E 2004-10-16

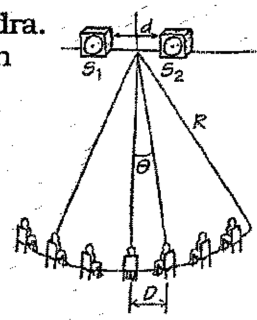
3. En spänd sträng utför en transversell vågrörelse som representeras av funktionen

$$y(x,t) = A\cos(\omega t - (2\pi/\lambda)\,x)$$

där; $\omega = 100$ rad/s, $\lambda = 0{,}3$ m, $A = 3$ mm

a. Ställ upp ett uttryck för hastigheten hos strängelementen(vinkelrätt mot utbredningsriktningen) som funktion av x och t och bestäm den maximala hastigheten.
b. Ange lutningen på strängen som funktion av x och t.
c. Hur stor är vågens utbredningshastighet?
d. Strängens massa per längdenhet är 10 gram per meter. Hur hårt spänd är strängen? (4 p)

4. Två små högtalare S_1 och S_2, står på avståndet d = 0,2 m från varandra. Högtalarna sänder ut ljudvågor med samma amplitud och frekvensen 4400 Hz. Vågen som kommer från S_1 är dock fasförskjuten 180 grader relativt den som kommer från S_2. På avståndet R = 30 meter står ett antal stolar uppställda i en formation enlig figuren. På vilket avstånd D (vid sidan om den stol som står längs mittpunktsnormalen från de båda högtalarna) uppstår det första maximat i ljudintensitet? (4 p)



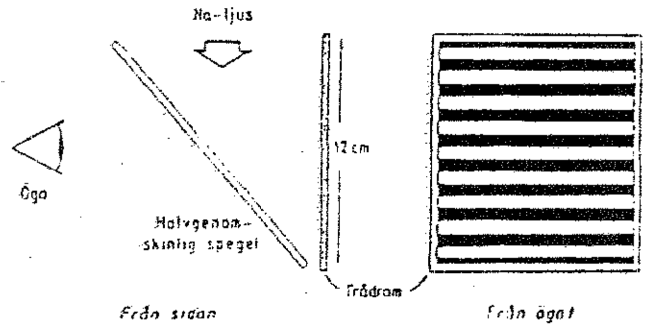
E 2004-08-23

2. En harmonisk våg som rör sig längs en sträng har en utbredningshastighet som är 12,4 m/s. Varje strängelement har en maximal avvikelse från jämviktsläget som är 2,4 cm och en maximal hastighet som är 9,4 m/s. Bestäm vågens våglängd, frekvent och skriv ned vågfunktionen på lämpligt sätt. (4 p)

4. Ett transmissionsgitter har 350 spalter/mm och belyses med vinkelrätt infallande vitt ljus. Utgående ljus fokuseras på en skärm 40 cm från gittret. I skärmen har man 20 cm från centralmaximum tagit upp en smal spalt. Vilken eller vilka våglängder inom det synliga området kommer att passera genom spalten? (4p)

E 2002-10-22

2. En såphinna hänger vertikalt i en kvadratisk trådram med sidan 12 cm, där kanterna är lod- respektive vågräta. Såphinnan belyses vinkelrätt med monokromatiskt kollimerat ljus (dvs så att den inkommande vågen kan betraktas som plan) med våglängden 5893 Å (se figuren nedan). På grund av att de två såphinneytorna som vetter mot luft inte är helt parallella utan har formen av en kil med mycket liten kilvinkel α får man ett interferensmönster som framgår av figuren längst till höger. Beräkna med hjälp av informationen vinkeln α mellan såphinneytorna om man vet att såpan har brytningsindex 1,33. (4 p)



E 2001-10-23

1. När man slår an en sträng på ett stränginstrument uppstår som bekant stående vågor. Genom ytterligare påverkan av strängen kan man styra vilka av de möjliga stående vågorna som skall höras bäst. Detta kan utnyttjas t ex när man stämmer en fiol.
En lätt beröring av en viss sträng exempelvis en tredjedel in på den gör att strängen svänger med tre bukar (se figuren nedan).
Om en sträng (vi kallar den y-strängen) fås att svänga med tre bukar (y-strängens andra överton) och en annan sträng (x-strängen) på motsvarande sätt fås att svänga med två bukar (x-strängens första överton) så ger de båda strängarna samma ton. y-strängens grundton har en frekvens som är 660 Hz. Hur stor är då frekvensen för x-strängens grundton? (4 p)

5. I figuren nedan visas ett transmissionsgitter som består av ett 8 aperturer. Detta belyses med monokromatiskt ljus med en våglängd som är 20% av aperturbredden a. Mellan aperturerna finns ett ogenomskinligt mellanrum vars bredd är 3a. I vertikal led har aperturerna mycket stor utsträckning.
Rita en <u>tydlig</u> figur som visar hur intensiteten, på stort avstånd från gittret, varierar som funktion av vinkeln mot normalen. Tag hänsyn till såväl interferens som diffraktion. Ange hur styrkan av huvudmaxima varierar. När det gäller sekundära maxima och minima räcker det att ange vinklar. (4 p)

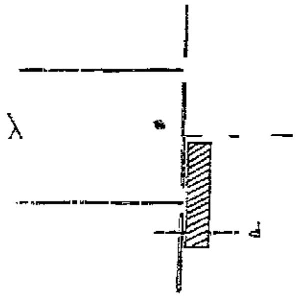
E 2005-10-15

2. En vätskebehållare har en dubbelspalt, med mycket små spaltöppningar, inristad i en övrigt helt svart sida. När enfärgat ljus infallet vinkelrätt mot spalten observeras ett tydligt interferensmönster på motsatta sidan. Hur förändras interferensmönstret om behållaren fylls med vätska. Hur kan vätskans brytningsindex bestämmas från resultaten av detta försök? (4 p)

D 2006-04-21

2. a. Två 0,02 mm breda spalter på avståndet 0,10 mm från varandra belyses med monokromatiskt ljus. Hur många maxima kan observeras inom det centrala diffraktionsmaximat? (2 p)

b. Omedelbart bakom den ena spalten i Youngs försöksuppställning (med två mycket smala spalter) inskjuts en platta med genomskinligt material, vars brytningsindex är 1,58. Därvid förskjuts interferensmönstret 600 fransavstånd. Beräkna plattans tjocklek om våglängen hos det infallande ljuset är 589 nm(de aktuella vinklarna är så små att man kan bortse från brytningseffekter) (2 p)



D 2005-12-13

4. Vitt ljus infaller vinkelrätt mot ett transmissionsgitter som har 600 ritsar per mm. Man vill registrera ljuset fotografiskt (efter att det har passerat gittret) i så hög ordning m som möjligt utan att man får med något ljus från andra ordningar. Det gäller alltså att hitta ett vinkelintervall (med så stora vinklar som möjligt) där det bara finns strålar i samma ordning. Den fotografiska filmen som används är okänslig för ljus vars våglängd är större än 5100 Å och ett filter tar bort alla våglängder som är mindre än 4000 Å. Inom vilket vinkelintervall kommer man att kunna registrera ljuset? (4 p)

D 2006-12-18

4. I ett visst diffraktionsexperiment används monokromatiskt synligt ljus. Man belyser en enda smal enkelspalt som befinner sig framför en platt skärm där det diffrakterade ljuset observeras. Avståndet mellan spalt och skärm är mycket större än spaltbredden. Man observerar att huvudmaximat (eller centralmaximat) har bredden 1,2 cm på skärmen när spaltbredden är 0,032 mm. Om man därefter gör om experimentet med samma ljusvåglängd men byter spalt finner man att huvudmaximats bredd har ändrats till 1,9 cm. Hur stor bredd har den nya spalten? För att få poäng på uppgiften är det av största vikt att beräkningarna motiveras ordentligt. (4 p)

I 2006-01-11

5. En hamnbassäng i ett skeppsvarv har formen av en kvadrat med sidan 300 meter och har en smal förbindelse med havet. Bottnen är horisontell och sidoväggarna vertikala. Tidvattnet gör att vattennivån varierar som en harmonisk rörelse med en period av 12,5 timmar. Det maximala vattendjupet är 15 m och det minimala är 10 meter.

a. Skriv ned ett matematiskt uttryck för hur vattenytans nivå varierar i tiden.
b. Skriv ned ett matematiskt uttryck för vattenytans rörelse som funktion av tiden.
c. Vid vilka tider ändras vattennivån snabbast.
d. Beräkna det största vattenflödet (uttryckt i kubikmeter per sekund) genom öppningen till hamnen. (4 p)

I 2005-01-15

4. På en spänd fiolsträng som är 80 cm lång och svänger med resonansfrekvensen 880 Hz finns fyra bukar vardera med amplitud 2,0 mm. Hur stor är den maximala (transversella) hastigheten för en liten grönmålad punkt som ligger 20 cm in på strängen och en dito rödmålad punkt som ligger 25 cm in på strängen? (4p)

6. Ljus med våglängden λ infaller mot en enkelspalt med bredden b. Diffraktionsmönstret studeras på en skärm som befinner sig på, relativt b, stort avstånd L från spalten. Antag att man tillverkar en ny enkelspalt genom att helt enkelt klippa ett hål i skärmen där hålet definieras av den del som det relativt ljusstarka och breda centralmaximat täcker. Därefter tar man bort spalten med bredden b och belyser sedan skärmen (som alltså nu har ett hål) med ljus som har samma våglängd som tidigare och studerar det nya diffraktionsmönstret med hjälp av en ny skärm på avståndet L från skärmen med hål i. L kan fortfarande antas vara stort i förhållande till den nya spaltbredden. Hur stor blir nu den totala bredden av centralmaximat som observeras på den nya skärmen?

Om man ska kunna räkna på detta problem på ett enkelt sätt krävs det att spalten är smal. I det här problemet kan ju bredden på den spalt som vi tillverkar genom att klippa hål bli mycket stor. Därför finns det en lins, vars brännvidd är L, bakom spalten i båda de fall som beskrivs ovan. Linsen gör att den observerade intensitets-fördelningen på skärmen endast beror av diffraktionseffekter. Utan lins skulle intensitetsfördelningen bakom en mycket bred spalt (såsom en dörröppning) som belyses med en plan våg inte vara särskilt smal. (4 p)

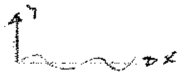
I 2007-01-17

4 En sträng har sträcks mellan två fästpunkter som är belägna på avståndet 75,0 cm från varandra. När man slår an strängen kan man mäta upp att den har resonanser vid 420 respektive 315 Hz och att det inte finns någon resonans mellan dessa. Hur stor är frekvensen för grundtonen på strängen och hur stor är utbredningshastigheten för de aktuella vågorna på strängen? (4 p)

5 En stråle av rött ljus infaller vinkelrätt mot ett transmissionsgitter. Efter passagen av gittret observeras ljuset på en halvcylinderformad genomskinlig skärm som har sin symmetriaxel i gittet och parallell med ritsarna i gittret. Man observerar då 15 ljusa fläckar på skärmen. Vad kan man då dra för slutsatser om gitterkonstantens storlek om man vet att ljusets våglängd är 654 nm? (4 p)

E 2004-10-16

(3) $y = A\cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x)$



a) $\frac{dy}{dt} = -A\omega \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x)$

$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{max} = A\omega = 2\cdot 10^{-3}\cdot 100 = \underline{0{,}2\ m/s}$

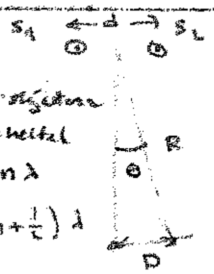
b) lutning $\frac{dy}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda} A \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x)$

c) $v_{fas} = f\cdot\lambda = \frac{\omega}{2\pi}\cdot\lambda = \frac{100}{2\pi}\cdot 0{,}2 = \underline{3\ m/s}$

d) $v_{fas} = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Rightarrow F = v_{fas}^2\cdot\mu =$

$= \left(\frac{10}{\pi}\right)^2\cdot 10\cdot 10^{-2} = \underline{0{,}1\ N}$

(4) Högtalarna sänder ut vågor som är fasförskjutna 180°



n = heltal

$\Rightarrow$ Villkor för min: $d\cdot\sin\theta = n\lambda$

max $d\cdot\sin\theta = (n+\frac{1}{2})\lambda$

1:a maximet D från mittpunktsnorm.

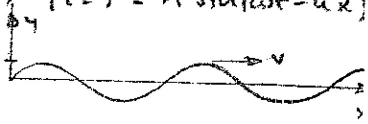
$$\left.\begin{aligned} d\cdot\sin\theta &= (0+\tfrac{1}{2})\lambda \\ \sin\theta &\approx \tan\theta = \frac{D}{L} \end{aligned}\right\} \Rightarrow D = \frac{\lambda}{2d}\cdot R$$

$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{330}{4400}\ m$ ljudhast i luft $\approx 330\ m/s$

$\Rightarrow D = \frac{330\cdot 30}{4400\cdot 2\cdot 0{,}2}\ m = \underline{5{,}6\ m}$

E 2004-08-23

(2) Harmonisk våg: $y(t) = A\sin(\omega t - kx)$



$k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega = 2\pi f$

$v = \lambda\cdot f = \frac{\omega}{k} \Rightarrow$

$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{max} = A\omega \Rightarrow \omega = \frac{\left(\frac{dy}{dt}\right)_m}{A} = \frac{9{,}4}{0{,}024} =$

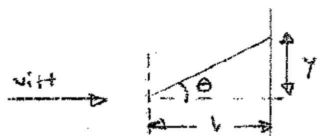
$= \underline{392\ rad/s}$

$\Rightarrow f = \frac{392}{2\pi}\ s^{-1}$

$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2\pi\cdot 12{,}4}{392} = \underline{0{,}199\ m} \Rightarrow k = 31{,}6\ m$

$\therefore y(t) = 0{,}024\sin(392\cdot t - 31{,}6\cdot x)$

(4)



synl ljus 400 — 700 nm

gitterkonstant $d = \frac{1}{350}$ mm

$\tan\theta = \frac{y}{l} = \frac{20}{40} \Rightarrow \theta = 26{,}56°$

gitter-ekv. $d\sin\theta = p\lambda$ $p = 1, 2, 3, \ldots$

$\Rightarrow \lambda = \frac{d\cdot\sin\theta}{p}$

$p=1 \Rightarrow \lambda_1 = \frac{d\cdot\sin\theta}{1} = \frac{10^{-3}\cdot\sin 26{,}56°}{350} = 1277\ nm$

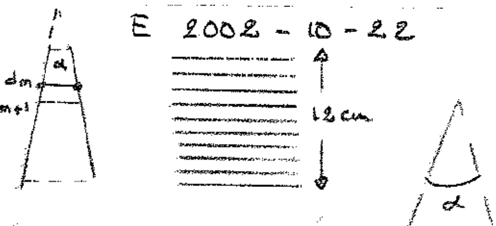
$p=2 \Rightarrow \lambda_2 = \frac{d\cdot\sin\theta}{2} = \underline{639\ nm}$ synl.

$p=3 \Rightarrow \lambda_3 = \frac{d\cdot\sin\theta}{3} = \underline{426\ nm}$ synl

$p=4 \Rightarrow \lambda_4 = \frac{d\cdot\sin\theta}{4} = 319\ nm$

E 2002-10-22

(2)



α liten
refl. vid passage av ytorna

Villkor för en mörk frans (en av refl. sker mot tätare medium)

$$2d_m \cdot n = m\lambda \quad (1)$$

Villkor för närliggande frans

$$2\, d_{m+1} \cdot n = (m+1)\lambda \quad (2)$$

(2) − (1) ger $\Delta d = \dfrac{\lambda}{2n}$

x = avståndet mellan två fransar $= \dfrac{0{,}12}{9}$ m

$$\tan\frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta d/2}{x}$$

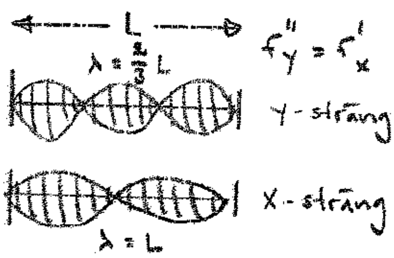
$$\Rightarrow \alpha = \frac{\Delta d}{x}$$

$$\therefore \alpha = \frac{\lambda/2n}{x} = \frac{5893\cdot 10^{-10}}{2\cdot 1{,}33 \cdot 0{,}12/9}$$

$$\Rightarrow \alpha = 1{,}66\cdot 10^{-5}\ \text{rad}$$

E 2001-10-23

(1)



$$f_y'' = f_x'$$

$$V = f\cdot\lambda$$

$$Y: \quad V_y = f_y''\cdot\frac{2}{3}L = f_y^0\cdot 2L$$

$$\Rightarrow f_y'' = 3f_y^0$$

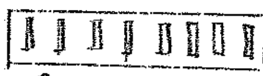
$$x: \quad V_x = f_x'\cdot L = f_x^0\cdot 2L$$

$$\Rightarrow f_x' = 2f_x^0$$

$$f_y'' = f_x' \Rightarrow 3f_y^0 = 2f_x^0$$

$$\therefore f_x^0 = \frac{3}{2}f_y^0 = \frac{3}{2}660 = \underline{\underline{990\ \text{Hz}}}$$

(5) $\lambda = 0{,}2a$ Ur Fig:



8 aperturer
gitterkonst $4a$
Spaltbredd a

Huvudmax: $4a\cdot\sin\theta = n\lambda = n(0{,}2a)$, $n = 0,1,2,\ldots$

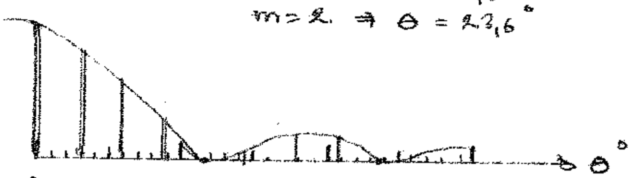
$$\Rightarrow \theta = \arcsin\left(n\,\frac{0{,}2}{4}\right)$$

$\Rightarrow \theta = 0^\circ, 2{,}9^\circ, 5{,}7^\circ, 8{,}6^\circ, 11{,}5^\circ, 14{,}5^\circ, 17{,}5^\circ, 20{,}1^\circ, 23{,}6^\circ, 26{,}7^\circ, 30^\circ$

mellan två huvudmaxima finns 6 sek max och 7 minima. Dela vinkelavst i 7 delar!

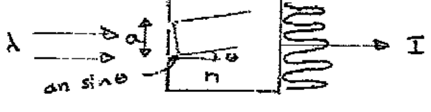
Diffr. villkor för min: $a\cdot\sin\theta = m\lambda = m\cdot 0{,}2a$

$m=1 \Rightarrow \theta = 11{,}5^\circ$
$m=2 \Rightarrow \theta = 23{,}6^\circ$



E 2005-10-15

(2)



Villkor för maximum: $an\cdot\sin\theta = m\lambda$

$$\Rightarrow \sin\theta = \frac{m\lambda}{a\cdot n}$$

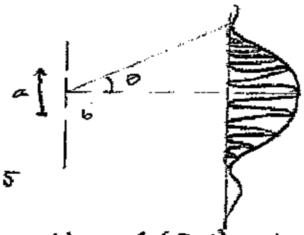
Om n ökar så ökar franstätheten
Räkna hur många fransar som finns i intervallet $[0^\circ, 20^\circ)$ med luft i behållaren och gör samma räkning i samma vinkelintervall med vätskan.
Om antalet fransar ökar med 50% har brytningsindex ökat med 50% dvs från 1 till 1,5

D 2006-04-21

(2)

a) $a \sin\theta = m\lambda$

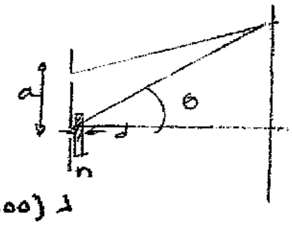
$b \sin\theta = \lambda$



$\Rightarrow m = \frac{a}{b} = \frac{0{,}10}{0{,}02} = 5$

∴ max nr. 5 osynligt $\quad N = 2(5-1)+1 = \underline{9}$

b)



Utan platta:

$a \cdot \sin\theta = m\lambda$

med platta

$a \sin\theta + d(n-1) = (m+600)\lambda$

$\Rightarrow d(n-1) = 600\lambda$

$\Rightarrow d = \frac{600\lambda}{n-1} = \frac{600 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{1{,}58-1} = \underline{\underline{6{,}1 \cdot 10^{-4}\ m}}$

D 2005-12-13

(4) Gitterformeln: $d \sin\theta = m\lambda$

$1/d = 600\ 1000\ m^{-1}$

En viss ordning ger ett vinkelintervall

$[\theta_m^{min}; \theta_m^{max}]$

där $d \sin\theta_m^{min} = m\lambda_{min} \Rightarrow \sin\theta_m^{min} = \frac{m\lambda_{min}}{d}$

och

$d \cdot \sin\theta_m^{max} = m \cdot \lambda_{max} \Rightarrow \sin\theta_m^{max} = \frac{m\lambda_{min}}{d}$

vilket x uppfyller $\sin\theta_{x+1}^{min} = \sin\theta_x^{max}$

$\Rightarrow (x+1)\frac{1}{d}\lambda_{min} = x\frac{1}{d}\lambda_{max}$

$\Rightarrow x = \frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}-\lambda_{min}} = \frac{4000}{5100-4000} = 3{,}6$

men m måste vara ett heltal $\Rightarrow m_{max} = 3$

∴ $\sin\theta_3^{max} = 3\frac{\lambda_{max}}{d} = 3\ 5100\ 10^{-10} \cdot 6\ 10^5$

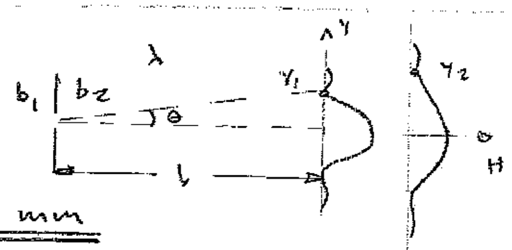
$\Rightarrow \theta_3^{max} = \underline{\underline{66{,}6^\circ}}$

på s. $\sin\theta_3^{min} = 3\frac{1}{d}\lambda^{min} \Rightarrow \theta_3^{min} = \underline{\underline{46{,}1^\circ}}$

D 2006-12-18

(4) Med spalt nr 1, $\quad b_1 \sin\theta_1 \approx b_1 \frac{y_1}{L} = \lambda$

— " — $\quad$ 2, $\quad b_2 \sin\theta_2 \approx b_2 \frac{y_2}{L} = \lambda$



$\Rightarrow b_2 = b_1 \frac{y_1}{y_2} = 0{,}032\ \frac{1{,}2}{1{,}9}\ mm = \underline{\underline{0{,}020\ mm}}$

I 2006-01-11

(5)

s = vattendjupet i meter

a) $s = 12.5 + 2.5 \cos\frac{2\pi \cdot t}{12{,}5}$

t mäts i h efter högvatten

$\frac{ds}{dt} = -\frac{5.0\pi}{12{,}5}\sin\frac{2\pi t}{12{,}5}\ m/h$

t för $\left|\frac{ds}{dt}\right|_{max}$: $3.125 = 3h\ 7\ min$

$9{,}375 = 9h\ 22\ min$

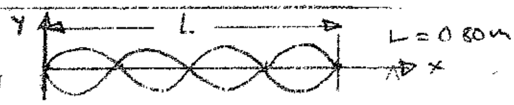
b) $\left(\frac{ds}{dt}\right)_{max} = 1{,}256\ m/h = 3{,}49 \cdot 10^{-4}\ m/s$

$\Rightarrow \left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = 300 \times 300\ \ 3{,}49\ 10^{-4}\ m^3/s$

$= 31{,}4\ m^3/s$

(4) $f = 880\ s^{-1}$

$\Rightarrow \omega = 2\pi f$



Stående våg: $y = 2A \cdot \sin kx \cdot \cos \omega t$

amplitud för buk $= 2A = 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ m.

$k = n\frac{\pi}{L}$ här: $n = 4 \Rightarrow k = \frac{4\pi}{L}$

$\Rightarrow y = 2A \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{L} \cdot x\right) \cdot \cos \omega t$

hastighet $v = \frac{dy}{dt} = -2A \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{L} \cdot x\right) \sin \omega t$

$v_{max} = 2A \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{L} \cdot x\right)$

$x = 0{,}20$ m: $v_{max} = 2A \cdot \omega \cdot \sin\overbrace{\left(\frac{4\pi}{L} \cdot \frac{L}{4}\right)}^{\pi} = \underline{0}$

$x = 0{,}25$ m: $v_{max} = \left|2A \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{L} \cdot \frac{25}{80} L\right)\right| =$

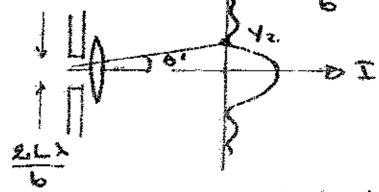
$= \left|2A \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{100\pi}{80}\right)\right| = \left|2 \cdot 10^{-3} \cdot 880 \cdot 2\pi \sin\left(\frac{100\pi}{80}\right)\right|$

$= \underline{7{,}8 \text{ m/s}}$

(6)

$b \cdot \sin\theta \approx b \cdot \tan\theta = b \cdot \frac{y_1}{L} = \lambda \Rightarrow y_1 = \frac{L\lambda}{b}$

Den nya spaltbredden $= 2y_1 = \frac{2L\lambda}{b}$

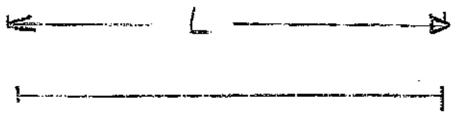


pss. $\left(\frac{2L\lambda}{b}\right) \cdot \frac{y_2}{L} = \lambda \Rightarrow y_2 = \frac{L \cdot \lambda \cdot b}{2L\lambda} = \frac{b}{2}$

$\Rightarrow$ Totala bredden av centralmaximet $= 2y_2 =$

$= 2 \cdot \frac{b}{2} = \underline{\underline{b}}$

I 2007-01-17



4

Givet: $L = 0{,}75$ m Stående våg.

$f_n = 315$ Hz n heltal

$f_{n+1} = 420$ Hz

Lösning: $v = f\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$ $f = \frac{v}{\lambda}$

$$\left.\begin{aligned} k_n &= n\frac{\pi}{L} \\ k_n &= \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{2\pi \cdot f_n}{v} \end{aligned}\right\} \Rightarrow 2 f_n = n\frac{v}{L}$$

Dessutom på samma sätt $2 f_{n+1} = (n+1)\frac{v}{L}$

$$\Rightarrow 2(f_{n+1} - f_n) = (n+1)\frac{v}{L} - n\frac{v}{L}$$

$$\Rightarrow 2(f_{n+1} - f_n) = \frac{v}{L}$$

$$\Rightarrow 2(420 - 315) = \frac{v}{L} \Rightarrow v = 2L(420 - 315)$$

$$\Rightarrow v = 2 \cdot 0{,}75(420 - 315) = \underline{157{,}5 \text{ m/s}}$$

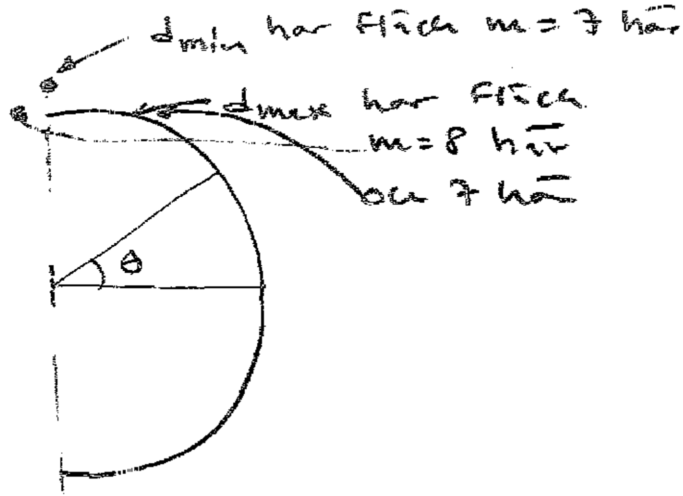
Grundtonen: $\lambda = 2L \Rightarrow f_0 = \frac{157{,}5}{2 \cdot 0{,}75} = \underline{\underline{105 \text{ Hz}}}$

I 2007-01-17

5

Givet: 15 fläckar på skärmen

$\lambda = 654\,nm$



Lösning: gitterformeln $d \cdot \sin\theta = m\lambda$ ger.

$d_{min} \cdot \sin 90^\circ = 7\lambda$ — de sista synliga fläckarna precis vid 90°

$d_{max} \cdot \sin 90^\circ = 8 \cdot \lambda$ — de första osynliga fläckarna precis vid $\approx 90^\circ$

$\therefore \quad d_{min} = 7 \cdot \lambda = 7 \cdot 654 \cdot 10^{-9} = 4{,}58 \cdot 10^{-6}\,m$

$d_{max} = 8 \cdot \lambda = 8 \cdot 654 \cdot 10^{-9} = 5{,}23 \cdot 10^{-6}\,m$

$\therefore \quad \underline{\underline{d \in [4{,}58\ ,\ 5{,}23]\ \mu m}}$