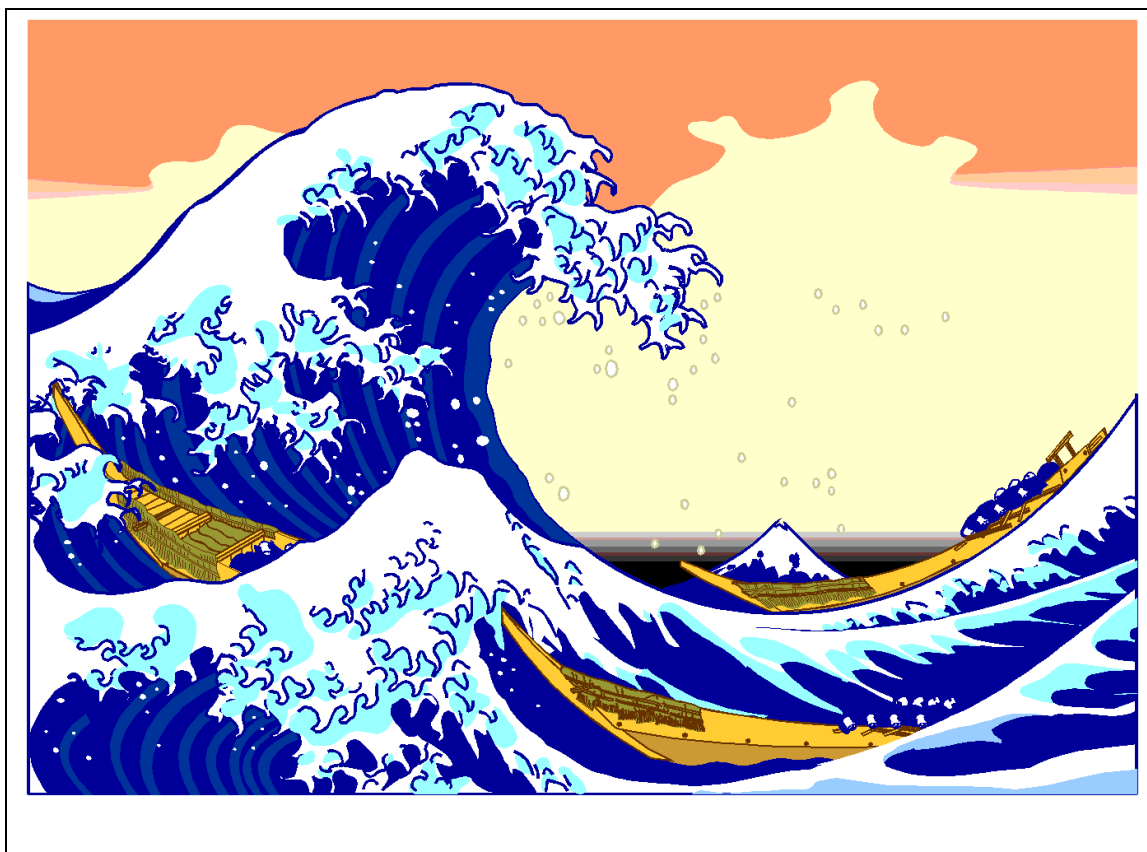


BØLGELÆRE

Hokusai: "The Hollow of the Deep-Sea Wave off Kanagawa,"

Pædagogisk introduktion

Disse noter om bølgelæren består af en tekst med forklaringer. Bagest i noterne findes studiespørgsmål, hvor du kan checke din viden og som du kan bruge til repetition. Endvidere findes en formelsamling til brug ved opgaveregning. Mange af forsøgene her er tænkt som demonstrationsforsøg fordi vi ikke har apparater nok til at eleverne kan udføre dem. I skal kunne dem og i vil få lejlighed til at udføre dem i opsamlingsrunder. Husk at tage noter selv! Som noget nyt er der links til computer animationer af mange bølgefænomener. Disse virker som levende figurer. De er den del af lektien. De fleste af disse er udviklet af en kinesisk fysiker fra Taiwan, Fu-Kwun Hwang. De ligger alle her i landet på linket <http://www.tonder-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/index.html>. Såfremt denne server ikke virker kan man gå ind på original siden <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/index.html>.

Opdager i trykfejl eller andre uklårheder, vær da venlig at maile mig på ove.d.christensen@get2net.dk

God fornøjelse
Ove Christensen

INDHOLDSFORTEGNELSE

<i>Bølgelære</i>	1
Pædagogisk introduktion.....	1
<i>Indledning</i>	5
<i>Bølgefænomener</i>	5
Periode og frekvens.....	5
Bølgeligningen.....	5
Longitudinale og transversale bølger.....	7
Harmonisk bølge.....	9
<i>Interferens</i>	9
Huygens' princip.....	12
Dobbeltspalten.....	12
<i>Lys</i>	15
Spejling og brydning.....	15
Brydning og bølgeligning.....	21
Udledning af brydningsloven.....	22
Totalreflektion.....	23
Det optiske gitter.....	24
<i>Spektre</i>	28
<i>Det elektromagnetiske spektrum</i>	33
Virkeligheden?.....	33
Former for elektromagnetisk stråling.....	33
<i>Lyd</i>	35
Lydintensitet og lydtryksniveau.....	36
Hørestyrke.....	37
Ud over pensum.....	37
Fouriersyntese.....	37
Overlydsbrag og Doppler effekt.....	38
<i>Formler</i>	39
Sammenhæng mellem frekvens og periode.....	39
Dobbeltspalten.....	39
<i>Studiespørgsmål</i>	41
Bølgefænomener.....	41
Interferens.....	41
Lys.....	42
Spektre.....	42
Lyd.....	42

INDLEDNING

Der findes bølger overalt. Bølgerne på havet er måske det bedst kendte eksempel. Det er også de nemmeste at forestille sig! Der findes mange andre slags bølger. Jorden bølger når der er jordskælv. Når vi taler, udsender vi lydbølger i luften, men det oplever vi ikke umiddelbart som bølgebevægelse. Lys er også bølger, men det er svært at se ligheden mellem lysbølger og vandbølger.

Fælles for de fleste bølger er, at de udbreder sig i noget: i vandet, i luften osv., og set ser umiddelbart ud, som om det er nødvendigt, at der er noget, de kan udbrede sig i. Lys kan dog udbrede sig i det lufttomme rum, ellers ville vi ikke kunne se stjernerne. Fordi det er svært at forestille sig så troede man indtil 1905, at lyset udbredte sig i et medium, som man kaldte æteren.

Der findes mange forskellige typer af bølger og de kræver en ret omfattende viden at forstå i detaljer. I bølgelæren beskæftiger vi os med de fælles træk for disse bølger og kun ret overfladisk med mekanismen bag de forskellige typer af bølger.

BØLGEFÆNOMENER

Periode og frekvens

Mange fænomener gentager sig: en gyngel bliver ved at svinge frem og tilbage på samme måde, en karrusel kører rundt på samme måde, jorden drejer sig rundt om sig selv på samme måde osv. Disse fænomener kaldes **periodiske** eller **cykliske**. Den tid, der går, inden fænomenet gentager sig kaldes **perioden** og betegnes med det fysiske symbol T . Den er den samme uanset hvor i perioden man starter at måle den.

Hvis et pendul har en periode på $\frac{1}{2}$ s, så gentager bevægelsen sig 2 gange pr. se-

$$f = \frac{1}{T}$$

sammenhæng mellem frekvens og pe-

kund. Antal gange, som en periodisk proces gentager sig pr. sekund kaldes for **frekvensen** som benævnes med symbolet f og måles i enheden $\text{Hz} = 1/\text{s} = \text{s}^{-1}$ (udtales Hertz). Som vist i eksemplet ovenfor gælder der relationen

Bølgeligningen

Vi tænker os en situation med vandbølger på stranden. Du står stille ude i vandet, og bølgerne kommer hen imod dig. Afstanden fra bølgetop til bølgetop (eller bølgedal til bølgedal) kaldes **bølgelængden**. Den betegnes med det fysiske symbol λ . De bevæger sig med en hastighed, som vi kalder v . Du står i vandet og vandhøjden stiger og falder. Vandhøjden er et periodisk fænomen.

Vi antager eksempelvis, at der går 10 sekunder fra vandet når højst op en gang til det næste gang når højst op. Derfor er perioden 10 sekunder og frekvensen af

bølgerne er $f = 1/T = 1/(10s) = 0.1 \text{ Hz}$. Lad os endvidere antage, at der er 40 m mellem bølgetoppene, dvs., at $\lambda = 40 \text{ m}$. Bølgen har derfor bevæget sig $s = 40 \text{ m}$ på $t = 10 \text{ s}$. Derfor kan vi beregne dens hastighed som $v = 40\text{m}/10\text{s} = 4 \text{ m/s}$.

Dette generaliserer vi således: bølgen bevæger sig stykket λ i tiden T , derfor er

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{Bølgelignin-}$$

dens hastighed $v = \lambda/T = \lambda \cdot (1/T) = \lambda \cdot f$. Der gælder derfor følgende relation mellem de tre størrelser λ , f og v :

Træningsopgaver.

Lydens hastighed er 343 m/s ved 20 °C

Lysets hastighed er 300.000 km/s = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Lys er **elektromagnetiske bølger**, og alle elektromagnetiske bølger: gammastråler, røntgenstråler, ultraviolet lys, synligt lys, infrarød stråling (= varmestråling), mikrobølger og radiobølger udbreder sig med samme hastighed.

1. I skemaet nedenfor betyder f frekvensen og T perioden for et periodisk fænomen. Udfyld de tomme rubrikker i skemaet

f	1 Hz		1 kHz		50 Hz	
T		10 s		1 år		1 ns

2. hvilken bølgelængde har lyd med frekvensen 440 Hz (= kammertonen a)?
3. mennesket kan høre frekvenser fra ca. 20 Hz til ca. 20 kHz. Hvilket interval af bølgelængder svarer det til?
4. længden af en blokfløjte er $\frac{1}{4}$ af bølgelængden for den dybeste tone. En almindelig c-blokfløjte kan tage tonen c som har frekvensen 262 Hz. Hvor lang skal den være?
5. For orgelpiber gælder samme regel som ovenfor. Den længste orgelpibe er normalt $8' = 8 \text{ fod}$. Hvilken frekvens har den når en fod er 0.305 m?
6. lynet slår ned 1 km væk. Hvor lang tid går der, inden man hører tordenbraget?
7. hvor lang tid er lyset om at nå solen, der er 150 millioner km fra os?
8. radiobølger til FM station har en frekvens på 101.3 MHz. Bestem bølgelængden.
9. en mikrobølgeovn kører ved en bølgelængde på 4 cm. Hvad er strålingens frekvens.
10. Synligt lys har bølgelængder i intervallet 400 - 700 nm. Hvilket interval af frekvenser svarer det til.
11. Kalundborg langbølgesender bruger en frekvens på 220 kHz. Hvad er radiobølgernes bølgelængde.

Forsøg (DEMO) måling af lydens hastighed med klaptræ

Man slutter to mikrofoner til en tidsmåler. Måleren kan måle tiden fra en puls optræder på den ene mikrofon til den optræder på den anden mikrofon. Endvidere målet afstanden mellem de to mikrofoner. Man har brug for en "skarp" lyd for at starte tidsmåleren. derfor laver man lyden ved at klappe to stykker træ mod hinanden.

Tid i s				
afstand i m				
hastighed i m/s				

Longitudinale og transversale bølger

Der gælder for alle bølgebevægelser, at det, der "bølger", bevæger sig rundt om en ligevægtsposition. Hvis denne bevægelse er i samme retning som bølgens bevægelse, så kaldes bølgen for en **longitudinal bølge**. Hvis derimod bevægelsen er vinkelret på bølgens udbredelsesretning, så kaldes bølgetypen for en **transversal bølge**.

Dette illustreres lettest med nogle demonstrationsforsøg:

DEMO1: bølgetyper på en fjeder

Her kan man både se longitudinal- og transversal bølger

DEMO2: bølger i magneter på skinne

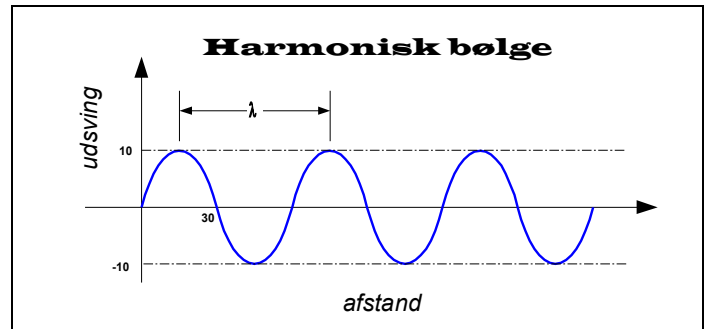
På en skinne ligger en række magneter. De er vendt så de alle frastøder hinanden. Bevæges én magnet forplanter bevægelsen sig til de andre magneter i en bølgebevægelse. Her er tale om en longitudinal bølge.

Lyd er longitudinal bølger. Det, der bølger er: lufttrykket, densiteten og hastigheden af molekylerne. De tre størrelser er gensidigt afhængige.

Elektromagnetiske bølger (gammastråler, røntgenstråler, ultraviolet lys, synligt lys, infrarød stråling, mikrobølger og radiobølger). Det der varierer i disse bølger, er de elektriske og magnetiske felter. Disse afhænger gensidigt af hinanden. De har retning vinkelret på udbredelsesretningen og derfor er elektromagnetiske bølger transversal bølger.

Harmonisk bølge

Figuren til højre viser en harmonisk bølge. Her er **udsvinget** fra ligevægtsstilling en **sinusfunktion** af den afstand, som bølge har bevæget sig. For en harmonisk bølge kaldes det maksimale udsving A for bølgens amplitude. Bølgen til højre har en amplitude på 10 (positivt tal).



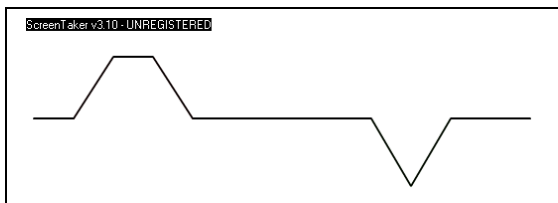
Taler vi om lyd, så svarer en harmonisk bølge her til en **ren tone**.

INTERFERENS

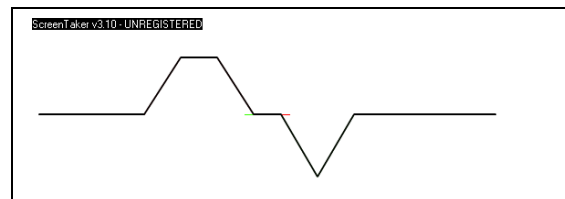
Interferens er det fænomen, der opstår, når to bølger mødes og blander sig. Lad os som eksempel bruge tværbølger på en fjeder. Vi ser på transversal bølgers udsving fra ligevægt.

Der gælder da, at den resulterende bølges udsving fra ligevægt er summen af de enkelte bølgers udsving fra ligevægt, regnet med fortegn.

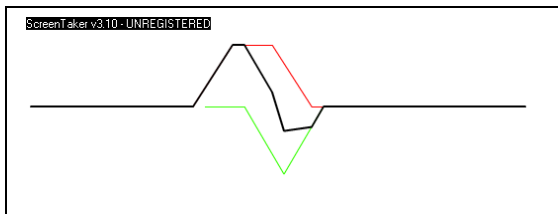
Vi illustrerer dette med en tegneserie af to bølgers rejse imod hinanden.



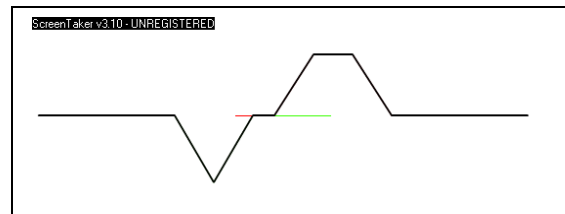
1



2



3



4

Billederne 1 og 2 viser de to bølger, der rejser ind mod hinanden. Billede 3 viser hvad der sker når de mødes. Det er her interferensen der finder sted. Billede 4 viser, at bølgerne er uændret efter at de er gået igennem hinanden. I billede 3 ses de enkelte bølger samtidig med den resulterende bølge. På hvert sted af den vandrette akse kan man finde udsvinget ved at addere de to bølgers udsving. Prøv selv at lave forskellige situationer ved at gå ind på linket

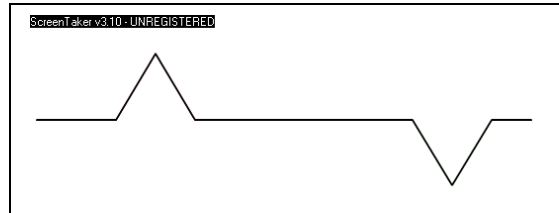
http://users.erols.com/renau/wave_interference.html

Øvelse

De to bølger går ind mod hinanden

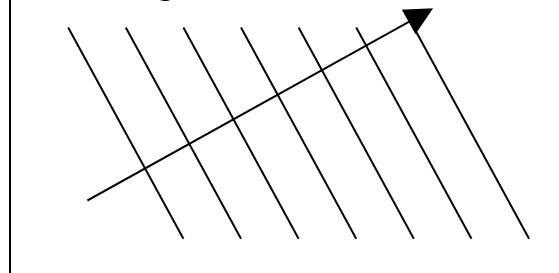
⇒

Tegn dem lige før de mødes,
"midt" under mødet og lige efter

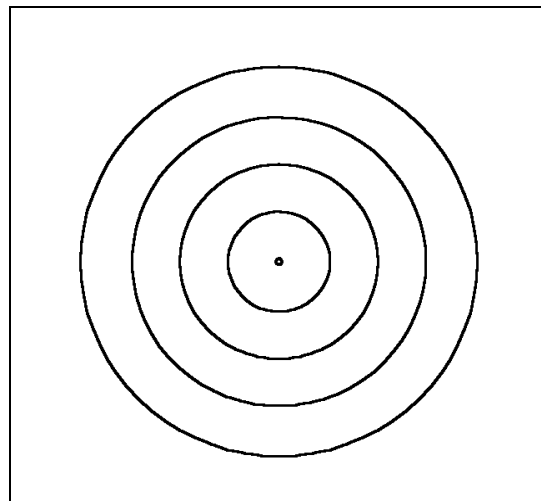


Fjederbølgerne er eksempler på én-dimensionelle bølger. Vi skal i det følgende se på to-dimensionelle bølger. Vi tegner sådanne bølger ved at **angive bølgetoppene med linier**. Sådanne linier kaldes en **bølgefront**. Et almindeligt bølgefænomen er **den plane bølge**, der er illustreret i figuren. Man må selv tænke sig til, der er bølgedale mellem linjerne. Pilen er bølgens

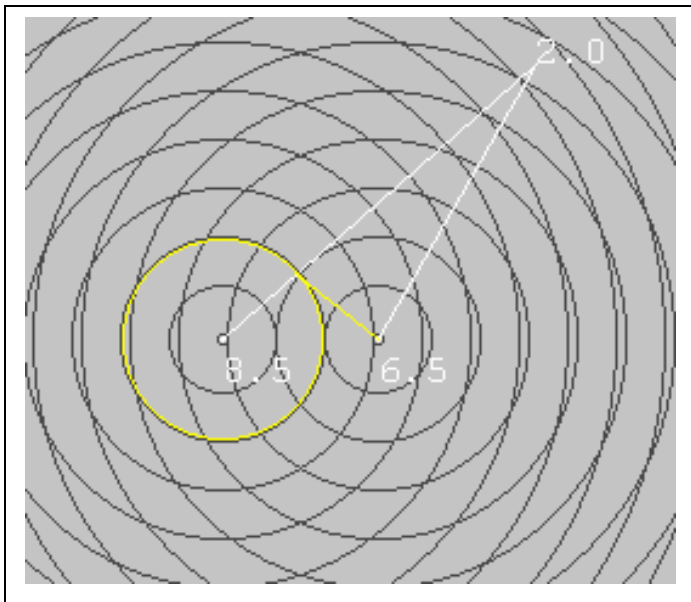
Plan bølge



En anden bølgeform vi skal beskæftige os med er ringbølgen, som vi kalder en **elementarbølge**. Det er den bølge, man ser når man smider en sten i vandet. Bølgefronterne udbreder sig radiært ud fra centrum. Udsvinget bliver mindre, efterhånden som bølgen fjerner sig fra centrum.



Når man smider to sten i vandet samtidig ser man to elementarbølger, der interfererer. Det mønster, der kan fremkomme kan tegnes som vist herunder - idet vi forestiller os, at der i hvert centrum sidder en bølge giver samt, at de to bølgegi-vere er samtidige.



Prøv selv på linket nedenfor - hvor man kan se bølgerne bevæge sig i denne Java applet. (højre centrum kan flyttes med musen)

<http://www.toender-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/wave-Interference/waveInterference.html>

Der, hvor to bølgetoppe mødes, forstærker de hinanden. Det kaldes **konstruktiv interferens**. Hvor to bølgedale mødes, forstærker de også hinanden og her er også tale om konstruktiv interferens. Men hvor bølgetop møder bølgedal

svækker de to bølger hinanden. Dette kaldes **destruktiv interferens**. Linjerne i figuren viser afstandene fra de to centre til det valgte punkt. Punktet er 8.5 bølgelængder fra det ene centrum og 6.5 bølgelængder fra det andet centrum. Forskellen er 2 bølgelængder. Derfor er der i dette punkt konstruktiv interferens. Konkret ser man to bølgedale, der mødes og forstærker hinanden. Vi generaliserer dette:

Betingelse for konstruktiv interferens i et punkt: der er en forskel i vejlængder fra de to bølgegi-vere på et helt antal bølgelængder.

Betingelse for destruktiv interferens i et punkt: der er en forskel i vejlængder fra de to bølgegi-vere på et helt antal bølgelængder plus en halv bølgelængde.

- det sidste skyldes, at der er netop en halv bølgelængde mellem bølgetop og bølgedal.

Øvelse: marker en række punkter i figuren hvor der er konstruktiv interferens med o og en række punkter med destruktiv interferens med +.

DEMO: interferens mellem to elementarbølger vist på overhead projector

DEMO: bølgekar

DEMO: interferens fra to højttalere

De to højttalere stilles med 4-5 meters afstand. De forbindes til samme tonegenerator, der stilles på en frekvens på 150 Hz. Hver højttaler udsender nu en elementarbølge. Forsøget skal udføres udenfor af hensyn til refleksioner indendørs fra væggene. Der dannes "korridorer" med konstruktiv interferens (kraftig tone) og destruktiv interferens (svag tone). Man kan gå rundt i dette "landskab". Hvis

DEMO forsøg: dobbeltspalten

Vi ser nu på en situation, hvor bølgerne er lys. Den plane bølge til venstre er her lyset fra en laser. Spalterne kan have en afstand på f.eks. 0.5 mm og hver en udstrækning på f.eks. 0.1 mm. Laserlyset går altså gennem dobbeltspalten og på væggen til højre ser man områder - "pletter" - med stærk lysintensitet.

Hvor findes disse pletter? Bruger vi betingelsen for konstruktiv interferens, så skal vi se på afstandene fra de to spalter til pletten. Hvis forskellen mellem disse afstande er et helt antal bølgelængder, så er der konstruktiv interferens. På figuren ser man pletter på væggen svarende til 0 og 1 bølgelængdes forskel og man kan se højere oppe i figuren, at der er retninger, der må svare til 2, 3 og 4 bølgelængdes forskel. Vi snakker her om ordener og betegner pletterne som 0te ordens pletten, 1ste ordens pletten osv.

Lyset går lige gennem spalterne ved nulte ordens pletten. Ved de andre ordener er lyset blevet afbøjet. Vi er interesserede i at bestemme afbøjningsvinkelen. Man skal her være klar over, at lysets bølgelængde (0.4 til 0.7 tusindedele mm) er meget mindre end afstanden fra spalterne til den væg, hvor man ser pletterne. I figuren bliver linjerne fra spalterne til pletten derfor næsten parallelle og derfor bliver den lille trekant ved spalterne næsten retvinklet. Det udnytter vi i næste figur

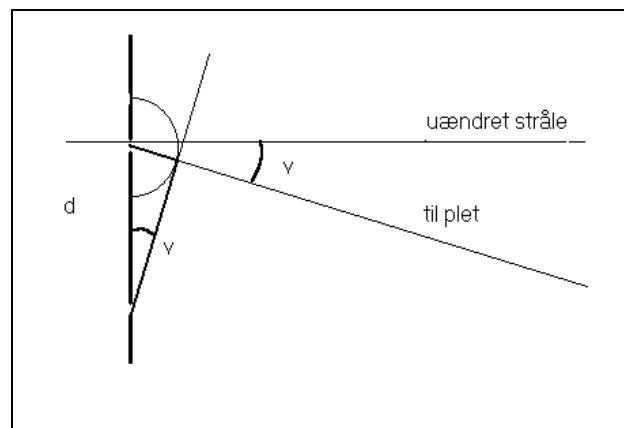
Vi kalder afstanden mellem spalterne for d og bølgelængden for λ . Den vinkel, der svarer til 1ste ordens pletten har den korte hypotenuse lig λ . Derfor er

$$\sin v_1 = \lambda/d$$

Plet nummer n er derfor afbøjet med en vinkel v_n givet ved

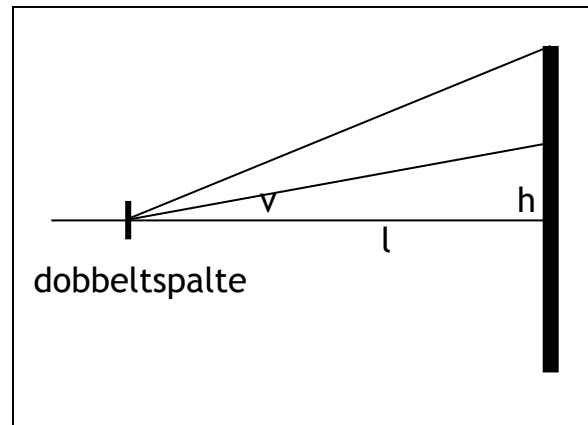
$$\sin v_n = n \cdot \lambda/d \quad \Leftrightarrow$$

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin v_n$$



Forsøg med dobbeltspalten

Vi sender rødt laserlys ind på en dobbeltspalte. Dernæst måler vi afbøjningsvinklen for 1 og 2 ordens pletten. Vinklen måles som vist på figuren til højre og man bruger relationen $\tan v = h/l$. Idet vinklen og d er kendte kan λ bestemmes



$l =$ _____

$d =$ _____

n	h	$v = \tan^{-1}(h/l)$	$\lambda = \sin v \cdot d/n$
1			
2			

Sammenlign med *det optiske gitter senere*

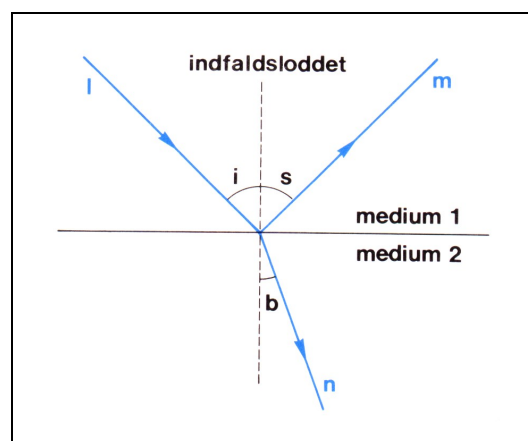
LYS

Lys er elektromagnetiske bølger. Det synlige lys består af bølgelængder på 400 - 700 nm svarende til henholdsvis violet (korte bølgelængder) og rødt (lange bølgelængder).

Spejling og brydning

Når lys rammer ind mod glas, vand, eller andre gennemsigtige stoffer med en glat overflade, så vil normalt en del af lyset blive tilbagekastet eller spejlet. Man kan jo se sit spejlbillede i vandet eller glasset. En anden del af lyset fortsætter gennem vand eller glas. Dette lys brydes, dvs. at dets retning ændres når det går fra et stof til et andet. Det ses f.eks. hvis man stikker en pind ned i vand.

Vi ser på en enkelt lysstråle, der kommer ind mod en spejlende flade. Der, hvor strålen rammer tegner vi en normal vinkelret på spejlet. Denne normal kaldes **indfaldsloddet**. **Indfaldsvinklen** i for strålen er nu vinklen mellem den indfaldende stråle og indfaldsloddet. **Spejlingsvinklen** s er vinklen mellem den spejlede stråle og indfaldsloddet. **Brydningsvinklen** b er vinklen mellem

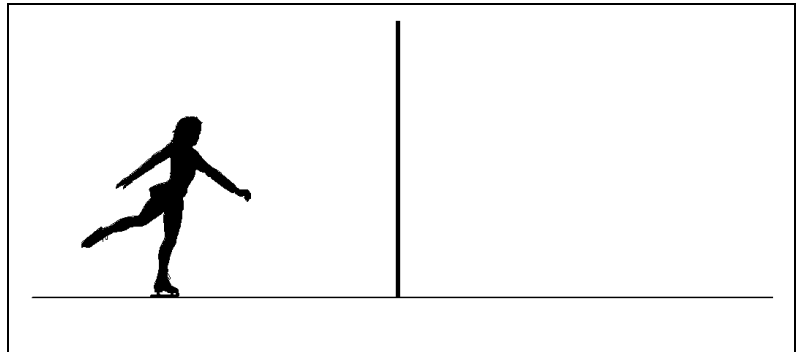


Spejlingsloven siger da, at

- spejlingsvinkel = indfaldsvinkel
- den indfaldende stråle, den brudte stråle og indfaldsloddet ligger i samme plan.

Skal man konstruere et spejlbillede, så er det værd at huske, at der fra en genstand udgår lysstråler i alle retninger. Når du ser genstanden, så ender disse stråler i dit øje.

Øvelse: "personen" til højre står foran et spejl. Tegn de tre lysstråler, der går fra personens fod, hofte og bryst og ind i personens øje. Når du forlænger strålerne fra øjet og ind bag spejlet kan du tegne spejlbilledet der.

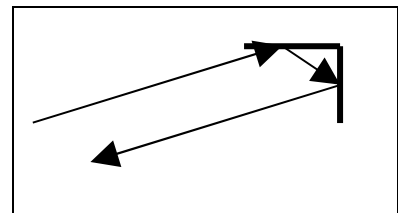


Et godt eksempel på strålegangen ved dannelse af et spejlbillede kan ses på linket

http://www.phy.ntnu.edu.tw/~hwang/optics/mirror_e.html

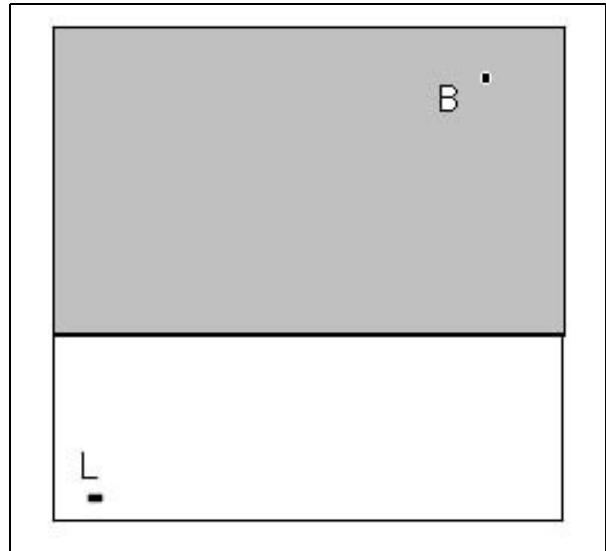
Når en billiardkugle støder ind i banden vil den normalt følge spejlingsloven. Hvis man stiller et håndspejl op ad banden kan man ganske præcist se den retning, man skal skyde i.

Stiller man to spejle vinkelret på hinanden, så vil de reflektere lyset tilbage i den retning, som det kom fra når lyset ligger i papirets plan. Bruger man 3 spejle, ser sidder som hjørnet i en terning, så bliver lyset reflekteret tilbage i den retning det kom fra. Sådanne "corner cube reflectors" bruges i skibsmaster til at reflektere radarbølger og der ligger et panel med reflektorer på månen så man kan få lyset fra en laser tilbage. Herved kan man præcist måle afstanden til månen.



En anden anvendelse er prismerne i en prismekikkert. Dette kræver dog først, at vi ser på brydning af lys.

Reglen for **brydning af lys** er mere kompliceret. Vi varmer op med eksemplet til højre, hvor livredderen L, der står på stranden skal hurtigst muligt ud til den badende B i vandet. Han kan løbe hurtigere end han kan svømme. Hvilken vej skal han løbe, så han hurtigst kommer til B?



Lyset vil altid følge den hurtigste vej mellem to punkter. Denne regel kalder **Fermats princip**. Når derfor lyset skal gå fra et stof (=medium) med én hastighed til et medium med en anden hastighed, så vil lysstrålen ”knække” på grænsen mellem de to stoffer. Sammenlign ovenstående eksempel. Det afgørende er derfor lysets hastighed i et stof. Vi indfører her den dimensionsløse (dvs. uden enhed) størrelse **brydningsindekset** (sometider kaldet **brydningsforholdet**), der betegnes med symbolet **n**. i Vacuum er lysets hastighed $3 \cdot 10^8$ m/s, der betegnes med bogstavet **c**. I et stof med lysets hastighed er brydningsindekset **n** givet ved

$$n = \frac{c}{v}$$

Øvelse

brug databogen til at finde brydningsindekset for stofferne nedenunder. Brydningsindekset afhænger af bølgelængden af lyset så brug værdien for gult lys ved ca. 600 nm

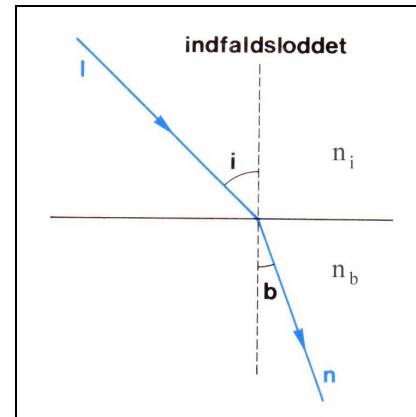
luft	vand	alm. glas	kvartsglas	diamant	is

...i praksis bruger vi i luft $n = 1$ og i vand $n = 4/3$

Brydningsloven siger, at når lyset går fra et stof med brydningsindeks n_i til et stof med brydningsindeks n_b , da er sammenhængen mellem **brydningsvinkel b** og **indfaldsvinkel i** givet ved - se tidligere figur

$$\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{n_b}{n_i}$$

læg mærke til, at der er "byttet om" på i og b på højre side. Det skyldes, at reglen mere direkte (men ikke praktisk brugbar) kan formuleres som $\sin i / \sin b = v_i / v_b$ - hvilket er identisk med ovenstående brydningslov.



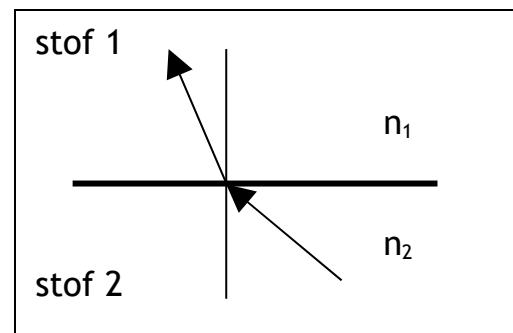
Øvelse: vil, at disse to formuleringer er identiske

For en given indfaldsvinkel, så bliver $\sin b$ - og dermed b - mindre jo større n_b er. Man kan derfor formulere følgende

Tommelfingerregel:

Jo større stoffets brydningsindeks er, desto tættere ligger strålen på indfaldsloddet.

I eksemplet til højre er derfor $n_1 > n_2$. Reglen kan forstås ved at huske på livredderen og på, at jo større n , desto mindre er hastigheden v



Hvis vi ganger over i brydningsloven fås

$$\sin b = \sin i \cdot (n_i / n_b)$$

Det følger heraf, at hvis $i = 0^\circ$ så er $b = 0^\circ$. Når lyset rammer vinkelret på grænsefladen mellem to stoffer, så går det ubrudt igennem.

Et link med demonstration af, at lyset går den hurtigste vej findes på

<http://www.toender-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/light/flashLight.html>

Eksempel

Lys går fra luft til vand. Indfaldsvinklen er 45° . Bestem brydningsvinklen.

$$\sin i / \sin b = n_b / n_i \Leftrightarrow \sin 45 / \sin b = 1.333 / 1 \Leftrightarrow \sin b = \sin 45 / 1.333 = 0,530 \Leftrightarrow b = 32,04^\circ$$

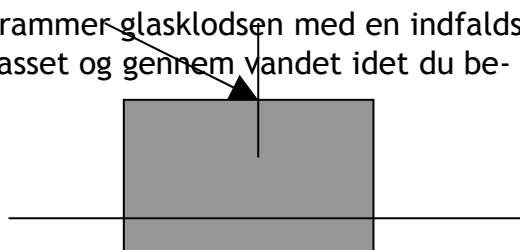
Bemærk at b er mindre end i og derfor ligger tættere på indfaldsloddet.

Opgave 1

Lys kommer fra glas med en indfaldsvinkel på 32.04° . Hvor stor bliver brydningsvinklen. Sammenhold resultatet med eksemplet og forklar det ud fra Fermats princip.

Opgave 1

Se figuren til højre. Lyset kommer fra luften og rammer glasklodsen med en indfaldsvinkel på 60° . Fortsæt nu lysets bane gennem glasset og gennem vandet idet du beregner alle de nødvendige vinkler.

**Opgave 3**

Samme som figuren men nu er vandet erstattet med luft. Tegn strålegangen og skriv vinklerne på ved grænsefladerne.

Opgave 4

Luftens brydningsindeks afhænger af højden således at det er størst ved jorden og nærmer sig 1 jo højere man kommer. Dette giver anledning til, at lyset fra solen og stjernerne afbøjes på sin vej ned gennem atmosfæren. Brug tommelfingerregelen til at skitsere denne afbøjning idet du ser på en enkelt lysstråle, der kommer ned fra en stjerne.

Opgave 5

Når man er ved stranden ser man at bølgerne kommer næsten parallelt ind med strandkanten. Det sker på alle strande selvom man må formode, at bølgerne kommer ind i samme retning. Dette fænomen kan forklares ved at vandbølgerne brydes fordi bølgehastigheden bliver mindre desto mindre vandhøjden er. Prøv at tegne bølgefronter langt væk fra stranden og vis hvordan de afbøjes så de bliver næsten parallelle med strandkanten.

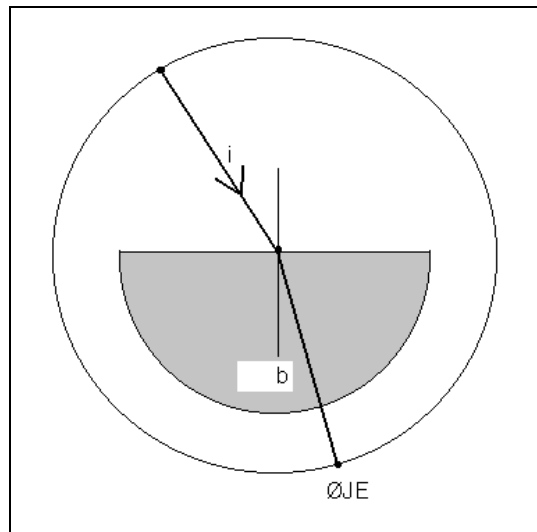
Opgave 6

Gult natriumlys fra en gadelampe har bølgelængden $589,3 \text{ nm}$ i luft. En stråle af dette lys bevæger sig under indfaldsvinklen 42° ind i en glassort, for hvilken brydningsforholdet er 1.52

- hvad bliver brydningsvinklen?
- hvad er lysets fart i glasset?
- lysets frekvens er den samme i glas og luft. Beregn denne frekvens.
- hvad er lysets bølgelængde i glasset?

Forsøg: bestemmelse af brydningsindeks for glas

Vi skal måle brydningsindeks for en glas-klods, der har form som en halvcirkel. Lysets gang er vist i figuren. Vi bestemmer brydningsindeks ved at fastlægge i idet klodsens lægges på en gradskala. Det er den runde cirkel i figuren. Lyset skal gå gennem centrum af klodsens. Centrum og et punkt ved den vinkel man har valgt markeres med knappenåle (sort). Men lyset skal jo også ud af klodsens. For at undgå, at det bliver brudt er klodsens lavet halvcirkelformet. Når strålen kommer fra centrum står den vinkelret på den cirku-



Man holder øjet som vist på figuren og sætter den tredje knappenål således, at man ser de tre nåle oven i hinanden. Nålen sættes på gradskalaen så man direkte kan aflæse brydningsvinklen. Man måler nu sammenhængende værdier af i og b således og beregner herfra brydningsindeks. Lav forsøget for 6 forskellige indfaldsvinkler og brug dette skema .

i-vinkel	b-vinkel	$\sin i$	$\sin b$	$n_{\text{glas}} = \sin i / \sin b \cdot n_{\text{luft}}$
10				
20				
30				
40				
50				
60				

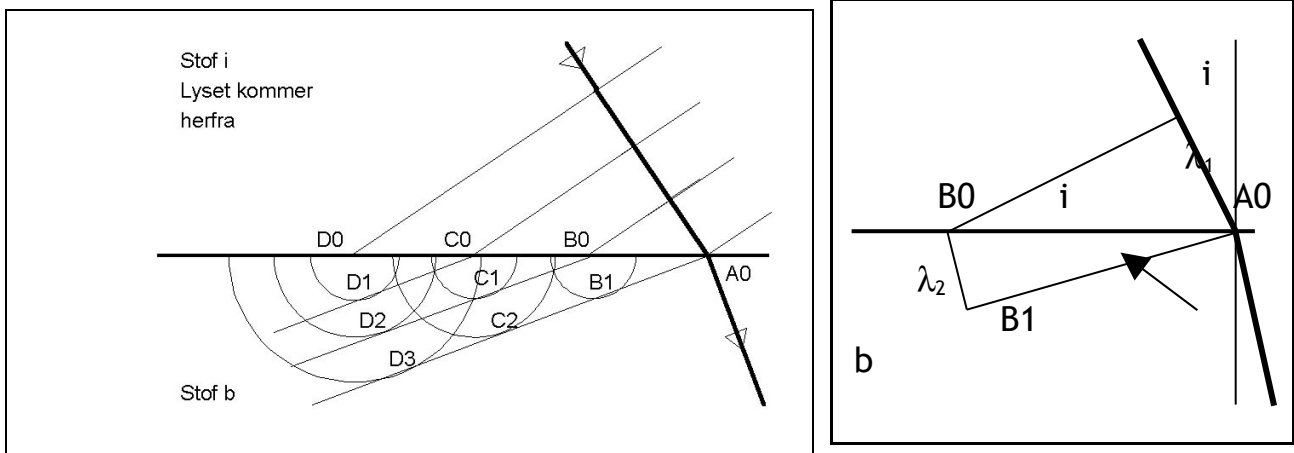
Angiv middelværdi og spredning på brydningsindeks for glas.

Hvordan passer værdien med databogens?

Brydning og bølgeligning

Når lyset brydes, så er lysets frekvens den samme i det stof, som lyset kommer fra som i det stof, det går ind i. Der må jo passere det samme antal bølgefronter pr sekund uanset hvilket stof man ser på, ellers ville der forsvinde bølger. Derfor er også lysets periode den samme. Hvis lyset går ind i et stof med større brydningsindeks, så er hastigheden her $v = c/n$ altså mindre. Bølgeligningen $v = \lambda \cdot f$ siger da at bølgelængden $\lambda = v/f$ også bliver mindre.

Udledning af brydningsloven



Figuren ovenover viser en bølge, der kommer ind mod et stof i. Den tykke linje er lysstrålen og vinkelret på den ses bølgefronterne. Vi bruger Huygens' princip og opfatter bølgefronterne som bestående af elementarbølger. Figuren viser til tiden NU. Vi ser på den bølgefront, der lige nu rammer i A0. Herfra vil nu starte en elementarbølge ind i stof b. For én periode siden ramte *den samme bølgefront* ind i B0. Den startede da en elementarbølge der nu er kommet til B1, nemlig afstanden λ_b . For to perioder siden ramte bølgefronten ind ved C0. Den startede en elementarbølge, der nu er kommet til C2 osv. Disse elementarbølger interfererer konstruktivt og danner en ny bølgefront (A0-B0-C0-D0) inde i stof b. (Den proces, der er illustreret her foregår hele tiden og ikke kun ved heltallige perioder.)

Den næste bølgefront, der NU er ved B0, giver anledning til en tilsvarende bølgefront inde i stof b, og alle disse bølgefronter tilsammen er del af en bølge, der udbreder sig vinkelret på bølgefronterne inde i stof b. Det er den fede linje. Resultatet er som vist i figuren til højre, at lyset bliver brudt. Her er tegnet en detalje fra første figur op. Vi kan nu udlede brydningsloven således

- vis først ved geometriske argumenter, at vinklerne i og b også findes i de to retvinklede trekanter.
- i den øverste retvinklede trekant gælder: $\lambda_1 = AOB_0 \cdot \sin i$
- i den nederste retvinklede trekant gælder: $\lambda_2 = AOB_0 \cdot \sin b$
- forholdet mellem disse giver: $\lambda_1/\lambda_2 = \sin i/\sin b$
- heri bruges bølgeligningen $v = \lambda \cdot f$ og vi får $v_1/v_2 = \sin i/\sin b$
- vi bruger $v = c/n$ og får endelig brydningsloven $\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{n_b}{n_i}$

Link til en fremragende demonstration af processerne ved refleksion og brydning

<http://www.toender-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/propagation/propagation.html>

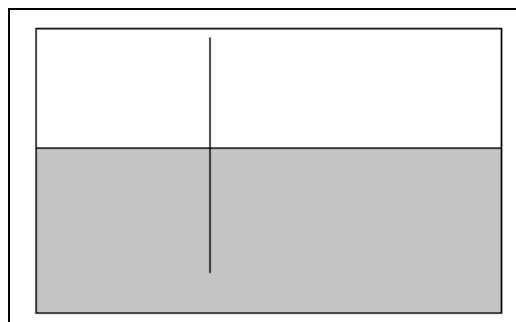
De elementarbølger, som vi lige har set på udbreder sig naturligvis i alle retninger, også "bagud" i stof i. Her interfererer de og danner den reflekterede bølge. Sådan kan man eftervise refleksionsloven.

Totalreflektion

Vi undersøger lys, der går fra vand med brydningsindeks 1.333 til luft med brydningsindeks 1.000. Bestem brydningsvinkel svarende til indfaldsvinklerne i tabellen

i	b
30°	
45°	
48,6°	
50°	

Skitser disse tilfælde i figuren til højre, hvor lyset kommer i vandet forneden og brydes i luften foroven.



Der er noget, der går galt i nederste situation i tabellen. Hvilket? Kan du bestemme den størst muligt værdi af indfaldsvinklen?

DEMO: totalreflektion

vises med laser, der sendes ind i et kar med vand hvor der er et spejl, der kan sende lyset op mod overfladen. Lyset i luften synliggøres vha. kridtstøv og lyset i vandet synliggøres med farvestoffet eosin.

Link til en computer demonstration af det samme:

<http://www.toender-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/light/flashLight.html>

Når lyset går fra et stof med lille til et stof med større brydningsindeks ($n_i < n_b$), så kan man for enhver indfaldsvinkel finde en brydningsvinkel. Bevis

$$\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{n_b}{n_i} \Leftrightarrow \sin b = \sin i \cdot (n_i/n_b) = \sin i \cdot (\text{tal mindre end én})$$
 ligningen kan altid løses og der gælder, at $b < i$.

Det modsatte er ikke tilfældet, når lyset går til et stof med mindre brydningsindeks gælder

$$\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{n_b}{n_i} \Leftrightarrow \sin b = \sin i \cdot (n_i/n_b) = \sin i \cdot (\text{tal større end én})$$
 ligningen kan ikke altid

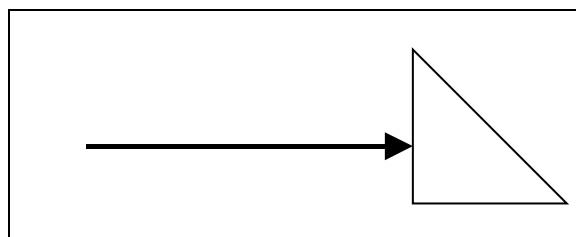
løses fordi $\sin b$ skal være ≤ 1 . Når lyset ikke kan blive brudt, så bliver det hele reflekteret. Dette fysiske fænomen kaldes totalreflektion. Når lyset brydes er $b >$

i. Men b kan højst være 90° . Den indfaldsvinkel som bevirker, at b bliver 90° kaldes grænsevinklen i_g . Den kan bestemmes fra $\sin i_g / \sin 90 = n_b / n_i \Leftrightarrow$

<p>Totalreflektion $\sin i_g = \frac{n_b}{n_i}$</p> <p style="text-align: center;">$n_b < n_i$</p>

Totalreflektion anvendes teknisk til kommunikation gennem optiske fibre. Disse er tynde glasfibre. Når lyset er "kommet ind" i dem kan det ikke "komme ud" fordi indfaldsvinklen altid bliver så stor, at der optræder totalreflektion.

I figuren til højre kommer lyset ind mod et glasprisme. Vinklerne i prismet er 45° , 45° og 90° . Forklar og beregn hvordan lysstrålen udbreder sig i prismet.

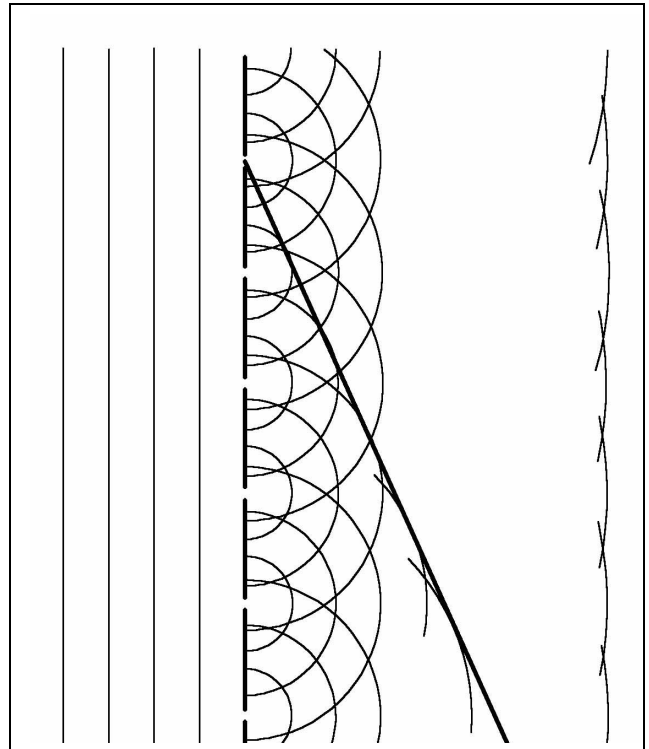


Demo: Den foregående opgave demonstreres med laserlys og 45 graders prisme.

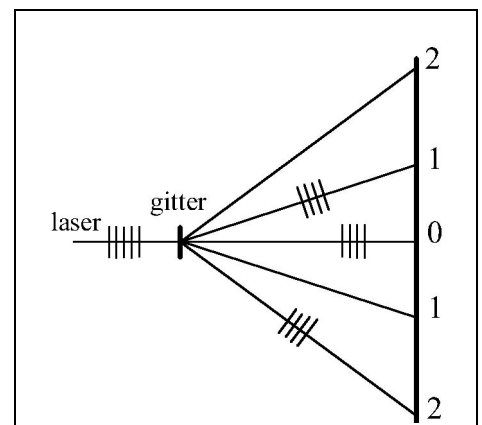
Det optiske gitter

Et optisk gitter består af en række tynde spalter. Spalterne ligger tæt. Et optisk gitter fremstilles ved at lave parallelle ridser i en glasplade med en diamant på en specielt konstrueret maskine. Man kan dog lave gitre af langt billigere kvalitet ved fotografisk teknik og det er sådanne gitre, vi skal bruge. Grunden til, at man er interesseret i gitre er, at de afbøjer lys med forskellige bølgelængder forskelligt. Ved at sende lys gennem et gitter kan man således finde ud af, hvilke bølgelængder det består af. Et typisk gitter har 300 spalter pr. mm og består af mange tusinde spalter. Man skelner mellem gitre, der lader lyset gå igennem - transmissionsgitre - og gitre, der spejler lyset.

Se på figuren til højre. Til venstre kommer en plan bølge ind mod gitteret. Fra hver spalte i gitteret udsendes der nu elementarbølger. Disse elementarbølger kan interferere på forskellig måde. Hvis bølgerne er udsendt fra spalterne på samme tidspunkt så interfererer de og giver en ny bølgefront sådan som vist yderst til højre i figuren. Da lysets retning er vinkelret på bølgefronterne så får dette lys samme retning som det indkommende lys. Men hvis man ser på elementarbølger, der er udsendt fra nabospalter med én periodes mellemrum, så er der konstruktiv interferens mellem alle bølgetoppe langs den sorte linje i figu-



I det sidste tilfælde er lyset altså blevet afbøjet. Set på afstand ser det ud som på figuren til højre. De dannede bølger giver anledning til pletter på væggen til højre der kaldes 0te ordens pletten, der går ubøjet gennem gitteret, 1ste ordens pletten for hvilken der er 1 bølgelængdes forskel mellem afstanden til to nabospalter, osv. I almindelighed snakker vi om *n*te ordens pletten, for hvilken der er *n* bølgelængders forskel mellem afstanden fra pletten til to nabospalter. Bemærk

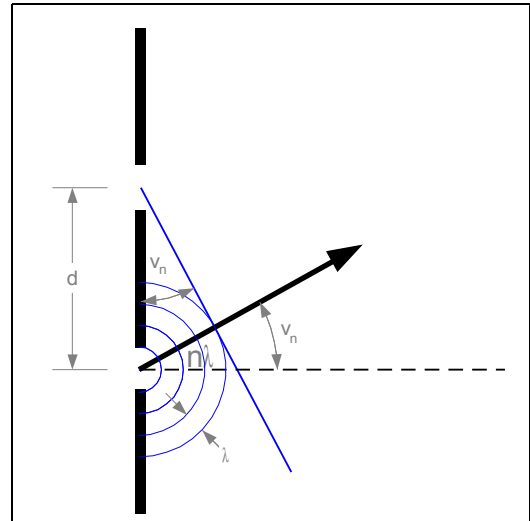


Faktisk dannes der også bølger, der går baglæns fra gitteret. De er udeladt for overskuelighedens skyld.

DEMO: afbøjning af laserlys i forskellige gitre

DEMO: OC's mekaniske model for konstruktiv interferens

I figuren til højre er vist et udsnit af et gitter. Vi ser på nte ordens bølgen ($n=2$ i figuren). På figuren er der en retvinklet trekant. Hypotenusen for denne er afstanden mellem spalterne d . Den korte katete nederst har en længde på $n\lambda$. Bølgefronten er den skrå linje, der går fra øverste spalte. Linjen vinkelret på denne er udbredelsesretningen for nte ordens bølgen. Den fede linje vandret angiver retning



Den vinkel, som nte ordens strålen afviger fra den indkommende retning kaldes v_n . Den skal vi finde.

- vis først ved geometriske argumenter at den øverste vinkel i den retvinklede trekant også er v_n .
- Ved at bruge relationer for retvinklede trekanter finder vi den nederste katete som har længden $n\lambda$

$$\text{Gitterligningen} \quad n \cdot \lambda = d \cdot \sin v_n$$

Eksempel

Et gitter har 300 spalter (eller linier) pr. mm. Hvor meget afbøjes grønt lys med bølgelængden 550 nm i 2den orden?

Først bestemmes $d = 1\text{mm}/300 = 10^{-3}\text{m}/300 = 3.33 \cdot 10^{-6}\text{m} = 3333\text{ nm}$ **NB: vigtigt!**

Så finder vi $\sin v_2 = n \cdot \lambda / d = 2 \cdot 550\text{ nm} / 3333\text{ nm} \quad \Leftrightarrow v_2 = 19.29^\circ$

Opgave 7

Hvor mange ordener findes der i tegningen øverst på foregående side?

Opgave 8

Brug den retvinklede trekant i figuren ovenfor til at besvare følgende

- hvor mange ordener kan der højst være for givet d og λ ?
- for givet n og d , hvordan ændres v_n når λ øges
- for givet λ og n , hvordan ændres v når d bliver mindre?

Opgave 9

Man måler med et gitter med 600 linier pr mm. Hvad er bølgelængden af det lys, der ses i 2den orden afbøjet en vinkel på 45° .

Opgave 10

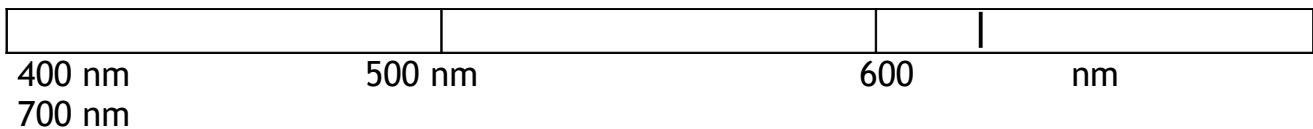
Vi sender laserlys med bølgelængden 632,8 nm gennem et optisk gitter anbragt 2.5 m fra skærmen. På skærmen måles afstanden fra centralpletten til anden orden. Denne afstand er 2.04 m. Hvad er gitterkonstanten?

SPEKTRE

Det synlige lys har bølgelængder fra 400 nm til 700 nm. Det opfatter vi som farver, der spænder fra violet til rødt. Der er nogenlunde følgende sammenhæng mellem bølgelængde og farve

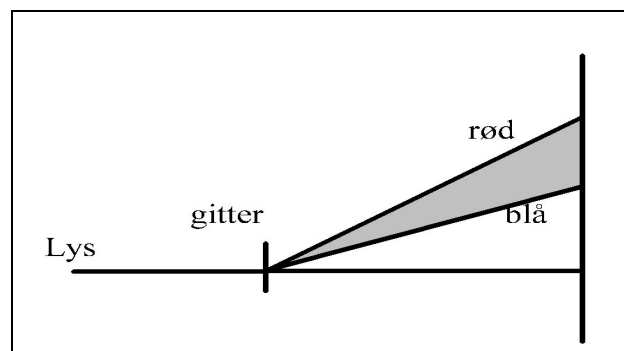
blå	grøn	rød
400 nm	500 nm	600 nm
700 nm		

Mere detaljeret så varierer "blå" fra violet til "petrol" og grøn fra "petrol" til grøn hen mod gul. **Farven gul** findes lige på grænsen mellem grøn og rød og har derfor en ret vel bestemt bølgelængde på ca. **600 nm**. **Hvidt lys** består af en blanding af lys med alle disse bølgelængder. Lyset fra en laser har derimod kun én bølgelængde. For den røde He-Ne laser er det 632.8 nm. Spektret for laser lys ser derfor således ud



spektret er tegnet omvendt fordi den sorte linie viser, hvor der er lys. Udenom er der sort, fordi der ikke lys med bølgelængder her. Spektret fra hvidt lys kaldes et **kontinuert spektrum** fordi det "hænger sammen". Spektret fra en laser er et eksempel på et **liniespektrum** hvor der kun ses én eller flere linier ved ganske bestemte bølgelængder.

Vi kan bruge gitteret til at undersøge lyset fra forskellige lyskilder. Til højre sendes lys ind mod et gitter. Gitteret afbøjer lyset mere desto længere bølgelængden er. Rødt lys bliver afbøjet mere end blått lys. I figuren bruger i 1ste orden men det er principielt ligegyldigt i 0te orden ser man



DEMO: spektret af hvidt lys

Vi bruger en overhead projektor som afskærmes så vi får en hvid lysstråle. Vi holder et gitter foran lysstrålen så vi får lyset brudt op i et spektrum, der projiceres på et lærred.

Forsøg med undersøgelse af spektre

I skal undersøge spektrene fra forskellige lyskilder. Sluk loftsbelysningen undtagen når det er den, i skal studere. Til undersøgelsen bruger i et håndspek-

troskop. Det indeholder et gitter og et spejl så man kan se spektret fra det lys, som man retter det mod. I skal for hver lyskilde afgøre, om spektret er et kontinuert spektrum eller et linjespektrum. I skal se på hovedtrækkene i spektrene og springe detaljerne over - undtagen i lyset fra solen, her skal detaljerne med. Spektrets type angives med K for kontinuert og L for linje

Lyskilde	K eller L	Kommentarer til spektret
glødelampe		
solen		
lysstofrør		
He-Ne laser		
NaCl i flamme		
Na spektrallampe		
Hg spektrallampe		
gasblus		

Kommentarer: en spektrallampe indeholder et stof på gasform. Der ledes en strøm gennem det hvorved gassen "gløder". Forklares under atomfysik. Et lysstofrør er opbygget omkring en spektrallampe.

Spørgsmål:

- Hvad er forskellen mellem lyset fra solen og en glødelampe?
- hvad er det, der frembringer kontinuerte spektre?
- hvad er det, der frembringer linjespektre?

CD'ens rilleafstand - hjemmeforsøg med rapport

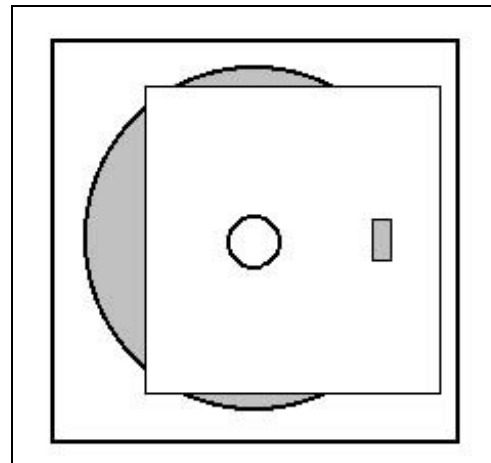
Dette forsøg laves på gulvtæppet eller køkkenbordet! Man kan næppe undgå kommentarer fra familien.

En CD har skrevet et mønster af reflekterende pletter der indeholder data for lyd-signalets størrelse. Mønstret ligger i cirkelbaner eller riller, der er pakket så tæt ved siden af hinanden som muligt. I skal finde afstanden mellem rillerne. Forsøget kunne laves for hundrede år siden hvis man bare kender bølgelængden af forskelligt farvet lys. Som omtalt før er bølgelængden af gult lys ca. 600 nm. Det anvender vi her.

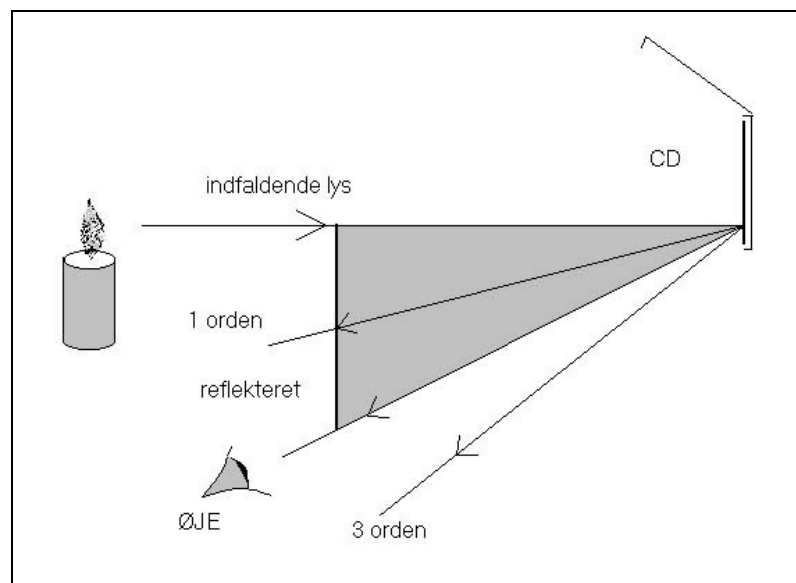
CD'en virker som et reflektionsgitter. Der gælder samme formler som for et almindeligt (transmissions) gitter men afbøjningsvinklen er her vinklen mellem det indkommende lys og det reflekterede lys.

Åbn CD-hylsteret, tag CD'en ud, vend den om og sæt den i hylsteret. Den vender nu bagsiden med rillerne ud. Åbn hylsteret og stil det på bord eller gulv så det støtter på lågen.

Selvom CD'en virker som gitter så er linierne ikke rette linjer men cirkelbuer. Derfor bruger vi et lille udsnit af dem så rillerne er næsten lige. Det gøres nemmest ved at lave en maske på ca. 1x1 cm af papir (POST-IT er god) og klæbe den fast som vist ⇒



Lav en opstilling som på figuren til højre. Sørg for at lyset falder vinkelret ind på CD'en. Det kan man vise ved at dreje CD'en så det reflekterede 0te ordens lys kommer tilbage i retning af lyset - hold et stykke papir bagved. brug lomme- eller cykellygte - eller stearinlys. **Lyset og masken skal være i samme**



indtil du ser reflektionerne i 1ste, 2den osv.. orden (hvor mange er der?). Sørg for at være mindst 1 m - gerne mere hvis muligt - fra CD'en. Se på den grå, retvinklede trekant. Hvis du markerer hjørnerne på den med knappenåle eller lignende i gulvtæppet så kan du bestemme afbøjningsvinklerne ud fra måling af kateterne i trekanten. Brug tommestok eller målebånd. Jo større trekant desto bedre nøjagtighed. Mål dem for mindst to ordener. Fra disse vinkler, fra lysets bølgelængde og fra gitterligningen kan du nu bestemme CD'ens rilleafstand, som er det samme som gitterkonstanten.

Hvis du får tid kan du eventuelt undersøge en DVD.

Et lille problem som vi har undgået at tale om, men som kan forstås ud fra hvad vi har lært: CD'en er lavet af polycarbonat som nok har $n \approx 1.5$. Inde i CD'en, hvor rillerne er, er bølgelængden altså mindre! Men heldigvis: lyset bliver jo også brudt når det går ud fra CD'en til luften og brydningsloven indeholder også sin til vinklen og ... tja regner man det igennem, så passer det vi har gjort her alligevel. Prøv selv hvis du har mod på det!

DET ELEKTROMAGNETISKE SPEKTRUM

Virkeligheden?

Vi har tidligere nævnt, at lys er elektromagnetiske bølger. Hele vores virkelighedsopfattelse er baseret på vore sanser. For synets vedkommende, så kan vi tilfældigvis se elektromagnetisk stråling i bølgelængde intervallet 400 - 700 nm og vores øjne har tilfældigvis synsceller for de tre farver blå, grøn og rød (ligesom prikkerne på TV'et). Nogle dyr har helt anderledes sansning af lys! Deres "virkelighed" er forskellig fra vores. Mange astronomiske billeder er optaget ved bølgelængder vi selv overhovedet ikke kan se. For eksempel kan man ikke med synligt lys se ind til kernen af vores egen galakse mælkevejen. Fordi lyset ikke kan trænge igennem støvet. Men man kan "se" med et radioteleskop, der modtager radiobølger med en bølgelængde på 21 cm. Disse bølger udsendes af neutral brint. Solen kan man heller ikke se igennem, men "ser" man med røntgenstråler - som satellitten Chandra - så kan man se langt "ind" i solen. Radioteleskopet og satellitten er på en måde udstyret med "øjne", der er følsomme for elektromagnetiske bølger med andre bølgelængder end vores øjne kan se.

Former for elektromagnetisk stråling

Det elektromagnetiske spektrum er betegnelsen for al elektromagnetisk stråling. Vi kender forskellige former for elektromagnetisk stråling under forskellige navne afhængigt af bølgelængden.

type af stråling	bølgelængde i m
gammastråling	
røntgenstråling	
ultraviolet lys	
synligt lys	
infrarødt lys	
mikrobølger	
radiobølger	

I databogen findes en oversigt over elektromagnetisk stråling. Her kan man finde bølgelængde, frekvens (og energi som vi ikke har lært om endnu). Man kan finde hvilke fysiske processer, der frembringer denne stråling og hvordan man teknisk fremstiller den.

Opgave 11

Find ved hjælp af databogen typiske bølgelængder for strålingen i tabellen ovenfor

Opgave 12

Der findes tre typer ultraviolet lys. Undersøg vha. databogen hvilket bølgelængde område der er tale om og hvilke virkninger denne stråling har. Skriv nedenunder:

Gammastråling skyldes kerneprocesser. Det lærer vi om i kernefysik. Anvendes f.eks. ved strålingsbehandling af kræft.

Røntgenstråling skyldes elektronovergange i de inderste elektroner i atomet. Det lærer vi mere om i atomfysik. Anvendes medicinsk til røntgenfoto.

Ultraviolet stråling er traditionelt området fra 200 - 400 nm. Det skyldes, at lys med mindre bølgelængde end 200 nm stoppes meget effektivt af atmosfæren. Hvis vore øjne virkede i området fra 100 - 200 nm ville vi ikke kunne se ret langt væk!

Synligt lys er i området 400 - 700 nm. Både synligt lys og ultraviolet lys skyldes at elektroner i de yderste baner skifter bane (det kaldes også elektronovergange).

Infrarødt lys skyldes varmestråling. Varmestrålingen giver altid et kontinuert spektrum. Det er varmestråling, man mærker fra kogepladen og fra Skt. Hans bålet. Jo varmere en ting er, desto mere kortbølget bliver varmestrålingen. Når temperaturen stiger bliver en ting først rød, så orange, og så hvid. Den bølgelængde der har mest intensitet i varmestrålingen afhænger af stoffets absolutte temperatur således

$$\lambda_{\max} \cdot T = 3000 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Wiens forskydningslov

En iod-kvarts pære har en temperatur på ca. 3000 K og λ_{\max} er da $1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$. Derfor falder kun en lille del af lyset i det synlige område men man kan mærke, at det varmer. For en almindelig pære er det endnu mindre af energien der udnyttes da temperaturen er lavere.

Solen har en temperatur på ca. 6000 K. Det svarer til $\lambda_{\max} = 0.5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$, altså midt i det synlige område. Endnu varmere stjerner har mindre λ_{\max} og de synes da blå, f.eks. Sirius. Et menneske har en temperatur på ca. 300 K. Dette giver $\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$. Kvælerslanger har omkring munden nogle sanseceller, der registrerer denne varmestråling. Da de selv har omgivelsernes temperatur kan de i mørke finde et varmblodigt dyr.

DEMO: infrarød stråling

Vi anvender her et termoelement. Når det bestråles med varmestråling varmes det lidt op og dette giver en elektrisk spændingsforskel som vi måler.

Mikrobølger er radiobølger med bølgelængder på ca. 1- 10 cm. Kendt fra mikrobølgeovne samt fra kommunikationsudstyr.

Radiobølger frembringes altid af elektrisk ladning, der accelereres. De antenner, man anvender for at sende (eller modtage) bølgerne har typisk en fysisk udstrækning på $\frac{1}{2}$ til 1 bølgelængde. Bølgelængden for langbølge radio er flere tusinde meter. Radiotransmission foregår ved, at man udsender en radiobølge med en høj frekvens - ellers bliver antennen for stor. Bølgen er en ren sinusbølge. for langbølge og mellembølge radio (Amplitude Modulation = AM) varierer man signalets amplitude i takt med lydfrekvensen af det signal, der udsendes. For FM radio (Frekvens Modulation) ændrer man i stedet frekvensen. På den måde får man plads til flere "kanaler" og kvaliteten bliver bedre. For TV bruger man også amplitude modulation.

LYD

Lydbølger i luft og vand er longitudinale bølger. Bølgen består i en gradvis vekslen mellem sammenpresning og fortynding af stoffets molekyler. Lydbølger i faste stoffer kan derimod godt være transversalbølger. Find lyshastigheden fra databogen i følgende stoffer

Stof	Lydhastighed i m/s
luft 20°C	
luft 0°C	
helium	
kuldioxid	
vand 20°C	
træ \perp fibre	
træ \parallel fibre	
jern	

Opgave 13

En blokfløjte har en længde på 30 cm, hvilket svarer til $\frac{1}{4}$ af en lydbølge. Beregn tonehøjden (= frekvensen) af fløjten i luft ved 20°C, i luft ved 0°C, i helium og i kuldioxid.

Det menneskelige øre kan høre frekvenser i området fra ca. 20 Hz til ca. 20 kHz, men det varierer fra person til person og især nedsættes øvre grænse stærkt med alderen.

Opgave 14

Hvis man i opgave 11 har en fløjte, der har en frekvens på 20 kHz i luft ved 20 °C, hvilken længde har den så. Hvor mon man typisk finder denne længde på et menneske?

DEMO: Ørets frekvensområde

Lydintensitet og lydtryksniveau

Ved lydens intensitet I forstås den energi, som af lydbølgen transporteres pr. kvadratmeter pr. sekund. Enheden er da W/m^2 . Det menneskelige øre kan høre lyde med intensiteter fra $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ til ca. 100 W/m^2 som er smertegrænsen. Dette er et helt utroligt område, der går over 14 størrelsesordener. Man bruger derfor gerne et andet mål for lydstyrke, nemlig **lydtryksniveauet**. Kaldes intensiteten af lyden for I og så er lydtryksniveauet defineret som

$$\text{Lydtryksniveau} = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

lydtryksniveauet angives i dB, som er et logaritmisk mål, ikke en enhed.

Eksempelvis svarer intensiteten 10^{-8} W/m^2 til lydtryksniveauet $10 \cdot \log(10^{-8} \text{ W/m}^2 / 10^{-12} \text{ W/m}^2) = 10 \cdot \log 10^4 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ dB}$ som svarer til niveauet i en dagligstue eller på et bibliotek.

DEMO: lydtryksmåler

Brug databogen til at finde typiske dB-værdier for forskellige lydkilder

dB	lydkilde
0	høretærskel
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	smertetærskel.

Eksempel

En sanger synger med lydtryksniveauet 100 dB. Med hvilket niveau synger to identiske sangere. Det der fordobles her er intensiteten. Den kan vi for én sanger bestemme til 10^{-2} W/m^2 . Prøv. Derfor er den for to sangere $2 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$. Indsættes dette i definitionen af lydtryksniveau får vi et niveau fra to sangere på

$$\begin{aligned} 10 \cdot \log(2 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2 / 10^{-12} \text{ W/m}^2) &= 10 \cdot \log(2 \cdot 10^{10}) \\ &= 10 \cdot \log 2 + 10 \cdot \log 10^{10} = 3 \text{ dB} + 100 \text{ dB} = 103 \text{ dB} \end{aligned}$$

Fordobles intensiteten, så øges lydtryksniveauet med 3 dB

Opgave 15

Én sanger synger med lydtryksniveauet 80 dB. Med hvilket lydtryksniveau synger et kor på 100 sådanne sangere?

Hørestyrke

Det menneskelige øres følsomhed varierer med frekvensen og med lydens intensitet. Det betyder, samme intensitet høres som en kraftigere lyd hvis den har frekvensen 1 kHz end hvis den har frekvensen 100 Hz. Dette gælder kun for ret lave intensiteter. For høje intensiteter høres de to lyde som lige kraftige! Dette illustrerer, at hørelse er et meget komplekst fænomen. Man kan i databogen finde en graf over hørestyrke, der viser dette fænomen.

Ud over pensum

Uden for pensum til fysik vil jeg pege på et par computer animationer (Java applets) som er absolut seværdige og som med lethed demonstrerer fysiske fænomener, der ellers er svære at forstå.

Fouriersyntese

Enhver periodisk funktion (som de fleste lydsignaler) kan efter en matematisk sætning af Fourier skrives som en sum af sinusbølger med heltallige forhold mellem frekvenserne. F.eks. kan en tone skrives som en sum af sinusbølger med frekvenserne 1·100 Hz, 2·100 Hz, 3·100 Hz osv...I musikken siger man, at 100 Hz er grundtonen og at de andre er overtoner. I animationen på linket <http://www.toender-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/sound/sound.html>

kan man selv bestemme grundtonen og styrken af overtonerne. Samtidig med at man kan høre resultatet, så kan man se den resulterende graf for lyden. Læg mærke til, at vi kalder det samme tone uanset hvordan man varierer overtonerne. Ja, man kan endda slukke for grundtonen og stadig "høre" den - dette er for eksempel også tilfældet med den menneskelige sangstemme i det lavere leje.

Overlydsbrag og Doppler effekt.

En flyvemaskine udsender lyd. Det opleves som larm. Men hvis den flyver med lydens hastighed, så hører man et brag, efter at den er passeret. Flyveren er en lyd giver, der bevæger sig og de bølger, som den udsender bliver påvirket af dens egen bevægelse. Brug animationen på linket

<http://www.toender-gym.dk/mbs/fysik/ntnujava/Doppler/Doppler.html>

til at finde ud af hvad overlydsbraget skyldes.

En anden effekt man kan bruge samme animation til at undersøge er Doppler effekten. Når en ambulance kører forbi, så oplever man at sirenelyden har højere frekvens når ambulancen kommer nærmere og at lyden har lavere frekvens når ambulancen fjerner sig. Sæt lyd giverens hastighed i animationen til at være ret lille og husk, at frekvensen af lyden er det antal bølgefronter, der passerer en fast iagttager pr sekund. Du kan eventuelt forsøge at udlede en formel for den frekvens, som iagttageren hører ud fra lydhastigheden og ambulancens hastighed.

Fredensborg, den 14 juli 2001
Ove Christensen

FORMLER

Sammenhæng mellem frekvens og periode

$$f = \frac{1}{T} \quad . \quad f \text{ måles i Hz} = 1/\text{s}, T \text{ måles i s}$$

Bølgeligningen

$$v = \lambda \cdot f \quad v \text{ er bølgehastighed i m/s, } \lambda \text{ er bølgelængde i m}$$

Dobbeltspalten

Plet nummer n er afbøjet med vinkel v_n givet ved $\sin v_n = \lambda/d$

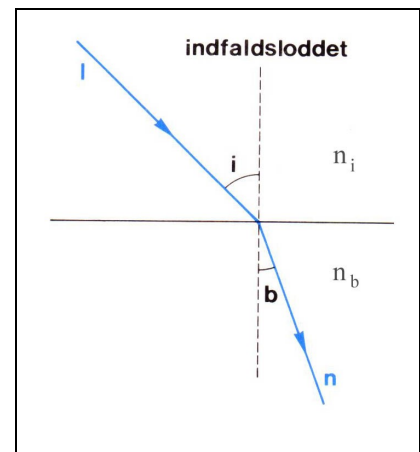
Spejlingsloven

- spejlingsvinkel = indfaldsvinkel
- den indfaldende stråle, den brudte stråle og indfaldsloddet ligger i samme plan.

Brydningsloven siger, at når lyset går fra et stof med brydningsindeks n_i til et stof med brydningsindeks n_b , da er sammenhængen mellem **brydningsvinkel b** og **indfaldsvinkel i** givet ved - se tidligere figur

$$\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{n_b}{n_i}$$

Jo større stoffets brydningsindeks er, desto tættere ligger strålen på indfaldsloddet



Totalreflektion

$$\sin i_g = \frac{n_b}{n_i}$$

$$n_b < n_i$$

Gitterligningen

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin v_n$$

n = orden, λ = bølgelængde,
 d = gitterkonstant, v_n =

afbøjningsvinkel

Spektret af synligt lys

blå	grøn	rød
400 nm	500 nm	600 nm
700 nm		

$$\text{Lydtryksniveau} = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

I er intensiteten i W/m^2 og $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

STUDIESPØRGSMÅL

Den teoretiske del af pensum er dækket ind i disse spørgsmål. Det er hensigten, at man skal kunne repetere efter dem. Lad derfor være med at skrive svarene på spørgsmålene her - man lærer ikke så meget af at læse et svar som ved at finde det selv!

Bølgefænomener

1. Angiv nogle periodiske fænomener.
2. Hvordan defineres perioden
3. hvordan defineres frekvensen?
4. hvad er enhed for periode og for frekvens
5. hvad er sammenhæng mellem periode og frekvens.
6. udled bølgeligningen
7. beskriv forskellige typer elektromagnetiske bølger og angiv deres bølgelængde og frekvens.
8. forklar longitudinal og transversal bølge og giv nogle eksempler på disse.
9. hvordan karakteriseres en harmonisk bølge?

Interferens

10. hvad er interferens og hvilke regler gælder der for interferens?
11. lav en tegneserie med interferens mellem to bølger, der går ind mod hinanden.
12. skitser bølgefronter for en plan bølge og for en elementarbølge.
13. hvordan kan man finde udbredelsesretningen ud fra et foto af en bølge?
14. beskriv konstruktiv og destruktiv interferens.
15. hvad er betingelsen for konstruktiv og destruktiv interferens mellem bølger fra to ens bølgegivere?
16. skitser interferensmønsteret mellem bølger fra to ens bølgegivere.
17. forklar Huygens' princip.
18. skitser bølgefronter fra dobbeltspalten og forklar, hvorfor pletterne optræder. Giv betingelsen for konstruktiv interferens.
19. udled for dobbeltspalten den matematiske formel for afbøjningsvinklen for plet nummer n .
20. forklar forsøget for dobbeltspalten.

Lys

21. forklar spejlingsloven
22. giv eksempel på konstruktion af et spejlbillede.
23. hvad siger Fermats' princip?
24. hvordan defineres brydningsindekset?
25. hvad siger brydningsloven?
26. skitser eksempler på tommelfingerreglen
27. skitser lysets gang ned gennem atmosfæren idet det vides, at luftens brydningsindeks vokser ned mod jorden.
28. forklar proceduren i forsøget med at bestemme brydningsindeks for glas.
29. udled brydningsloven!
30. forklar hvad det fysiske fænomen totalreflektion er og hvilken betingelse der er for totalreflektion.
31. udled formlen for grænsevinklen ved totalreflektion.
32. forklar hvordan det optiske gitter virker og skitser herunder bølgefronter.
33. hvad er karakteristisk for 3die ordens pletten?
34. udled gitterligningen
35. hvor mange ordener kan der højst være for givet d og λ ?
36. for givet n og d , hvordan ændres v_n når λ øges
37. for givet λ og n , hvordan ændres v når d bliver mindre?

Spektre

38. skitser spektret for synligt lys. Angiv farve og bølgelængde.
39. skitser brydning af hvidt lys i et gitter.
40. angiv nogle lyskilder med kontinuerte spektre.
41. angiv nogle lyskilder med linespektre.

Lyd

42. angiv lydets hastighed i luft, i vand og i jern.
43. hvilket interval af frekvenser kan et menneske høre?
44. i hvilken enhed måles lydets intensitet?
45. hvordan defineres lydtryksniveau?
46. et orkester spiller med et lydtryksniveau på 90 dB. Med hvilket niveau spiller så 4 orkestre?