

Prüfungsbedingung:

- 100 Punkte insgesamt
- 20 Punkte können während des Semesters durch Abgabe von Übungsbeispielen erworben werden (jeweils vor den Seminarterminen am 10.04., 26.05.)
- 80 Punkte für Theorie und Beispiele bei der zweistündigen schriftlichen Prüfung am 23.06.2025
- Erlaubte Hilfsmittel: Taschenrechner

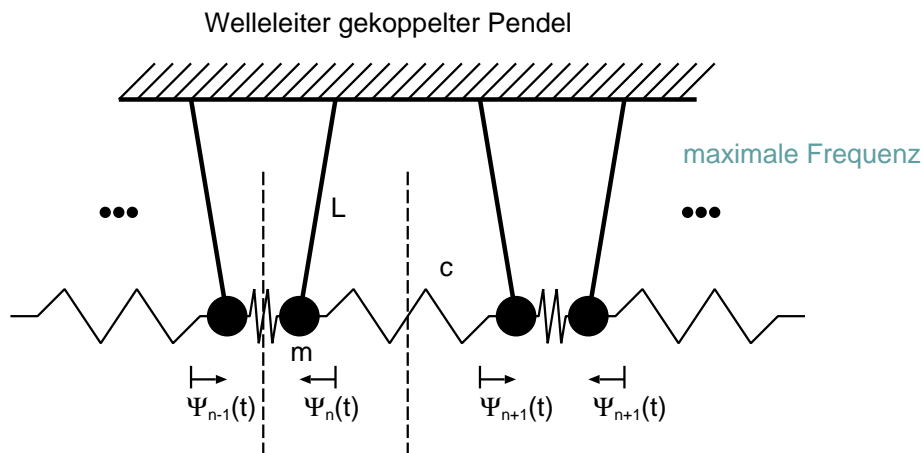
Beispiele für den 10.04.:

1, 2, 7, 18, 23, 29, 30, 35, 38, 40

Beispiele

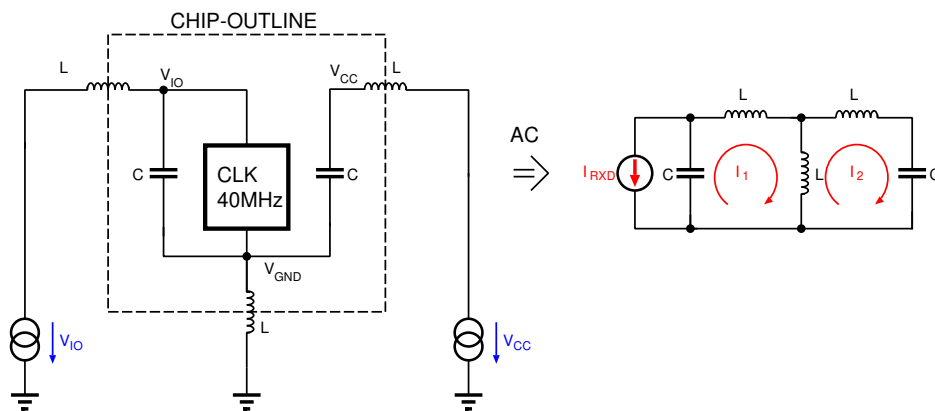
Wellenlehre

- 1 Ein Coaxialkabel mit Wellenwiderstand 50Ω wird mit einem Widerstand von 75Ω abgeschlossen.
 - a) Welche Amplitude und Phasenlage hat die Spannung des reflektierten Impulses, wenn ein Spannungsimpuls mit 1V Amplitude auf die 50Ω -Leitung geschickt wird und warum?
 - b) Welche Amplitude und Phasenlage hat die reflektierte Stromwelle? Warum?
 - c) Mit welcher zusätzlichen Ohm'schen Last am Ausgang kann eine Reflexion vermieden werden?
- 2 Eine Pendelkette (siehe Skriptum Seite 26) bestehe aus Pendeln mit Masse m und Länge L , welche durch Federn der Federkonstanten c verbunden sind. Die minimale Frequenz der Pendelkette ergibt sich, wenn alle Pendel in Phase schwingen, die maximale Frequenz, wenn alle Pendel gegenphasig schwingen. Leite die Maximalfrequenz und die Minimalfrequenz her.
 - a) Welche minimale Frequenz ergibt sich und warum? Welchen Beitrag liefern die Federn?
 - b) Betrachte für die Maximalfrequenz die Abbildung unten. Warum sind die Schwingungsknoten, jeweils auf der strichlierten Linien?
 - c) Wie gross ist die Federkraft relativ zum Schwingungsknoten und folglich die Gesamtkraft der Federn für die Auslenkung $\Psi_n(t)$?
 - d) Wie lautet die Schwingungsgleichung für $\Psi_n(t)$ mit maximaler Schwingungsfrequenz?



- 3 Die Oberflächenwelle eines Erdbebens kann näherungsweise als sinusförmige Transversalwelle beschrieben werden. Ab welcher Amplitude werden bei einer Erdbebenfrequenz von 0.5Hz Objekte ihren Bodenkontakt verlieren?

- 4 Dem Buseingang eines Mikrochips mit Eingangskapazität $C = 20pF$ sei eine Spule von $L = 100\mu H$ (Common-Mode-Choke) in Serie vorgeschaltet. Der Eingangswiderstand des Chips (Bonddraht) betrage 1Ω . Das Bussystem soll Daten bis zu Frequenzen von 10MHz detektieren können.
- Welche Störfrequenzen führen zur größten Resonanzüberhöhung am Chipeingang?
 - Durch einen Serienwiderstand direkt am Chipeingang kann die Resonanzüberhöhung um einen Faktor 10 reduziert werden. Welcher Widerstand wird hierfür benötigt? Was bedeutet das für die Datenrate?
- 5 Ein CAN-Bus wird mit verdrehten Leitungen des Wellenwiderstandes $Z_W = 120\Omega$ betrieben.
- An einem Knotenpunkt mit 3 Leitungen (Y-Verzweigung) entstehen Reflexionen, welche?
 - Welche Reflexionen entstehen an einem Endpunkt mit einer rein kapazitiven Buslast? Kann durch geeignete Wahl der Kapazität die reflektierte Energie reduziert werden?
- 6 Eine Mixed-Mode Chip bestehe aus einem Digitalteil, der mit 40MHz Taktfrequenz betrieben wird, und einem empfindlichen Analogteil, welcher vom digitalen Takt möglichst entkoppelt sein soll. Aus diesem Grund werden getrennte Versorgungsspannungen für den Digitalteil (V_{IO}) und den Analogteil (V_{CC}) von Außen angeschlossen. Die Versorgungsnetze und die gemeinsame Masse (V_{GND}) sind über Bonddrähte mit $L = 5nH$ mit dem Chip verbunden. Chipintern wird jedes Versorgungsnetz mit der (gleichen) Kapazität C gepuffert (siehe Skizze).
- Die Bonddrähte bilden mit den Pufferkapazitäten zwei gekoppelte Schwingkreise. Wie lauten die beiden Eigenfrequenzen?
 - Modelliere den digitalen Takt als sinusförmigen Strom aus dem digitalen Netz (siehe Skizze). Was passiert im analogen Versorgungsnetz?
 - Wie groß sollte die Pufferkapazität C mindestens gewählt werden, um Resonanzen möglichst zu vermeiden?



- 7 Man stelle sich einen langen geraden Tunnel tangential durch die Erdkruste vor. Ein (reibungsfrei rollender) Zug der Masse m würde durch die Schwerkraft $F_G = \frac{GM(r)m}{r^2}$ immer weiter in den Tunnel hinein beschleunigt werden, bis er ab der Mitte des Tunnels wieder abgebremst würde. ($M(r)$ ist die Erdmassenmasse innerhalb des Radius r , $G = 6.67 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$, Erdradius $R_E = 6360km$, Erdmasse $M_E = 5.974 \times 10^{24}kg$.)

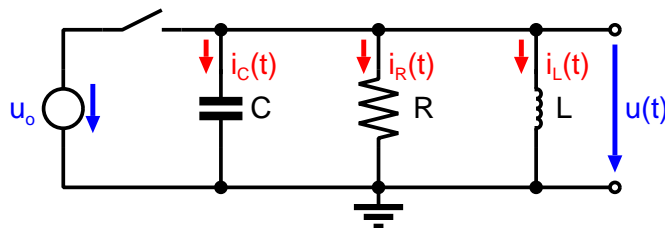
- a) Welche Kraft wirkt auf den Zug in Abhängigkeit vom Abstand zur Tunnelmitte x ? Welche Bewegung $x(t)$ resultiert?
 - b) Wie lange dauert die Reisezeit hin und zurück durch den Tunnel? Hängt sie von der Länge des Tunnels ab? Wie lange dauert die Reisezeit, wenn der Tunnel durch den Erdmittelpunkt führt?
- 8 Gegeben sei ein Coaxialkabel mit Kapazitätsbelag $C' = 100\text{pF}/m$ und einem Induktivitätsbelag von $L' = 250\text{nH}/m$.
- a) Wie groß ist der Wellenwiderstand Z_W und was gibt er an?
 - b) Was passiert mit einer Stromwelle am offenen, was passiert am kurzgeschlossenen Ende?
 - c) Wie lautet der Reflexionsfaktor Γ für Stromwellen?
- 9 Eine stehende Welle auf einem 1.2m langen horizontal gespannten Seil weist bei einer Frequenz von $f = 440\text{Hz}$ drei Bäuche auf. Der maximale Seilausschlag im Zentrum jeden Bauches betrage 4cm.
- a) Welche Funktion beschreibt die stehende Welle?
 - b) Welche Wellenlänge haben die beiden gegenläufigen Wellen, die die stehende Welle bilden?
 - c) Wie lauten die beiden stehenden Wellen, welche das Schwingungsmuster bilden?
- 10 Bei welcher Auslenkung eines harmonischen Oszillators (in % der Amplitude) besteht die Energie zur Hälfte aus potentieller Energie und zur Hälfte aus kinetischer Energie? Wie ist das Verhältnis zwischen kinetischer und potentieller Energie wenn die Auslenkung gerade die Hälfte der Amplitude ist?
- 11 Ein Coaxialkabel mit einem Dielektrikum aus Polyethylen $\epsilon_r = 2.25$ habe einen Kapazitätsbelag von $100\text{pF}/m$.
- a) Wie gross ist der zugehörige Induktivitätsbelag L' ?
 - b) Wie gross ist der Wellenwiderstand?
 - c) Welcher Durchmesser hat der inneren Leiter, wenn das Coaxialkabel einen Aussendurchmesser von 1cm hat?
- 12 Ein Pendel mit der Masse $M = 0.1\text{kg}$ hängt an einem dünnen Faden. Eine kleinere Kugel mit der Masse $m = 10\text{g}$ wird aus einer Federpistole mit der Geschwindigkeit $v_o = 20\text{m/s}$ zentral und horizontal auf M geschossen und bleibt darin stecken. Das "Pendel" wird dadurch in Bewegung versetzt. Reibungsverluste sind zu vernachlässigen.
- a) Wieviel cm war die Feder der Federpistole zusammengedrückt? ($c = 1600\text{N}/m$)
 - b) Auf welche maximale Höhe h lenkt das Pendel aus?
 - c) Welcher Anteil der kinetischen Energie der kleineren Kugel wird beim Eindringen in M in Verformungsarbeit umgesetzt?
- 13 Eine Gitarrensaite der Länge 60cm schwingt auf der Frequenz 440Hz.
- a) Welche Wellengeschwindigkeit hat die Saite?
 - b) Auf welchen Frequenzen befinden sich die ersten 10 Obertöne?
- 14 Ein Coaxialkabel der Länge 5m mit Kapazitätsbelag $C' = 100\text{pF}/m$ und Induktivitätsbelag $L' = 250\text{nH}/m$ sei an beiden Enden mit Z_L abgeschlossen.

- a) Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn der Abschluss hochohmig ist, $Z_L \gg Z_W$? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
- b) Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn der Abschluss niederohmig ist, $Z_L \ll Z_W$? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
- c) Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn ein Abschluss niederohmig, der ander hochohmig ist? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
- 15 Die Induktivität des Bonddrahtes eines Mikrochips beträgt ca. 1 nH/mm . Die Spannungsversorgung des Chips wird auf dem Chip nochmals mit 100 pF gegen die chipinterne Masse gepuffert. Der Chip arbeitet intern mit einer Takfrequenz von 60 MHz .
- a Welche Eigenfrequenz der Spannungsversorgung ergibt sich, wenn sowohl Versorgungs-als auch Masse-Bonddraht 4 mm lang sind?
- b Welche Möglichkeiten gibt es, das Schwingungsverhalten zu reduzieren?
- 16 Ein Fadenpendel mit der Länge $l = 1\text{ m}$ schwingt mit kleiner Amplitude. Nach 5 min ist die Amplitude auf den halben Wert abgeklungen.
- a Wie groß ist die Abklingkonstante γ ? Nach welcher Zeit ist die Amplitude auf $1/e$ abgeklungen?
- b Um welchen Faktor unterscheidet sich die Frequenz von der ungedämpften Eigenfrequenz?
- c Stellen Sie das Schwingungsverhalten im Phasenraum dar.
- 17 Ein Coaxialkabel mit den Durchmessern $r = 1.0\text{ mm}$ und $R = 4.8\text{ mm}$ sei gefüllt mit einem Dielektrikum aus Polyethylen ($\epsilon_r = 2.25$). Wie groß ist der Wellenwiderstand? Mit welcher Geschwindigkeit breiten sich Wellen in diesem Coaxialkabel aus?
- 18 Zeigen Sie, dass die allgemeine Form einer ebenen Welle

$$\vec{q}(t, \vec{x}) := \vec{A} \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) + \vec{B} \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} + \omega t). \quad (1)$$

die Wellengleichung erfüllt. In welche Richtung breitet sich die Welle aus?

- 19 Ein LRC-Parallelschwingkreis (siehe Abbildung) weist als dissipatives Element einen hochohmigen Widerstand R parallel zu L und C aus.
- a) Wie lautet die dissipierte Leistung und daher die zeitliche Energieabnahme im Schwingkreis?
- b) Leite daraus die Differentialgleichung des Parallelschwingkreises her. Wie lautet die Güte?
- c) Wie lautet die Lösung, wenn der Schwingkreis bei $t = 0$ mit einer Spannung u_o gestartet wird? Wie lautet die Lösung im Grenzwert einer sehr großen Induktivität?



20 Eine Transversalwelle auf einem Seil genügt der Gleichung

$$D(x, t) = 4.2\text{cm} \sin(0.71x/1\text{cm} - 47t/1\text{s} + 2.1) \quad (2)$$

- a Welche gegenläufigen Welle muss addiert werden um eine stehende Welle zu erhalten.
- b Wie lautet die Gleichung der resultierenden stehenden Welle? ($\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \sin \beta \cos \alpha$)

21 Eine kleine Fliege mit einer Masse $m = 0.6\text{g}$ verfängt sich in einem Spinnennetz. Das Netz schwingt dabei mit einer Frequenz von $f = 10\text{Hz}$.

- a) Wie groß ist die Federkonstante des Spinnennetzes.
- b) Mit welcher Frequenz würde ein Insekt mit der vierfachen Masse schwingen?

22 Eine Transversalwelle breitet sich in x -Richtung mit $c = 5\text{m/s}$ ungedämpft aus. Die Ausbreitung beginnt bei $t = 0$ im Koordinatenursprung mit $s(t = 0, x = 0) = 0$. Die Auslenkung wächst zunächst mit der Zeit, die Wellenlänge sei $\lambda = 0.5\text{m}$, die Amplitude sei $A = 0.12\text{m}$.

- a Mit welcher Frequenz f und Periodendauer T schwingt die Welle?
- b Wann hat die Welle den Ort $x = 15\text{m}$ erreicht?
- c Wie lautet die Gleichung der Welle?

23 Der Laplace-Operator in Kugelkoordinaten (r, θ, φ) ist gegeben durch

$$\Delta := \frac{1}{r^2} \partial_r (r^2 \partial_r) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \partial_\theta (\sin \theta \partial_\theta) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \partial_\varphi^2 \quad (3)$$

Bestimme die Lösung der 3-dimensionalen Wellengleichung für eine Kugelwelle $f(r)$.

24 Ein Proton in einem komplizierten Molekül kann mit einfacher harmonischer Bewegung in einer bestimmten Richtung schwingen. Wenn das Proton 10^{-11}m in dieser Richtung aus seiner Gleichgewichtslage entfernt wird, beträgt die Rückstellkraft $4.5 \times 10^{-9}\text{N}$. Mit welcher Frequenz f schwingt das Proton um seine Ruhelage?

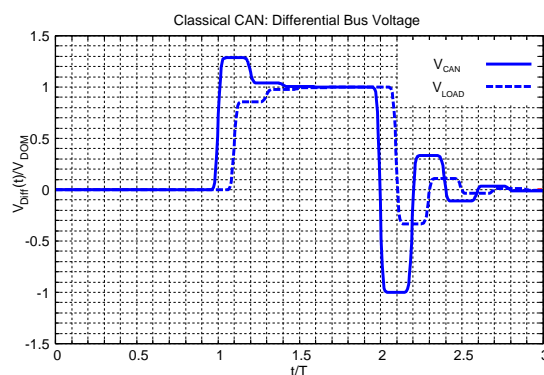
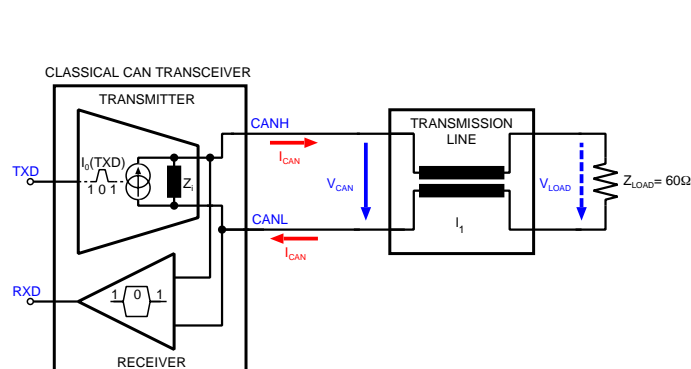
25 Die Bonddrähte an Masse und Versorgung (jeweils $4nH$) eines Mikrochips bilden zusammen mit der internen Puffer-Kapazität von 100pF einen Schwingkreis. Auf welcher Frequenz wird man Resonanz beobachten? Der Leitungswiderstand in diesem Schwingkreis betrage 1Ω . Wie groß ist die Güte des Schwingkreises? Wie lautet die Halbwertsbreite des Leistungsspektrums? Wieviel Widerstand muß in Serie zur Puffer-Kapazität eingefügt werden um die Resonanzüberhöhung um 10dB zu reduzieren?

26 Zwei ebene Wellen gleicher Amplitude und gleicher Frequenz ω breiten sich im Raum aus. Die Wellenvektoren der beiden Wellen sind gegeben durch

$$\vec{k}_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix} m^{-1} \quad \vec{k}_2 = \begin{pmatrix} \sqrt{3} \\ -4 \\ 1 \end{pmatrix} m^{-1}. \quad (4)$$

In welche Richtung breitet sich die überlagerte Welle aus?

- 27 Ein Coaxialkabel der Länge 5m mit Kapazitätsbelag $C' = 100\text{pF}/\text{m}$ und Induktivitätsbelag $L' = 250\text{nH}/\text{m}$ sei an beiden Enden mit Z_L abgeschlossen.
- Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn der Abschluss hochohmig ist, $Z_L \gg Z_W$? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
 - Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn der Abschluss niederohmig ist, $Z_L \ll Z_W$? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
 - Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn ein Abschluss niederohmig, der ander hochohmig ist? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
- 28 Eine stehende Welle auf einem 1.8m langen horizontal gespannten Seil weist bei einer Frequenz von $f = 120\text{Hz}$ drei Bäuche auf. Der maximale Seilausschlag im Zentrum jeden Bauches betrage 12cm .
- Welche Funktion beschreibt die stehende Welle?
 - Welche Wellenlänge haben die beiden gegenläufigen Wellen, die die stehende Welle bilden?
- 29 Wie muss das Verhältnis der Kapazitäten zweier (mit Kapazitäten) gekoppelter Schwingkreise (siehe Vorlesung) gewählt werden, damit die beiden Eigenfrequenzen gerade im Verhältnis $1 : 2$ stehen? Welche Resonanzverhalten erwarten Sie wenn dieser Schwingkreis von Außen angeregt wird? Was bewirkt ein zusätzlicher ohmscher Widerstand?
- 30 Die Bits in einem CAN Bus (siehe Abbildung) werden als DC-Spannungspegel an einer Buslast $Z_{\text{LOAD}} = 60\Omega$ definiert. Während der Transmitter im Dominant-Zustand (DOM) eine Differenzspannung von 2V an der Last erzeugt, wird im Rezessiv-Zustand (REC) der Transceiver hochohmig mit einer Differenzspannung von 0V .
- Wie lautet der Ausgangsstrom des CAN-Transceivers (I_{CAN}) für die DC Zustände?
 - Wie gross ist die Wellenimpedanz der Transmissionline zwischen Transceiver und Last?
 - Wie gross der Reflexionsfaktor an der Last, wie gross für die rücklaufende Welle am rezessiven Transceiver?
 - Wie entsteht das "oszillierende Verhalten" am Transceiver und an der Last beim Übergang DOM-REC? (qualitativ und quantitativ - zu welcher Zeit erfolgt welcher Sprung und warum).
 - Wie verbessert sich der Übergang bei einem impedanz-angepassten Rezessiv-Zustand (also bei einem REC Zustand mit $R_i = Z_W$)?



- 31 Ein Coaxialkabel mit den Durchmessern $r = 3.0\text{mm}$ und $R = 10.3\text{mm}$, gefüllt mit einem Dielektrikum aus Polyethylen ($\epsilon_r = 2.25$), wird mit 75Ω abgeschlossen. Wie groß ist der Reflexions-

faktor? Findet am Abschlusswiderstand ein Phasensprung statt? Mit welcher Geschwindigkeit breiten sich Wellen in diesem Coaxialkabel aus?

- 32 Für einen LC-Schwingkreis mit einer Eigenfrequenz von 10kHz sollen Spulen gewickelt werden. Es stehen Kondensatoren mit $1\mu\text{F}$ und $6.8\mu\text{F}$ zur Verfügung. Der Serienwiderstand der Kondensatoren sei 4Ω .

- Welche Induktivitäten werden für die 2 Kapazitätswerte benötigt um Resonanz bei 10kHz zu erhalten?
- Welcher der 2 Schwingkreise hat die bessere Güte (Serienwiderstand der Spule sei vernachlässigbar) und warum?

- 33 Eine elektromagnetische Welle (Wellenlänge λ , Frequenz ω) breitet sich in Richtung \vec{n} aus.

- Zeige, dass der Ansatz $\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$ die Wellengleichung löst? ($\vec{k} := \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$)
- Welche Bedingung ergibt sich zwischen \vec{k} und ω ?
- Welche geometrische Beziehung ergibt sich zwischen der Ausbreitungsrichtung \vec{n} und der Auslenkung \vec{E}_0 ? (Einsetzen in die quellfreien Maxwell-Gleichungen.)
- Welche Beziehung ergibt sich für das Magnetfeld?

- 34 Kohlendioxid ist ein lineares Molekül mit dem Kohlenstoffatom in der Mitte und den beiden Sauerstoffatomen aussen (O-C-O). Die Masse eines Sauerstoffatoms beträgt $2.672 \times 10^{-26}\text{kg}$. Experimentell wird eine harmonische Eigenfrequenz bei $f = 2.83 \times 10^{13}\text{Hz}$ ermittelt.

- Skizzieren Sie das Schwingungsverhalten der Atome? Wie verhält sich der Kohlenstoff?
- Wie groß ist die Federkonstante der C-O Bindung unter der Annahme eines Masse-Feder-systems?

- 35 Beweise folgende Relation für den Nabla-Operator $\vec{\nabla}$ angewendet auf das Vektorfeld $\vec{a}(x, y, z)$ durch explizites Anschreiben der Vektorkomponenten:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{a}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) - \Delta \vec{a} \quad (5)$$

Der Laplace-Operator ist wie folgt definiert $\Delta := \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

- Wie lange muß ein mathematisches Pendel sein, damit die Eigenfrequenz gerade 1Hz beträgt?
- Um welchen Faktor muß das Pendel verlängert werden, wenn die Frequenz halbiert werden soll?

- 37 Gegeben sei ein Coaxialkabel mit Kapazitätsbelag $C' = 100\text{pF}/m$ und einem Induktivitätsbelag von $L' = 250\text{nH}/m$.

- Wie groß ist der Wellenwiderstand Z_W und was gibt er an?
- Was passiert mit einer Spannungswelle am offenen Ende, was passiert am kurz-geschlossenen Ende?
- Wie lautet der Reflexionsfaktor r und was bedeutet ideale Wellenanpassung?

- 38 Die Bonddrähte an Masse und Versorgung (jeweils 3nH) eines Mikrochips bilden zusammen mit der internen Puffer-Kapazität von 200pF (zwischen Chip-interner Versorgung und Masse) einen Schwingkreis.

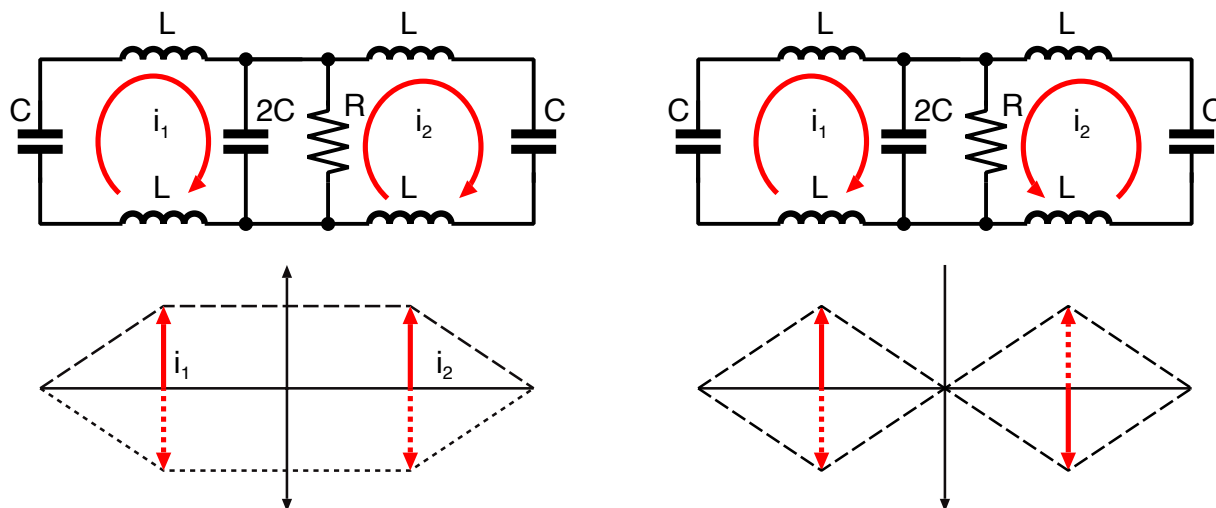
- Auf welcher Frequenz wird man Resonanz beobachten?
- Der Leitungswiderstand in diesem Schwingkreis betrage 1Ω . Wie groß ist die Güte des

Schwingkreises? Wie lautet die Halbwertsbreite des Leistungsspektrums?

- c) Wieviel Widerstand muß in Serie zur Puffer-Kapazität eingefügt werden um die Resonanzüberhöhung um 10dB zu reduzieren?
- d) Kann das Schwingverhalten durch eine grosse externe Puffer-Kapazität zwischen den Versorgungsleitungen auf dem Board verbessert werden?

39 Der Lastwiderstand $R = 60\Omega$ eines CAN-Busses wird für einen Einstrahlungstest mit einem sogenannten "Ringing Network" (L und C laut Abbildung) versehen.

- a) Welche Resonanzfrequenzen und Dämpfungen ergeben sich für die beiden Modi?
- b) Eine Anregung mit der ersten Oberschwingung (Bild rechts) zeigt einen Resonanzkreis mit Güte 6 auf der Resonanzfrequenz 4MHz. Welche Werten haben L und C ?
- c) Wie gross ist die Dämpfung der Grundwelle?



40 Ein Coaxialkabel der Länge $5m$ mit Kapazitätsbelag $C' = 100pF/m$ und Induktivitätsbelag $L' = 250nH/m$ sei an beiden Enden mit Z_L abgeschlossen.

- a) Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn der Abschluss hochohmig ist, $Z_L \gg Z_W$? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
- b) Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn der Abschluss niederohmig ist, $Z_L \ll Z_W$? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?
- c) Welche stehenden Wellen können sich auf dem Kabel ausbilden wenn ein Abschluss niederohmig, der ander hochohmig ist? Wie lautet das Spektrum der Eigenfrequenzen?

41 Eine stehende Welle auf einem $1.2m$ langen horizontal gespannten Seil weist bei einer Frequenz von $f = 440Hz$ drei Bäuche auf. Der maximale Seilausschlag im Zentrum jeden Bauches betrage $4cm$.

- a) Welche Funktion beschreibt die stehende Welle?
- b) Welche Wellenlänge haben die beiden gegenläufigen Wellen, die die stehende Welle bilden?
- c) Wie lauten die beiden stehenden Wellen, welche das Schwingungsmuster bilden?

42 Die Tonhöhe einer Orgelpfeife wird durch eine stehende Schallwelle im Rohr der Pfeife bestimmt. Die Schallgeschwindigkeit bei Normalbedingungen beträgt $343m/s$. Die Anregung des

Tones erfolgt auf einer Seite der Pfeife und bildet daher einen Maximum der Luftbewegung (Schwingungsbauch).

- a) Wie lang muss eine offene Orgelpfeife für den Kammerton $a = 440\text{Hz}$ gebaut werden? (d.h. mit offenem zweiten Ende)
- b) Welche Obertonreihe wird in dieser Pfeife zusätzlich angeregt?
- c) Was passiert mit dem Grundton und den Obertönen, wenn das zweite Ende verschlossen wird? (gedeckte Orgelpfeife)

43 Gegeben sei ein Coaxialkabel mit Kapazitätsbelag $C' = 100\text{pF}/\text{m}$ und einem Induktivitätsbelag von $L' = 250\text{nH}/\text{m}$.

- a) Wie groß ist der Wellenwiderstand Z_W und was gibt er an?
- b) Was passiert mit einer Spannungswelle am offenen Ende, was am kurz-geschlossenen Ende?
- c) Wie lautet der Reflexionsfaktor Γ und was bedeutet ideale Wellenanpassung?

44 Die Energie einer Welle ist proportional zum Quadrat der Amplitude.

- a) Wie klingt folglich die Amplitude einer isotropen Zylinderwelle im 3-dim Raum ab?
- b) Wie klingt die Amplitude einer isotropen Kugelwelle im 3-dim Raum ab?

45 Ein Mikrochips kommuniziert mit der Außenwelt über den Pading (in der Abbildung unten als Inverter dargestellt), welche digitale Eingangssignale $u_{\text{in}}(t)$ an die chipinterne Schaltung liefern und andererseits digitale Ausgänge auf das PCB treiben, $u_{\text{out}}(t)$. Der Pading wird von Außen mit der Spannung u_{padding} versorgt, die elektrische Verbindung vom Chipgehäuse auf den Chip erfolgt mit Bonddrähten, welche, je nach Länge, eine Induktivität von einigen $n\text{H}$ aufweisen. Zur Stabilisierung der chipinternen Versorgung wird eine integrierte Kapazität C (nicht eingezeichnet) zwischen u_{supply} und u_{GND} verwendet. Es wird nun folgendes Verhalten beobachtet:

Nach jedem Schaltvorgang am Eingang $u_{\text{in}}(t)$ ist der Spannung des Ausgangs $u_{\text{out}}(t)$ eine abklingende Schwingung überlagert, wobei das erste Maximum eine Auslenkung von 320mV , das zweite Maximum 11.6ns später eine Auslenkung von 87mV zeigt.

- a) Wie groß die Eigenfrequenz dieser Schwingung? Wie gross ist die Dämpfungskonstante?
- b) Welche Güte hat der Schwingkreis und wie wird des Frequenzspektrum aussehen?
- c) Die Bonddrähte des Chips haben eine Induktivität von jeweils 3nH . Was bewirken die Bonddrähte im Falle des hochohmigen Eingangs und des hochohmigen Messpunktes am Ausgang? Welche Kapazität liegt auf dem Chip zwischen Versorgungsspannung und Masse? Welche ohm'schen Widerstände hat der Schwingkreis?
- d) Wie kann die Schwingverhalten reduziert werden? Hilft eine externe Kapazität?

