



Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe II

Schwingungen und Wellen Daten

Unterrichtshilfen

Der Karlsruher Physikkurs

Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II
Unterrichtshilfen

- Elektrodynamik
- Thermodynamik
- **Schwingungen, Wellen, Daten**
- Mechanik
- Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik

Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Auflage 2014

Bearbeitet von Prof. Dr. *Friedrich Herrmann* und Dr. *Holger Hauptmann*

Abbildungen: *F. Herrmann*



Lizenziert unter Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

A

Allgemeine Bemerkungen

1. KPK-typische Besonderheiten

Der Teil „Schwingungen und Wellen“ des vorliegenden Bandes zeichnet sich wieder durch die KPK-typische Behandlungsweise aus. Besonders in den Kapiteln zu den Schwingungen ist das auffällig. Bei den mechanischen Schwingungen steht nicht die Bewegung im Vordergrund, sondern die Bilanz von Energie und Impuls. Die Übereinstimmung zwischen mechanischen und elektrischen Schwingungen wird so besonders deutlich.

Die Beschreibung der erzwungenen mechanischen Schwingungen wird stimmiger, wenn man statt der Ortsamplitude den mittleren Energiefluss vom Erreger zum Schwinger über der Frequenz aufträgt.

2. Die harmonische Analyse

Wir benutzen zur Beschreibung von Schwingungen und von Wellen, was man im Rahmen der Hochschulphysik Fourieranalyse nennt. Das Verfahren galt früher einmal als schwierig und für die Schule ungeeignet. Seit man über schnelle Rechner verfügt, stellt sich das etwas anders dar. Das Zusammensetzen von periodischen Funktionen kann man leicht mit einem Rechenblatt („Tabellenkalkulationsprogramm“) zeigen. Für die Zerlegung mit einer FFT (Fast Fourier Transform) stehen zahlreiche leicht zu bedienende Programme zur Verfügung (zum Beispiel die Cassy- oder die Cobra-Software).

Für die Behandlung der Fourier-Zerlegung spricht, dass sie nicht nur in der Physik fast allgegenwärtig ist, sondern auch darüber hinaus. So sagt man, Sonnenlicht *bestehe* aus Licht verschiedener Wellenlängen, oder ein Ton *enthalte* bestimmte Frequenzen. Diese Sprechweisen beruhen darauf, dass man in Gedanken das Licht- oder Schallsignal in harmonische Anteile zerlegt.

Auch wird eine physikalisch saubere Behandlung des Kohärenzbegriffs möglich.

Die Zerlegung in harmonische Anteile ist eine gute Gelegenheit, ein wichtiges mathematisches Verfahren und physikalisches Werkzeug an einem einfachen Beispiel vorzustellen, ohne gleich mit den mathematischen Einzelheiten zu beginnen, die den einfachen Grundgedanken dieser Verfahren verschleiern würden. Schließlich begegnen uns andere Zerlegungen nach Basisfunktionen, wenn

auch nur ansatzweise, im Physik- und Mathematikunterricht immer wieder:

Die elektrischen Felder einer Punktladung und eines elektrischen Dipols sind die beiden ersten Terme in der Entwicklung eines beliebigen Feldes nach Multipolanteilen. Die s-, p-, d-Orbitale usw. sind die ersten Terme der Entwicklung der Elektronenwellenfunktion nach Kugelflächenfunktionen. Mittelwert und Streuung sind die ersten Terme der Momentenanalyse einer Verteilungsfunktion.

Die Methode der Zeigerdiagramme für die phasengerechte Addition von Sinusfunktionen wurde nicht benutzt, da sie, unserer Meinung nach, das Lösen eines Problems nicht vereinfacht, sondern eher komplizierter macht. Als geometrisches Verfahren umgeht sie zwar die analytische Rechnung. Dafür bezahlt man aber mit einer gewissen Unübersichtlichkeit der Zeigerbilder.

B

**Bemerkungen zu den einzelnen
Abschnitten**

1. Schwingungen

Definition des Schwingungsbegriffs

Wenn man Schwingungen behandelt, würde man gern eine Definition an die Tafel schreiben: „Eine Schwingung ist...“.

Nun ist aber eine eindeutige Definition des Begriffs kaum möglich. Es gibt zahlreiche Erscheinungen auf einer Skala, die reicht von Vorgängen, die jeder klar als Schwingung bezeichnen würde bis zu solchen, die niemand mehr als Schwingung akzeptiert. Wohin legt man die Grenze?

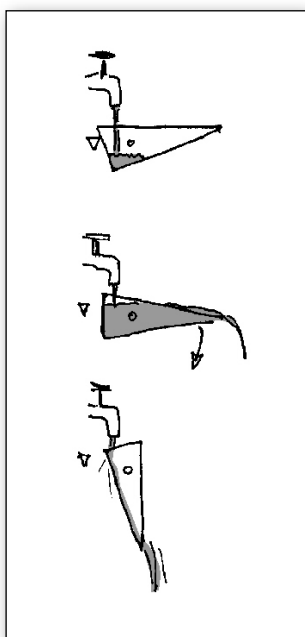
Wir möchten, dass nach der Definition eine „gedämpfte Schwingung“ eine Schwingung ist, obwohl sie nicht periodisch ist und obwohl ihre Energie nicht konstant ist.

Wir möchten, dass der Vorgang mit den beiden rotierenden Wellen (Abb. 1.4 im Schülerband) keine Schwingung mehr ist, obwohl er periodisch, ja sogar sinusförmig ist.

Ein Gleiter, der auf der Luftkissenbahn zwischen zwei Federpuffern hin und herfährt, soll nach der Definition keine Schwingung ausführen.

Eine Definition, die das leistet, ist uns nicht eingefallen. Man stellt schließlich auch schnell fest, dass man gut ohne eine solche Definition leben kann.

Dasselbe Problem tritt übrigens später wieder auf, wenn man versucht sein sollte, zu definieren, was eine Welle ist.



Relaxations- und Resonanzschwingungen

Im Mittelstufenband des KPK hatten wir den Schwingungsbegriff weiter gefasst. Dort wurde als Beispiel eines Schwingers die Vorrichtung von Abb. 1 vorgestellt. Das System hat nur einen einzigen Energiespeicher. Die entsprechenden Schwingungen werden manchmal als „Relaxationsschwingungen“ bezeichnet, um sie von den normalen „Resonanzschwingungen“ zu unterscheiden. Zu ihnen gehören die Schwingung der Geigensaite, die mit dem Bogen

Abb. 1
Relaxationsschwinger

gestrichen wird, sowie die bekannten chemischen Schwingungen. Zwischen Resonanz- und Relaxationsschwingungen gibt es einen kontinuierlichen Übergang.

Warum nur mechanische und elektrische Schwingungen?

Wer an den KPK gewöhnt ist, mag sich fragen, warum die Analogie, die sonst so stark im Vordergrund steht, bei den Schwingungen auf die mengenartigen Größen Impuls, Drehimpuls und elektrische Ladung beschränkt bleibt. Der Grund ist, dass sie, was die Schwingungen betrifft, für weitere Größen nicht gilt.

Um ein schwingungsfähiges System (einen Resonanzschwinger) zu realisieren, braucht man zwei Energiespeicher unterschiedlicher Natur. Im elektrischen Fall sind das Kondensator und Spule, charakterisiert durch eine Kapazität und eine Induktivität. Bei einem mechanischen System können es ein träger Körper und eine Feder sein, charakterisiert durch Masse (= „Impulskapazität“) und Federkonstante.

Nun gibt es in der Wärmelehre zwar das Analogon des Kondensators mit der entsprechenden „Entropiekapazität“, aber für Entropieströme gibt es keine „Induktivität“. Ähnliches gilt für die Stoffmenge.

Größen aus Mechanik und Elektrizitätslehre, die einander entsprechen, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Dass die schwingungsfähigen Systeme gerade mit denjenigen Größen realisiert werden können, die einem Erhaltungssatz genügen, ist wohl als Zufall zu betrachten.

Mechanik	Elektrizitätslehre
Impuls \mathbf{p}	elektrische Ladung Q
Impulsstrom \mathbf{F}	elektrischer Strom I
Geschwindigkeit \mathbf{v}	elektrisches Potenzial ϕ
Verschiebung \mathbf{s}	magnetischer Fluss $N\Phi$
Masse m	Kapazität C
1/Federkonstante $1/D$	Induktivität L
mechanischer Widerstand R_p	elektrischer Widerstand R
Viskosität (Impulsleitfähigkeit) η	elektrische Leitfähigkeit σ

Tabelle 1

Auswahl der Systeme

Im Schülertext werden bestimmte schwingungsfähige Systeme behandelt oder angesprochen. Wir wollen unsere Auswahl begründen:

1. Zwei gleich schwere Körper sind durch eine Feder verbunden, Abb. 1.3 im Schülertext. Es ist der begrifflich einfachste mechanische Schwinger. Man sieht deutlich die beiden Teilsysteme, zwischen denen der Impuls hin- und herfließt. Es ist auch das perfekte Analogon zum einfachen elektrischen Schwingkreis. Wir nehmen dafür in Kauf, dass es ein etwas unrealistisches System ist. Ein Nachteil besteht darin, dass man die Anordnung auf der Luftkissenschiene schwer daran hindern kann, eine Translationsbewegung auszuführen.

2. Ein Körper ist über eine Feder „an der Wand“ befestigt, Abb. 1.9 im Schülertext. Dieser Schwinger ist noch einfacher im Aufbau, und man hat nicht das Problem der Translationsbewegung des ganzen Systems. Der Impuls pendelt hier zwischen Körper und „Erde“ hin und her. Der schwerere Körper, nämlich die Erde, nimmt am Energieaustausch praktisch nicht teil. Ein Nachteil des Systems besteht darin, dass das zweite Impulsreservoir nicht gut zu erkennen ist, denn ob die Erde mehr oder weniger Impuls hat, sieht man ihr nicht an. Allerdings sind Schüler, die die Mechanik nach dem KPK gelernt haben, an diese Eigenschaft der Erde gewöhnt. Das System ist insofern realistischer als das System mit den gleich schweren Körpern, als in den meisten praktischen Anwendungen der eine Körper eine viel größere Masse hat als der andere. In jedem dieser Fälle trägt der schwerere nicht zum Energiehaushalt bei. Beispiele sind das bremsende Auto, der gegen eine Wand fliegende Ball, das System Erde-Mond, das System Sonne-Erde, das System Atomkern-Atomhülle.

3. Das Fadenpendel. Von einem formalen Standpunkt aus, ist es ein eher unästhetisches System: die Kraft ist nicht proportional zur Auslenkung, und das System ist nicht eindimensional, d.h. Impuls, Impulsstrom und Geschwindigkeit müssen als Vektoren behandelt werden. Wegen der Allgegenwärtigkeit solcher Schwingungen gehört es aber in den Unterricht.

4. Drehschwingungen. Sie werden nicht deshalb behandelt, weil man sie mit dem Pohlschen Rad so schön realisieren kann, sondern erstens, weil die Jahrhunderte lang gebräuchlichen mechanischen Uhren Drehschwingungen ausgenutzt haben und zweitens, weil

man die Analogie zu den Translationsbewegungen so gut zeigen kann.

5. Der elektrische Schwingkreis. Er ist eine wichtige Komponente von Radio und Fernseher. Es kann allerdings sein, dass es sich, wie bei den Pendeluhrn, um eine vom Aussterben bedrohte Spezies handelt.

Die Rückstellkraft

Dass für eine mechanische harmonische Schwingung die „Rückstellkraft“ proportional zur Elongation ist, wird oft in Form eines Merksatzes formuliert. Die Aussage wird also für wichtig gehalten. Bei uns gibt es keinen solchen Merksatz. Denn erstens garantiert das lineare Kraftgesetz noch keine harmonische Schwingung (dazu sind noch andere Zutaten erforderlich) und zweitens sollte man dann auch bei elektrischen Schwingungen die entsprechenden Lehrsätze formulieren, wozu sich sicher niemand entschließen würde.

Gedämpfte Schwingungen

Was ist das Interessante an gedämpften Schwingungen? Es ist wohl kaum bemerkenswert, dass eine Schwingung langsam wegstirbt. Das machen auch andere, z.B. translative Bewegungen.

Es gibt aber eine interessante Erscheinung im Zusammenhang mit der Dämpfung, die bei Schwingungen auftritt und bei anderen Bewegungen nicht: Für einen bestimmten Wert der Dämpfungskonstante, der weder gleich null noch unendlich ist, kehrt das System in minimaler Zeit in die Gleichgewichtslage zurück.

Die offensichtlichste und wichtigste Anwendung einer solchen optimalen Dämpfung stellen die Schwingungsdämpfer von Fahrzeugen dar. Die Behandlung der gedämpften Schwingungen im Schulunterricht ist durch sie sicher gerechtfertigt.

Die Begriffe Amplitude, Kreisfrequenz und Phase

Bei einer harmonischen Schwingung wird das Zeitverhalten der wichtigsten Variablen durch eine „Allgemeine Sinusfunktion“

$$y(t) = \hat{y} \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

beschrieben. Man nennt \hat{y} die Amplitude, ω die Kreisfrequenz und

ϕ die Anfangsphase. Verschiedene Variablen ein und derselben Schwingung haben natürlich verschiedene Amplituden (schon weil sie unterschiedliche Dimensionen haben), und sie haben im Allgemeinen verschiedene Anfangsphasen. Die Kreisfrequenz dagegen ist für alle Größen, die sich überhaupt durch eine Gleichung dieses Typs beschreiben lassen, dieselbe.

Wenn man von der Amplitude oder der Phase spricht, muss man daher immer angeben, von welcher Größe man spricht: vom Ort, vom Impuls, vom Druck, von der elektrischen Ladung, von der magnetischen Feldstärke... Es gibt also keine Amplitude schlechthin. Tatsächlich spricht man bei mechanischen Schwingungen aber oft von „der“ Amplitude der Schwingung und meint damit die Ortsamplitude. (Das entspricht schließlich auch der Etymologie des Wortes.) Wir vermeiden diese Sprechweise auch deshalb, weil sie dazu beiträgt, der Ortsvariable eine besondere Bedeutung zuzuschreiben. Wir sprechen also nie von der „Amplitude der Schwingung“, sondern nur von der Ortsamplitude, der Impulsamplitude usw. Es ist aber nichts dagegen einzuwenden von der „Frequenz der Schwingung“ zu sprechen.

Stoßdämpfer als mechanische Widerstände

Der Stoßdämpfer ist das mechanische Analogon des ohmschen elektrischen Widerstandes. Der linearen U - I -Kennlinie des ohmschen Widerstandes entspricht beim Stoßdämpfer die lineare v - F -Kennlinie.

Es ist üblich, den ohmschen Widerstand in der Elektrizitätslehre ausführlich zu behandeln. Die Kennlinie wird aufgenommen, der lineare U - I -Zusammenhang wird als wichtiges Gesetz eingeführt. Regeln über das Parallel- und das Hintereinanderschalten von ohmschen Widerständen werden formuliert. Das mechanische Analogon dagegen wird kaum angesprochen. Die Kennlinie wird nicht aufgenommen und es werden keine Anwendungen diskutiert. Der zum elektrischen analoge mechanische Widerstand bekommt auch kein grafisches Symbol. Vermutlich hat diese „Benachteiligung“ der mechanischen Reibung damit zu tun, dass Reibung oft als eine störende, unerwünschte Erscheinung auftritt. Dass sie genau so nützlich und unentbehrlich ist, wie der elektrische Widerstand, wird daher kaum deutlich.

Wir räumen aus diesem Grund dem Stoßdämpfer im Unterricht mehr Platz ein als es sonst üblich ist.

2. Resonanz

Welche Variablen soll man über der Frequenz auftragen?

Ein schwingungsfähiges System wird zu „erzwungenen Schwingungen“ angeregt. Die Reaktion des Schwingers auf die Erregung hängt von der Frequenz des Erregers ab. Ist diese gleich der Eigenfrequenz des Schwingers, so ist die Reaktion maximal, d.h. der Schwinger schwingt am heftigsten. Bei dieser Frequenz ist seine Energiedissipation oder Entropieproduktion am größten, und daher ist der Energiestrom vom Erreger zum Schwinger maximal.

Die Energiedissipation geschieht durch die Reibung, in Abb. 2 repräsentiert durch den Dämpfer. Der Energiestrom, der im zeitlichen Mittel mechanisch in den Dämpfer fließt (und thermisch wieder heraus) lässt sich berechnen nach

$$\bar{P} = \frac{k}{2} \cdot \hat{v}^2$$

Hier ist \hat{v} die Geschwindigkeitsamplitude des rechten „Anschlusses“ des Dämpfers (die des linken ist null). k charakterisiert den Dämpfer: Je größer k , desto härter ist er.

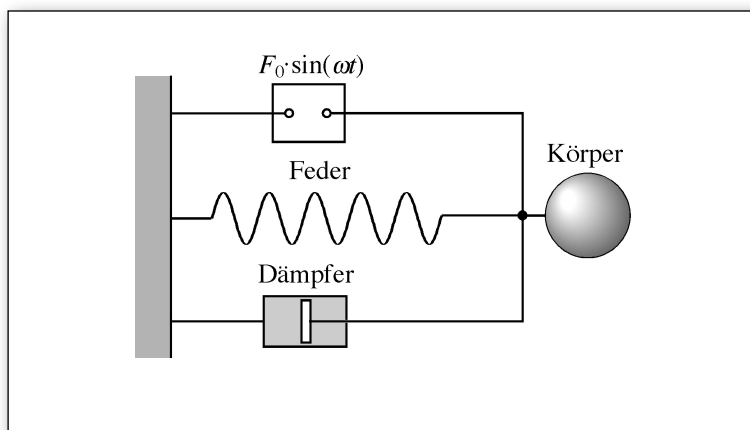


Abb. 2

Vorrichtung zur Erzeugung erzwungener Schwingungen, symbolisch

Die Energie, die im Dämpfer dissipiert wird, wird dem System vom Erreger zugeführt. Daher kann man den zeitlich gemittelten Energiestrom auch ausrechnen aus den Größen, die den Erreger charakterisieren:

$$\bar{P} = \overline{v \cdot F}$$

Hier ist v die Geschwindigkeit des Energieausgangs des Erregers (sein rechter „Anschluss“), und F der Impulsstrom durch diese Verbindung. Bei der Berechnung des Mittelwertes der rechten Seite

der Gleichung ist zu beachten, dass v und F im Allgemeinen nicht in Phase sind. Mit dem Phasenunterschied ϕ ergibt sich:

$$\bar{P} = \frac{\hat{v} \cdot \hat{F}}{2} \cdot \cos \phi$$

Der Faktor $\cos \phi$ ist aus der Elektrizitätslehre bekannt. Genau wie dort sagt er uns, wie groß die „Blindleistung“ ist, d.h. der Teil des Energiestroms, der vom Verbraucher wieder zur Quelle zurückfließt. Für $\cos \phi = 0$ ist der Nettoenergiefluss von der Energiequelle zum Verbraucher gleich null. Zwischen Quelle und Verbraucher (bei uns zwischen Erreger und Schwinger) fließt die Energie nur hin und her. Für $\cos \phi = 1$ ist der Nettoenergiefluss zum Schwinger optimal. Dieser Fall entspricht der Resonanz.

Aus den vorangehenden Überlegungen folgt, welche Größen man zweckmäßigerweise über der Frequenz aufträgt, damit die Erscheinung der Resonanz möglichst klar zu erkennen ist:

1. Den Mittelwert der pro Zeit dissipierten Energie (der gleich ist dem mittleren Energiestrom vom Erreger zum Schwinger). Wie man erwartet, hat dieser Energiestrom bei der Eigenfrequenz des Schwingers sein Maximum, und er wird null sowohl für $\omega \rightarrow 0$ als auch für $\omega \rightarrow \infty$. Da dieser Energiestrom proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit des schwingenden Körpers ist, kann man ersatzweise auch die Geschwindigkeitsamplitude über der Frequenz auftragen. Auch diese Kurve hat das Maximum an der richtigen Stelle und das korrekte asymptotische Verhalten für $\omega \rightarrow 0$ und für $\omega \rightarrow \infty$. Es ist weniger geschickt, die Resonanz an einem Diagramm zu diskutieren, das die Ortsamplitude des Schwingers als Funktion der Frequenz zeigt. In einem solchen Graphen liegt das Maximum bekanntlich nicht an der „richtigen“ Stelle.

2. Die Phasenverschiebung zwischen Impulsstrom und Geschwindigkeit am Ausgang des Erregers. Wie man erwartet, ist diese bei der Eigenfrequenz des Schwingers null, und für kleinere und größere Frequenzen von null verschieden.

Oft wird die Phasenverschiebung zwischen der Ortsamplitude des Erregers und Ortsamplitude des Schwingers als Funktion der Frequenz aufgetragen. Diese Kurve ist aber schwerer zu interpretieren.

HERRMANN, F. und HAUPTMANN, H.: Unstimmigkeiten bei der Behandlung von Schwingungen, Praxis der Naturwiss. 8/50, 39 (2001).

Parallel- oder Serienschwingkreis?

Es soll ein Problem angesprochen werden, das einem im Zusammenhang mit erzwungenen mechanischen Schwingungen begegnet. Da es leichter am elektrischen Schwingkreis zu diskutieren ist, betrachten wir zunächst einen elektrischen Schwingkreis.

Der Schwingkreis soll bestehen aus Kondensator, Spule, Widerstand und Erregerenergiequelle. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, diese 4 Bauelemente zu kombinieren: alle vier parallel; alle vier in Reihe; drei parallel und das vierte zu einem der drei in Reihe... Für welche dieser Schaltungen sollen wir uns entscheiden? Zunächst schließen wir diejenigen aus, bei denen Parallel- und Reihenschaltung gemischt auftreten, wir beschränken

uns auf die Kandidaten mit den übersichtlichsten Schaltbildern, Abb. 3.

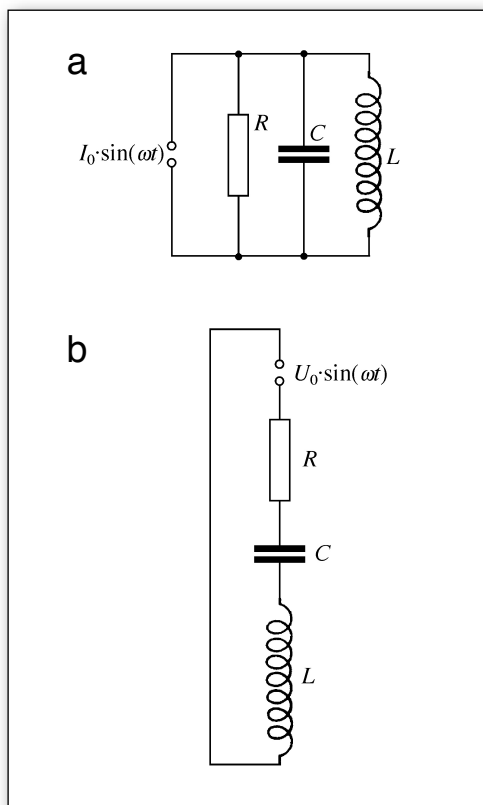


Abb. 3

(a) Parallelschwingkreis, (b) Serienschwingkreis

Wir wollen eine Resonanzkurve aufnehmen, d.h. die Frequenz der Erregerquelle durchdrehen und die Reaktion des Schwingkreises beobachten. Dazu müssen wir aber noch festlegen, welche Variable der Quelle wir konstant halten. Die vernünftigsten Kandidaten hierfür sind 1. die Stromamplitude oder 2. die Spannungsamplitude. Natürlich könnte man auch noch andere Möglichkeiten ins Auge fassen. So könnte man auch den Energiestrom konstant halten. Nur kann man dann im Energiestrom die Resonanz nicht mehr erkennen. Beschränken wir uns also auf die Betrachtung von elektrischem Strom und elektrischer Spannung.

Wir wollen untersuchen, wie der Schwingkreis auf einen Stimulus reagiert. Wenn wir im Fall des Parallelschwingkreises die Spannung vorgäben, so läge diese Spannung auch in jedem Augenblick an allen drei anderen Bauelementen. Der „Schwingkreis“ wäre kein Schwingkreis mehr. Wir hätten die drei Bauelemente ebenso gut

unabhängig voneinander an drei Wechselspannungsquellen anschließen können. Man wird also hier die Stromamplitude vorgeben, und untersuchen, wie der Schwingkreis den Strom zwischen den drei Bauelementen aufteilt.

Ähnliche Argumente sprechen beim Serienschwingkreis dafür, die Spannungsamplitude konstant zu halten.

Nun ist die Frage klarer. Wir haben zu entscheiden zwischen einem Parallelschwingkreis mit einem Erreger konstanter Stromamplitude und einem Serienschwingkreis mit einem Erreger konstanter Spannungsamplitude. Beide Optionen sind in vieler Hinsicht äquivalent. Die entsprechenden Resonanzkurven sehen absolut gleich aus.

So wie man bei dem mechanischen Schwinger von Abb. 2 statt des Energiestroms auch die Geschwindigkeit über der Frequenz auftragen kann, so kann man beim elektrischen Parallelschwingkreis statt des Energiestroms auch die Spannung, und beim Serienschwingkreis die Stromstärke über der Frequenz auftragen. In beiden Fällen bekommt man das von einer Resonanzkurve erwartete Verhalten: das Maximum bei der Eigenfrequenz, und eine Amplitude (der Spannung bzw. des Stroms), die für $\omega \rightarrow 0$ und $\omega \rightarrow \infty$ gegen null geht.

Wofür sollen wir uns also entscheiden?

In einem Kurs für Fortgeschrittene könnte man beide Versionen behandeln und gerade die Analogie oder Äquivalenz als interessantes Lernziel hervorheben. Aber auch, wenn wir uns beschränken müssen, fällt die Entscheidung nicht schwer: Wir stellen die Sache ja so dar, dass wir den Erreger als Ursache und das Verhalten des Schwingkreises als Wirkung darstellen. Da wir nun in der Elektrizitätslehre daran gewöhnt sind, die Spannung als Ursache und den Strom als die Folge hinzustellen, wollen wir es hier genauso machen. Also: Wir diskutieren den Serienschwingkreis mit einem Erreger konstanter Spannungsamplitude.

So leicht die Entscheidung im Fall des elektrischen Schwingkreises ist, so schwer wird sie im Fall des mechanischen Schwingers.

Man könnte denken, man brauche doch nur den elektrischen Serienschwingkreis in eine mechanische Anordnung zu übersetzen. Die Übersetzungsregeln kennen wir ja schließlich. Aus elektrischer Ladung wird Impuls, aus elektrischem Strom Impulsstrom, aus Spule Feder, aus Körper mit Masse wird Kondensator mit Kapazität.

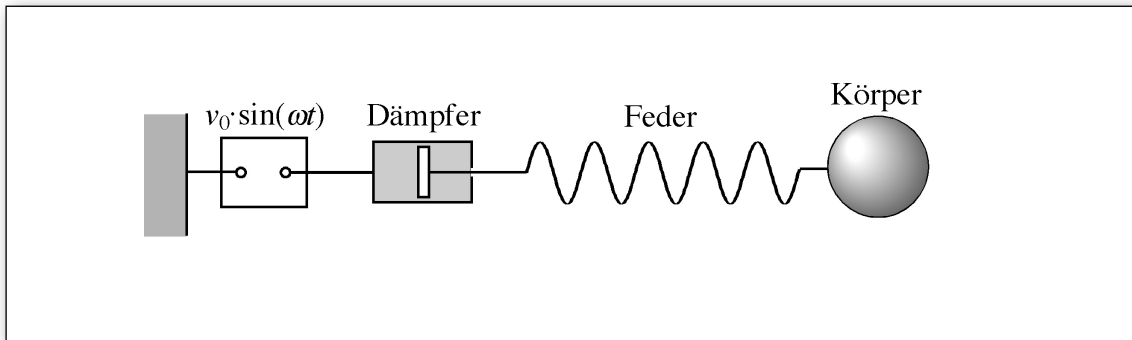


Abb. 4

Mechanisches Analogon zum elektrischen Serienschwingkreis

Wenn man das tut, so erhält man den Schwinger von Abb. 4. (Die Übersetzung des Parallelschwingkreises ergibt den Schwinger von Abb. 2.) Dieser mechanische Schwinger funktioniert im Prinzip, und wird durch dieselbe Mathematik beschrieben wie der elektrische Schwingkreis, aus dem er hervorgegangen ist. Er hat nur einen kleinen Schönheitsfehler: Wir brauchen einen Erreger oder Antrieb, der unabhängig von der Drehzahl eine konstante Geschwindigkeitsamplitude liefert. Das ist in zweierlei Hinsicht ungeschickt.

1. Während wir daran gewöhnt sind, die elektrische Spannung als Ursache des elektrischen Stroms zu begreifen, so sagt uns unser Gefühl für mechanische Vorgänge, dass eher die Kraft, d.h. der Impulsstrom die Ursache einer Geschwindigkeit ist, und nicht umgekehrt.

2. Einen mechanischen Antrieb, der eine periodische Bewegung mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude liefert, findet man nicht. Es ist gar kein Problem, eine Vorrichtung zu bauen mit konstanter Ortsamplitude, oder konstantem Hub. Genau das macht ja eine Kurbel. Man könnte tatsächlich auch einen Antrieb mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude bauen. Dieser sähe allerdings so unnatürlich aus, dass er den ganzen Versuch suspekt machen würde.

Wir sind also gezwungen, die Wahl der Anordnung im elektrischen und im mechanischen Fall unterschiedlich zu treffen.

Damit scheint die Sache entschieden zu sein: Wir bauen den mechanischen Schwinger von Abb. 2 auf, der dem elektrischen Parallelschwingkreis entspricht: Feder, Körper, Dämpfer und Erreger sind mechanisch parallel geschaltet. In Hochschulbüchern, in denen

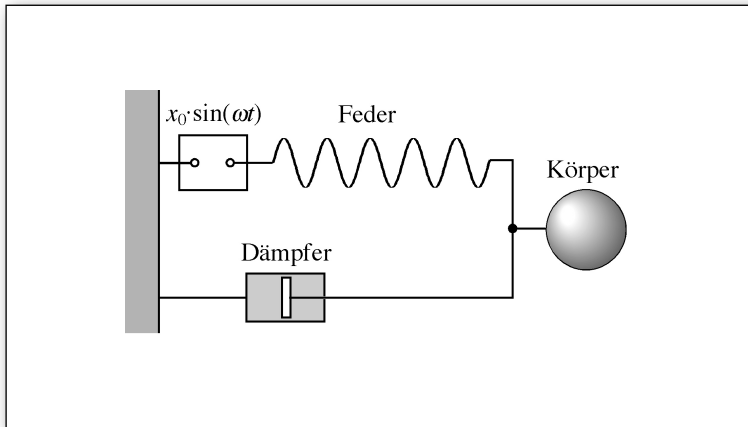


Abb. 5

Mechanischer Schwinger
mit Erreger konstanter
Ortsamplitude

der mechanische Schwinger durchgerechnet wird, bezieht man sich auch fast durchweg auf diesen Schwingertyp.

Praktisch tritt hier allerdings ein weiteres Problem auf: Auch ein solcher Schwinger ist nur schwer zu realisieren, denn man braucht einen Antrieb, der eine konstante Kraftamplitude liefert. Es ist zwar nicht allzu schwer, ein solches Gerät zu bauen, aber in Schulsammlungen ist es nicht vorhanden.

Was man zum Experimentieren benutzt, ist ein Antrieb mit einer Kurbel, die sich mit vorgegebener Winkelgeschwindigkeit dreht. Die Anregung der Schwingung geschieht also weder mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude, noch mit konstanter Kraftamplitude, sondern mit fester Ortsamplitude, Abb. 5. Die Methode funktioniert deshalb, weil die resultierende Differenzialgleichung dieselbe ist wie die eines „Parallelschwingers“, der mit konstanter Kraftamplitude angetrieben wird.

3. Spektren

Eine Minimalversion der Fourierzerlegung

Unsere Behandlung der Zerlegung von Funktionen in eine Fourierreihe ist ein Kompromiss, bei dem wir abzuwägen hatten zwischen mathematischer Strenge einerseits und Kürze der Herleitungen, sowie Griffigkeit des Ergebnisses andererseits.

Die kürzeste Version wäre gewesen, dass wir einfach behaupten: „Jede Funktion lässt sich in Sinusbestandteile zerlegen.“ Dann wären uns allerdings einige interessante Erscheinungen der Akustik entgangen. So haben wir uns entschlossen, den periodischen Funktionen doch eine besondere Bedeutung einzuräumen.

Die Aussage, dass man eine beliebige Funktion, die nur in einem Intervall der unabhängigen Variablen definiert ist, stets periodisch ergänzen kann, ist unseren Vereinfachungsbemühungen zum Opfer gefallen.

Fourierzerlegungen überall

Man mag der Meinung sein, die Zerlegung einer Zeitfunktion in harmonische Anteile sei zu schwierig für die Schule. Wir glauben das nicht. Wir glauben sogar, dass sie eine Voraussetzung ist für das Verständnis vieler Aussagen und Behauptungen, die wir ohnehin im Unterricht machen, wie etwa: „Sonnenlicht besteht aus Licht vieler Wellenlängen zwischen...“. (Es wäre treffender, man sagte: „Man kann Sonnenlicht zerlegen in“.) Oder: „Unser Gehör ist empfindlich für Schall mit Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz.“

Was sollte man mit solchen Aussagen anfangen, wenn man nicht voraussetzte, dass jedes Licht, jedes Geräusch und jeder Ton zerlegbar ist in Sinusanteile?

Spektren

Bei der Einführung des Begriffs „Spektrum“ hätte man eigentlich unterscheiden müssen zwischen diskreten Spektren, die sich mit einem Balkendiagramm darstellen lassen und kontinuierlichen Spektren, bei denen die Ordinate die Ableitung einer Amplitude oder Energiestromdichte nach der Frequenz ist.

Wir haben auf eine mathematisch saubere Darstellung aus zwei Gründen verzichtet. Erstens können wir nicht davon ausgehen, dass die Differenzialrechnung im Mathematikunterricht schon behandelt wurde, und zweitens wäre der mathematische Aufwand etwas unverhältnismäßig.

Gekoppelte Schwingungen

Wir haben die Ausdrücke „gekoppelte Schwingungen“ und „gekoppelte Schwinger“ vermieden. In der ursprünglichen Bedeutung sollten die Ausdrücke ja sicher an die beiden Pendel erinnern, die durch eine weiche Feder oder einen Faden mit einem kleinen Gewicht aneinander „gekoppelt“ worden sind. Man geht also aus von zwei zunächst unabhängigen Schwingern, die dann schwach aneinander gekoppelt werden. Nun sind bei den Systemen, auf die wir später hinauswollen, die Einzelschwinger aber nicht mehr zu erkennen. Wir können nicht irgendwelche Federn der Art wegnehmen, dass dadurch ungekoppelte Schwinger entstehen.

Eine klarere Alternative wäre gewesen, die verschiedenen Schwinger durch die Zahl der Freiheitsgrade zu charakterisieren. Das hätte aber eine längere formale Diskussion erfordert, die unseren Ansprüchen nicht angemessen ist. Wir haben uns daher für eine Ausdrucksweise entschieden, die sich eher an die Umgangssprache anlehnt: Ein Schwinger mit zwei, drei usw. Freiheitsgraden heißt bei uns ein Doppelschwinger, Dreifachschwinger usw.

Resonanzkurven von Schwingern mit mehreren Freiheitsgraden

Wir haben nur ungern darauf verzichtet, dieses Thema zu behandeln. Schwierig ist es nicht, solche Resonanzkurven aufzunehmen. Es ist eher ein etwas marginales Problem, das einen daran hindert, das Thema im Unterricht zu behandeln. Während wir bei der Behandlung der Resonanz beim einfachen Schwinger sowohl Dämpfer als auch Erreger als parallel zur Feder angenommen hatten, bietet sich bei Mehrfachschwingern eine große Zahl von Alternativen. Dies hätte eine umständliche und nicht sehr ergiebige Diskussion über den Zusammenhang zwischen Resonanzkurve und Spektralfunktion erforderlich gemacht.

4. Wellen

Nicht die Erzeugung steht im Mittelpunkt

Man kann in Physikbüchern eine gewisse Tendenz erkennen, eine Erscheinung dadurch zu erklären, dass man beschreibt, wie man sie hervorruft oder erzeugt. Das elektrische Feld wird über die elektrische Ladung erklärt, die die Ursache des Feldes ist. Die Kohärenz erklärt man, indem man Lichtquellen beschreibt, die kohärentes Licht erzeugen. Elektromagnetische Wellen erklärt man über den Hertzschen Oszillator. Wir meinen, dass diese Vorgehensweise unnötig umständlich ist, denn oft ist der Entstehungsprozess komplizierter als das zu erklärende Phänomen selbst. Etwas übertreibend könnte man so sagen: Um jemandem zu erklären, was ein Fahrrad ist, beschreibt man am besten das Fahrrad selbst und nicht den Herstellungsprozess in der Fahrradfabrik.

Auch bei den Wellen haben wir uns bemüht, gleich auf die Erscheinung selbst zu sprechen zu kommen. Wir beschreiben, was eine Welle ist und welche verschiedenen Wellentypen es gibt.

Der Energietransport mit Wellen

Wir haben die Regel formuliert, dass die zeitlich gemittelte Energiestromdichte in einer Welle proportional ist zum Quadrat der Amplitude einer der Größen, durch die wir die Welle beschreiben. Auch wenn es im Unterricht nicht angesprochen wird, sollte der Lehrer wissen, dass, wenn sich zwei Wellen durchdringen, sich zwar die jeweiligen Wellenvariablen addieren, nicht aber die Energieströme. Auch sollte man nicht aus den Augen verlieren, dass an den Stellen, an denen sich „die Wellen weginterferieren“, lediglich eine der Wellenvariablen ständig (und nicht nur im Zeitmittel) null ist, eine andere Variable aber nicht zu null wird. Man erkennt es deutlich bei stehenden Wellen. Bei einer stehenden elektromagnetischen Welle hat dort, wo die elektrische Feldstärkeverteilung ihre Knoten hat, die magnetische Feldstärke gerade einen Bauch. Ähnlich bei einer stehenden Schallwelle: Wo die Geschwindigkeitsknoten liegen, befinden sich die Druckbäuche.

Die Abbildungen im Text, bei denen das Quadrat der Wellenfunktion dargestellt ist – man erkennt sie daran, dass der Hintergrund weiß und nicht grau ist – sind also im Allgemeinen nicht Bilder der Energiedichte und auch nicht der Energiestromdichte. Sie sind es nur dort, wo sich eine reine Sinuswelle befindet, nicht aber in den Interferenzbereichen.

Die Auslöschung ist meist nicht vollständig

Bei der Diskussion der Interferenz begehen wir mit einem etwas unguuten Gefühl eine Ungenauigkeit, die aber in der Lehrbuchliteratur durchweg begangen wird, und die man anscheinend kaum der Erwähnung für Wert hält.

Man sagt, dass sich zwei ebene Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude, die sich unter einem gewissen Winkel durchkreuzen, an bestimmten Stellen auslöschen. Es sind die Stellen, an denen sich die Größe, mit der man die Wellen beschreibt, zu null addiert, und zwar nicht im zeitlichen Mittel, sondern in jedem Augenblick. Tatsächlich bedeutet das aber gar nicht, dass sich die beiden Wellen auslöschen. Nur die eine betrachtete Größe ist an diesen Stellen null. Die zu ihr komplementäre Größe ist es im Allgemeinen nicht.

Abb. 6 zeigt die Durchdringung von zwei ebenen elektromagnetischen Wellen. Nehmen wir an, die elektrischen Feldstärkevektoren stehen senkrecht zur Zeichenebene. Die Grautönung stehe für den Betrag der elektrischen Feldstärke. Man erkennt im Interferenzgebiet waagrechte Linien, auf denen sich die elektrische Feldstärke zu null addiert. Wenn die elektrischen Feldstärkevektoren senkrecht zur Zeichenebene stehen, so liegen die magnetischen in der Zeichenebene, und zwar für die beiden Einzelwellen senkrecht zur Laufrichtung der jeweiligen Welle. Das bedeutet aber, dass sich die magnetischen Feldstärkevektoren der beiden Einzelwellen nie zu null addieren können, denn sie sind ja nie antiparallel. Dort wo sich die elektrischen Feldstärkebeiträge zu null addieren, ist also die magnetische Feldstärke von null verschieden.

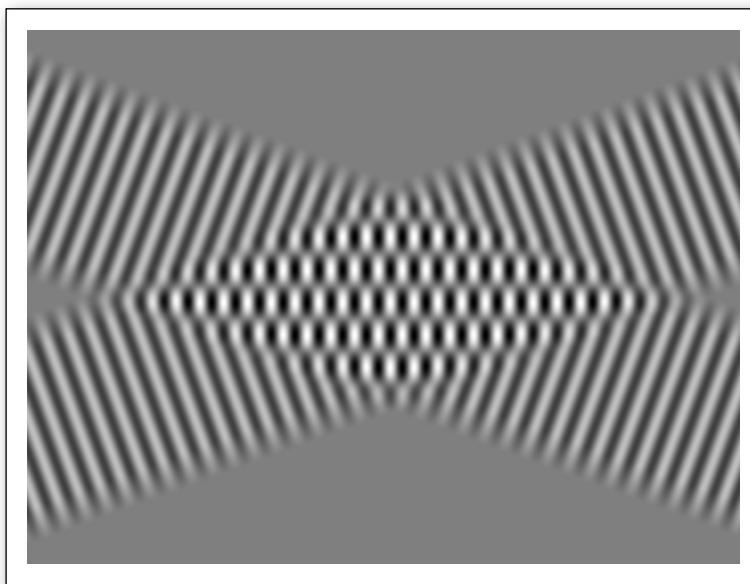


Abb. 6

Wenn die elektrischen Feldstärkevektoren senkrecht zur Zeichenebene stehen, so liegt die magnetische Feldstärke in der Zeichenebene.

Daher ist auch die Energiedichte der Welle dort nicht null. Die Energiestromdichte dagegen, die durch das Vektorprodukt $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ gegeben ist, ist null, da der eine Faktor, nämlich \mathbf{E} , null ist.

Beugung

Die Beugung wird bei uns deutlich getrennt von der Interferenz behandelt. Nach unserer Erfahrung bringen Schüler und Studenten die beiden Begriffe gern durcheinander. Wir diskutieren daher die Interferenz zunächst an Hand einer Situation, bei der keine Beugung im Spiel ist: zwei spitzwinklig durcheinander hindurch laufende Sinuswellen. Man kann sich diese Wellen ruhig erzeugt denken durch zwei voneinander unabhängige Quellen. Dass diese Art Interferenzversuch beim Licht Probleme macht, liegt nur an einem technischen Problem: Es gibt keine Lichtquellen, die hinreichend phasenstabil sind.

Die raffinierteren Interferenzversuche

Ein unvoreingenommener Mensch, der die Interferenz von Licht untersuchen wollte, würde wahrscheinlich nicht mit der Beugung am Doppelspalt oder am Gitter beginnen. Die näher liegende Idee ist die, dass man mit zwei unabhängigen Lichtquellen zwei Sinuswellen erzeugt. (Entsprechend würde man auch verfahren, um die Interferenz von Schallwellen zu zeigen.)

Bevor wir zu den gut funktionierenden, raffinierten Interferenzversuchen mit Doppelspalt und Gitter kommen, versuchen wir daher zu verstehen, warum die näher liegende Methode versagt.

Kohärenz

Wir diskutieren sie im Zusammenhang mit dem Theorem der Zerlegbarkeit einer Welle in Sinuswellen. Dieses Theorem ist ja eines der wichtigsten Lernziele dieses Bandes.

Das Huygenssche Prinzip

Das Huygenssche Prinzip wird, unserer Meinung nach, in der Schulbuchliteratur etwas missbraucht.

Um zu erklären, dass von einer kleinen Quelle eine Kreis- oder Kugelwelle ausgeht, braucht man das Prinzip nicht zu bemühen.

In der Form, in die es Fresnel gebracht hatte, sagt es ja nichts anderes, als dass man eine gegebene Welle in Kreis- oder Kugelwellen zerlegen kann. Zerlegungen sagen uns aber nichts über eine tiefere Wahrheit. Sie sind lediglich ein mathematisches Werkzeug. Man wendet es an, wenn es die Arbeit vereinfacht, und man lässt es bleiben, wenn es keinen Vorteil bringt.

Ein Wellenfeld in Kugelwellen zu zerlegen bietet sich an, wenn das Problem kugelsymmetrisch oder nahezu kugelsymmetrisch ist. Eine ebene Welle in Kugelwellen zu zerlegen, wie man es tut, um Brechung und Reflexion mit dem Huygensschen Prinzip zu erklären, bedeutet aber, einen einfachen Sachverhalt umständlich zu erklären.

5. Interferenz von Licht und Röntgenstrahlung

Beugungsgitter und Röntgenbeugung an Kristallen

Die Entscheidung, das Beugungsgitter als Unterrichtsthema aufzunehmen, ist uns schwer gefallen. Schließlich stellt es ja nur eines von unzähligen Werkzeugen dar, die in der atom- und festkörperphysikalischen Forschung zur Anwendung kommen.

Das Beugungsgitter für sichtbares Licht ist vor allem wichtig im Gitterspektroskop, die Beugung von Röntgenlicht für die Röntgenstrukturanalyse. Heben sich diese beiden Analyseverfahren unter den vielen anderen Techniken so stark heraus, dass man sie, und nicht all die anderen Verfahren, im Unterricht behandeln soll? In einer Hinsicht tun sie das tatsächlich. Den weitaus größten Teil unseres Wissens über das Atom und damit die experimentellen Grundlagen der Quantenphysik, verdanken wir der optischen Spektroskopie. Historisch war sie sicher wichtiger als Massenspektroskopie, Elektronenverlustspektroskopie, Elektronenmikroskopie, Fourierspektroskopie, und vieles andere. Die Röntgenbeugung spielte eine ähnliche Schlüsselrolle, nämlich bei der Aufklärung der Struktur der festen Materie. Sie war und ist wichtiger als Röntgenfluoreszenzanalyse, Neutronenbeugung, Transmissionselektronenmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie, Rastertunnelmikroskopie, SNOM (Scanning Nearfield Optical Microscopy), LEED (Low Energy Electron Diffraction), Elektronenspinresonanz, NMR (Nuclear Magnetic Resonanz), SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) und viele andere Verfahren.

6. Datentransport und -speicherung

Die Datenmenge bei der optischen und der akustischen Wahrnehmung

Wir beginnen das Thema, indem wir unterstellen, dass Bilder und Geräusche keine Redundanz haben. Wir berücksichtigen zunächst also noch nicht die Möglichkeit der Datenkompression. Tatsächlich gibt es ja auch immer Wegteile im Datenfluss, über die dieser unkomprimierte Datenstrom fließt.

Das Abtasttheorem

Es taucht bei uns auf im Zusammenhang mit akustischen Datentransporten, allerdings ohne dass es beim Namen genannt wird.

Die Redundanz

Wir haben für die Redundanz kein eigenes Maß eingeführt. Ein solches Maß wäre zwar leicht zu definieren:

$$R = 1 - H_0/H.$$

(H_0 = tatsächliche Datenmenge, H = scheinbare Datenmenge.) Allerdings könnten wir praktisch nicht viel damit anfangen. Das Problem besteht darin, die tatsächliche Datenmenge zu bestimmen.

Spiele und Wahrscheinlichkeiten

In Lehrbüchern über die Informationstheorie spielen Würfel- und Urnenexperimente eine wichtige Rolle. Der Grund ist, dass damit Situationen vorliegen, in denen Wahrscheinlichkeiten leicht angegeben werden können. So kann man gut das Funktionieren der Shannonschen Formel zeigen. Daher der Abschnitt „Spiele“.

Datenspeicher

Es ist ein schönes Thema in verschiedener Hinsicht. Einmal geht es um sehr aktuelle Technik. Außerdem sind sie ein interessantes Thema der Technikgeschichte. Eine sorgfältige Beschreibung der wichtigen Verfahren wäre aber für ein Physikbuch zu umfangreich, eine Auswahl dagegen enthielte Willkür. Wir geben daher nur einen groben Überblick, und überlassen es dem Lehrer, das eine oder

andere Verfahren ausführlicher zu behandeln. Das Thema ist sicher auch für Schülervorträge geeignet.

Es ist uns auch schwer gefallen, uns für ein bestimmtes Ordnungsprinzip der Datenspeicher zu entscheiden. Wir haben sie schließlich nach dem physikalischen Fachgebiet geordnet, da ein solches Vorgehen in die allgemeine Philosophie des KPK passt.

In Frage gekommen wäre auch eine Behandlung, die dem historischen Werdegang entspricht (Wir haben eine solche in eine Aufgabe gepackt.), eine Ordnung nach Kodierungsverfahren, nach der Art der ursprünglich vorliegenden Daten (Text, Bilder, bewegte Bilder, akustische Signale), nach Speicherkapazität, Zugriffszeit und Haltbarkeit oder nach Art der Kodierung: Analog, digital oder holographisch.

C

Versuche

Wir gehen davon aus, dass eine Luftkissenbahn zur Verfügung steht, dass die Möglichkeit der Orts- und Geschwindigkeitsaufnahme besteht und dass die aufgenommenen Daten fourier-analysiert werden können.

1. Schwingungen

1.1 Eine vorläufige Beschreibung

1. Man führt verschiedene periodisch ablaufende Vorgänge vor und diskutiert, ob es sich um eine Schwingung in unserem Sinn handelt, zum Beispiel:

- ein (möglichst großes) Fadenpendel;
- ein einseitig eingeklemmtes Lineal oder Sägeblatt;
- zwei durch eine Feder verbundene Gleiter auf der Luftkissenbahn;
- ein Gleiter und eine Feder, deren eines Ende fixiert ist;
- das Wasser im U-Rohr;
- ein Gleiter, der auf der Luftkissenbahn zwischen zwei Federpuffern an den Enden der Bahn hin- und herläuft;
- das Experiment von Abb. 1.4 im Schülertext (leicht zu realisieren).

Man misst die Periodendauer.

2. Man nimmt für einen der Schwinger Ort und Geschwindigkeit als Funktion der Zeit auf.

1.3 Die Erde als Partner

Man baut einen Schwinger auf, der ähnlich wie der von Abb. 1.3 im Schülertext aussieht, bei dem allerdings der eine Gleiter ersetzt ist durch mehrere (möglichst viele) fest aneinander gekoppelte Gleiter. Man nimmt den Geschwindigkeit-Zeit-Zusammenhang auf für den einzelnen Gleiter und für die fest aneinander hängenden Gleiter. Man vergleicht die kinetischen Energien.

1.4 Harmonische Schwingungen

1. Man nimmt den Ort-Zeit-Zusammenhang eines Federschwingers auf und vergleicht mit dem Diagramm einer Sinusfunktion.

2. Man nimmt den Winkel-Zeit-Zusammenhang eines Pendels auf und vergleicht mit dem Diagramm einer Sinusfunktion.

1.5 Wovon die Periodendauer abhängt

1. Man untersucht die Periodendauer des Federschwingers als Funktion der Masse des schwingenden Körpers, Abb. 7.

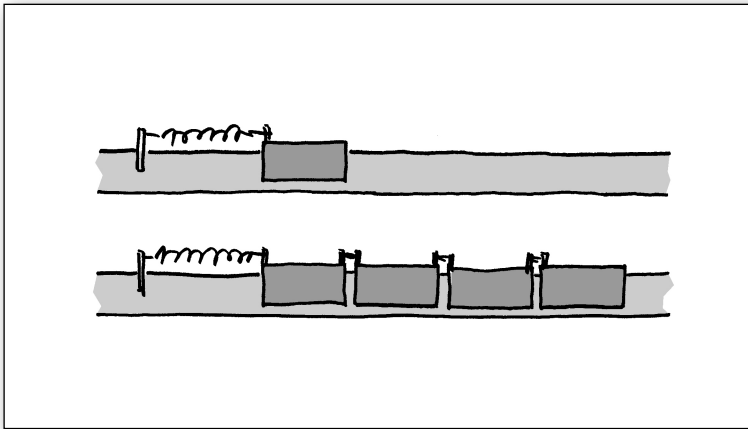


Abb. 7

Man erhöht die Masse des schwingenden Körpers und misst die Periodendauer.

2. Für einen waagrecht liegenden Federschwinger auf der Luftkissenbahn ist es etwas schwierig, die Federkonstante durch Aneinanderhängen von Federn zu verändern. Man kann sich dadurch behelfen, dass man die Messung an einem hängenden Federpendel macht. Dabei tritt natürlich das Problem des Impulsaustauschs über das Schwerfeld auf.

1.7 Das Pendel

1. Die Bewegung eines Pendels wird aufgenommen, auch die eines Pendels, das überschlagen kann, so dass man Abweichungen vom Sinusverlauf erkennt.

2. Ein Pendel wird auf ein leichtes Fahrzeug montiert (Abb. 1.19 im Schülertext). Man sieht den Impulsaustausch zwischen Pendel und „Umgebung“.

3. Die Periodendauer wird gemessen als Funktion von Masse und Pendellänge.

4. Ein mechanisches Metronom wird an einer Schur aufgehängt. Man lässt es ticken und beginnt dann, es nicht zu schnell im Kreis herumzuschleudern. Das Metronom tickt deutlich hörbar schneller. (Das Metronom stellt im Wesentlichen ein Pendel dar. Im Bezugssystem des herumgeschleuderten Metronoms ist die Gravitationsfeldstärke, d.h. der Ortsfaktor, größer als im ruhenden Bezugssystem.)

1.8 Drehschwingungen: Hin- herfließender Drehimpuls

Mit den Mitteln der Sammlung baut man einen Drehschwinger auf und untersucht den Einfluss der Masse auf die Periodendauer. Man untersucht auch den Einfluss des Abstandes der Schwingkörper von der Drehachse auf die Periodendauer.

1.9 Elektrische Schwingungen: Hin- und herfließende elektrische Ladung

Aufbau eines elektrischen Schwingkreises und Aufzeichnung der Schwingungen. Besonders überzeugend sind langsame Schwingungen, die man mit einem Zeigerinstrument sichtbar macht. Um die Dämpfung zu vermindern, kann man die Spule (des Transformatorbausatzes) in flüssigen Stickstoff eintauchen.

1.10 Die Dämpfung von Schwingungen

Man zeigt den linearen Impulsstrom-Geschwindigkeits-Zusammenhang für einen Autostoßdämpfer. Der Stoßdämpfer sollte einen langen Hubweg haben, etwa 20 cm.

Der Stoßdämpfer wird senkrecht aufgehängt, es werden verschiedene Gewichte angehängt, und es wird jedes Mal die Geschwindigkeit gemessen (mit Maßstab und Stoppuhr).

Beim Experimentieren muss der Stoßdämpfer senkrecht stehen oder hängen, denn er enthält Luft, und die gelangt sonst in den Strömungswiderstand.

Die Impulsströme müssen groß sein, vergleichbar denen, die in dem Fahrzeug auftreten, zu dem der Stoßdämpfer gehört. Wir haben als Gewichte schwere Stativfüße aus der Sammlung verwendet.

Der Zusammenhang kann nur für die Ausdehnung des Stoßdämpfers aufgenommen werden. Beim Zusammendrücken ist er viel nachgiebiger.

Es wäre wünschenswert, dass man in der Sammlung mehrere kleine, unterschiedlich harte Stoßdämpfer hat, so wie man die verschiedensten Federn, Gewichtsstücke, elektrischen Widerstände, Kondensatoren und Spulen hat.

2. Resonanz

2.1 Was ist Resonanz?

Mit einem Fadenpendel macht man den im Schülertext beschriebenen Freihandversuch.

2.3 Wie man eine Resonanzkurve aufnimmt

Mit den Mitteln der Sammlung werden Resonanzkurven für verschiedene Dämpfungen aufgenommen – wie im Schülertext beschrieben.

2.4 Resonanz eines elektrischen Schwingkreises

Mit den Mitteln der Sammlung werden Resonanzkurven für verschiedene Dämpfungen aufgenommen.

2.5 Selbstgesteuerte Schwingungen

1. Einem Fadenpendel oder einem Federpendel wird per Hand die verlorene Energie wieder zugeführt.
 2. Die Selbststeuerung der Schwingung einer mechanischen Uhr wird untersucht. Evtl. alte Wecker von zu Hause mitbringen.
 3. Ein elektrischer Schwingkreis mit Rückkopplung wird aufgebaut.
-

3. Spektren

3.1 Einige Ergebnisse der Mathematik

Mit einem Algebra- oder einem Tabellenkalkulationsprogramm zeigt man die Gültigkeit der im Text behandelten Lehrsätze. Man macht gewissermaßen Experimentalmathematik.

3.3 Doppelschwinger

Man führt die im Schülertext beschriebenen Versuche aus.

Man baut einen Doppelschwinger, der aus zwei durch eine Feder gekoppelten Fadenpendeln besteht und macht qualitative oder quantitative Experimente.

3.4 Mehrfachschwinger

1. Man baut einen Mehrfachschwinger auf wie im Schülertext beschrieben. Man nimmt den Ort eines der schwingenden Körper als Funktion der Zeit auf und lässt den Rechner das Spektrum bestimmen.

2. Man lässt die Schüler versuchen, reine Eigenschwingungen eines Dreifach- und eines Vierfachschwingers anzuregen, Abb. 8.

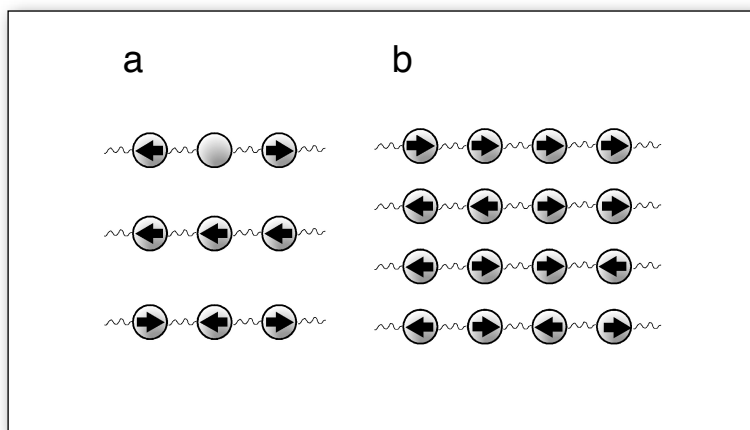


Abb. 8

Eigenschwingungen (a) eines Dreifach- und (b) eines Vierfachschwingers. Die Pfeile deuten die Bewegungsrichtung zu einem bestimmten Zeitpunkt an.

3.5 Wenn Trägheit und Elastizität nicht mehr getrennt sind

1. Ein elastisches Seil wird aufgespannt. Die eine Befestigung wird mit Hilfe eines Elektromotors sinusförmig auf- und abbewegt. Die Frequenz dieser Anregung wird „durchgefahren“. Bei bestimmten Frequenzen beobachtet man die Eigenschwingungen des Seils, die man auch als stehende Wellen beschreiben kann. Mit Hilfe eines Stroboskops lässt sich die Bewegung deutlich erkennen.

2. Solche Eigenschwingungen lassen sich auch mit weniger Aufwand zeigen. Man fixiert ein Ende eines elastischen Seils oder einer langen Feder und bewegt das andere mit der Hand auf und ab.

3. Man nimmt Spektren der Töne von Musikinstrumenten auf. Man spielt den Ton in ein Mikrofon. Das Ausgangssignal wird in seine Sinusanteile zerlegt.

4. Wellen

4.1 Der Träger der Wellen

1. Ein langes Seil (z.B. Gummiseil wie es im Sportunterricht verwendet wird) wird gerade ausgestreckt auf den Boden gelegt. Das eine Ende wird einmal schnell auf- und abbewegt. Es läuft eine Welle von der Quelle aus weg.

2. Eine etwa 5 m lange Stahlfeder wird gestreckt auf den Boden gelegt. Das eine Ende wird irgendwo befestigt, das andere vor- und zurückbewegt (Bewegung in Richtung der Feder). Von der Quelle löst sich eine Welle. Um den Lauf der Welle gut sichtbar zu machen, befestigt man an mehreren Stellen der Feder Pappkartonstückchen. Sobald die Welle an der entsprechenden Stelle ankommt, bewegt sich der Pappkarton vor und zurück.

Man legt die Feder auf den Boden, damit die Dämpfung recht hoch ist, so dass die am festen Ende reflektierte Welle die Beobachtung nicht stört. Möglicherweise muss man die Welle am Ende noch zusätzlich dämpfen, etwa mit einem Schwamm.

Hängt man die Feder frei auf, so sieht man die Welle mehrere Male schnell hin- und herlaufen.

3. Ein etwa 2 m langes an beiden Enden geschlossenes Stück Dachrinne wird mit Wasser gefüllt. Am einen Ende liegt zur Dämpfung der Wellen ein Lappen im Wasser. Am anderen Ende wird ein Körper, zuerst langsam dann schnell ins Wasser eingetaucht. Der Körper hat Zylinderform, so dass er sich an die Form der Dachrinne anpasst

4.2 Die Geschwindigkeit von Wellen

Im Schülertext beschriebener Versuch.

4.4 Sinuswellen

1. Mit den Mitteln der Sammlung wird eine harmonische Welle erzeugt. Eine Möglichkeit: Die lange Stahlfeder liegt am Boden, ein Ende wird festgehalten, das andere durch einen in die Handbohrmaschine eingespannten Exzenter in Hin- und Herbewegung versetzt. Um stehende Wellen zu vermeiden muss die Welle am festen Ende weggedämpft werden.

2. Mit einem Algebraprogramm wird eine animierte Sinuswelle auf dem Bildschirm dargestellt. Die Kinematik wird diskutiert.

4.5 Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge

Man erläutert etwa mit Hilfe des Projektionsmodells, dass die Welle pro Schwingungszeit gerade um eine Wellenlänge vorrückt.

4.6 Schallwellen

1. Ein Lautsprecher, dessen Membran nicht verdeckt, also sichtbar ist, wird über einen Schalter mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Man sieht, dass sich die Membran beim Öffnen und Schließen des Schalters bewegt. Außerdem hört man jeweils einen Knackton.

2. Man macht den bekannten Versuch, bei dem eine Klingel unter der Vakuumglocke klingelt.

3. Ein Lautsprecher wird an einen Funktionsgenerator nicht zu niedriger Leistung angeschlossen. Der Funktionsgenerator wird auf „Rechteckspannung“ gestellt. Die Frequenz ist zunächst sehr niedrig. Man nimmt eine Folge von Knacktönen wahr. Man erhöht die Frequenz. Von etwa 20 Hz an kann man die einzelnen Knacktöne nicht mehr auflösen, und man nimmt einen kontinuierlichen, tiefen Ton wahr. Die Tonhöhe nimmt zu, wenn man die Frequenz weiter erhöht.

Man stellt den Funktionsgenerator auf „Sinusspannung“ um. Man hört einen reinen „Sinuston“.

4. Ein Mikrofon wird an ein Oszilloskop angeschlossen. Man sieht sich den zeitlichen Verlauf der Schallschwingungen bei verschiedenen Tönen und Geräuschen an. Insbesondere betrachtet man das Bild für die menschliche Stimme und für verschiedene Musikinstrumente.

5. Man misst die Schallgeschwindigkeit mit einer Weg-Zeitmessung.

6. Man zeigt eine Schallwelle in einem festen Material. Man braucht eine möglichst lange Stange (mehrere oder viele Meter lang). An einem Ende befindet sich ein Fadenpendel. Der am Faden hängende Körper berührt das Ende der Stange. Man gibt nun mit einem Hammer einen leichten Schlag gegen das andere Ende der Stange. Der Pendelkörper springt weg. Die Stange darf durchaus irgendwo eingebaut sein. Es eignet sich also etwa ein langes Geländer.

4.7 Elektromagnetische Wellen

Sendung und Empfang einer elektromagnetischen Welle:

Mit Hilfe des Bandgenerators erzeugt man eine Funkenentladung. Die An- und Abklingzeit des elektrischen Stroms in der Funkenstrecke ist sehr kurz. (Funken, die man mit niedrigerer Spannung erzeugt, etwa, indem man einen $80\ \mu\text{F}$ -Kondensator auf $300\ \text{V}$ auflädt und dann kurzschließt, sind zwar sehr eindrucksvoll, für unseren Versuch aber ungeeignet, da die Stromänderung zu langsam vor sich geht.)

Am anderen Ende des Klassenzimmers steht ein empfindliches Oszilloskop, dessen Eingang man über ein Stück Kabel mit der Erdbuchse verbindet. Das Kabel dient als Empfangsspule.

Jedes Mal, wenn ein Funke überspringt, ist auf dem Oszilloskopbildschirm ein Signal zu sehen.

Als Empfänger eignet sich auch ein Radioempfänger, den man auf Kurz-, Mittel- oder Langwellenempfang stellt. Das Ankommen der Welle äußert sich hier in einem Knackton. (Auf UKW-Empfang, d.h. bei Frequenzmodulation, erzeugen Störungen großer Amplitude kein lautes Signal im Lautsprecher.)

4.9 Zwei Wellen am selben Ort

Man lässt auf einem auf dem Boden liegenden Seil zwei Wellenpulse in entgegengesetzter Richtung laufen. Die Auslenkung des Seils geschieht parallel zum Boden und senkrecht zur Seilrichtung. Man macht den Versuch mit Pulsen, deren Auslenkungen dieselbe Richtung haben, und mit solchen, deren Auslenkungen entgegengesetzt sind. Die Wellen laufen durch- einander hindurch.

Die starke Dämpfung, die durch die Reibung zwischen Seil und Boden zustande kommt, ist erwünscht: So wird das Experiment nicht durch reflektierte Wellen gestört.

4.10 Zwei Sinuswellen – Interferenz

1. Man bewegt beide Enden eines auf dem Boden liegenden Seils quer zur Seilrichtung periodisch hin und her. Von jedem Ende läuft eine gedämpfte periodische Welle los. Im mittleren Bereich des Seils ist eine stehende Welle zu erkennen.

2. Zwei gegeneinander laufende Wellen werden auf dem Computer simuliert. Man addiert auch zwei gegeneinander laufende Wellen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz.

4.11 Reflexion von Wellen

1. Das eine Ende eines Seils wird befestigt, das andere periodisch hin- und herbewegt. Die dabei erzeugte Welle wird am festen Ende reflektiert. Im Bereich des festen Endes ist eine stehende Welle zu erkennen.
2. Ein Lautsprecher wird an einen Funktionsgenerator, der eine Sinusspannung liefert, angeschlossen. Der Lautsprecher wird gegen eine ebene Wand gerichtet. In dem Bereich zwischen Lautsprecher und Wand wird ein Mikrofon, das an ein Oszilloskop angeschlossen ist, herumbewegt. Man erkennt die Ebenen, in denen sich einfallende und reflektierte Schallwelle verstärken und die, in denen sie sich abschwächen.
3. Man zeigt die Auslöschung, die durch die Reflexion von elektromagnetischen Dezimeterwellen entsteht.

4.12 Eigenschwingungen von Wellenträgern

1. Das eine Ende des Seils wird an der Wand befestigt, das andere hält man in der Hand. Das Seil berührt den Boden nicht. Durch periodisches Auf- und Abbewegen des einen Endes erzeugt man Eigenschwingungen des Seils: zuerst die Grundschiwingung, dann verschiedene Oberschwingungen.
2. Erzeugung von Eigenschwingungen eines Gummiseils. Anregung mit einem Elektromotor mit Exzenter. Beobachtung mit dem Stroboskop.
3. Man untersucht und diskutiert die Funktionsweise der verschiedensten Musikinstrumente.

4.13 Die Interferenz von Wellen

Man zeigt mit den Mitteln der Sammlung, etwa mit der Wellenwanne, das Interferenzmuster von zwei sich durchdringenden Sinuswellen.

4.14 Bewegte Schallquellen und Schallempfänger

Wenn man es sich leisten kann, geht man hinaus, an den Straßenrand und hört sich den Effekt an. Sonst tut es auch ein YouTube-Video.

4.15 Die Beugung von Wellen

1. Man zeigt die Beugung von Schall, am besten im Freien an einer Mauer oder Wand mit einer Öffnung. Es sollen keine weiteren Wände vorhanden sein, über die der Schall durch Reflexion zum Empfänger gelangen könnte.

2. Man zeigt die Beugung von Licht, mit einem Laserstrahl, den man auf eine sehr kleine Öffnung in einem dünnen Hindernis richtet.

5. Interferenz von Licht und Röntgenstrahlung

5.3 Auch Laserlicht genügt nicht

1. Wenn zwei gleichartige Laser zur Verfügung stehen, kann man den zum Misslingen verurteilten Versuch machen, durch Überlagerung der beiden Strahlen ein Interferenzbild zu erzeugen.
2. Interferenz von Licht mit dem Doppelspiegelversuch.

5.5 Polarisationsfilter

1. Mit einem Polarisationsfilter wird unpolarisiertes Licht polarisiert. Dass es polarisiert ist, weist man mit einem zweiten Filter nach.
2. Polarisiertes Licht geht durch ein Polarisationsfilter, das quer zur Polarisationsrichtung steht, nicht hindurch. Man stellt vor dieses Filter ein weiteres Filter, das gegen die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts um 45° gedreht ist. Jetzt kommt durch das anschließende Filter wieder Licht hindurch.
3. Man untersucht die Polarisation des Lichts vom Himmel und des Lichts, das vom Computer-Monitor kommt.

5.6 Beugung an kleinen Öffnungen und Spalten

Man zeigt die Interferenz von Licht durch Beugung am Doppelspalt und wertet den Versuch aus.

5.7 Beugung am Gitter – das Gitterspektrometer

Man experimentiert mit Beugungsgittern.

5.8 Zwei- und dreidimensionale Gitter

Wenn die notwendigen Mittel zur Verfügung stehen, zeigt man die Interferenz durch Beugung an einem zweidimensionalen Gitter.

5.9 Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen

Wenn entsprechende Geräte zur Verfügung stehen, zeigt man die Interferenz durch Röntgenbeugung.

6. Datentransport und -speicherung

6.7 Einige gebräuchliche Kodierungen

1. Man vergleicht die Größe von Dateien, die auf unterschiedliche Arten abgespeichert worden sind, etwa Bilder in verschiedenen Bildformaten.
2. Man komprimiert Dateien und vergleicht die Datenmenge vor und nach dem Komprimieren.

6.8 Spiele

Man macht die im Schülertext beschriebenen Spiele.

6.9 Datenreduktion

1. Man verbindet einer Testperson (Schülerin oder Schüler) die Augen, führt sie in eine ihr unbekannte Umgebung, entfernt die Augenbinde für eine Sekunde und führt sie wieder zurück in die alte Umgebung. Man fragt sie dann, welche Gegenstände sie gesehen hat. Sie wird wahrscheinlich nicht mehr als 10 Gegenstände nennen können. Bei diesem Vorgang wurde die Datenmenge reduziert.

Datenmenge der aufgenommenen Daten:

Ein Bild trägt etwa 50 Mbit.

Datenmenge der abgegebenen Daten:

Jeder Gegenstand, der einen Namen hat, steht auch im Wörterbuch. Ein typisches Wörterbuch enthält 30 000 Wörter. Daraus folgt eine Datenmenge von etwa 15 bit pro Namen, zusammen

$10 \cdot 15 \text{ bit} = 150 \text{ bit}$.

Die Testperson hat also etwa 50 Mbit aufgenommen und 150 bit abgegeben.

2. Man zeigt mit einem Farbeditor des Computers oder auch mit den entsprechenden Geräten aus der Sammlung, wie man jeden Farbeindruck durch „additives Mischen“ von 3 Leichtsarten erhält, etwa aus den drei Fernsehgrundfarben rot, grün und blau.

6.11 Datenübertragung mit elektromagnetischen Wellen – Modulation

1. Mit einem Technikbaukasten baut man ein „Detektorradio“ auf.
2. Man untersucht, wie der Radioempfang durch Funken des Bandgenerators gestört wird. Die Störungen sind groß bei Mittel-, Lang- und Kurzwellenempfang, d.h. für amplitudenmodulierte Signale. Die Störung stellt ja ein Signal großer Amplitude mit vielen Frequenzanteilen dar. Die Störungen sind klein für FM, d.h. frequenzmodulierte Signale.

6.12 Datenübertragung mit elektromagnetischen Wellen – gerichtete und geleitete Wellen

Wenn mit den Mitteln der Sammlung möglich, zeigt man die Übertragung akustischer Daten mit Hilfe eines Lichtwellenleiters durch Modulation des Lichts.

6.13 Verstärker

1. Man realisiert einen Datentransport von einem Mikrofon zu einem Lautsprecher mit und ohne Verstärker.

2. Man zeigt, dass die Energiemenge, die beim Empfänger ankommt, sehr stark davon abhängt, ob man den Datenträger durch eine enge Leitung schickt oder in alle Raumrichtungen aussendet. Man kann Experimente mit Licht und mit Schall machen.

Licht: Als Zeichen benutzt man nur „hell“ und „dunkel“. Lichtübertragung durch einen seitlich eng begrenzten Kanal realisiert man mit einem Lichtleiter oder durch Bündelung von Licht mit einer Linse oder einem Hohlspiegel.

Schall: Quelle ist eine sprechende Person. Die Person spricht einmal ganz normal ohne Hilfsmittel und einmal in ein langes Rohr hinein, an dessen Ende sich der Empfänger, d.h. das Ohr einer anderen Person befindetet.

D

Lösungen der Aufgaben

1. Schwingungen

1.1 Vorläufige Beschreibung

1. Keine charakteristische Periodendauer.

2. Über die beiden Wellen fließt Impuls: über die linke in den Stab hinein, über die rechte aus dem Stab heraus. Befindet sich der Stab in der symmetrischen Mittellage, so bekommt er über die linke Welle gerade so viel Impuls, wie er durch die rechte wieder verliert. Liegt er links von der Mittellage, so bekommt er mehr als er abgibt, liegt er weiter rechts, so gibt er mehr ab, als er bekommt.

Legt man ihn am Anfang nach links versetzt auf die Wellen, so bekommt er so lange mehr Impuls als er verliert, bis er die Mittellage erreicht hat. Es häuft sich also zunächst Impuls an, er bewegt sich mit zunehmender Geschwindigkeit nach rechts. Sobald er über die Mittellage hinaus ist, nimmt sein Impuls wieder ab. Er kommt zum Stillstand und gibt immer noch weiter Impuls ab, sodass er sich immer schneller nach links bewegt, usw.

Der Vorgang ist keine Schwingung gemäß unserer Definition, weil er nur bei ständiger Energiezufuhr läuft.

3. Keine Schwingung, denn es gibt keine charakteristische Periodendauer.

1.2 Impuls und Energie

Der Impuls fließt nach wie vor zwischen den beiden Körpern hin und her. Der Betrag der Impulse der beiden Körper ist immer noch in jedem Augenblick gleich. Der Betrag der Geschwindigkeit des leichten ist aber zu jedem Zeitpunkt größer als der des schweren. Die Energie verteilt sich nicht mehr gleichmäßig auf die beiden Körper.

1.3 Die Erde als Partner

Impuls: vom Körper gleichzeitig über beide Federn in die Erde und wieder zurück. (Falls die Federn vorgespannt sind, ist dem ein Impulsstrom nach links überlagert.)

Energie: vom Körper gleichzeitig in die beiden Federn und wieder zurück.

1.4 Harmonische Schwingungen

1. Siehe Abb. 9.

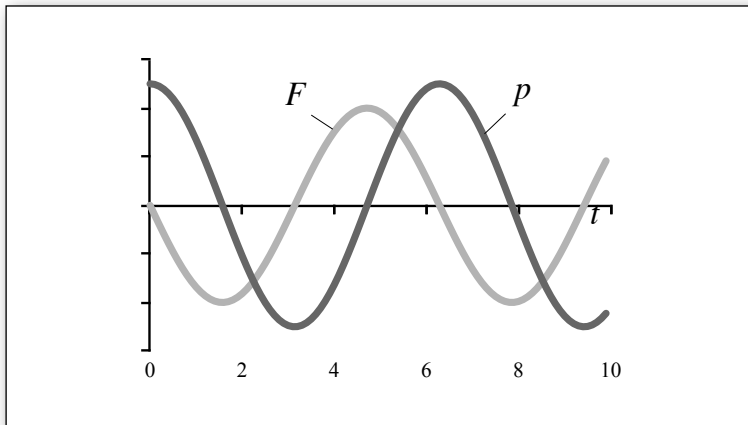


Abb. 9

Zu Abschnitt 1.4, Aufgabe 1

$$s(t) = \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$F(t) = -D \cdot s(t) = -D \cdot \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$v(t) = \omega \hat{s} \cdot \cos(\omega t)$$

$$p(t) = m \cdot v(t) = m \cdot \omega \hat{s} \cdot \cos(\omega t)$$

Am Anfang ($t = 0$) hat der Körper Impuls. Dann fließt ein Strom negativen Impulses in den Körper hinein, d.h. es fließt Impuls aus ihm heraus. Dadurch nimmt der Impuls des Körpers ab und wird negativ. Der Impulsstrom nimmt wieder ab. Wenn er null ist, ändert sich p nicht mehr. Der Impulsstrom kehrt sein Vorzeichen um, d.h. es fließt Impuls in den Körper hinein. Der Impuls nimmt also zu und wird wieder positiv usw..

2.

$$P(t) = v(t) \cdot F(t)$$

$$F(t) = -D \cdot s(t) = -D \cdot \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$v(t) = \omega \hat{s} \cos(\omega t)$$

$$P(t) = -\omega \hat{s} \cdot \cos(\omega t) \cdot D \cdot \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

Mit $2\sin(a) \cdot \cos(a) = \sin(2a)$ wird:

$$P(t) = -(\omega/2) \cdot D \cdot \hat{s}^2 \cdot \sin(2\omega t)$$

Der Energiestrom befolgt auch eine Sinusfunktion. Wie die Energie in den beiden Energiespeichern wechselt sie mit der doppelten Schwingungsfrequenz.

3.

$$s_A(t) = \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$p_A(t) = m \cdot \omega \hat{s} \cdot \cos(\omega t)$$

$$s_B(t) = s_0 - \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$p_B(t) = -m \cdot \omega \hat{s} \cdot \cos(\omega t)$$

$$F_{AB} = -D[s_B(t) - s_A(t) - s_0] = 2D \cdot \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$E_F = 2D \cdot \hat{s}^2 \cdot \sin^2(\omega t)$$

$$E_A = E_B = (m/2) \cdot (\hat{s} \cdot \omega)^2 \cdot \cos^2(\omega t)$$

$$E = E_F + E_A + E_B$$

$$= 2D \cdot \hat{s}^2 \cdot \sin^2(\omega t) + m \cdot (\hat{s} \cdot \omega)^2 \cdot \cos^2(\omega t)$$

Damit E unabhängig von der Zeit ist, muss der Faktor vor dem \sin^2 gleich dem vor dem \cos^2 sein:

$$2D \cdot \hat{s}^2 = m \cdot (\hat{s} \cdot \omega)^2.$$

Die Gleichung lässt sich vereinfachen:

$$D = (m/2) \cdot \omega^2$$

und es folgt die Kreisfrequenz des Schwingers:

$$\omega = \sqrt{\frac{2D}{m}}$$

$$P_{AF} = P_{BF} = v_A \cdot F_{AB}$$

$$= \omega \hat{s} \cdot \cos(\omega t) \cdot 2D \cdot \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$= \omega D \hat{s}^2 \cdot \sin(2\omega t)$$

1.5 Wovon die Periodendauer abhängt

1.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$$

$$\frac{m \cdot \omega^2}{k} = \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$$

$$m' = m \cdot \left(\frac{T'}{T}\right)^2$$

$$m = 0,25 \text{ kg}$$

$$T = 2 \text{ s}$$

(a) $T' = 3 \text{ s}$

$$m' = 0,25 \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2 \text{ kg} = 0,56 \text{ kg}$$

(b) $T' = 10 \text{ s}$

$$m' = 0,25 \cdot \left(\frac{10}{2}\right)^2 \text{ kg} = 6,25 \text{ kg}$$

2. Zwei Federn: D verdoppelt sich, T nimmt um den Faktor $1/\sqrt{2}$ ab.

Vier Federn: D vervierfacht sich, T nimmt auf die Hälfte ab.

3. Der Mittelpunkt der Feder bewegt sich nicht. Daher kann der eine Körper + die halbe Feder als ein unabhängiger Schwinger betrachtet werden. Für die halbe Feder ist $D' = 2D$, also wird

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D'}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{2D}}.$$

4. Die beiden Federn sind äquivalent zu zwei parallel geschalteten Federn. Deren Gesamtfederkonstante ist $D' = 2D$, also wird

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D'}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{2D}}.$$

1.6 Warum gerade die Sinusfunktion?

Differenzialgleichungen und das Erraten von Lösungen

1. Statt Gleichung (VI) im Text erhält man

$$m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} + k \cdot s^2 = 0.$$

Einsetzen von $s(t)$ und seiner zweiten Zeitableitung und anschließendes Vereinfachen ergibt:

$$\frac{dp}{dt} + D \cdot s = 0.$$

Hier steht links eine Konstante, rechts aber eine Zeitfunktion. Der Ausdruck ist also widersprüchlich.

2. Mit

$$p = m \cdot \frac{ds}{dt}$$

wird aus Gleichung (VI)

$$\frac{d^2 p}{dt^2} + \frac{D}{m} p = 0.$$

Ableiten nach der Zeit ergibt:

$$\frac{d^2 p}{dt^2} + D \frac{ds}{dt} = 0,$$

und nach Ersetzen von ds/dt durch p/m ergibt sich:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \hat{I} \cdot \cos(\omega t).$$

bis hierher

1.7 Das Pendel

1.

Erde:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,2 \text{ m}}{10 \text{ N/kg}}} = 2,2 \text{ s}$$

Mond:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,2 \text{ m}}{1,62 \text{ N/kg}}} = 5,4 \text{ s}$$

Neutronenstern:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,2 \text{ m}}{1\,000\,000\,000\,000 \text{ N/kg}}} = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

2.

$$l = g \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{2\text{s}}{2\pi}\right)^2 = 0,994 \text{ m}$$

3. Sie muss senkrecht stehen.

4. Wahrscheinlich reichen die Gewichte nicht für den Antrieb, man muss also deren Masse etwa um einen Faktor 6 erhöhen (das Verhältnis der Ortsfaktoren von Erde und Mond).

Die Uhr läuft nun, aber viel langsamer (vergleiche mit Aufgabe 1.). Diesen Fehler kann man durch Verkürzen des Pendels korrigieren.

5.

$$\frac{m}{2}v^2 = m \cdot g \cdot h$$

$$\Rightarrow h = \frac{v^2}{2g} = \frac{(0,2 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 10 \text{ N/kg}} = 0,002 \text{ m}$$

Die Höhe hängt weder von der Pendellänge, noch von der Masse des Körpers ab.

1.8 Drehschwingungen: Hin- herfließender Drehimpuls

1. Zwei Schwungräder sind so nebeneinander angeordnet, dass die Achse des einen in der Verlängerung der Achse des anderen liegt. Sie werden über eine Spiralfeder miteinander verbunden: Das innere Ende der Spiralfeder ist an dem einen Rad befestigt, das äußere an dem anderen.

2. Man kann sie orientieren wie man will. Sie schwingt immer mit derselben Periodendauer.

1.9 Elektrische Schwingungen: Hin- und herfließende elektrische Ladung

1. Die Kapazität eines Kondensators ist um so größer, je größer die Plattenfläche und je kleiner der Plattenabstand ist. Die Induktivität einer Spule ist um so größer, je größer die Querschnittsfläche der Spule, je größer die Windungszahl pro Länge und je größer die Gesamtwindungszahl ist. Entsprechend kann man die Periodendauer eines Schwingkreises beeinflussen.

2. Mit

$$\frac{1}{(2n-1)} \cdot \sin[(2n-1)x]$$

wird

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \hat{I} \cdot \cos(\omega t).$$

Damit ergibt sich

$$E_{\text{Kond}} = \frac{C}{2} \cdot U^2 = \frac{Q^2}{2C} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} \cdot \sin^2(\omega t)$$

und

$$E_{\text{Spule}} = \frac{L}{2} \cdot I^2 = \frac{L\hat{I}^2}{2} \cdot \cos^2(\omega t).$$

1.10 Die Dämpfung von Schwingungen

2. Siehe die Abbildungen 10 und 11.

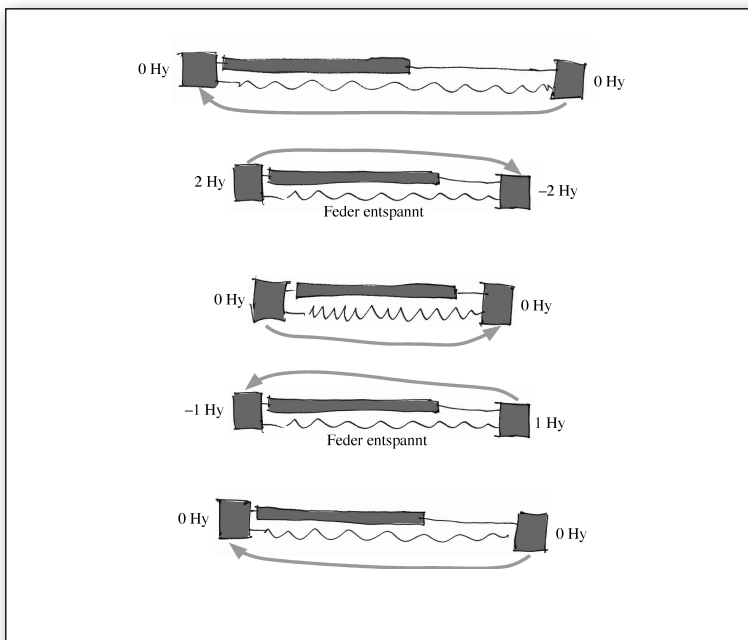


Abb. 10

Zu Abschnitt 1.10, Aufgabe 2, Impulsfluss

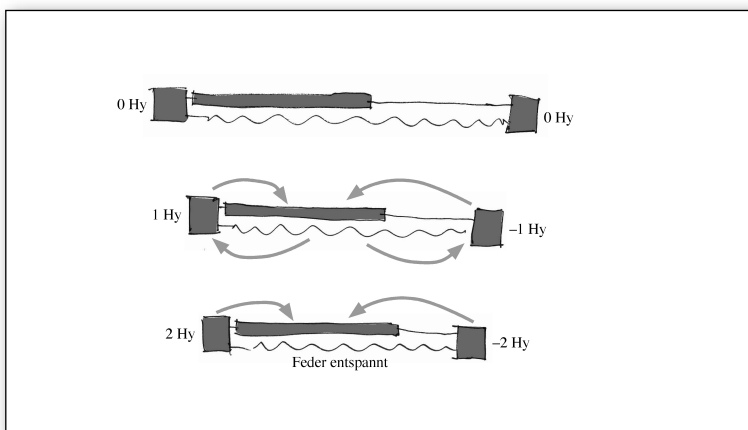


Abb. 11

Zu Abschnitt 1.10, Aufgabe 2, Energiefluss

2. Resonanz

2.2 Resonanz eines mechanischen Schwingers

1,5 Hz: Energiestrom für starke Dämpfung am größten und für schwache am kleinsten.

1,7 Hz: Energiestrom für mittlere Dämpfung am größten und für schwache am kleinsten.

2,0 Hz: Energiestrom für schwache Dämpfung am größten und für starke am kleinsten.

2.3 Wie man eine Resonanzkurve aufnimmt

Zu jedem über der 0,5-Geraden liegenden Kurvenabschnitt gibt es einen an dieser Gerade gespiegelten. Die Abweichungen nach oben und nach unten gleichen sich also aus.

3. Spektren

3.1 Einige Ergebnisse der Mathematik

2. Das Bildungsgesetz der Terme ist

$$(-1)^{n+1} \cdot \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot \sin[(2n-1)x]$$

(Es muss nicht in analytischer Form angegeben werden.)
Vermutung: Je mehr Terme die Summe enthält, desto mehr gleicht der Graph einer Zick-Zack-Linie (Abb. 12).

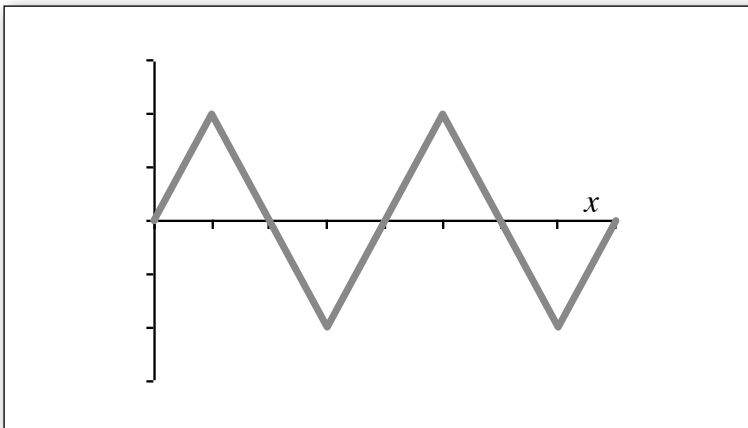


Abb. 12

Zu Abschnitt 3.1,
Aufgabe 2

3. Das Bildungsgesetz der Terme ist

$$d_2 = \frac{a_1}{a_2} \cdot d_1 = \frac{32 \text{ cm}}{48 \text{ cm}} \cdot 0,0033 \text{ mm} = 0,0022 \text{ mm}$$

Vermutung: Je mehr Terme die Summe enthält, desto mehr gleicht der Graph dem in Abb. 13 dargestellten.

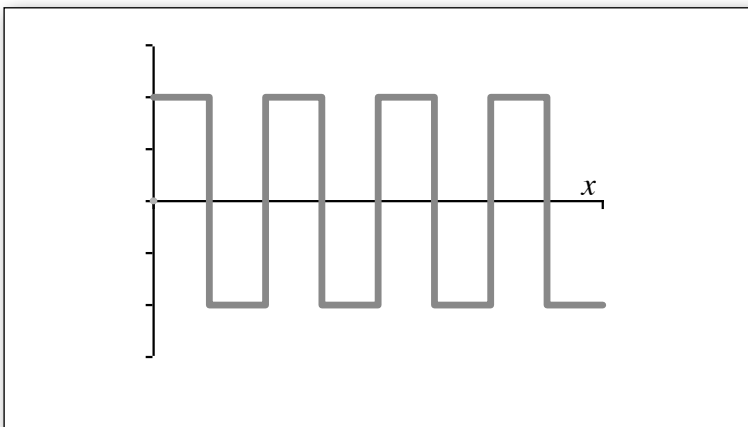


Abb. 13

Zu Abschnitt 3.1,
Aufgabe 3

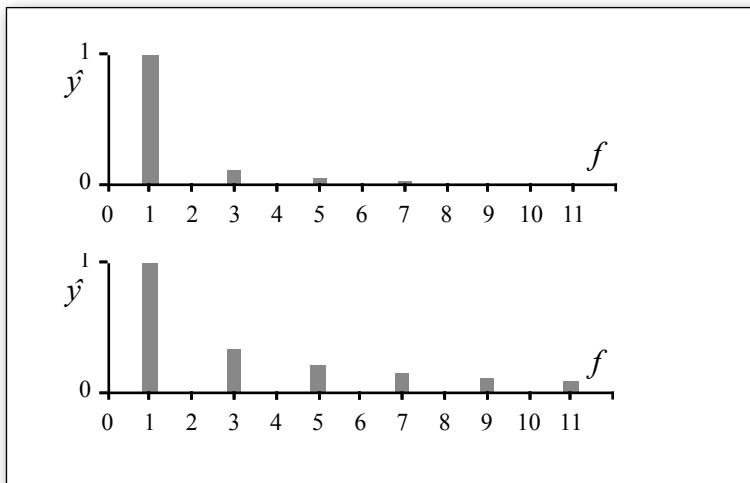


Abb. 14

Zu Abschnitt 3.2,
Aufgabe

3.2 Spektren

Siehe Abb. 14.

3.3 Doppelschwinger

1. Bei der ersten Eigenschwingung ändert sich die Länge der mittleren Feder nicht. Jeder der beiden Körper schwingt so, als würde er nur an der benachbarten äußeren Feder hängen. Bei der zweiten Schwingung spürt jeder Körper außer dieser äußeren Feder noch die mittlere. Es ist so, als wäre zu der äußeren Feder noch eine weitere Feder „parallel geschaltet“. Die resultierende Federkonstante wird dadurch vergrößert, und damit wird auch die Frequenz größer.

2. (a) Der relative Unterschied der beiden Frequenzen ist gering.

(b) Die erste Eigenfrequenz ist klein gegen die zweite.

3. Man kann diesen Schwinger als Doppelschwinger auffassen, bei dem die äußeren Federn „unendlich weich“ sind. Die Frequenz der zweiten Eigenschwingung ist daher null.

4. Man verbindet die schwingenden Körper durch eine weiche Feder.

4. Wellen

4.2 Die Geschwindigkeit von Wellen

Es läuft auch hier die Veränderung eines Zustandes durch oder über einen „Träger“. Die Zustandsänderung ist aber dauerhaft. Man kann keine zweite Welle durch den Träger schicken.

Wie eine richtige Welle, hat auch die Dominowelle einen Träger und eine eigene Geschwindigkeit.

4.4 Sinuswellen

1. Wenn die neue Laufrichtung der Welle die z-Richtung ist, so muss in Gleichung (4.1) x durch z ersetzt werden.
2. Von einigen Zentimetern bis einigen zig Metern.
3. Alle vier Momentaufnahmen sehen gleich aus. Zwischen zwei Aufnahmen rückt die Welle gerade um eine Wellenlänge vor.
4. Die Welle läuft in die negative x-Richtung.

4.5 Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge

1. $\lambda = v/f = (300 \text{ m/s})/440 \text{ Hz} = 0,7 \text{ m}$
2. $\lambda = v/f = (300 \text{ 000 km/s})/98,4 \text{ MHz} = 3 \text{ m}$

4.6 Schallwellen

1. Lautsprecher, Stimme, Musikinstrumente, Gewitter, Explosion
2. 150 Hz
3. 15 m und 15 mm
4. Die Frequenz bleibt gleich, die Wellenlänge nimmt zu.
5. Etwa 3000 m

4.7 Elektromagnetische Wellen

1. Im Blitz fließt für sehr kurze Zeit ein sehr starker Strom. Das Magnetfeld dieses Stroms ändert sich sehr schnell. Es löst sich vom Blitz, läuft als Welle weg und induziert in den Fernsehantennen einen elektrischen Strom.
-

2. Sendeantennen von Radio- und Fernsehsendern, Parabolantennen von Fernmeldetürmen, heißer Ofen, Lichtquellen, Röntgenröhren, radioaktive Stoffe.

3. Für gleiche Werte von x und von t hat der Sinusterm der elektrischen Feldstärke denselben Wert wie der der magnetischen Feldstärke.

4. Siehe Abb. 15.

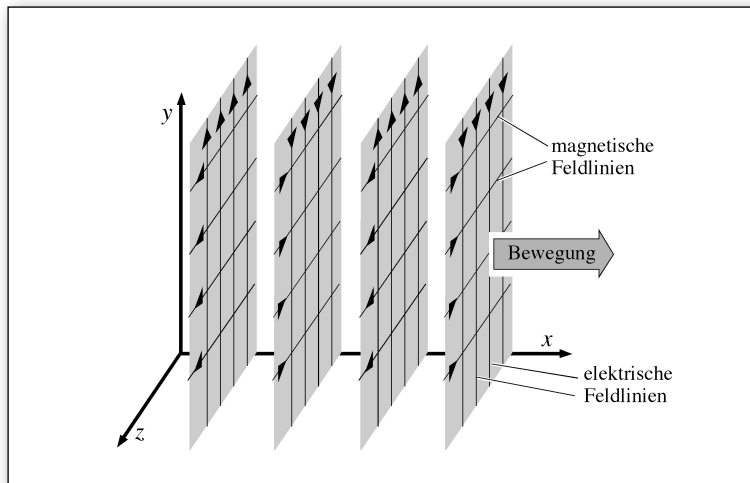


Abb. 15

Zu Abschnitt 4.7,
Aufgabe 4

4.8 Energietransport mit Wellen

1.

Energie eines sich bewegenden Körpers:

$$E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2m}$$

Energie einer gespannten Feder:

$$E_{\text{F}} = \frac{D}{2} x^2$$

Energie eines geladenen Kondensators:

$$E_{\text{Kond}} = \frac{Q^2}{2C}$$

Energie einer Spule, durch die ein elektrischer Strom fließt:

$$E_{\text{Spule}} = \frac{L}{2} I^2$$

2. Siehe die Aufgabe von Abschnitt 2.3.

4.9 Zwei Wellen am selben Ort

1. Wind ist keine Welle. Zwei „Winde“ können nicht durcheinander hindurch strömen.
2. Wenn zwei „Quellen“ eines elektrischen oder magnetischen Feldes vorhanden sind, so ergibt sich die Gesamtfeldstärke durch vektorielle Addition der Feldstärken der Felder der Einzelquellen.

4.10 Zwei Sinuswellen – Interferenz

1. Ein „Zwischending“ zwischen stehender und gewöhnlicher Welle: Man erkennt einerseits eine fortschreitende Bewegung, wie bei einer gewöhnlichen Welle; andererseits aber auch ein periodisches Kleiner- und Größerwerden der ganzen Welle, wie bei einer stehenden Welle.
2. Wenn die Wellen „im Takt“ schwingen: eine Welle, deren Amplitude doppelt so groß ist, wie die einer Einzelwelle. Wenn sie im „Gegentakt“ schwingen: vollständige, dauernde Auslöschung.

4.12 Eigenschwingungen von Wellenträgern

2. Gegeben: $l = 1 \text{ m}$
 $v = 6 \text{ m/s}$

$$\lambda_{\max} = 2l = 2 \text{ m}$$

Damit zwei Knoten entstehen, muss $l = 3/2\lambda$ sein, also
 $\lambda = 2/3l = 2/3 \text{ m}$.

Mit $v = \lambda f$ folgt

$$f = v/\lambda = 9 \text{ Hz}$$

4.13 Die Interferenz von Wellen

1. Der Winkel α beträgt hier 180° . Mit

$$\sin(90^\circ) = 1$$

erhält man mit Hilfe der Gleichung

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\lambda}{2a}$$

wie erwartet

$$a = \lambda/2.$$

2.

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{2a}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{550 \text{ nm}}{2 \cdot 2 \text{ mm}}\right) = 0,016^\circ$$

4.14 Bewegte Schallquellen und Schallempfänger

1.

$$f_L = f \left(1 - \frac{v_L}{u}\right)$$

$$f = \frac{f_L}{\left(1 - \frac{v_L}{u}\right)}$$

Beim Annähern: 468 Hz und 624 Hz;

beim Entfernen: 417 Hz und 556 Hz.

2.

$$f_M = f_L \frac{u - v_M}{u - v_L} = 520 \text{ Hz} \frac{300 + 36,1}{300 - 27,8} = 642 \text{ Hz}$$

4.14 Beugung

Die Wellenlängen der Wellen für den normalen Fernsehempfang von einer Sendeantenne auf der Erde liegen bei etwa 1m. Sie werden noch recht gut gebeugt. Die Wellenlänge der Satellitenprogramme liegen im Bereich von Zentimetern. Die Beugung ist hier sehr gering.

Wolken sind für die Wellen des Satellitenfernsehens „durchsichtig“.

Mobiltelefone arbeiten bei 900 MHz und 1800 MHz. Die Wellenlänge liegt also bei 20 cm, und die Beugung ist noch recht wirksam. Auch das schnurlose Telefon arbeitet in diesem Frequenzbereich.

5. Interferenz von Licht und Röntgenstrahlung

5.1 Kohärenz

1.

$$\frac{l_{\text{Koh}}}{\lambda} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{645 \text{ nm}}{10 \text{ nm}} \approx 64$$

2.

$$\frac{l_{\text{Koh}}}{\lambda} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{590 \text{ nm}}{0,6 \text{ nm}} \approx 1000$$

$$l_{\text{Koh}} = 1000 \cdot 590 \text{ nm} \approx 600\,000 \text{ nm} = 0,6 \text{ mm}$$

3. Den beiden Frequenzen

$$f_1 = 105,65 \text{ MHz}$$

$$f_2 = 105,75 \text{ MHz}$$

entsprechen die Wellenlängen:

$$\lambda_1 = 2,83957 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 2,83688 \text{ m}$$

Damit wird

$$\frac{l_{\text{Koh}}}{\lambda} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2,838 \text{ m}}{0,00269 \text{ m}} \approx 1000$$

$$l_{\text{Koh}} = 1000 \cdot 2,8 \text{ m} \approx 2800 \text{ m}$$

5.3 Auch Laserlicht genügt nicht

1. (a) Die Wellenlänge wird nicht gebraucht. Das Interferenzbild springt nach der Zeit, die das Licht braucht, um die 15 cm zu durchlaufen:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0,15 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0,5 \text{ ns}$$

(b) $s = v \cdot t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ s} = 300\,000 \text{ km}$

2. Es kann sein, dass man dieselben Probleme hat, nämlich wenn die beiden Lautsprecher an voneinander unabhängige Sinusgeneratoren angeschlossen sind. Um diese zu vermeiden, schließt man sie an denselben Generator an.

5.6 Beugung an kleinen Öffnungen und Spalten

1. (a)

$$d(\alpha) = \frac{\tan \alpha - \sin \alpha}{\tan \alpha} \cdot 100\%$$

$$d(1^\circ) = 0,015 \%$$

$$d(5^\circ) = 0,38 \%$$

$$d(10^\circ) = 1,5 \%$$

(b) Für kleine Winkel hat die Ankathete fast dieselbe Länge wie die Hypotenuse.

2.

$$a = \frac{l}{d} \cdot \lambda = \frac{1,2 \text{ m}}{0,2 \text{ mm}} \cdot 520 \text{ nm} = 3,12 \text{ mm}$$

3.

$$\lambda = \frac{d}{l} \cdot a = \frac{0,2 \text{ mm}}{8 \text{ m}} \cdot 20 \text{ mm} = 0,5 \mu\text{m}$$

5.7 Beugung am Gitter – das Gitterspektrometer

1. Man braucht eine Lichtquelle, die unter einem kleinen Winkel erscheint: eine Lampe oder auch die Sonne. Man orientiert die CD so, dass man das Spiegelbild der Lichtquelle sieht. (Achtung: die Sonne blendet!) Man kippt dann die CD langsam aus dieser Lage heraus. Dabei sieht man zweimal nacheinander das Spektrum der Lichtquelle vorbeilaufen.

2. (a)

$$d = 1/300 \text{ mm} = 0,0033 \text{ mm}$$

$$l = 2 \text{ m}$$

$$a = 32 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{d}{l} \cdot a = \frac{0,0033 \text{ mm}}{2 \text{ m}} \cdot 32 \text{ cm} = 0,533 \mu\text{m}$$

(b)

$$d_2 = \frac{a_1}{a_2} \cdot d_1 = \frac{32 \text{ cm}}{48 \text{ cm}} \cdot 0,0033 \text{ mm} = 0,0022 \text{ mm}$$

5.8 Zwei- und dreidimensionale Gitter

1. Man erhält ein Interferenzbild, und zwar ein Punktmuster, denn für irgendwelche Wellenlängen ist die Bedingung

$$2d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda \quad \text{mit } k = 1, 2, 3, \dots$$

erfüllt, und das für jede der Ebenenscharen.

2. Man erhält den größten vorkommenden Abstand zwischen Ebenenscharen. Auf diesen Ebenen ist die Dichte der Beugungszentren im Vergleich zu allen anderen Ebenen am größten.

6. Datentransport und -speicherung

6.2 Beispiele für Datenmengen und Datenströme

1. $100\,000 \approx 65\,536 = 2^{16}$. Eine Postleitzahl trägt etwa 16 bit.
 2. Etwas mehr als 13 bit
 3. Knapp 11 bit
 4. $2^5 = 32$ Zeichen.
 5. Der Baum hat unten 27 Enden.
Da $2^4 = 16 < 27 < 32 = 2^5$ ist, folgt, dass man mit drei Zeichen zwischen 4 und 5 bit erhält.
 6. Ein Zeichen von Quelle B trägt 1 bit mehr als ein Zeichen von Quelle A.
 7. Zum Identifizieren der Karte braucht der Zauberer 4 bit. Jedes Mal wenn der Zuschauer einen von vier Stapeln bezeichnet, bekommt der Zauberer 2 bit. Der Zauberer legt den Stapel, auf den der Zuschauer gewiesen hat, jeweils an die zweite Stelle von oben. Nach dem ersten Zusammenpacken der Stapel ist die gesuchte Karte die 5., 6., 7. oder 8. Karte von oben. Nach dem zweiten Durchgang ist es die 6. von oben.
 8. Die Balkenwaage sei mit 5 kg belastbar. Der Gewichtssatz enthalte als kleinstes Gewichtsstück ein 1-g-Gewicht. Auf die Frage „Wie schwer ist der Gegenstand?“ kann die Waage damit 5000 verschiedene Antworten geben. Es ist also $z = 5000$. Daraus folgt $H = 12,3$ bit.
 9. Bilddateien haben im Allgemeinen größere Datenmengen als Textdateien.
 11. (a) Datenmenge eines Scheibchens: 4 bit; Datenmenge eines Bildes: $60 \cdot 80 \cdot 4$ Bit = 19 200 bit
(b) Es gibt $z = 16^{60 \cdot 80} = 16^{4800}$ verschiedene Bilder. Daraus folgt die Datenmenge
 $H = \text{Id } 16^{4800}$ bit = $4800 \cdot \text{Id } 16$ bit = 19 200 bit.
 12. Ein typischer Schlüssel hat, von der Seite gesehen, 5 Kerben. Diese sind, je nach individuellem Schlüssel unterschiedlich tief. Es gibt 16 verschiedene Tiefen. Jede Kerbe enthält also 4 bit, alle 5 Kerben zusammen 20 bit. Außerdem haben verschiedene Schlüssel noch unterschiedliche Längsprofile. Beim Schlüsseldienst erfährt man, dass es 500 verschiedene Längsprofile gibt. Im Längsprofil stecken daher noch einmal etwa 9 bit. Der Schlüssel trägt damit insgesamt etwa 29 bit.
-

6.5 Die Datenmenge – endgültig

1. $H = 4,32$ bit (bei gleicher Wahrscheinlichkeit 5,09 bit)
2. $H = 2,88$ bit (bei gleicher Wahrscheinlichkeit 3,17 bit)

6.7 Einige gebräuchliche Kodierungen

1. Es wurde zum Beispiel die folgende Zahlenfolge erzeugt:
1011100011111100101100011001011101100101

Sie entspricht der Buchstabenfolge:
abaadaaaaaacbadaacbaabacb

2. Eine unkomprimierte Binärokodierung steht in der dritten Spalte der Tabelle. Die Datenmenge pro Zeichen beträgt 3 bit. In Spalte 4 steht eine Kodierung, die gegenüber der in Spalte 3 komprimiert ist. Die Datenmenge pro Zeichen beträgt:

$$\begin{aligned} H &= 0,6 \cdot 1 \text{ bit} + 0,2 \cdot 2 \text{ bit} + 0,1 \cdot 3 \text{ bit} \\ &+ 0,06 \cdot 4 \text{ bit} + 0,02 \cdot 5 \text{ bit} + 0,014 \cdot 6 \text{ bit} \\ &+ 0,005 \cdot 7 \text{ bit} + 0,005 \cdot 7 \text{ bit} = 1,77 \text{ bit} \end{aligned}$$

Zeichen	Wahrscheinlichkeit	Binärokodierung	
		ohne Kompression	mit Kompression
a	0,6	000	1
b	0,2	001	01
c	0,1	010	001
d	0,06	100	0001
e	0,02	011	00001
f	0,01	101	000001
g	0,005	110	0000001
h	0,005	111	0000000

3. Indem man den Text wortweise kodiert: Für jedes Wort, das im Wörterbuch steht ein Zeichen (das wiederum aus verschiedenen Binärzeichen bestehen kann).

4. Auf einer CD ist Musik für etwa 80 Minuten gespeichert. Mit

$$I_H = 1 \text{ Mbit/s}$$

ergibt sich

$$H = I_H \cdot t = 1 \text{ Mbit/s} \cdot 4800 \text{ s} \approx 5 \text{ Gbit}$$

8. Es verdoppelt sich nur die scheinbare Datenmenge, die tatsächliche Datenmenge bleibt gleich. Die Redundanz wird also erhöht. Jemand, der zusätzlich zu der CD noch die Kopie bekommt, erfährt durch die Kopie nichts Neues, es wird keine weitere Unsicherheit beseitigt.

6.8 Spiele

1. Damit die Antwort ein Bit trägt, müssen die möglichen Antworten gleich wahrscheinlich sein. Die Fragen könnten also lauten: „Ist es eine gerade Zahl?“, oder „Ist es eine der Zahlen 1, 2 oder 3?“

Die Antwort auf die Frage „Ist es die Sechs?“ trägt weniger als 1 bit, da die möglichen Antworten mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten auftreten.

2. Wir nehmen an, dass Lilly einen Begriff aus 30 000 Begriffen auswählen kann (Größenordnung der Zahl der Substantive in einem Wörterbuch). Da $30\,000 \approx 2^{15}$ ist, braucht Willy bei Anwendung der optimalen Strategie 15 Ja-Nein-Fragen. Damit die Antworten gleich wahrscheinlich sind, wird Willy nicht etwa mit der folgenden Frage beginnen: „Lautet der Begriff 'Bleistift'?“, sondern z.B. so: „Ist es belebt?“, oder „Ist es von hier aus zu sehen?“.

3. Die scheinbare Datenmenge ist jeden Morgen 1 bit. Es wird überhaupt keine Unsicherheit beseitigt. Die wahre tatsächliche Datenmenge ist also 0 bit. Die Wahrscheinlichkeiten der beiden Antworten sind 1 und 0, d.h. maximal unterschiedlich.

4. Was er erzählt ist redundant, die scheinbare Datenmenge ist viel größer als die tatsächliche.

6.9 Datenreduktion

1. Bei der Addition wird die Datenmenge reduziert. Man kann aus der Summe nicht auf die Summanden schließen. Entsprechend verhält es sich mit der Subtraktion, der Multiplikation und der Division. Auch beim Quadrieren wird die Datenmenge reduziert, denn man kann aus dem Quadrat nicht auf das Vorzeichen der beiden gleichen Faktoren schließen. Beim Wurzelziehen (aus einer Quadratzahl) wird die Datenmenge nicht reduziert. Wird das Ergebnis des Wurzelziehens aber gerundet, so wird die Datenmenge wieder reduziert.

3. Nein, denn die Information über das Vorzeichen von x geht nicht verloren.

4. Der Großvater wiederholt sich oft, die Großmutter redet über unwichtige Details.

6.11 Datenübertragung mit elektromagnetischen Wellen – Modulation

1. In 1 s: 77 500 Schwingungen
in 0,1s: 7750 Schwingungen
in 0,9 s: 69 750 Schwingungen

Wenn man in der Darstellung noch die einzelnen Schwingungen sehen soll, so kann man das Ende eines 1-s-Intervalls nicht mehr sehen, und umgekehrt.