\mathrm{s}}$

$v(t) = \dot{y}(t) = \sqrt{\frac{D}{m}} \cdot \hat{y} \cdot \cos(\sqrt{\frac{D}{m}}t)$; $\sqrt{\frac{D}{m}} \cdot \hat{y} = \hat{v}$

$a(t) = \ddot{y}(t) = -\sqrt{\frac{D}{m}}^2 \cdot \hat{y} \cdot \sin(\frac{D}{m} \cdot t)$; $-\sqrt{\frac{D}{m}}^2 \cdot \hat{y} = \hat{a}$, $\hat{y} \cdot \sin(\frac{D}{m} \cdot t) = y(t)$

Zusammenhang zwischen $y(t) = \hat{y}\sin(\sqrt{\frac{D}{m}}t)$ mit $f$bzw. Tder Schwingung: Periodendauer/länge: $\sqrt{\frac{D}{m}} \cdot T = 2\pi$, d.h.$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{m}}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ $f = 2\pi f = \sqrt{\frac{D}{m}} = \omega$

1.2 Überblick: *Harmonischer Oszillator* (HO)

Ein schwingungsfähiges System liegt dann vor, wenn ein Körper/eine Masse durch eine *rücktreibende Kraft* in Richtung einer *Ruhelage* beschleunigt wird. Ist diese rücktreibende Kraft „*linear*" ($F_R = -Dy$), d.h. proportional zur Auslenkung aus der Ruhelage, so ergibt sich eine *harmonische* Schwingung, d.h. die Auslenkungsfunktion $y(t)$ ist *sinusförmig*. Die Größe D ist beim Federpendel die *Federkonstante*, bei anderen Systemen wird sie allg. als *Richtgröße* bezeichnet. Für den HO gilt allgemein:
Kräftegleichung $F_a = F_R \rightarrow m \cdot \ddot{y} = -D \cdot y(t)$ DGL mit: $y(t) = \hat{y} \cdot \sin(\omega t)$; $v(t) = \dot{y}(t) = \omega \cdot \hat{y}\cos(\omega t)$, $(\omega \cdot \hat{y} = \hat{v})$; $a(t) = \ddot{y}(t) = -\omega^2\hat{y}\sin(\omega t)$, $(\omega^2\hat{y} = \hat{a})$ und $\omega^2 = \frac{D}{m}$ bzw. $\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$ und $\omega = 2\pi f$ und $T = \frac{1}{f}$

1.3 Energie des HO

Im HO auftretende Energieformen: $\mathcal{E}_{kin}$ und $\mathcal{E}_{pot}$ (enthält Spannenergie der Feder und Lageenergie der Masse) mit $\mathcal{E}_{kin} = \frac{1}{2}mv^2und\mathcal{E}_{spn} = \mathcal{E}_{pot} = \frac{1}{2}Dy^2 = \int F(s)ds$. Mit$v(t) =$

$\hat{v}\cos(\omega t)$und$y(t) = \hat{y}\cdot\sin(\omega t)$ ergibt sich $\mathcal{E}_{kin}(t) = \frac{1}{2}m(\hat{v}\cos(\omega t))^2 = \frac{1}{2}m\hat{v}^2\cos^2(\omega t)$ und $\mathcal{E}_{pot}(t) = \frac{1}{2}D(\hat{y}\sin(\omega t))^2 = \frac{1}{2}D\hat{y}^2\sin^2(\omega t)$

1.3.1 Betrachtung der Energien als Funktion von t bzw. y

Mit $\mathcal{E}_{pot} = \frac{1}{2}Dy^2$ und $\mathcal{E}_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ erhält man entweder:

1. mit $y = y(t)$ und $v = v(t)$ $\mathcal{E}_{pot}(t)$ bzw. $\mathcal{E}_{kin}(t)$
2. mit y direkt $\mathcal{E}_{pot}(y)$ und mit $\hat{v} = \omega\hat{y}$ $\mathcal{E}_{kin}(y)$

Konkret:

1. $\mathcal{E}_{pot}(t) = \frac{1}{2}D(y(t))^2 = \frac{1}{2}D(\hat{y}\sin(\omega t))^2 = \frac{1}{2}D\hat{y}^2\sin^2(\omega t)$
   $\mathcal{E}_{kin}(t) = \frac{1}{2}m(v(t))^2 = \frac{1}{2}m(\omega\hat{y}\cos(\omega t))^2 = \frac{1}{2}m\omega^2\hat{y}^2\cos^2(\omega t) \longrightarrow \mathcal{E}_{ges} = \frac{1}{2}D\hat{y} = \frac{1}{2}m\omega^2\hat{y}^2$ (es gilt: $\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$)
   außerdem: $\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2}\sin^2(2\omega t) + 0,5$
2. $\mathcal{E}_{pot}(y) = \frac{1}{2}Dy^2(t) = \frac{1}{2}Dy^2$
   $\mathcal{E}_{kin}(y) = \frac{1}{2}mv^2(t) = \frac{1}{2}m(\omega\cdot\hat{y}\cos(\omega t))^2 = \frac{1}{2}m\omega^2\hat{y}^2\cos^2(\omega t) = \frac{1}{2}D\hat{y}^2\cos^2(\omega t) = \frac{1}{2}D\hat{y}^2(1-\sin^2(\omega t)) = \frac{1}{2}D\hat{y}^2 - \frac{1}{2}D\hat{y}^2\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2}D\hat{y}^2 - \frac{1}{2}Dy^2 = \mathcal{E}_{ges} - \mathcal{E}_{pot}$;
   $\cos^2(\omega t) = 1 - \sin^2(\omega t)$; $\hat{y}^2\sin^2(\omega t) = y^2$

Frage: Für welchen Wert von y ist $\mathcal{E}_{kin} = \mathcal{E}_{pot}$? $\frac{1}{2}Dy^2 = \frac{1}{2}D\hat{y}^2 - \frac{1}{2}Dy^2 \Rightarrow y = \sqrt{\frac{1}{2}}\hat{y}$

1.4 Das Fadenpendel

1. Rücktreibende Kraft
   $\frac{F_R}{F_G} = \sin(\alpha) \Rightarrow F_R = F_G\cdot\sin(\alpha)$; $F_R = m\cdot g\cdot\sin(\alpha)$

1.5 Mechanische Wellen

Eine *Welle* ist ein Phänomen, das auf einem System gekoppelter Oszillatoren stattfindet: Eine Erregung des ersten Oszillators wird über die Kopplung an die anderen Oszillatoren weitergereicht. Wir betrachten den Spezialfall der *linearen harmonischen Welle*, d.h. der Wellenträger ist eindimensional, die einzelnen Oszillatoren schwingen harmonisch, die Anregung des „1. Oszillators“ erfolgt dauerhaft. Entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle wird Energie transportiert, die Oszillatoren selbst bleiben dabei an ihrem Platz (kein Materietransport, nur die Schwingung wird weitergegeben). Die Welle ist charakterisiert durch die Schwingungsdauer T des einzelnen Oszillators, die sogenannte *Phasengeschwindigkeit*, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Erregung und die *Wellenlänge*, d.h. der kürzeste Abstand zweier Oszillatoren gleicher Phase. Eine Welle ist zweifach periodisch: in der Zeit bei festem Ort: jeder einzelne Oszillator schwingt gemäß $y(t) = \hat{y}\sin(\omega t + \varphi)$ sowie zu fester Zeit (*Momentbild*) im Ort: Die Auslenkung aller Oszillatoren folgt $y(x) = \hat{y}\sin(kx)$.
Beschrieben wird diese Welle durch die *Wellenfunktion* (im Buch „Wellengleichung“)

Herleitung: Es gilt: $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}; v_{ph} = \frac{\lambda}{T}$

Der „erste“ Oszillator ($x = 0$) schwingt gemäß $y(x;t) = y(0;t) = y(t) = \hat{y}\sin(\omega t)$
Ein beliebiger Oszillator an einer Stelle x_1 übernimmt diese Schwingung zeitverzögert zum Zeitpunkt $t - t_1$:
$\Rightarrow y(x_1;t) = \hat{y}\sin(\omega(t - t_1))$ Nun bringen wir über t_1 λ und v_{ph} ins Spiel: es gilt $v_{ph} = \frac{x_1}{t_1} = \frac{\lambda}{T} \to t_1 = \frac{x_1}{\lambda} \cdot T = \hat{y}\sin(\frac{2\pi}{T})(t - \frac{x_1}{\lambda} \cdot T) = \hat{y}\sin(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda})) \to \boxed{y(x;t) = \hat{y}\sin(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}))}$
(Wellenfunktion)

Diese Funktion berechnet zu vorgegebenen T; λ und $\hat{y}$ die Auslenkung des Oszillators an beliebiger Stelle x zu beliebiger Zeit t. Hält man z.B. die Zeit fest, so erhält man $y(x)$, also den Graphen aller Oszillatoren zu diesem Zeitpunkt (Momentbild). Betrachtet man einen festen Ort, so erhält man y(t), also das Schwingungsbild des Oszillators an diesem Ort.

1.6 Überlagerung von Wellen – Interferenz

Begriffe:

- *Wellenberg/Wellental*: Orte, an denen der entsprechende Oszillator seine maximale Auslenkung hat (nach oben/unten).
- *Interferenz*: Überlagerung von 2 oder mehr Wellen. Dies geschieht „ungestört“, d.h. es addieren sich einfach die entsprechenden Auslenkungen.
- *Konstruktive Interferenz*: Überlagerung von Wellen gleicher Phase, die Einzelamplituden addieren sich.
- *Destruktive Interferenz*: Überlagerung von zwei Wellen entgegengesetzter Phase, bei gleicher Einzelamplitude erfolgt völlige Auslöschung
- Bemerkungen: Wenn sich drei oder mehr Wellen destruktiv überlagern, ist die Situation komplizierter.
  In einem Wellenfeld gibt es feste Orte destruktiver Interferenz, sogenannte *Knoten*

1.6.1 Interferenz von Schallwellen

Für f; λ und c gilt: $c = \lambda \cdot f$
speziell für Schall in Luft ist $c = 340\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$, wir wählen $f = 3400\mathrm{Hz} \Rightarrow \lambda = 0,1\mathrm{m}$

Versuch: Interferenzen bei Schallwellen
Zeichung: 7ece6ca5-05e1-4a70-addd-77b94a185a9f, Teil 1

Durchführung: Zwei Lautsprecher werden von einem Frequenzgenerator gespeist ($f = 3400\mathrm{Hz}$). Ein Mikrofon wird in einer Linie parallel zur Verbindungsstrecke der Lautsprecher bewegt.

Beobachtung: Die Amplitude des Mikrofons ändert sich mehrfach, von Maximum zu Minimum. Zeichnung: 7ece6ca5-05e1-4a70-addd-77b94a185a9f, Teil 2
$\Rightarrow$ Es gibt 5 *Interferenzhyperbeln konstruktiver Interferenz* (diese haben untereinander auf der Verbindungsstrecke zwischen E_1 und E_2 jeweils den Abstand $\frac{\lambda}{2}$)

1.7 Stehende Wellen

Überlagern sich auf einem Wellenträger zwei gegenläufige Wellen gleicher Wellenlänge und Amplitude, so erhält man eine *stehende Welle*: An jeder Stelle haben die Anteile der rechts- bzw. linkslaufenden Welle eine konstruktive Phasenbeziehung, sodass die Amplitude aller Oszillatoren konstant bleibt. An Stellen entgegengesetzter Phase ist die resultierende Amplitude Null, man hat einen *Knoten*, bei gleicher Phase ist die Amplitude verdoppelt, man hat einen *Bauch*. Eine stehende Welle transportiert die Energie nicht, sondern „speichert" sie sozusagen.

Zeitlicher Verlauf: Hier sollte jetzt ein Bild sein. „Das könnt ihr so freihand zeichnen." Hahahahahaha nein.

Man unterscheidet bei Wellenträgern *„feste"* bzw. *„offene" Enden*, die sich durch ihr Reflexionsverhalten der hin- und herlaufenden Wellen unterscheiden:

offenes Ende: Reflexion „mit Phasensprung" $\Rightarrow$ hin- und rücklaufende Welle überlagern sich zu einem Knoten (*bezogen auf den Druck*)

festes Ende: Reflexion „ohne Phasensprung $\Rightarrow$ hin- und rücklaufende Welle überlagern sich zu einem Bauch (*Druck*)

Bezogen auf die Teilchenbewegung hat man beim offenen Ende einen Bauch, bei geschlossenen einen Knoten. Mit diesen *Randbedingungen* sind folgende stehende Wellen möglich:
Wellenträger mit (Länge l)
Haha Bilder schon wieder.
$l = \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \lambda = 2l$
$c = 340\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Aus $c = \lambda \cdot f \Rightarrow$
Bsp.: $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 63\text{cm}} = \frac{340\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 0{,}63\text{m}} = 270\text{Hz}$
Noch ein Bild.
$l = \frac{\lambda}{4} \Leftrightarrow \lambda = 4l$
$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4 \cdot 63\text{cm}} = 135\text{Hz}$

1.8 Überblick

Knoten (destruktiv): an den Punkten, bei denen der *Gangunterschied* $\Delta S = k\frac{\lambda}{2}$ mit $k = 1; 3; 5; \dots$

„Bauch" (konstruktiv): für Gangunterschied $\Delta S = k \cdot \lambda$ mit $k \in \mathbb{N}^0$

Hyperbel (geometrische Definition): Menge aller Punkte A_i, deren Abstände zu zwei festen Punkten E_1 und E_2 konstante Differenz haben: $d = d_{22} - d_{21} = d_{12} - d_{11}$