Planungsblatt Physik für die 8B

Woche 24 (von 27.02 bis 03.03)

Hausaufgaben [1]

Bis Freitag 03.03:
Lerne die Notizen von Dienstag!

Bis Dienstag 07.03:
Lerne die Notizen von Woche 23 und 24!

Kernbegriffe dieser Woche:

Wellen: EM, Wasser, Schall, Helioseismologie, Materiewellen, Doppler und Fourier, Interferenz, Wellenfront, Phase

Ungefähre Wochenplanung

Schulübungen.

(a) Dienstag (3.Std): §5 Interferenz und Überlagerung: §5.1 Fourier und Wellen-Addition, Phase, Gangunterschied, Kohärente Lichtquellen, als Beispiel das Schillern einer Öloberfläche auf Wasser

(b) Freitag (5.Std): (i) Vortrag von einer von euch, (ii) §5.2 Stehende Wellen – Musik, Saiten, Flöte und so weiter

Unterlagen auf `www.mat.univie.ac.at/~westra/edu.html`

[1] Für manche Aufgaben wird auf Rückseite/Anhang/Buch/Arbeitsblatt verwiesen.

Überblick der Abschnitte
§1 Allgemeinheiten §2 Das Pendel §3.3 Helioseismologie, §3.4 Oberflächenwellen und Schwerewellen – die Rolle von Viskosität und Auftrieb (auch Beispiel von Venus und Leewellen) §4 Energie in Wellen §4.1 Dezibel §4.2 Das Pendel mit Energie §4.3 Hooke's Law und Energie §4.4 Phononen als Energiequanten
§5 Interferenz und Überlagerungen
§5.1 Wellen-Addition und Fourier
§5.2 Stehende Wellen – Musik, Saiten
§5.3 Interferenz bei Licht – CD-Rillen, Bragg-Reflection

Einige Notizen

§4.1 Dezibel

Lautstärke ist etwas schwierig zu definieren. Mit Schall wird Energietransportiert; durch eine bestimmte Fläche wird in einer bestimmten Zeit eine Energiemenge transportiert. Umso größer die Fläche ist, desto mehr Energie. Auch umso länger man misst, desto mehr Energie wird man messen. Um auf sinnvolle und vergleichbare Zahlen zu kommen, ist es daher sinnvoll, die Energiemenge, die pro Sekunde durch ein Quadratmeter transportiert werden, zu betrachten. Wir definieren damit die Schallintensität L als die transportierte Menge Energie pro Sekunde pro Quadratmeter. Die Einheit von L ist $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$, oder auch wohl W/m^2.

Weil die Moleküle immer schon eine thermische Bewegung ausführen, ist immer ein Hintergrundgeräusch da. Durch eine gegebene Fläche wird immer etwas Energie hin und her transportiert. Somit ist auch in voller Abwesenheit von Lärmquellen ein bestimmtes Niveau L_0 vorhanden. Es gilt $L_0 \approx 10^{-12} W/m^2$.

Die Dezibelskala für den Lärmpegel ist dann durch folgenden Ausdruck gegeben: $10 \cdot {}^{10}\log(\frac{L}{L_0})$. Man vergleicht somit Schall mit dem Hintergrundrauschen. Der Zehnerlogarithmus wird benutzt, weil sonst die Zahlen über ein zu unhantierbares Intervall laufen würden.

Beispiel: Wenn Lärmpegel 60 dB ist, dann $60 = 10 \cdot {}^{10}\log(\frac{L}{L_0})$ also $6 = {}^{10}\log(\frac{L}{L_0})$, also $L = L_0 \cdot 10^6$. Wenn Lärmpegel 50 dB ist, dann $L = L_0 \cdot 10^5$. So sieht man leicht ein, für jeden Zehnerschritt in der Dezibelskala nimmt die Schallintensität mit einen Faktor 10 zu. Der Lärmpegel 120 dB ist somit von der Leistung her eine Million mal stärker als 60 dB.

Im Weltall gibt es keine Moleküle, also ist gar kein Schall dort. Somit $L = 0$. Aber dann ist der Lärmpegel $10 \cdot {}^{10}\log(0) = -\infty$. Leiser als 0 dB geht also doch.

§4.2 Das Pendel mit Energie

–¿ Siehe auch Handout, das in der Klasse aufgehängt wurde ¡–

Kurzer Umriß:

Höhenenergie $E_{pot} = mgh = mgl(1 - \cos(\theta)) \approx \frac{1}{2} mgh\theta^2$, weil $\cos(\theta) \approx 1 - \theta^2/2$ für kleine Winkel θ.

Kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} ml^2 \dot{\theta}^2$, weil $v = l\dot{\theta}$.

Die Summe dieser Energieen ist im reibungslosen Fall konstant, also finden wir $l\dot{\theta}^2 + g\theta^2 = C$ für irgendeine positive konstante C. Eine Lösung dazu ist $\theta = \theta_0 \cdot \cos(\omega t)$, wobei $\omega^2 = g/l$. Was θ_0 sein muss, darfst du bestimmen! Aus $\omega^2 = g/l$ finden wir für die Periode $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, die altbekannte Pendelformel.

§4.3 Hooke's Law und Energie

Bringt man eine Feder um eine Distanz s aus seiner Gleichgewichtslage, so erfordert dies eine Kraft $F(s)$. Diese Kraft hängt von der Auslenkung s ab. Im Allgemeinen wird $F(s)$ eine sehr komplizierte aber monoton steigende Funktion von s sein. Wir können die Analyse vereinfachen, indem wir uns auf kleine Auslenkungen beschränken. Wir wollen also mal wieder die Technik der Linearisierung anwenden: $F(s) = ks$. Achtung: die Feder über eine Kraft in die andere Richtung aus, also $-ks$.

Die Formel $F(s) = -ks$, wobei F die Kraft ist, die die Feder ausübt, ist als das Gesetz von Hooke bekannt.

Die Konstante k heißt Federkonstante, hat Einheit N/m und gibt an, wie viel Kraft pro Längeneinheit nötig ist, die Feder auszulenken. Umso steifer die Feder, desto größer k. k ist also ein Proportionalitätsfaktor $F(s) : s = k$. Dass k wirklich von s unabhängig ist, gilt nur für kleine Auslenkung.

Wenn wir die Feder um eine Distanz x aus ihrer Gleichgewichtsposition bringen wollen, so ist eine Arbeit

$$W(x) = \int_0^x F(s)\mathrm{d}s = \int_0^x ks\mathrm{d}s = [\frac{1}{2}ks^2]_0^x = \frac{1}{2}kx^2$$

notwendig.

ALLGEMEIN kann man sagen, dass die Energie eines schwingenden System nach Linearisierung immer von der Form $\frac{1}{2}Cx^2$, wobei C eine Konstante ist, die das System charaktierisiert.

Wenn die Feder mit einer Masse m am Ende hin und her schwingt, so ist die kinetische Energie der Masse $\frac{1}{2}m\dot{x}^2$.

ACHTUNG: Ein Punkt (Dot) über ein Symbol bedeutet die Zeitableitung. Somit ist $\dot{x}$ nichts anders als die Geschwindigkeit.

Die Gesamtenergie des Schwingsystems Masse-Feder ist somit

$$E = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2\,.$$

Wir wollen nun unter der Annahme der Reibungslosigkeit untersuchen, welche Bewegungen die Masse an der Feder ausführen wird. Wenn keine Reibung vorherrscht, so ist E konstant. Somit muss zwischen x und seiner Zeitableitung $\dot{x}$ eine Beziehung gelten, die x fast ganz bestimmt: Denn aus

$$\frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 = kst.$$

folgt

$$m\dot{x}^2 + kx^2 = kst.$$

Da wir schon wissen, dass eine periodische Bewegung ausgeführt wird, können wir als Ansatz nehmen $x = A \cdot \cos(\omega t)$, und versuchen dann A und ω zu bestimmen. Wenn $x = A\cos(\omega t)$, dann $\dot{x} = -A\omega\sin(\omega t)$, und somit haben wir

$$mA^2\omega^2\sin^2(\omega t) + kA^2\cos^2(\omega t) = kst.$$

Dies kann nur gelten, wenn die beiden Koeffizienten $mA^2\omega^2$ und kA^2 gleich sind, denn dann steht dort ein Vielfaches von $\sin^2 + \cos^2$, und keine andere Kombination von $\sin^2 + \cos^2$ ist konstant. Also

$$mA^2\omega^2 = kA^2 \longrightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}\,.$$

Und somit gilt für die Periode $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Wir sehen, dass die Konstante A nicht bestimmt ist. A ist die maximale Auslenkung. Die kann ich mit der Hand selbst festlegen, indem ich der Masse eine Anfangsauslenkung gebe. Die Frequenz bestimmte ich aber nicht; die hängt von der Feder und von der Masse ab.

ACHTUNG: Für die, die die Mathe etwas besser verstehen wollen: Ich hätte auch den Ansatz $x = A\sin(\omega t)$, oder $x = A\sin(\omega t) + B\cos(\omega t)$ oder sogar $x = A\cos(\omega t + \delta)$ nehmen können. Dies ist eine gute Übung. Keine Sorge aber, denn die Ergebnisse bleiben gleich – beim zweiten Ansatz braucht man dann noch $A = \pm B$. Diese Vielzahl an Möglichkeiten rührt daher, dass man zwei Anfangsbedingungen braucht: Anfangsauslenkung und Anfang der Zeitmessung. Gibt man $x(0)$ und $\dot{x}(0)$ vor, so gibt es nur eine Lösung.

WICHTIG: Die Formel $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ kann man auch für Schall anwenden, aber dann nur qualitativ. Moleküle ziehen einander ja auch etwas an, lassen sich aber auch nicht beliebig zusammendrücken. Sie verhalten sich in Gruppen also etwa wie eine Menge an Massen, die durch Federn verbunden sind. Nimmt die Masse zu, so nimmt auch T zu, nimmt b ab, so auch T. Dies sehen wir bei Helium: wenn wir Helium einatmen, dann wird unsere Stimme höher, also f höher, somit T kleiner. Das kann man darauf zurückführen, dass Heliumatome nur vier Teilchen im Kern haben, und somit sehr leichte Moleküle sind. Sauerstoff und Stickstoff haben im Schnitt etwa 16 bzw. 14 Teilchen im Kern, die Moleküle O_2 und N_2 haben also eine achtmal bzw. siebenmal so große Masse als Heliumatome (welche auch gleich die Moleküle sind). Ein CO_2-Molekül hat insgesamt $12 + 32 = 44$ Nukleonen. Und tatsächlich bekommt man eine sehr niedrige Stimme, wenn man etwas pures CO_2 einatmet. Dies ist aber recht gefährlich, denn es kann sich unten in den Lungen ablagern – falls so ein Experiment nicht gut läuft, muss man die Person vertikal mit dem Kopf nach unten aufstellen, damit das schwerere CO_2 aus den Lungen abläuft.

Falls wir aber k modifizieren, so ergibt sich auch etwas interessantes: Wasser ist viel schlechter zusammendrückbar als Luft, und somit verhält Wasser sich wie ein System gekuppelter Federn mit großem k. Dann nimmt T ab, die Frequenz somit zu. Was wir vor allem in der Praxis sehen, ist das Schall in Luft langsamer als in Wasser ist. Die Größe k sagt also auch etwas über die Geschwindigkeit der Wellen! In Metall oder in Wasser kan Schall viel schneller als in der Luft.

Versuchen wir noch zum Schluss einen Ausdruck für die totale Energie zu finden. Nehmen wir $x = A\cos(\omega t)$:

$$E = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t) + \frac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega t)\,.$$

und benutzen, dass $k = m\omega^2$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t) + \frac{1}{2}m\omega^2 A^2\cos^2(\omega t) = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2\,.$$

Diese Formel gilt sehr allgemein: E ist direkt proportional zum Quadrat der Frequenz und direkt proportional zum Quadrat der maximalen Auslenkung. Achtung: Die Formel von Planck $E = hf$ ist also wirklich ganz anders! Photonen sind ja auch nicht ganz normal schwingende Massen ...

§4.4 Phononen als Energiequanten

Oben wurde schon erwähnt, dass wir Schall als Schwingungen mit Federn betrachten können. Wir wissen, dass Licht auch ein schwingendes System ist. Bei Licht schwingen das elektrische Feld E und das magnetische Feld hin und her. Es gilt auch hier, dass die Energiedichte (Energie pro Volumen) direkt proportional zum Quadrat der maximalen Auslenkung ist. Die Lichtintensität wächst mit dem Quadrat des elektrischen Feldes – das E und B direkt proportional sind, gilt das noch immer, wenn wir auch B betrachten.

Also, klassisch sind Schall und Licht sich als Schwingungssystem irgendwie ähnlich, und doch auch nicht:

(1) Licht gibt in Vakuum die maximale Geschwindigkeit des Universums an. Schall nicht.

(2) Licht kennt nur transversale Wellen; die Polarisation von Licht wird durch zwei Richtungen beschrieben, die senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung stehen. Schall ist ein longitudinales Wellenphänomen; es gibt nur eine Polarisation, die Ausbreitungsrichtung. Somit kann man für Licht ganz interessante Phänomene wie zirkulare Polarisation wahrnehmen, bei Schall nicht.

Aber, und das ist wesentlich, die Gleichungen, die Schall und Licht beschreiben, haben eine bestimmte Ähnlichkeit; ja, beide sind Schwingungssysteme. Somit sind mehrere mathematische

Merkmale gleich. Diese überleben, wenn wir die Quantenmechanik benutzen, und jetzt kommt etwas ganz interessantes:

Wo Licht aus Photonen besteht, die die kleinsten Wellen als Quanten beschreiben, also als Teilchen, so sind Schwallwellen auch als Quantenteilchen zu beschreiben. Diese nennt man Phononen. Man kann also eine Schallwelle als Strom von vielen Phononen betrachten. Diese Phononen sind wie kleine Teilchen, die sich durch das Medium fortpflanzen, und auch absorbiert, emittiert und reflektiert werden können. Ein Phonon ist etwas wie eine quantisierte Schwingung ... Wenn ein Phonon auf ein Elektron trifft, kann er es aus dem Atom kicken. Dies ist klassisch gesehen das Folgende: geht eine Schallwelle durch ein Medium, so schwingen die Atome hin und her, und schwingt ein Atom mal heftig und prallt auf einen Nachbar mit so einer Wucht, so wird ein Elektron aus dem Atom gekickt, und so ensteht in einem Metall ein freies Elektron.

Mit den Phononen hat man eine interessante Sichtweise dazu bekommen; man kann vieles durch Teilchen beschreiben, ob diese Dinge, die sie beschreiben, jetzt Teilchen sind oder nicht. Weil diese Phononen nicht nur mit den Atomen interagieren, sondern auch mit sich selbt, kann man ein Festkörper als Gas aus Atomen und Phononen betrachten. Die Atome schwingen bei jeder Temperatur $T > 0(K)$, und somit gibt es immer Phononen, aber mit steigender Temperatur mehr und mehr. Durch die Interaktion mit einander und mit den Atomen kann man dann auch erklären, warum es immer in paar Ionen, freie Elektronen aus kovalenten Bindungen im Metall gibt, in einem Halbleiter sind somit immer Löcher und Leitungselektronen vorhanden. In der Luft sind also immer mehrere Atome ionisiert ...

Phononen sind also wie Photonen, aber dann was anders; das wichtigste ist, dass sie wesentlich zu einem Verständnis der Natur betragen können. Sie sind Pseudo-Teilchen, sie sind ja nicht wirklich Teilchen, aber was macht das denn aus?

§5 Interferenz und Überlagerung

Zuerst sammle ich hier einige Definitionen, die in der Stunde von Freitag 24.02 vorgekommen sind.

Phase: alle Punkte auf einer Sinuswelle, die eine ganze Anzahl an Perioden von $x = 0$ liegen, haben Phase 0. Die Periode wird in Grad aufgeteilt, und so korrespondiert zu jedem Punkt auf einer Welle eine Phase, das ist dann der Winkel innerhalb einer Periode.

Wellenfront: das ist eine zusammenhängende Fläche von Punkten, die alle Phase Null haben. In Prinzip wird auch folgende Definition genommen: Eine zusammenhängende Fläche mit gleicher Phase; die Wahl der Phase ist eigentlich willkürlich.

Kaustik: *Brennlinie*: Wenn die Wellenfronten zusammenkommen, hat der Punkt / haben die Punkte, wo die Wellenfronten auf einander treffen, keine eindeutige Phase mehr, weil dort alle Phasen von 0 bis 360 Grad vertreten sind. Der Brennpunkt bei einer konvexen Linse ist also eine Kaustik. Der Regenbogen ist auch ein Beispiel eines Phänomens, wo die Kaustiken den Effekt erzeugen. Achtung: In der Literatur ist eine andere Definition von Kaustiken eher üblich – die andere Definition braucht aber mehr Vorwissen und somit mehr Vorbereitung; für uns wird diese Definition reichen.

Schallmauer: Dieses Beispiel ist strikt genommen keine Kaustik, hat aber schon einige Ähnlichkeiten damit. Die Wellenfronten breiten sich langsamer aus als die Quelle, und somit bildet sich eine sogenannter Mach-Kegel. An der Spitze ist die Quelle und hier ist die Phase nicht definiert. Der Mach-Kegel ist eine Wellenfront ohne eindeutige Phase, und wird als Knall wahrgenommen. Dies hat damit zutun dass die Quelle die Luft sehr stark zusammenpresst. Man sieht ähnliche Phänomene bei Wasserwellen, wenn ein Schiff schnell genug fäht und Bugwellen erzeugt.

Kohärenz: Zwei Lichtquellen sind kohärent, wenn ihre Phasendifferenz konstant ist. Kohärentes Licht hat folgende Eigenschaft: zwei Punkte im Lichtstrahl haben konstante Phasendifferenz, und diese wird bestimmt durch die Anzahl der Wellenlängen, die zwischen beiden Punkten liegen. Diese Definition hat nur Sinn für monochromatisches Licht.

Gangunterschied: Der Wegunterschied zwischen zwei Lichtwegen, aber dann in Phasen ausgedrückt, oder in Wellenlängen.

Monochromatisches Licht ist Licht mit fester Wellenlänge.

§5.1 Wellen-Addition und Fourier

Um Phänomene zu beschreiben, bei denen mehrere Quellen eine Rolle spielen, muss man wissen, wie man Wellen addiert. Seien nun L_1 und L_2 zwei Punkte, in denen monochromatische Lichtquellen stehen. Sei P ein dritter Punkt. Es kommen also zwei Lichtwellen auf P zu. Sind diese Lichtwellen in P in Phase, so kommt also ein Maximum von L_1 gleichzeitig mit einem Maximum von L_2 an. So auch für ein Minimum. In diesem Falle addieren sich die Intensitäten wie $A\sin(\omega t) + B\sin(\omega t) = (A + B)\sin(\omega t)$, mit A und B positiv. Falls diese Lichtwellen in Antiphase ankommen, so haben wir die Addition $A\sin(\omega t)B\sin(\omega t+\pi) = (A-B)\sin(\omega t)$, also eine Verringerung der Intensität.

Sind die in P ankommenden Lichtwellen in Phase, so verstärken sie sich, und man spricht von konstruktiver Interferenz.

Haben die in P ankommenden Lichtwellen einen Phasenunterschied von 180 Grad, so ist die Intensität deutlich verringert, und man spricht von destruktiver Interferenz.

Wodurch wird diese Phasendifferenz bestimmt? Gehen wir zuerst mal davon aus, dass L_1 und L_2 in Phase sind. Dies kann man erreichen, wenn man das Licht von einer Quelle aufsplitst. Zum Beispiel lässt man das Licht durch eine Wand mit zwei Löchern gehen, oder man benutzt einen halbdurchlässigen Spiegel. In diesem Fall ist die Phasendifferenz zwischen L_1 und P mit der Phasendifferenz zwischen L_2 und P zu vergleichen.

Phasendifferenz zwischen L_1 und P: $\frac{|L_1P|}{\lambda}\cdot 360$. Phasendifferenz zwischen L_2 und P: $\frac{|L_2P|}{\lambda}\cdot 360$. Somit erreichen wir folgende Konklusion:

Ist der Wegunterschied (Gangunterschied) $|L_1P| - |L_2P|$ ein Vielfaches von λ, so herrscht in P konstruktiver Interferenz.

Ist der Wegunterschied (Gangunterschied) $|L_1P| - |L_2P|$ ein ungerades Vielfaches von $\lambda/2$, so herrscht in P konstruktiver Interferenz. Mit ungeradem Vielfachem von $\lambda/2$ ist gemeint: $\pm\frac{\lambda}{2}, \pm\frac{3\lambda}{2}, \pm\frac{5\lambda}{2}, \ldots$. In diesem Falle ist der Phasenunterschied immer 180 Grad.

Im Unterricht wird das Beispiel einer Doppelspalt besprochen: $d\sin(\theta) = k\lambda$, $k \in \mathbb{Z}$ gibt die Maximen der Intensität.

Das Addieren von Wellen hat eine große Wichtigkeit: Jedes periodische Signal, m.a.W. jede periodische Funktion, kann also Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen beschrieben werden. Die Kunst des Zerlegens in Summen von Sinus und Cosinus heißt Fourieranalyse. Sie spielt in der Technik eine wesentliche Rolle. Aber auch in der Grundlagenforschung: das Licht von Sternen wird in ein Fourierspektrum zerlegt und dann analysiert. Damit kann man mehreres machen ...

Sehr oft sind Signale nicht periodisch. Was man dann macht, ist nur ein Intervall betrachten, und dieses dann periodisch fortsetzen. So macht man mit der Hand das Signal periodisch.

Bleiben wir beim Beispiel von Licht. Das Licht der Sonne ist keine monochromatische Welle, sondern eine Überlagerung von vielen Wellen. Wenn man das Licht der Sonne durch ein Prisma leitet, so wird das Licht nach Wellenlänge aufgespalten, somit hat man das Licht der Sonne als

Summe von unterschiedlichen Sinuswellen geschrieben: Symbolisch:

$$I(t) \longrightarrow \sum_{\omega} A_\omega \sin(\omega t) \longrightarrow \int I(\omega) \sin(\omega t) \mathrm{d}\omega$$

Für ω korrespondierend mit Gelb etwa ist A_ω (oder $I(\omega)$) maximal. Dies ist genau durch das Verschiebungsgesetz von Wien bestimmt. Siehe Schwarzkörperstrahlung.

Nun kann man sich fragen, warum wir bei der Sonne keine Interferenz wahrnehmen, denn wir haben also eine Summe von Wellen, wieso dann keine Interferenz? Die Antwort ist so einfach, und gleichzeitig, so kompliziert wie nur möglich: Das Licht der Sonne ist nicht kohärent: Die Wellen sind so chaotisch durcheinander, dass statt scharf definierte Maximen und Minimen und der dazwischenliegenden Bereichen mit mittlerer Intensität alles durcheinander läuft und so eine Mittelintensität entsteht. Man kann also auch aus diesem Beispiel lernen, dass um Interferenz bei Licht wahrzunehmen, kohärente Lichtquellen notwendig sind, also zum Beispiel Laser.

Bei Schall ist Fourieranalyse auch extremst wichtig. Wenn du singst, ist dein Signal nicht eine schöne Abfolge von unterschiedlichen Sinuswellen. Zu jeder Zeit ist dein Signal eine Überlagerung von verschiedenen Frequenzen.

Betrachten wir die Saite einer Gitarre. Wenn wir die Saite in Schwingung versetzen ensteht eine sogenannte stehende Welle, die selbst eine Überlagerung ist. Die niedrigste Frequenz wird durch die Saitenlänge L bestimmt $\lambda_0 = 2L$. Dann gibt es noch die Obertöne $\lambda_1 = L$, $\lambda_2 = \frac{2}{3}L$, $\lambda_2 = \frac{2}{4}L = L/2$ und so weiter. All diese Frequenzen (Wellenlängen) haben unterschiedliche Intensitäten I_λ. Der Klang des Musikinstruments wird durch die Funktion $\lambda \mapsto I_\lambda$ bestimmt.

Dieselbe Frage wie vorher wird auch wie vorher beantwortet: Warum hat man in einer Musikhalle bei einem Monzert keine Interferenz? Weil die Wellen hier auch nicht kohärent sind.