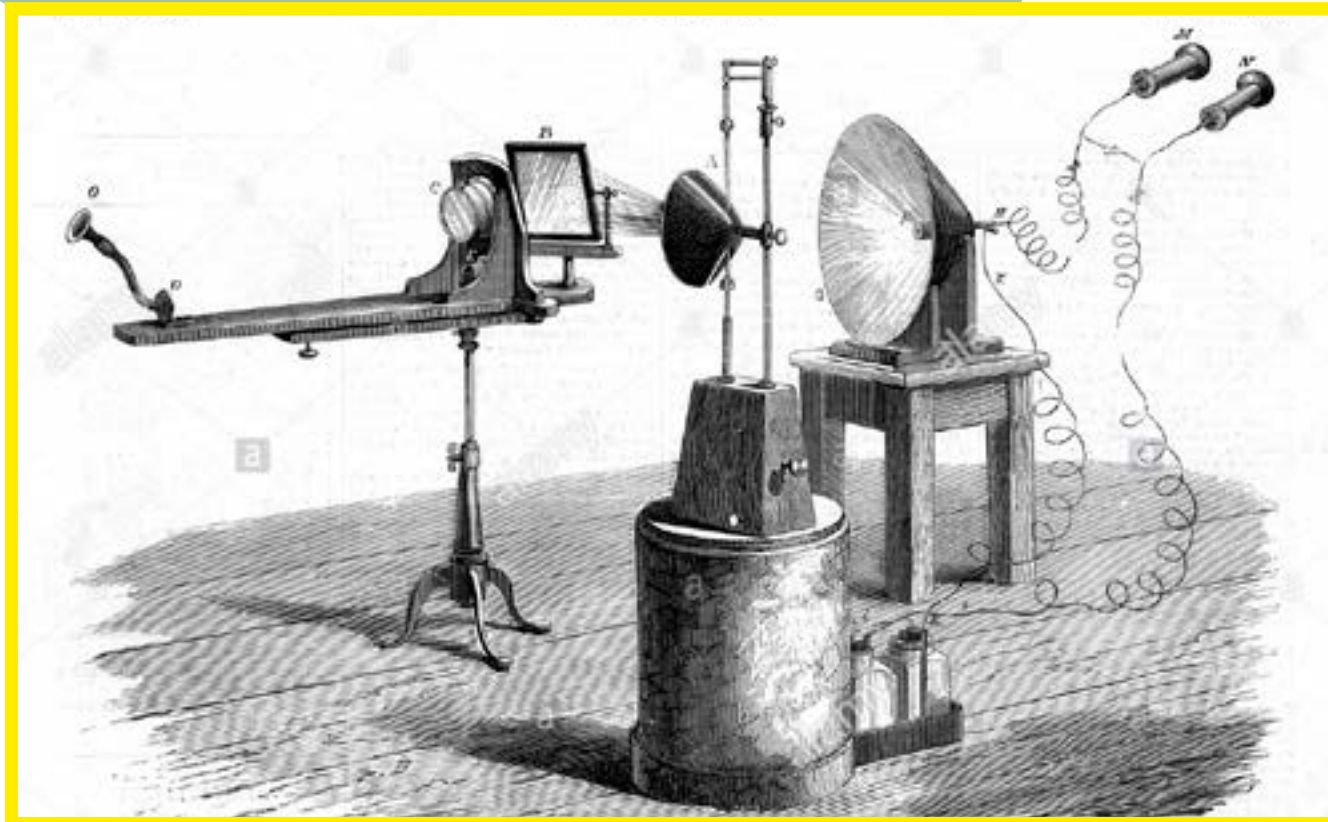


# FOTOFONEN

- Et projekt på **Skramloteket**  
sponseret af **Novo Nordisk Fonden**



# HVORFOR FOTOFONEN?

## **DU KENDER MÅSKE MANDEN BAG TELEFONEN?**

Hans navn var Alexander Graham Bell!

Det er ham, som du skal takke for at have opfundet forfaderen til din smartphone. Men der er mere du kan takke ham for. Alexander Graham Bell opfandt nemlig også fotofonen. Fotofonen er ifølge Bell hans allerstørste opfindelse. Nu tænker du måske, at sådan en tingest har du da aldrig hørt om, men fotofonen er et apparat, der kan overføre lyd via lys. Og faktisk er overførelsen af lyd og data via lys grundlaget for nærmest al vores kommunikation i dag. Det er fx det du benytter, når du bruger din telefon.

Signalet fra din telefon bliver sendt trådløst til en mast. Herfra bliver det lavet om til lysglimt, der sendes afsted igennem en lysleder. Det lyder måske ret vildt - og det er det faktisk også. Derfor vil du igennem dette undervisningsmateriale lære om alt lige fra historien om fotofonen og helt frem til den lyslederteknologi, som idag bruges til at sende data.

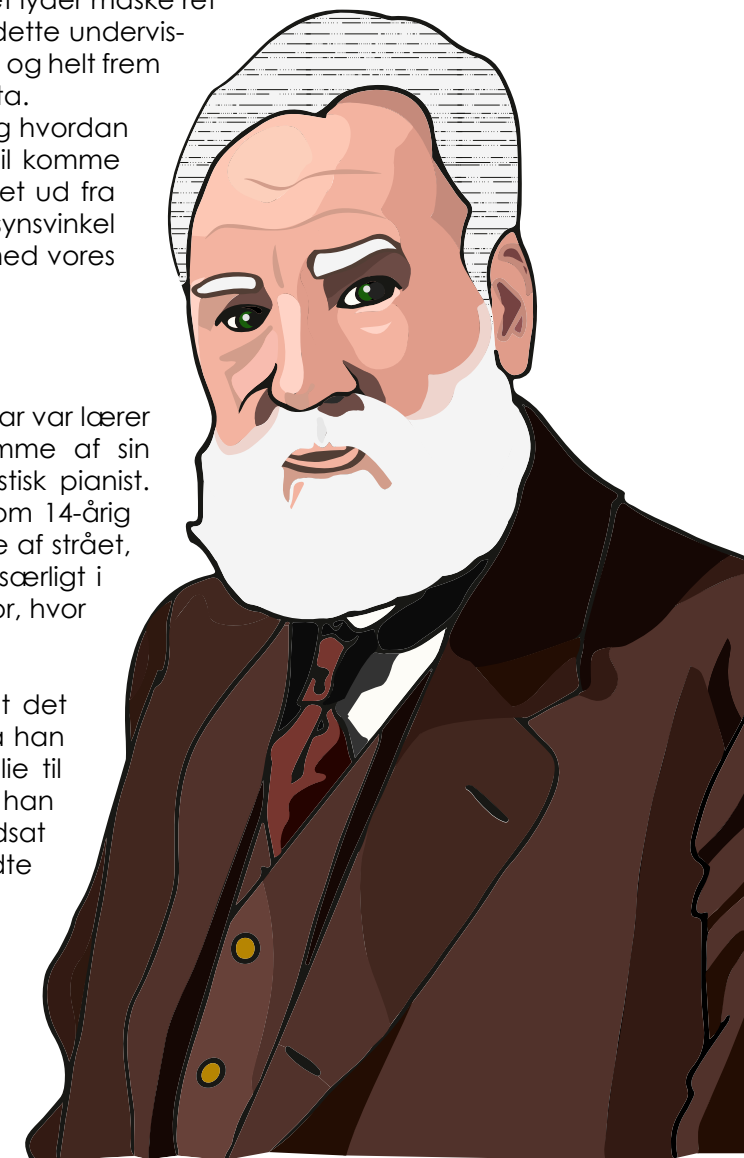
Du vil lære om fysikken bag fotofonen, om hvad lys er og hvordan man kan sende lyd eller data ved hjælp af lyset. Du vil komme igennem fotofonentechnologiens betydning for verden set ud fra et geografisk perspektiv. Og så vil du ud fra en biologisk synsvinkel lære, hvordan vi mennesker kan opfange information med vores egne lysmodtagere.

## **FOTOFONENS HISTORIE**

Alexander Graham Bell blev født i Skotland i 1847. Hans far var lærer på universitetet og Alexander blev undervist derhjemme af sin far. Hans mor var døv, men var dog stadig en fantastisk pianist. Alexander begyndte i en tidlig alder at opfinde ting. Som 14-årig opfandt han en maskine til at hjælpe med at få kornene af strået, når man havde høstet. Det lyder måske ikke af noget særligt i dag, men dengang kom det til at have stor betydning for, hvor hurtigt høsten kom i hus.

Alexander udviklede en stor interesse for lyd og særligt det at kunne hjælpe døve eller folk med nedsat hørelse. Da han var færdig med sin uddannelse, rejste hele hans familie til Canada. Her arbejdede han med at undervise døve, og han byggede endda sin egen skole for døve og folk med nedsat hørelse. Det var i forbindelse med sit arbejde, at han mødte sin kone, som også var døv.

Bell begyndte at eksperimentere med lyd. Først fik han lavet telefonen, og vi godt kan blive enige om, at det var en pænt stor opfindelse, eftersom det var første gang, at man kunne overføre tale gennem en ledning. På det tidspunkt var det bedste man havde til at kommunikere med over lange afstande morsesystemet. Men i vores historie er det opfindelsen af fotofonen, der er interessant.



Figur 1: Alexander Graham Bell 1847-1922

## **Skramloteket**

Norgesgade 3, 2. sal  
2300 København S

Tlf: 93 10 04 44

skram@skramloteket.dk

www.skramloteket.dk

Se også Skramloteket på facebook

## FOTOFONEN SER DAGENS LYS

Den 3. juni 1880 overførte Alexander Graham Bell en lydbesked over en lysstråle ved hjælp af sin ny-opfundne foton. Det var første gang, at man overførte lyd ved hjælp af lys. Den første besked blev sendt over 213 meter, og det blev startskuddet til en helt ny måde for mennesker at kommunikere på over lange afstande. Der gik dog en hel del år, før teknologien for alvor kom til sin ret - så lad os først starte med at se på den oprindelige foton.

Fotofonen er bygget op af to dele; en sender og en modtager. Fig. 3A-F viser Bells foton, som bestod af et spejl (fig. 3C), der reflekterede solens lys (fig. 3D). På spejlet var monteret en tragt (fig. 3A), og når man talte ned i tragten overførtes trykbølgerne fra talen, hvilket fik spejlet til at vibrere. Disse vibrationer blev overført til den reflekterede lysstråle, der således "pulsede" i takt med talen. Modtageren (fig. 3E) bestod af en lysfølsom modstand lavet af stoffet selen. Selen-modstanden var placeret i et kredsløb forbundet med en højttaler. Når modstanden i selen ændrede sig på grund af svingningerne i lyset, medførte det en påvirkning af højttaleren (fig. 3F) i takt med ændringerne i lyset, således at det gav en gengivelse af den tale, der startede i tragten.

Hvorfor blev fotofonen ikke et kæmpe hit? Ja, det er den jo teknisk set blevet, men først da vi mennesker begyndte at lave elektronik, som kunne forstærke den lyd, der kom fra modtageren. Endnu bedre er det blevet, efter vi blev i stand til at producere kraftigere lyskilder, såsom laseren.

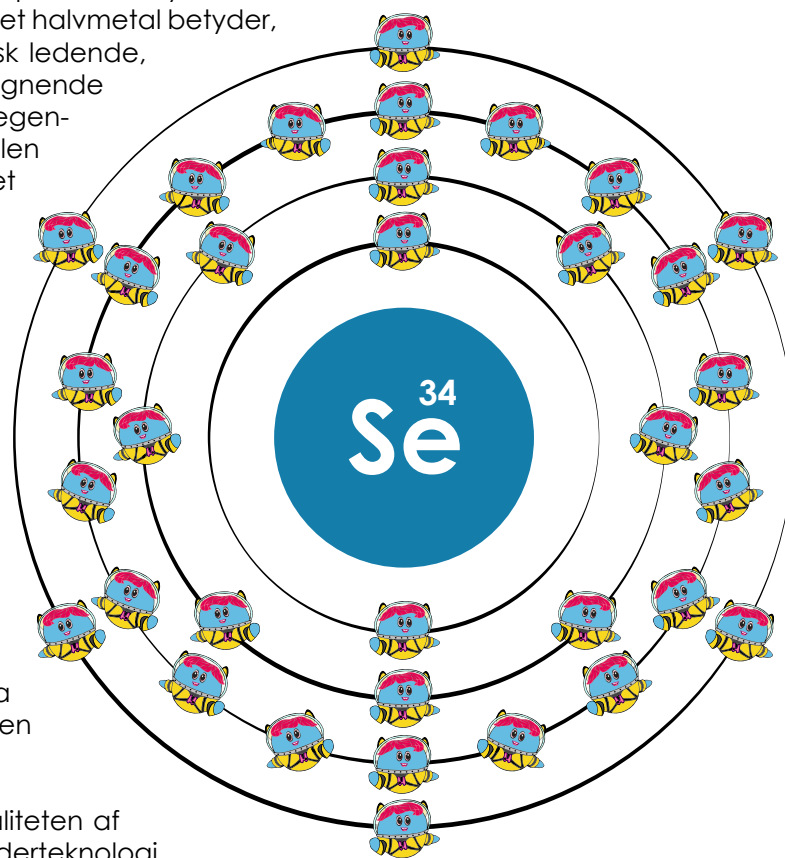
## GRUNDSTOF NR. 34: SELEN

Som beskrevet, var det grundstof Bell brugte i den oprindelige foton selen (fig. 2).

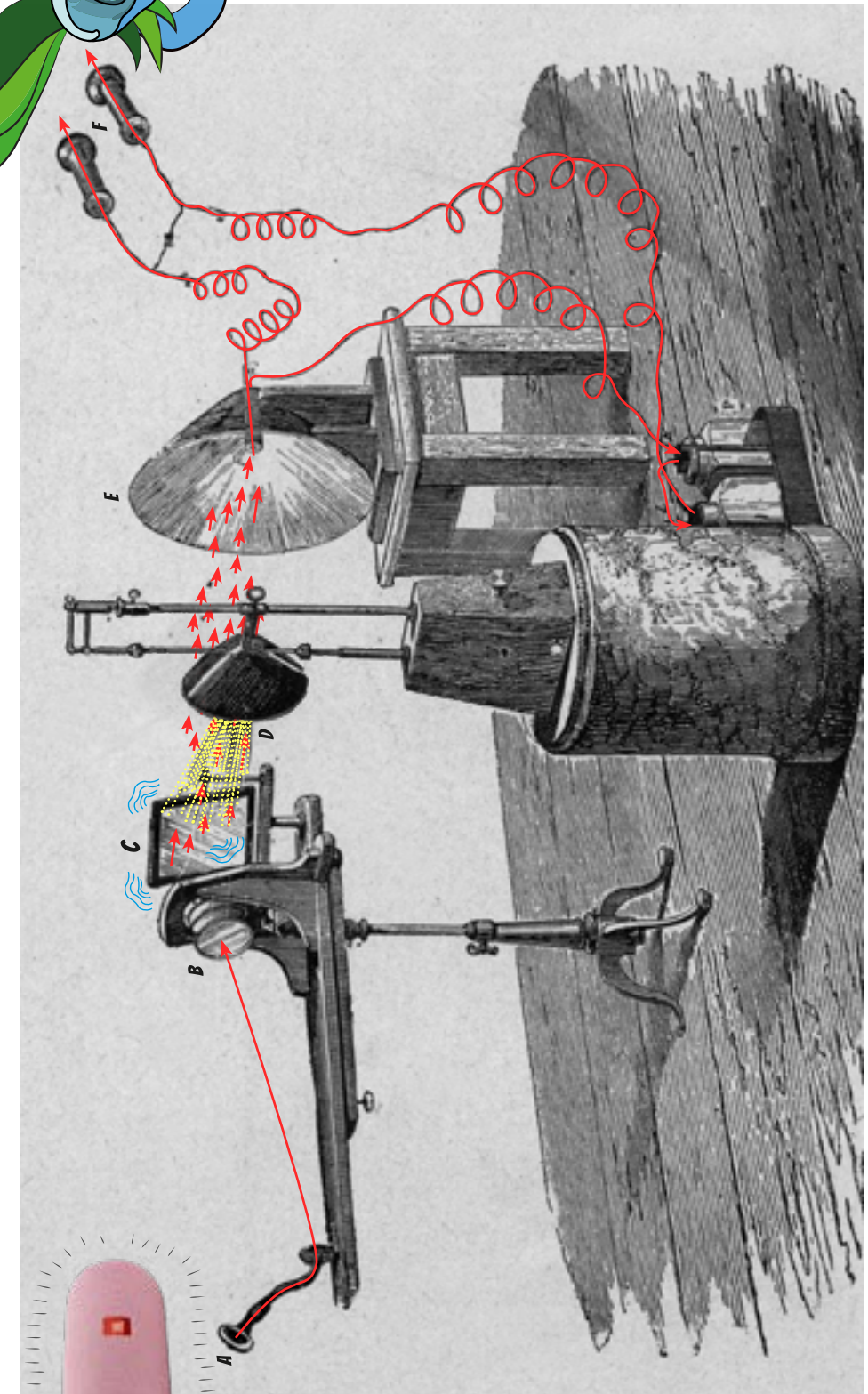
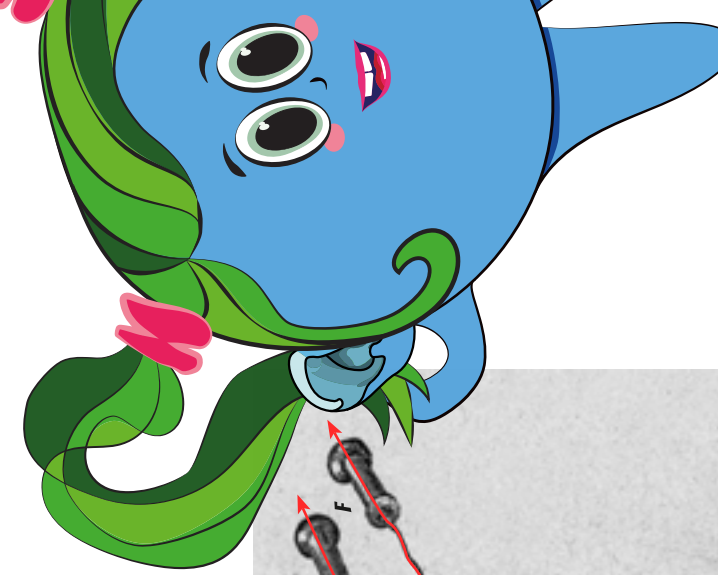
Selen er grundstof nr 34 i grundstoffernes periodiske system. Det betegnes Se og er et halvmetal. At det er et halvmetal betyder, at det som udgangspunkt ikke er elektrisk ledende, men at det i nogle tilstande har metallignende egenskaber. Selen har fx fotoledende egenskaber i dets  $\alpha$ -tilstand. Det betyder, at selen kan blive mere elektrisk ledende, hvis det optager elektromagnetisk stråling fra eksempelvis synligt, ultraviolet eller infrarødt lys. Det var lige præcis derfor, at Bell brugte selen i modtageren i hans foton.

Udover at have fotoledende egenskaber indgår selen også i moderne teknologi og i biologiske processer. Selen bruges fx til fremstilling af nogle typer af solceller. Selen indgår også i nogle antioxidant enzymer. Derudover findes det i nogle planter, som et forsvar mod at blive spist. Selen kan nemlig være giftigt i sin krystalform, og derfor er der nogen planter, som optager ekstra meget selen, så de bliver giftige og på den måde kan undgå at blive ædt.

Selen bruges iverigt også til at højne kvaliteten af glas - og det er jo lidt sjovt, da den lyslederteknologi, vi anvender i dag, fungerer ved at sende lys igennem tynde glastråde.



Figur 2: Selenatomets struktur



Figur 3: Bells foton fra 1880  
A) Lydsender (tragt). B) Transmitter. C) Spejl. D) Lyskilde  
E) Lysfølsom modtager - her selen. F) Lyden kommer ud gennem højttaleren



# INDHOLD

## **MANDEN BAG FOTOFONEN** ..... 3

## **LYSLEDERTEKNOLOGIEN** ..... 8

Den moderne kommunikationsvej  
Lysledere - typer & kvalitet  
Lyslederens problemstillinger  
Absorption & scattering  
Glaskvalitet & fremstilling  
Grundstof nr. 14: Silicium

## **LYSETS EGENSKABER** ..... 14

Men hvad er lys?  
Elektromagnetiske bølger  
Lys som partikler  
Lyset kommer fra atomerne

## **ALMEN BØLGETEORI** ..... 19

Bølger & svingninger?  
Bølgelængde, frekvens & amplitude  
Bølgeformel  
De to bølgetyper

## **LYSLEDERTEKNOLOGI & GEOGRAFI** ..... 24

Kan man leve uden  
Globalt netværk  
Globalt kommunikations netværk: en del af FN's verdensmål  
En skæv fordeling  
Forurening

## **HVORDAN SER MAN LYSET** ..... 27

Hvad har fotofonen og vores øje til fælles  
Øjets evolution  
Lysfølsomme celler  
A-vitamin

## **MENNESKE ØJETS OPBYGNING** ..... 27

Lysets vej gennem øjet  
Muskler  
Iris & pupil  
Øjets to kamre  
Nethinden  
Stave & tappe  
Tapetlaget

## **SKRAMLOTEKETS FOTOFON** ..... 34

Hvad så nu?

Hej allesammen. Mit navn er Ellen Elektron og jeg er her for at guide jer gennem dette kompendium om fotofonen.

Min opgave er at hjælpe med at forklare nogle af de svære ord og komme med eksempler og fakta undervejs.

Jeg vil desuden enkelte steder bruge videoer som enten kan ses i den online version (direkte eller ved QR kode) eller på Skramlotekets hjemmeside.



# LYSLEDERTEKNOLOGIEN

## DEN MODERNE KOMMUNIKATIONS VEJ

Den første teknologi, man anvendte til at kommunikere over store afstande, var trådtelegrafien. Det var amerikaneren Samuel Morse, som opfandt den første velfungerende telegrafi. Hans morsenøgler og tilhørende telegrafsystem blev præsenteret i 1848. Herefter erobrede trådtelegrafien verden med lynets hast!

I 1866 blev det første telegrafkabel under Atlanterhavet færdigt. Det blev nu muligt at sende telegrammer fra Nordamerika til Irland og herfra videre til Europa. Kommunikation på tværs af kloden havde nået en ny æra. Telegrafkabler blev lagt ned i verdenshavene og kunne i sin udstrækning med tiden nå syv gange rundt om jorden. Sideløbende blev der lagt mere end 1 million km landlinjer. Senere udvikledes den trådløse telegrafi, og verden blev yderligere forbundet! I dag sker kommunikationen rundt i verden på en lidt anderledes måde.



Figur 4: Historisk udvikling af kommunikationsteknologien

### Tit har vi her på Skramloteket spurgt elever:

1. Hvordan kan det lade sig gøre, at du kan ringe til din tante i Australien?
2. Hvordan kan det lade sig gøre, at du kan se en japansk hjemmeside på en computerskærm få sekunder efter, at du har tastet adressen?

Svarene er mange, men ofte svarer eleverne, at det går via satellitter.

Det er faktisk ikke et helt forkert svar, eftersom en del af kommunikationen i dag foregår via satellitforbindelser. Men langt det meste går faktisk via kabler! Signalerne er dog ikke længere elektriske impulser i en kobbertråd, men lysglimt i en glastråd (fig. 5).

Nutidens enorme kommunikationsnetværk består af de mere end 2 milliarder km lyslederkabler, som er blevet nedlagt over hele kloden. De er grundlaget for al mobiltelefoni, datatrafik, videooverførsler og meget andet.

Teknologien bag lyslederteknikken (nemlig fonfonen) blev opfundet allerede i 1880 af Alexander Graham Bell. Hans fotofon overførte tale analogt. Den fotofon, du har bygget på Skramloteket, fungerer på samme måde.



Figur 5: Laserlyset bevæger sig igennem glasspiralen, stort set uden at bryde ud

At noget overføres analogt betyder, at musikens svingninger (eller anden form for lyd) overføres direkte til lys, som svinger i intensitet efter lyden. Lyset fra afsenderapparatet rettes mod modtageren, hvor det rammer en lysfølsom diode. Her laves lyset om til en strøm, der svinger på samme måde som lyset. Når man tilslutter en højttaler til modtagerapparatet, kan man herefter høre den overførte musik!

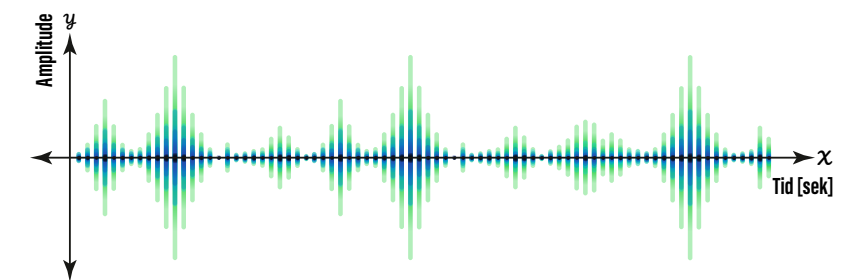
I den moderne lyslederteknologi fungerer overførslen af lyd lidt anderledes. Informationer via lys overføres ikke længere analogt men digitalt. Hvis du fx lytter til en streamingtjeneste som Spotify, så kommer musikken fra deres server i første omgang via et lyslederkabel frem til en 4- eller 5G antenne. Herfra sendes musikken videre til din mobil med en elektromagnetisk bølge.

I lyslederen er musikens svingninger omsat til koder i det binære talsystem (computersprog) dvs. lange koder af 0 og 1-taller. Hvert punkt i en svingningskurve er defineret og således overføres musikken helt frem til din mobil, som herefter omsætter koderne til svingninger, så du kan høre musikken!

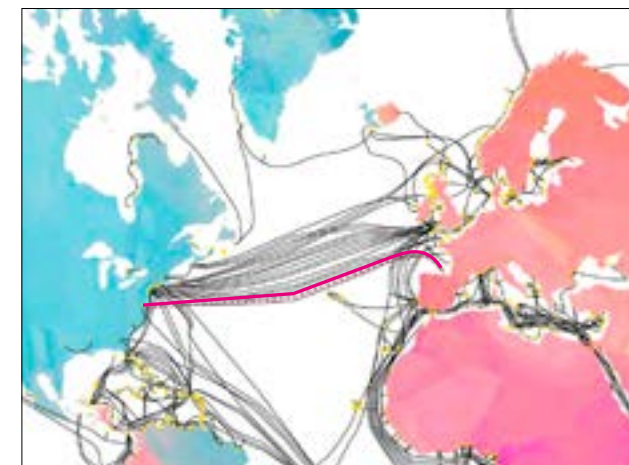
Lyslederteknologien bygger altså på overførsel af data via det binære talsystem. De lange rækker bestående af 0 og 1-taller sendes som lysglimt igennem en lysleder, dvs. tænd/sluk i lange lynhurtige sekvenser. Herunder ses et lydbillede af et stykke musik på et oscilloskop. Det skal forstås sådan, at Y-aksen viser lydets styrke (amplituden). Svingningens frekvens, der måles i hertz (Hz), kan aflæses som afstanden mellem to bølgetoppe. X-aksen angiver tiden der forløber målt i sekunder.

Når der sendes musik i høj kvalitet digitaliseres hvert sekund typisk i 40.000 punkter hvor amplitude og frekvens aflæses. Hvert punkt bliver så til en bit. Dvs. at punktet får værdien 0 eller 1, hvilket så betyder tænd eller sluk for et lysglimt (fig. 6).

Dette er muligt, fordi moderne computere kan kode store mængder af data til binære talkoder med lynets hast. Da lysglimt kan sendes i forskellige bølgeområder og hver overførsel kan kodes i tid, kan man sende enorme mængder af data samtidigt. Fx kan man sende mere end 500.000 mobiltelefonsamtaler på en gang i en enkelt glastråd! Alt som sendes via lysledere omformes digitalt. Det gælder både videoer, telefonsamtaler og diverse internetdata.



Figur 6: Viser hvorledes et stykke musik ser ud på et oscilloskop



Figur 7: Den røde streg er Marea søkablet mellem USA og Spanien

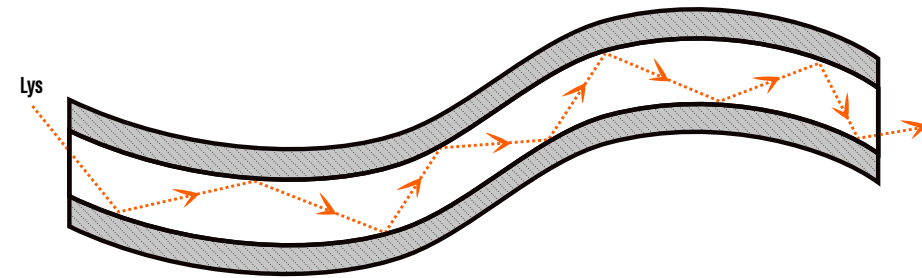
I Mareakablet (fig. 7) fra 2018, som går fra Virginia i USA til Bilbao i Spanien, kan der overføres mere end 71 millioner HD videoer samtidigt! Mareakablet er betalt af Microsoft, Facebook og det spanske telefon selskab Telefonica.

Mareakablet har en tykkelse på ca. 5 cm, hvoraf det meste består af en kobberkappe og anden beskyttelse af de indre glastråde, som udgør lyslederne. Kablet er ca. 6.600 km langt.

Nedlægning af søkabler er en meget specialiseret operation. Arbejdet udføres fra store skibe, som er specialdesignede til kabelnedlægning. Marea-kablet blev lagt ned i løbet af kun to måneder. På nogle strækninger ligger det på mere end 5.000 meters dybde.

Optiske glasfibre findes i forskellige udformninger, men de har ca. samme tykkelse som et hår. Glastrådene består af en kerne omgivet af en glaskappe. Yderst er der et beskyttende lag af plast. Lysglimtene løber via totalreflektion i kernen, hvor glaskappen medvirker til holde lyset inde (fig. 8).

Undervejs sker der en dæmpning af signalerne. Derfor er man nødt til løbende at forstærke signalerne, når de sendes over lange distancer. Nogle undersøiske kabler som f.eks. Mareakablet er derfor omsluttet af en kobberkappe, som forsyner forstærkningsmoduler med strøm undervejs på linjen. Der er forstærkningsstationer for ca. hver 100 km. De er monteret på selve kablet.



Figur 8: Her ses det hvordan lyset zig-zagger sig gennem lyslederen



En lysleder fungerer altså ved, at den lysstråle, der sendes igennem, „bouncer“ frem og tilbage på indersiden af glaskernen indtil den når frem. Undervejs vil signalet miste styrke. Derfor er der i kernen indbygget forstærkningsmoduler, som øger signalet.

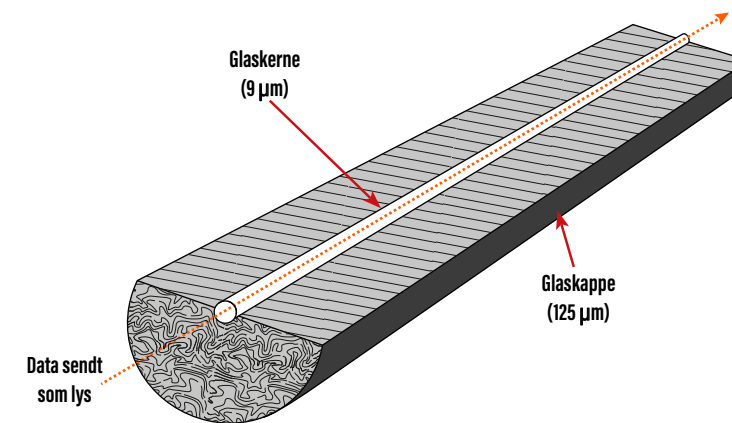
## LYSLEDERE - TYPER & KVALITET

Lysledere kan opdeles i to hovedtyper; single-mode og multi-mode fibre.

### Single-mode

Single-mode lysledere (fig. 9) har en meget tynd kerne og er bedst til langdistancetransmission. Denne type af lysleder har en meget lav dæmpning, hvilket betyder, at meget lidt lys tapes undervejs. Lyset kan bevæge sig op til 100 km, før signalet skal forstærkes. Den tynde kerne giver dog begrænsninger på mængden af signaler, som kan sendes på samme tid.

Single-mode fibre sender data via bølgelængder på 1310, 1550, 1625 og 1490 nm. Dvs via forholdsvis lange bølgelængder. Bemærk at de anvendte bølgelængder er uden for det synlige lys område (Synligt lys er fra ca. 380nm til 750nm).



Figur 9: Her ses hvordan lyset transporteres gennem en single-mode fiber

$\mu$   
My

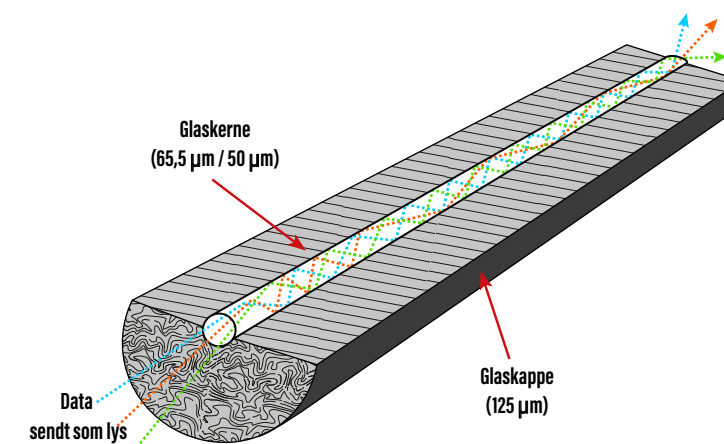
Det græske tegn for my ( $\mu$ ) bruges som enhed for størrelsen micro.

$1 \mu\text{m} = \frac{1}{1.000.000} \text{ meter}$

### Multi-mode

Multi-mode lysledere (fig. 10) bruges mest til at sende store datamængder over relativt korte afstande. Fx som forbindelsesled mellem store servere. Denne lysledertype kan overføre meget store mængder af signaler samtidigt. Bemærk at glaskernen er ca. 5 - 6 gange tykkere end i single mode fibre.

Den tillader flere bølgelængder og giver dermed en større båndbredde. Multi-mode fibre sender data via bølgelængder på 800 og 1300 nm. Den benytter altså kortere bølgelængder end single-mode fibren.



Figur 10: Her ses hvordan lyset transporteres gennem en multimode fiber



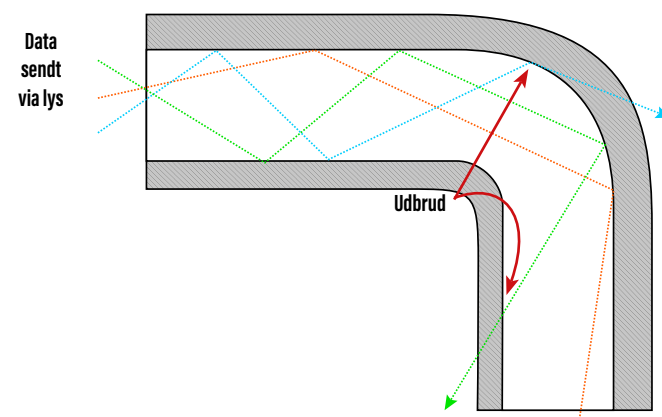
## ET PAR AF LYSLEDERENS PROBLEMSTILLINGER

Udfald (tab) af information fra lysledere kan skyldes macro- og microbending. Macrobending bruges om de steder hvor lyslederen bøjes i fx 90°. Her kan en del af lyset bryde ud af kernen, fordi den kritiske vinkel overskrides (fig. 11). I microbending derimod skyldes udfaldet en mindre bøjning eller deformation af lyslederen (fig. 12).

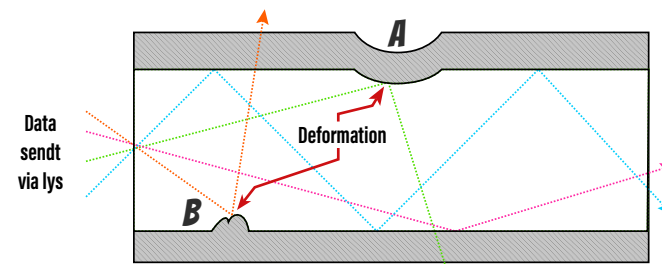
Den kritiske vinkel er afhængig af materialet. I tabel 1 kan du se den kritiske vinkel for en række stoffer fx glas. Overskrides den kritiske vinkel bryder der lys ud af lyslederen og det medfører informationstab.

Forskellige stoffers kritiske vinkel i forhold til luft	
Diamant	24°
Flintglas	37°
Kronglas	ca. 40°
Rudeglas	42°
Alkohol	47°
Vand	49°

Tabel 1: Forskellige mediers grænsevinkler



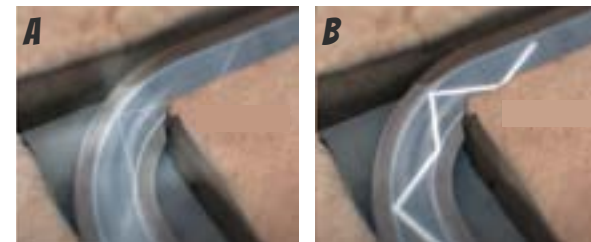
Figur 11: Macrobending i en lysleder der bukker 90°. Er lyslederen af dårlig kvalitet, sker udbrud af lys.



Figur 12: Microbending lysudbrud som følge af A) deformation udefra eller B) fejl i glaskernen (der ses udbrud ved orange og grøn pil pga. deformationerne).

### Macrobending

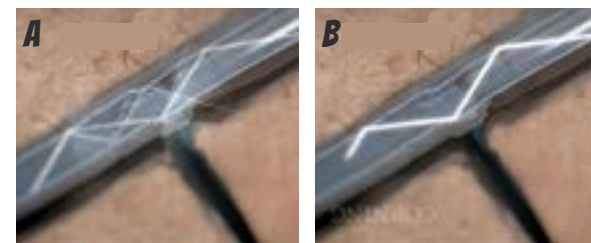
På fig. 13A og 13B ses macrobending i to lysledere af forskellig kvalitet. Som beskrevet ovenover sker der et tab af lys i lyslederen til venstre (fig. 13A), men ikke i den til højre (fig. 13B). Billederne er taget fra en reklame hvor firmaet ønsker at fremhæve den høje kvalitet af netop deres lysledere.



Figur 13: Viser forskellen på macrobending lysudbrud i lysledere af A) dårlig og B) god kvalitet.

### Microbending

Fig. 14A og 13B viser microbending i to forskellige lysledere. En mindre deformation giver et lille men skarpt knæk i glastråden. Lyslederen til venstre har en ringere kvalitet end den til højre og derfor sker der et uheldigt informationstab, da noget af lyset bryder ud af lyslederen (fig. 14A).



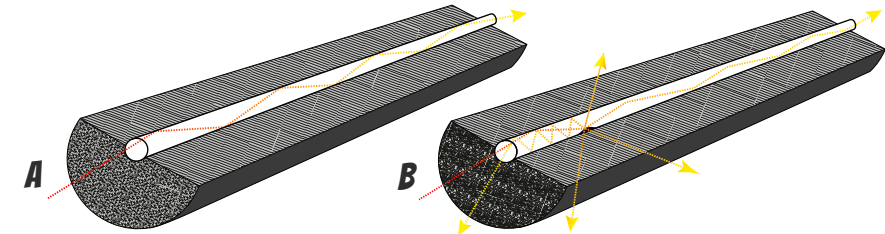
Figur 14: Viser forskellen på microbending lysudbrud i lysledere af A) dårlig og B) god kvalitet.

Macro- og microbending kan i høj grad undgås ved at benytte lysledere, som kan tåle bøjning og let deformation uden et stort tab af lys.

## ABSORPTION & SCATTERING

For at undgå informationstab, er det af afgørende betydning at lysledere fremstilles af meget rent glas. I praksis er det umuligt helt at undgå fremmede molekyler og atomer i glasset. Jo renere det fremstilles, des dyrere bliver det.

På tegningen til venstre (fig. 15A) ses hvordan lyset mister intensitet, idet partikler optager dele af fotonernes kinetiske energi (bevægelsesenergi). På tegningen højre (fig. 15B) ses et mere alvorligt sammenstød, hvor lysets fotoner helt ændrer retning og derfor bliver sendt ud af lyslederen.



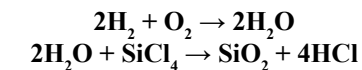
Figur 15: A) Viser hvordan lyset dæmpes undervejs i lyslederen. Meget rent glas giver en lille dæmpning. B) Urent glas kan føre til udbrud af lys, særligt hvis fotonerne støder ind i urenheder..

## GLASKVALITET & FREMSTILLING

Når man fremstiller undersøiske lyslederkabler anvendes en lysledertråd af meget rent glas. Den er op til 10 gange så ren, som den der anvendes på land. Derfor er søkabler også langt dyrere. Den høje glaskvalitet betyder, at afstanden mellem forstærkningsstationer kan blive længere fordi dæmpning og forstyrrelser minimeres.

Standard er dog stadig, at man anvender forstærkning for hver 100 km. I søkabler nedlægges forstærkningsstationer sammen med kablet og disse kan forsynes med strøm f.eks. fra en kobberkappe, som omslutter lyslederne, som i tilfældet med Mareakablet.

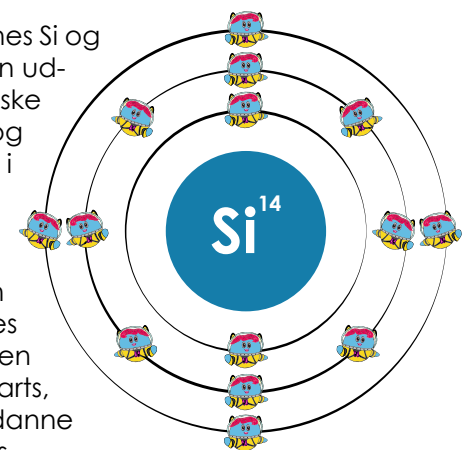
Nedenstående formel viser, hvordan glas fremstilles ved at to vandmolekyler reagerer med siliciumtetrachlorid hvilket giver saltsyre og siliciumdioxid, som er hovedbestanddelen i glas.



### GRUNDSTOF NR. 14: SILICIUM

Silicium (fig. 16) er grundstof nr 14 i det periodiske system. Det betegnes Si og er det man kalder et halvmetal. Silicium findes ikke frit i naturen, men udvindes af kvarts ved reduktion med kul under høj temperatur i elektriske ovne. Halvmetaller er grundstoffer med en blanding af metalliske og ikke-metalliske egenskaber. Et halvmetal har den egenskab, at det i nogle tilfælde leder elektrisk strøm og andre gange ikke gør. Derfor kaldes det også for en halvleder.

Krystallinsk silicium er et mørkegråt, stærkt glinsende, hårdt, men samtidig sprødt stof, der kan lede elektrisk strøm. Når silicium udsættes for sollys afgives elektroner, som i fotoceller kan udnyttes til at drive en elektrisk strøm. Silicium er grundlaget for al moderne elektronik. Kvarts, SiO<sub>2</sub>, og andre silikatminerale udgør ca. 95% af jordskorpen. Sådanne mineraler har været anvendt siden oldtiden, bla. til fremstilling af glas (kvarssand) og keramik (lerminerale).



Figur 16: Siliciumatomets struktur

# LYSETS EGENSKABER

„Og der blev lys!“ er en af de indledende sætninger fra første Mosebog.

Denne begyndelse på en af menneskets store religiøse skrifter fortæller om den tidlige erkendelse af, at lys er en forudsætning for livet på jorden. Dette skal dog ikke være en religiøs fortælling, men blot en indledning, der fortæller om betydningen af lys for alt levende - herunder vi mennesker. Lignende versioner af lysets betydning kan uddrages fra alle store religioner. Tænk fx på oldtidsegypternes gud Ra, som var en personificering af solen. Ra var den store livgiver - herre over liv og død.

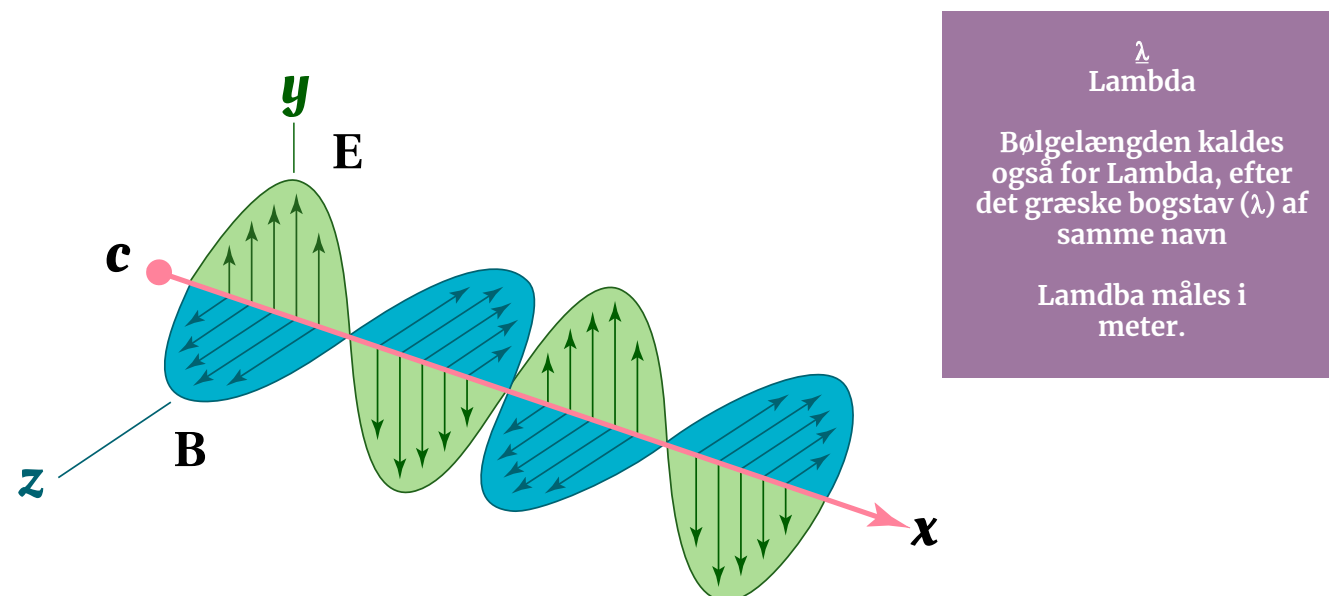
## MEN HVAD ER LYS ?

Lys er partikler også kaldet fotoner - og lys er bølger, elektromagnetiske bølger.

Elektromagnetiske bølger er tværbølger. Det betyder, at de svinger på tværs af den retning de udbreder sig i. De kan bevæge sig igennem det lufttomme rum. Med andre ord behøver de ikke et medie at bevæge sig i, som fx lydbølger. At lys kan være partikler (fotoner), og samtidig være bølger er umiddelbart ulogisk, men det lader sig bevise ud fra relativt simple forsøg (se forsøg på side 17).

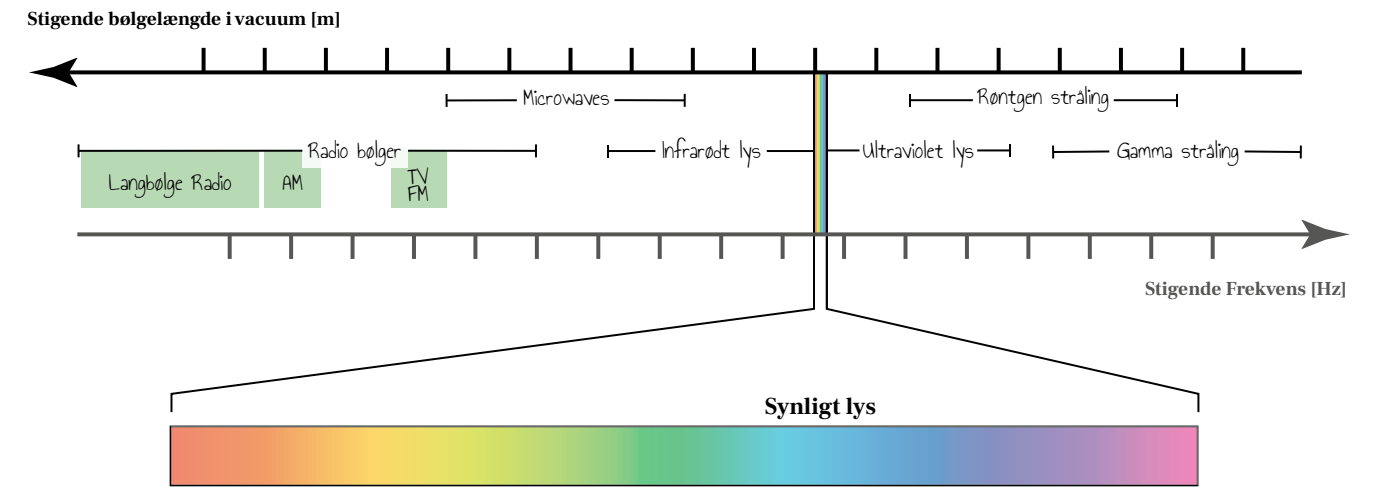
## ELEKTROMAGNETISKE BØLGER.

En elektromagnetisk bølge er en bølge, som udbreder sig som to bølger på tværs af hinanden (fig. 17). Den ene bølge er et elektrisk felt. På tværs af den bevæger sig et magnetisk bølge, som det ses på tegningen nedenfor. Begge bølger bevæger sig sammen i x-aksens retning.



Figur 17: Her ses det hvordan en elektromagnetisk bølge bevæger sig i to bølger vinkelret på hinanden. Den ene er en elektrisk feltbølge (E) og den anden er en magnetisk bølge (B).

Elektromagnetiske bølger er en fælles betegnelse for en lang række bølger med forskellig bølgelængde og frekvens. Her ses det elektromagnetiske spektrum (fig. 18):



Figur 18 Det elektromagnetiske spektrum viser sammenhængen mellem bølgelængde og frekvens for de forskellige elektromagnetiske bølger. Sammenhængen beskrives vha. bølgeformlen som ses nedenfor.

$$c = \lambda \cdot f$$

**Bølgeformlen** ovenfor angiver forholdet mellem lysets hastighed (300.000 km/sek) ( $c$ ), bølgelængde ( $\lambda$ ) og frekvensen ( $f$ ). Det elektromagnetiske spektrum dækker over en lang række forskellige elektromagnetiske bølger, som det ses på fig. 18.

**Lysets hastighed** blev forsøgt beregnet i 1676 af den danske astronom og videnskabsmand Ole Rømer. Igennem år-lange studier af stjernehimlen og planeterne i solsystemet opdagede han, at tilsyneladende afstanden til planeten Jupiters inderste måne, Io, var forskellig alt efter hvor på jordens bane omkring solen, vi befandt os. Ole Rømer optegnede los fremkomst igennem et helt år. Herved fik han målinger, når jorden var helt tæt på Jupiter, og nogle hvor afstanden skulle tilægges jordens banediameter omkring solen. Forskellen i tid på de to observationer blev derfor den tid, som lyset var om at rejse jordens banediameter omkring solen. På den baggrund kunne lysets hastighed beregnes.

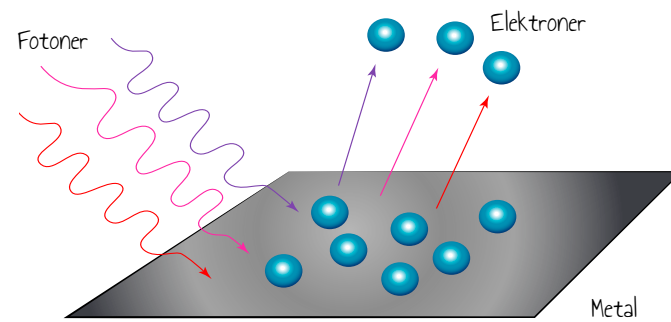
Ole Rømer kaldte fænomenet for „lysets tøven“.

Rømer beregnede lysets hastighed til ca. 227.000 km/sek. fordi den nøjagtige afstand til solen på daværende tidspunkt var ukendt og blev undervurderet. Alligevel var resultatet en fantastisk bedrift, når man tænker på datidens måleinstrumenter. I dag ved vi, at lysets hastighed i vacuum, det vil sige det lufttomme rum er ca. 300.000 km/sek.



## LYS SOM PARTIKLER.

At lys kan beskrives som partikler (også kaldet fotoner), blev påvist af den berømte fysiker Albert Einstein i 1905. Einstein kaldte teorien om lysets partikelegenskaber for „den fotoelektriske effekt“. Den fotoelektriske effekt betyder, at en foton med tilstrækkelig høj frekvens (stor energi) kan overføre hele sin energi til en enkelt elektron i fx en metalplade, som derefter løsriver sig fra sit atom (fig. 19).



Figur 19: Her ses en grafisk beskrivelse af den fotoelektriske effekt. Opdagelsen gav Albert Einstein Nobelprisen i fysik i 1921.

Man kan tænke på fænomenet, som det der sker, når en rullende billardkugle rammer en anden billardkugle i et centralt stød. I sammenstødet overføres bevægelsesenergien fra den rullende kugle (som herefter ligger stille) til den anden kugle som nu ruller videre. Løsrivelsen af en elektron fra atomet kan kun forklares, hvis hele energien er samlet i én partikel - nemlig fotonen.

En fotons energi kan beskrives med formlen: **E foton = h x f**

**Hvor:** E = energi  
f = frekvens  
h = Plancks konstant ( $6,626 \times 10^{-34}$ )

Det var den tyske fysiker Max Planck, som udledte formlen for fotonens energi. Efterfølgende beviste Einstein fotonernes partikelegenskaber ved hjælp af ovenstående forsøg. Fænomenet er i øvrigt det, som får en solcelle til at producere elektricitet.

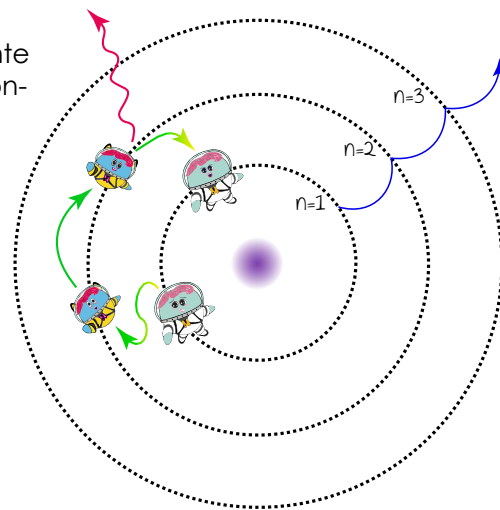
## LYSET KOMMER FRA ATOMERNE.

Den danske fysiker Niels Bohr fremsatte i 1913 sine to berømte postulater, der fortæller om atomets opbygning og elektron-systemets konstruktion.

Bohr beskriver hvordan fotoner udsendes fra et atom når en elektron skal af med „overskydende energi“. Elektroner bevæger sig omkring atomkernen i faste stationære baner. Når en elektron tilføres energi, fx når den rammes af en foton, bevæger den sig længere væk fra kernen i en såkaldt exciteret bane. Når elektronen efterfølgende vender tilbage til den stabile bane, afgives den overskydende energi i form af en foton (fig. 20). Hvis fotonen, som udsendes, har en bølgelængde mellem ca. 380 – 750 nm, ser vi den som en lyspartikel.

Menneskets syn virker ved „tolkning“ af lysbølger, dvs. elektromagnetiske bølger med en bølgelængde ( $\lambda$ ) på mellem 380 – 750 nm ( $1 \text{ nm} = \frac{1}{1.000.000.000}$  meter)

At lys kan udvise bølgeegenskaber er en gammel opdagelse. Sender man fx lys igennem et optisk gitter, kan man påvise bølgeinterferens (fig. 21). Interferens kan kun forklares, hvis lys ikke kun er partikler men også har bølgeegenskaber.



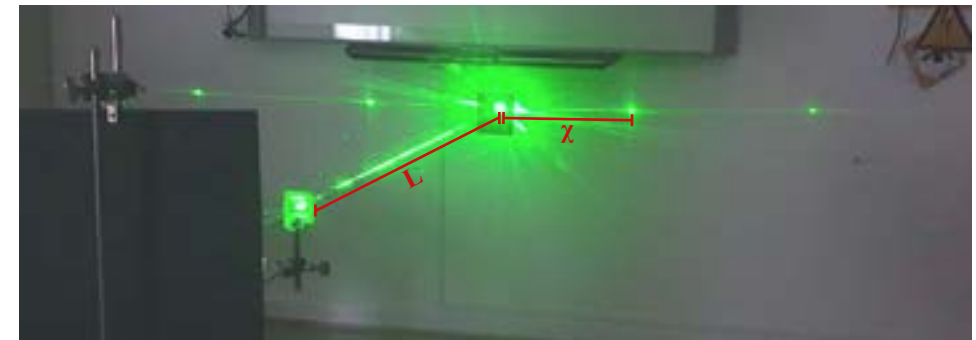
Figur 20: Figuren viser hvad der sker når atomets elektroner tilføres energi fra en foton. Den røde bølge væk fra elektronen er den energi der udsendes som en foton når atomet igen stabiliseres. De grønne pile illustrerer elektronens bevægelser. Den blå pil viser banerne rundt om atomets kerne.

## Bølgerne kan vandre gennem hinanden og interferere

Når lysbølger sendes gennem et gitter med åbninger, som er mindre end lysets bølgelængde, sker der det forunderlige, at der dannes ringbølger ud fra hver åbning. Disse ringbølger går ind og ud over hinanden, hvilket betyder at de nogle steder forstærkes (når en bølgetop møder en bølgetop) og andre steder udslukkes (når en bølgetop møder en bølgedal). De lyspletter, som ses på begge sider af den centrale lysplet, er forstærkningspunkter.

## Forsøg med påvisning af interferens fra grønt laserlys og måling af bølgelængden.

Lys fra en grøn laser (fig. 21) sendes igennem et optisk filter med 550 gitterlinjer pr. mm. På væggen bag gitteret kan man se, at der opstår flere lyspletter og ikke bare én central lysplet. Det sker fordi filteret får lyset til at danne ringbølger, som interfererer med hinanden. De mange lyspletter er forstærkninger, hvor én bølgetop rammer én anden bølgetop dermed er der opstået positiv interferens (som illustreret i fig. 22). Forsøget beviser, at lys også er bølger, da en partikel ikke bare kan dele sig og danne nye lyspletter!



Figur 21: En laserstråle sendes gennem et optisk filter. Da lyset interfererer ses flere pletter, der hvor der opstår positiv interferens.

Bølgelængden  $\lambda$  på den grønne laser kan beregnes ud fra måling af henholdsvis afstand  $\lambda$ , afstand L og d (d = data om gitterets linjeafstand).

Formel: 
$$\lambda = \frac{(\lambda \cdot d)}{L}$$

Hvor  
 $\lambda = 440 \text{ mm}$  (afstand fra den centrale lysplet til første interferenspunkt enten til højre eller venstre)  
 $L = 1500 \text{ mm}$  (afstand fra det optiske filter til væggen)  
 $d = 1/550 \text{ mm}$  (gitterets linjeafstand)

Da det optiske filter opgives til at have 550 gitterlinjer pr. mm laves udregningen i enheden mm.

Ligningen bliver så:

$$\lambda = \frac{440 \text{ mm} \cdot 1/550 \text{ mm}}{1500 \text{ mm}} = 0,000533 \text{ mm} = 533 \text{ nm}$$

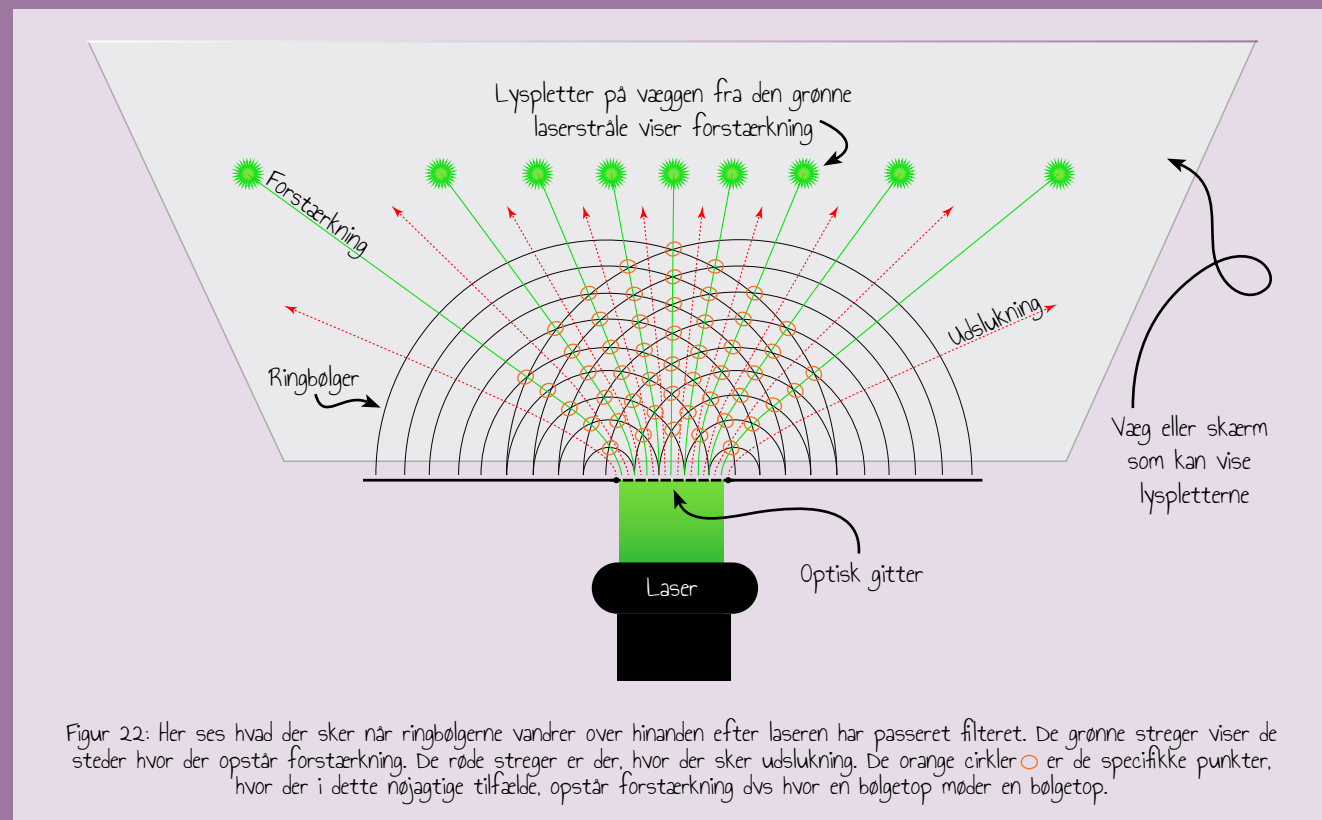
Den grønne laser har dermed en beregnet bølgelængde på 533 nm.

## Interferens

I det forsøg, som vises på side 17, bruges laserlys til at vise at lysbølger kan interferere. Fænomenet gælder også for lydbølger, og det kan også vises med vandbølger i et vandbølgekar.

Når lyset fra den grønne laser sendes gennem et optisk filter, hvor hullerne i gitteret er mindre end den bølgelængde lyset har, dannes der ringbølger på den anden side af gitteret (fig. 22). Disse ringbølger bevæger sig videre som ringbølger, som går ind og ud over hinanden.

De steder hvor en bølgetop rammer en anden bølgetop skabes forstærkning. De mange lyspletter på væggen, som opstår på hver side af den centrale lysplet, er netop forstærkninger fremkaldt af lysets evne til at udvise interferens. Mellem disse vil der samtidig opstå punkter hvor en bølgetop møder en bølgedal. Her vil de to ringbølger udligne hinanden og udslukning opstå.



# ALMEN BØLGETEORI

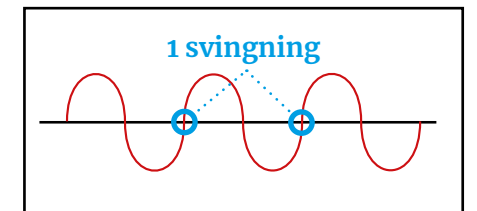
## BØLGER & SVINGNINGER

Vi er omgivet af bølger i vores hverdag. Bedst kendt er nok dem man finder på havet. Bølger bevæger sig af sted med en hastighed, som er bestemt af det medie, de bevæger sig igennem. Bølger kan have meget forskellig størrelse - de svinger altså forskelligt.

Man kan nemt selv lave og undersøge bølger i klassen. Alt hvad man skal bruge er en plastbakke med lidt vand og en blyant til at forstyrre overfladen - så dannes der små bølger.

Alle bølger, herunder både lyd- og lysbølger, har fælles egenskaber. Derfor har man kunne lave en almen bølgeteori, som kan bruges til at regne på alle bølger med.

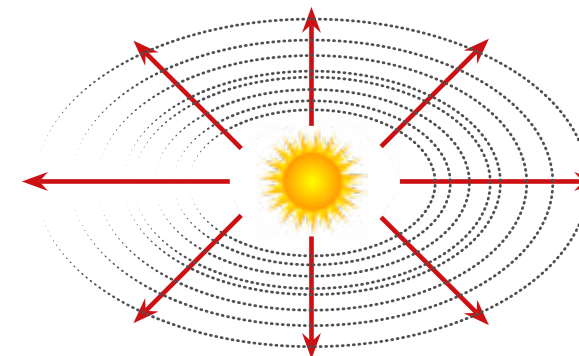
En bølges svingninger siger noget om bølgens egenskaber. Svingningstiden (T) er den tid det tager en bølge at gennemføre en hel svingning (se fig. 23).



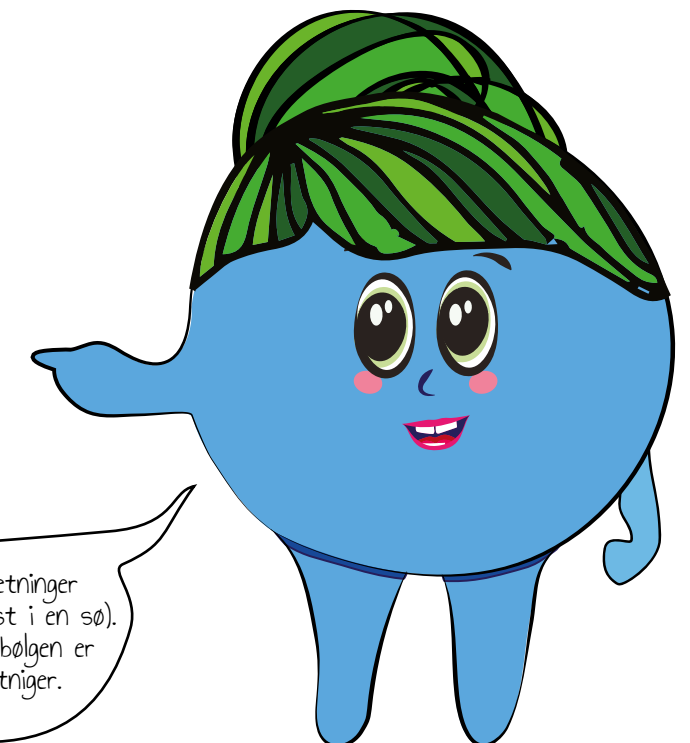
Figur 23: Model der viser én svingning

Nogle svingninger er så langsomme, at man kan se dem, mens andre er så hurtige, at de slet ikke kan opfattes af øjet. På legepladsen kan gyngens svingningstid være et par sekunder, mens svingningstiden for svingningerne i en guitarstreng kun er et par millisekunder.

Der er mange ting i vores omgivelser, der laver svingninger. En gyngesving på en legeplads, en lineal, der svippes igang ud over en bordkant, strengene på en guitar, dit stemmebånd (disse kan mærkes på halsen når du laver lyde) og en højttalermembran blot for at nævne nogle enkelte.



Figur 24: Bølger bevæger sig i alle retninger væk fra kilden.



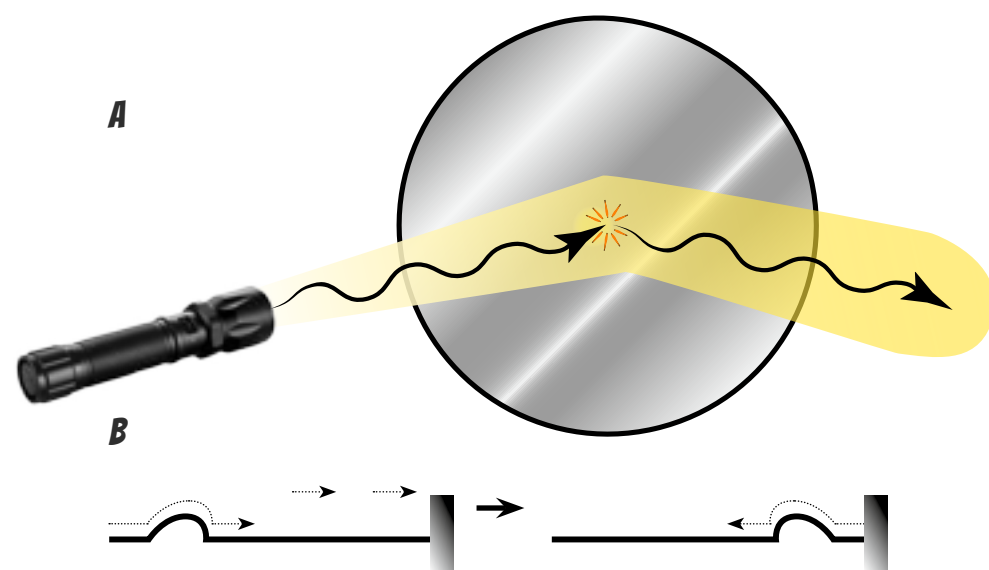
Bølger vil altid bevæge sig i ALLE retninger væk fra kilden (højttaler, lampe, et stenkast i en sø). Typisk kan der dog være en retning hvor bølgen er kraftigst, men den bevæger sig i alle retninger.

**ALLE BØLGER HAR FØLGENDE EGENSKABER:**

- ✓ De kan reflekteres (dvs at bølgerne spejles på de overflader, som de rammer)
- ✓ De kan bøje om hjørner
- ✓ De kan bevæge sig igennem hinanden uden at svækkes
- ✓ De kan forstærke og udslukke hinanden (se afsnit om interferens på s. 18)

**Bølgernes refleksion**

Når lysbølger reflekteres i en lysleder sker der det samme, som når lys rammer et spejl (fig. 25). Indfaldsvinkel på lysstrålen er lig med udfaldsvinkel



Figur 25: Bølger kan reflekteres. A viser en lysbølge, der reflekteres på et spejl, mens B viser en lysbølge, der sendes afsted mod en overflade og som reflekteres, når den rammer.

**Bølger kan bevæge sig om hjørner**

Det er muligt for en lyskilde at lyse om hjørner, fordi en lysbølge bevæger sig i alle retninger væk fra kilden (fig. 24). Dette kan man nemt selv teste. Hvis man lægger en lommelygte på en papkasse, vil den ikke kun lyse ligeud. Lygten vil fx også oplyse gulvet, som kassen står på.



Figur 26: Bølgerne kan bevæge sig om hjørner, fordi de bevæger sig i alle retninger på vej væk fra kilden.

Lyslederteknologien udnytter bølgenes evne til at reflektere på overflader

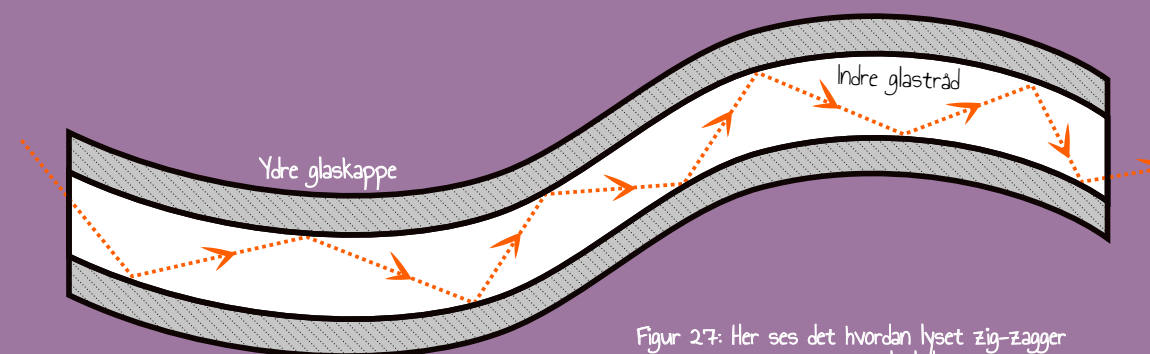
Det er muligt at sende lys igennem en glastråd, fordi lysbølger lader sig spejle. Det er netop det man udnytter i lyslederteknologien. Lyset kanter sig igennem glastråden, idet det spejles af siderne og totalreflekteres i den indvendige side af tråden i en løbende zig-zag bevægelse (se fig. 27). Hastigheden er ca. 200.000 km/sek. Altså ca. 2/3 af lysets hastighed i vacuum, som er 300.000 km/sek.

Lys bryder kun ud af en lysleder, hvis den specifikke grænsevinkel overskrides. Grænsevinklen er den vinkel hvor lyset netop spejles og bliver INDE i glastråden, som forklaret på side 12.

Man kan faktisk opleve dette fænomen, når man er på stranden. Hvis man på lavt vand kigger lige ned gennem vandoverfladen, kan man måske se en krabbe, som løber rundt på bunden. Hvis man så forsøger at følge dens "flugt", ser man pludselig kun solens lys, som spejler sig på vandoverfladen. Bunden og krabben er "forsvundet", fordi man nu kigger i en skrå vinkel på vandoverfladen.

Hvis grænsevinklen overskrides i en lysleder bliver lyset kastet på tværs af tråden i stedet for at fortsætte sin zig-zag bevægelse. I sådanne tilfælde vil noget af lyset bryde ud og forlade glastråden. I lyslederteknologien er dette lig med tab af information! I en mobiltelefonsamtale vil dette tab resultere i "huller" i samtalen.

En lysleder består af en indre glastråd, som lyset reflekteres igennem. Den indre glastråd er omgivet af en ydre glaskappe, som medvirker til, at lyset forbliver i den indre tråd. Totalrefleksion af de lysglimt som udgør signalerne er afgørende, idet enhver udstråling fra lyslederen medfører tab af information. Totalrefleksion betyder at alt lys spejles og bliver inde i lyslederen, som det ses på fig. 27.



Figur 27: Her ses det hvordan lyset zig-zagger sig igennem en lysleder

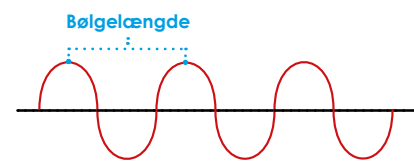


## BØLGELÆNGDE, FREKVENNS & AMPLITUDE

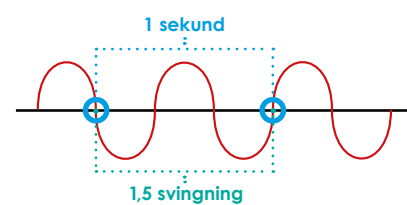
Bølgelængden (fig. 28) er afstanden fra én bølgetop til den næste. En bølgelængde er også det, man kalder én svingning.

Frekvensen (fig. 29) beskriver hvor mange bølgelængder (eller svingninger), der passerer ét givent punkt pr. sekund. Frekvensen afhænger således af bølgens hastighed og dens bølgelængde. Der er derfor en vigtig sammenhæng mellem frekvens, udbredelseshastighed og bølgelængde.

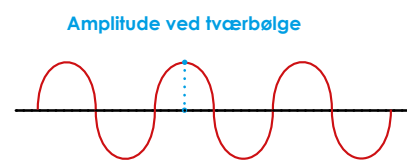
Svingningens amplitude (fig. 30) er et udtryk for hvor kraftig svingningen er. Når man skruer op for lyden på en radio, svinger membranen i højttaleren kraftigere frem og tilbage, end når man spiller med lav lydstyrke. Du kan lære mere om frekvens og amplitude igennem laboratoriforsøg.



Figur 28: Bølgelængde = 1 svingning



Figur 29: Bølgens frekvens (1,5 svingning pr. sekund = 1,5 Hz)



Figur 30 Bølgens amplitude

## BØLGEFORMEL

$$v = \lambda \cdot f$$

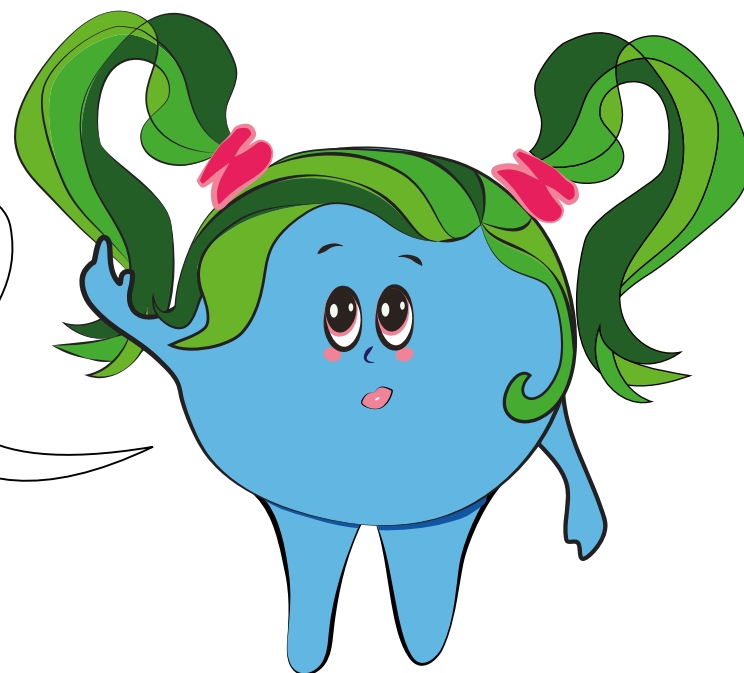
Hvor:

$v$  = Velocitet = Hastighed (Hastigheden afgøres af mediet, som lyden bevæger sig igennem og temperaturen. Lydens hastighed i 20°C varm luft er for eksempel ca. 340 m/sek.)

$\lambda$  = Lambda = Bølgelængde = afstanden mellem to bølgetoppe.

$f$  = Frekvens = Antal svingninger pr. sekund.

Kender man hastigheden ( $v$ ) i det medie man undersøger og enten bølgelængden ( $\lambda$ ) eller frekvensen ( $f$ ) kan man regne sig frem til den sidste ukendte.



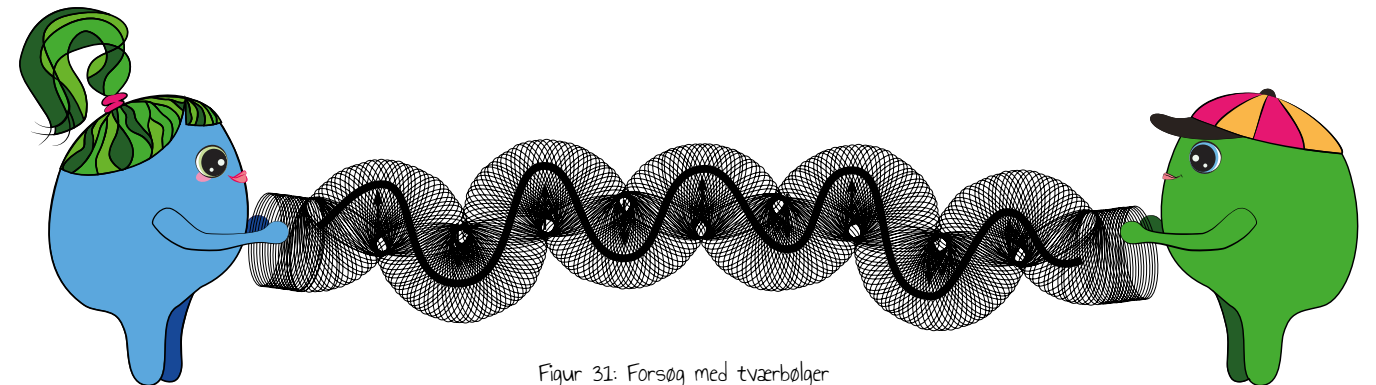
## DE TO BØLGETYPER: LÆNGDE- OG TVÆRBØLGER

Bølger kan opdeles i to forskellige typer alt efter hvilken led, man måler amplituden på.

### Tværbølger

Lysbølger og andre elektromagnetiske bølger er tværbølger. Fælles for disse er at deres amplitude måles på tværs af deres udbredelsesretning.

Der kan laves forsøg med tværbølger ved, at en elev holder fast i den ene ende af en slinky-fjeder, mens en anden elev bevæger fjederen i store bevægelser fra side til side (som vist i fig. 31).

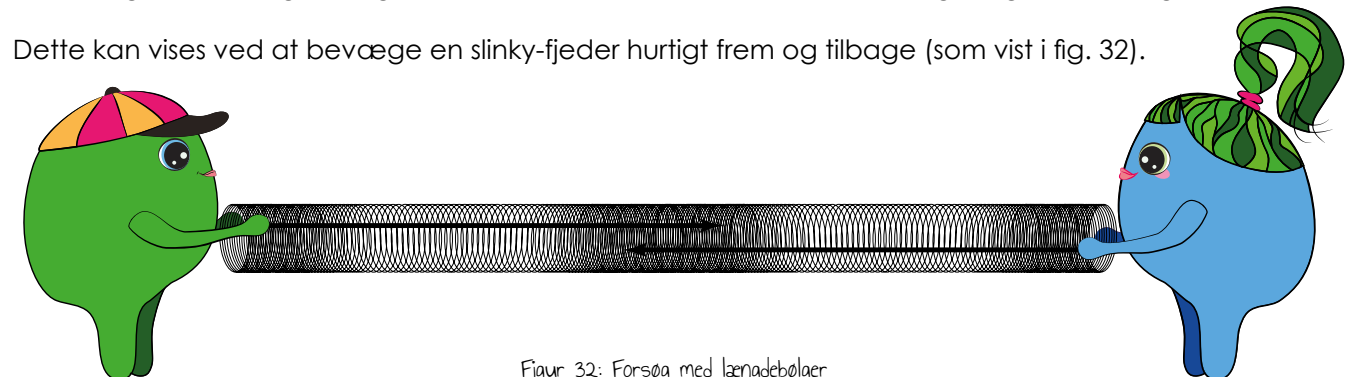


Figur 31: Forsøg med tværbølger

### Længdebølger

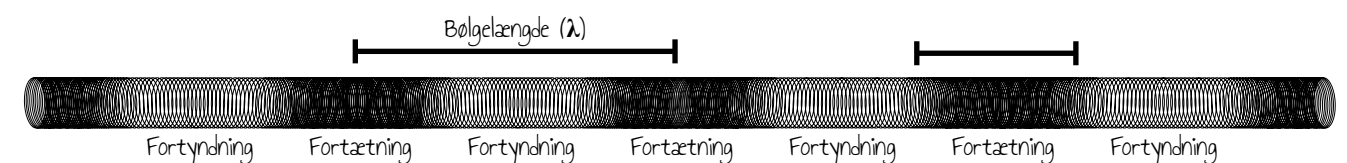
Trykbølger er længdebølger og da lyd er en trykbølge, hører lyd altså også til under længdebølgerne. Længdebølgers amplitude går, modsat tværbølgers, på langs af (i samme retning som) udbredelsesretningen. En længdebølge består af det, som man kalder fortætninger og fortyndninger.

Dette kan vises ved at bevæge en slinky-fjeder hurtigt frem og tilbage (som vist i fig. 32).



Figur 32: Forsøg med længdebølger

Hvis man oversætter spiralens fortætninger og fortyndninger til lydbølger i luft, er fortætningerne der, hvor luftens molekyler presses sammen. Omvendt er fortyndinger der, hvor der bliver længere mellem luftmolekylerne. En længdebølge består skiftevis af disse fortætninger og fortyndinger. Amplituden ved længdebølger er lig med længden af en fortætning, mens bølgelængden måles fra midten af en fortætning til midten af den næste fortætning (fig. 33).



Figur 33: Længdebølge

# LYSLEDERTEKNOLOGI & GEOGRAFI

## KAN MAN LEVE UDEN?

Hvad er det første, som du gør, når du vågner om morgenen? Tjekker du din mobiltelefon? Tjekker du om der er sket noget spændende, om nogen har liket, delt eller sendt noget interessant? At være „på nettet“ er formentlig en selvfølge for dig, og måske er din største udfordring dine forældres regler for dit internetforbrug. I den henseende er det heldigt at du bor i Danmark, for i Danmark har alle en god internetforbindelse. Sådan er det ikke nødvendigvis i resten af verden.

## GLOBALT NETVÆRK

Historisk set har vi mennesker altid forsøgt at optimere det globale kommunikationsnetværk. Det var fx noget af en revolution, da Samuel Morse byggede sit morsesystem. Kommunikationen over lange afstande blev elektrisk og meget hurtigere, end hvis man skulle bevæge sig selv hen til modtageren eller sende et brev med posten.

Det første kvantespring vi tog inden for kommunikationen var opfindelsen af trådtelegrafien. Den trådede teknologi udviklede sig med tiden, fra den trådede og til den trådløse telefon. I dag sender vi beskeder over lange afstande ved hjælp af lys og lysledere (se fig. 35). Læs mere om fysikken bag [her](#).

I geografi undersøger man bla. hvordan mennesker lever og hvordan infrastrukturen er i forskellige samfund. Faktisk er måden som man kommunikerer på, informationstrømmen mellem områder og vilkårene omkring kommunikationen ret interessant.

## GLOBALT KOMMUNIKATIONSNETVÆRK

I 2015 opsatte FN et verdensmål (nr 8) der bla. havde fokus på, at folk skal have adgang til information og kommunikation.

I FN's verdensmål lægges der vægt på at udvikling skal sikres gennem samarbejde. Visionen er at de rige lande skal hjælpe de mindst teknologisk udviklede lande med at give så mange mennesker som muligt adgang til ny teknologi.

Et delmål er at alle lande får en almen og rimelig tilgang til internettet inden 2020, mens et andet delmål er at 75% af verdens befolkning skal have adgang til internettet i 2025. Status lige nu er desværre, at denne ambition bliver svær at opfylde. I 2020 havde lidt over 50% af verdens befolkning adgang til internettet, men uden en større stigning i de forgangne år.

På linket herunder kan du se alle de lysleder søkabler, der er lagt ned: [submarinecablemap.com](http://submarinecablemap.com)

Figur 34:  
Nooooooo  
wifi!!!



## Hvad er infrastruktur?

Infrastruktur bruges ofte om:

Vejnettet  
Jernbanenetnet  
Telefonnettet  
Cykelstier  
Havneanlæg  
Flyforbindelser  
El-nettet  
Naturgasnettet  
Vandforsyningen  
Transportsystemer  
Kabelnetværk

Begrebet infrastruktur kan bruges om mange ting. Det kan handle om globale sammenhænge fx om det kommunikationsnetværk, der går rundt om kloden. Man kan også anvende begrebet på en meget mindre skala. Det gør man fx, når man snakker om vejnettet nationalt eller lokalt i et afgrænset område. Derudover anvendes infrastruktur ofte i en udvidet betydning, som omfatter organisationen af virksomheder, uddannelser, social- og sundhedsvæsenet samt offentlige og private serviceydelser.

Ordet infrastruktur kommer af det latinske ord "infrastructura". "Infra" betyder nedenunder og "structura" betyder bygge/ grundlag. Infrastruktur handler altså om alt det der ligger under og er med til at opbygge og vedligeholde vores samfund. Med andre ord er det en betegnelse for summen af de systemer, der forbinder enheder (fx veje) i et større system.

I et samfund handler infrastruktur om netværk, både nationalt og globalt, men også lokalt om netværk mellem virksomheder og offentlige institutioner. Hvordan man opbygger et samfunds infrastruktur er derfor af afgørende betydning for samfundets virkemåde, velfærd og produktivitet.

Et lands eller en bys infrastruktur spiller en afgørende rolle, når en virksomhed skal finde en velegnet lokalitet til nye produktions- eller kontorfaciliteter. For en eksportvirksomhed vil det fx være en fordel at lægge produktionen på et sted med nem adgang til motorveje, havne og lufthavne.

Ser man på vejnettet er det fx ikke kun et spørgsmål om at bygge og vedligeholde infrastrukturen. Det er også vigtigt at man bruger det rigtigt. Ved hjælp af teknologi kan man undersøge, hvordan man kan fremme mobiliteten og forbygge flaskehalsproblemer, som skaber køer. Med intelligent trafikstyring (hvor vej-infrastrukturen og køretøjer udveksler og udnytter data) kan man mindske trængsel.



Figur 35: Historisk udvikling af kommunikationsteknologien





## EN SKÆV FORDELING

Deler man verden op i høj, mellem- og lavindkomstlande. Kan man se at i lande med mellem eller lav indkomst er der oftere en dårligere internetforbindelse. Dette skyldes at man i disse lande anvender en mobiladgang til internettet, som sjældent er rigtig god. Mange mellem- og lavindkomstlande har ikke råd til at få lagt fibernet ned eller opsat 5G master, fordi den nyeste teknologi er dyr.

Det er dog ikke teknologien alene, som sætter begrænsninger i forhold til internetadgangen. Køn har også en betydning. Særligt i lavindkomstlande er det primært mændene, der har adgang til nettet. Forklaringen er at kvinderne ikke har lært at læse eller at de ikke har adgang til en enhed der har en internetopkobling.

Den internetadgang, du tager for givet, er altså kun noget, som en lille del af verdens befolkning har adgang til.

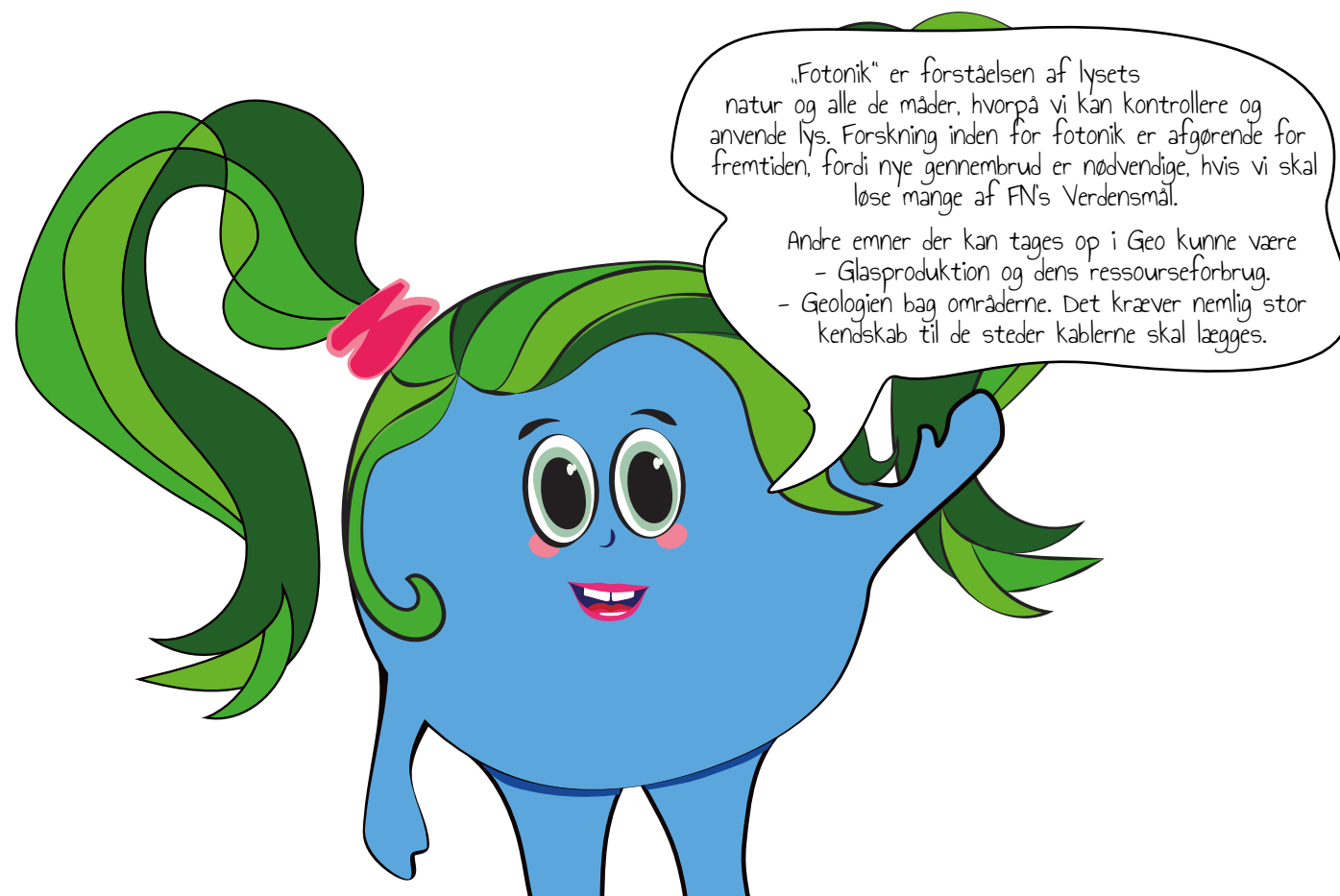
## FORURENING

Selvom det kun er ca 50 % af jordens befolkning der bruger internettet er det en stor post i det store CO<sub>2</sub> regnskab. Op mod 9 % af vores elektricitet bruges på internetkommunikation, altså at sende data af sted i fibernet. I 2020 udledte internettet ca 1.7 milliarder CO<sub>2</sub>!!! Dette svarer til 3 % af den samlede CO<sub>2</sub> udledning eller det samme som al flytrafik i hele verden. Faktisk er der nogen der mener, at om få årtier vil 50 % af alt elforbrug blive brugt på internet.

Hvis man ser på den udvikling, som brugen af internettet har haft i højindkomstlandene indenfor de sidste par år, og forestiller sig at det skal udbredes til 75 % af verdens befolkning inden 2025 - ja så kan man godt forstille sig, at det vil have en gigantisk indflydelse på klodens ressourcer, vores energiforbrug og CO<sub>2</sub> udledning.



Figur 36: Ellens rige fætter Fredby Foton, der har råd til den bedste internetadgang



## HVORDAN SER MAN LYSET?

### HVAD HAR FOTOFONEN OG VORES ØJE TIL FÆLLES?

Fotofonen fungerer ved at sende information ved hjælp af lys til en lysfølsom modtager. I dette afsnit vil vi se på menneskets lysfølsomme modtager - nemlig øjet og de celler der sætter os i stand til at se.

### ØJETS EVOLUTION

Det at kunne "se" er opstået flere gange hos forskellige dyr over tusindvis af år. Dvs at forskellige typer af øjne er opstået hos forskellige dyr, der har haft en fordel af at kunne se eller at kunne mærke forskel på lys og mørke.

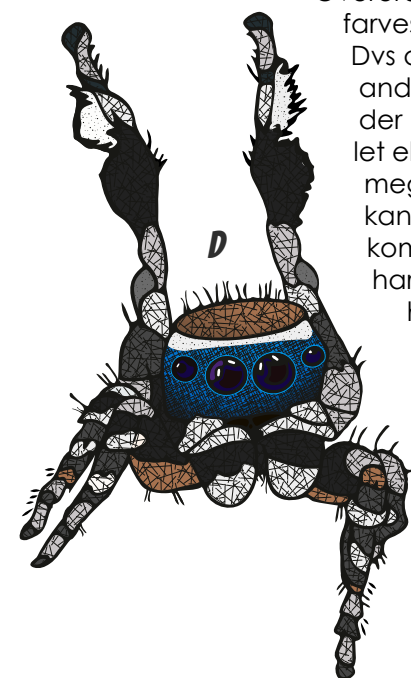


Figur 37: Forskellige typer af øjne  
A) Filippinsk spøgelsesabe med nattesyn;  
B) Gulabi ged; C) Rødojet træfrø;  
D) "Blue faced" påfugleedderkop

Øjets opbygning og anatomi er meget forskellig fra dyr til dyr. Da grisen genetisk er nært beslægtet med mennesket, ligner dens øjne meget vores. Andre dyr, fx insekter, har øjne, der er helt anderledes opbygget. Dette skyldes, at det lysspektrum de kan se er bredere eller anderledes end vores, fordi det har været en fordel for dyrets overlevelse.

Overordnet set deles det at kunne se op i to; farvesyn og det at kunne opfatte gråtoner. Dvs at nogle dyr kun ser lys og mørke, mens andre (fx os mennesker) kan se det vi kalder "synligt lys". Andre igen kan se ultraviolet eller infrarødt lys. Det fysiske øje kan have meget forskelligt udseende (fig. 37). Øjnene kan variere fra en klump af lysfølsomme celler til det komplekse øje, som vi kender fra os pattedyr. Øjet har altså udviklet sig gennem evolution, alt efter hvad der har været en fordel for det pågældende dyr.

Læs mere om evolution, mutationer og genetik i [afsnittet om evolution](#).





## Alt afhænger af øjenene der ser

VORES STAMFADER VAR ET SVØMMENDE ØJEÆBLE MED PELS!  
Forskere har fundet nogle larver fra brakiopder med lysfølsomme celler der fungerer lige som vores. [Læs mere...](#)

Fun fact: det ældste fossil af et øje er 555 millioner år gammelt



### TIGERENS PELS

Alle ved hvordan en tiger ser ud; orange ryg, lys bug og sorte striber. Men hvorfor ser den sådan ud?

Det sjove med farver er, at de afhænger af øjnene der ser. Tager man fx et af tigerens yndlings byttedyr, hjorten, så ser de faktisk noget helt andet end os. Hjorte kan nemlig ikke se farven orange!

Når en hjort ser en tiger, falder den i med omgivelserne, og den kan kun se tigreren, når den bevæger sig. Tigreren er derfor orange idag, fordi de tigere, der var mere orange i pelsen, var bedre skjult. Derved havde de større chance for at fange deres bytte, og overleve længe nok til at få unger, der så arver de orange træk.

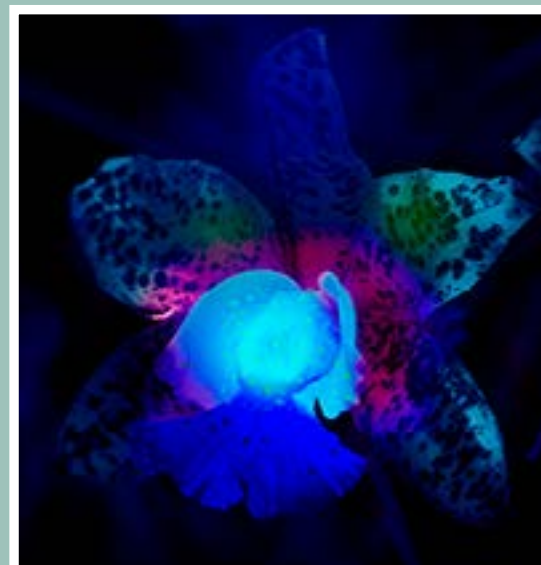


### MANGE MÅDER AT SE PÅ

Insektøjne er bygget op på af mange små øjne. Man kalder insekters øjne for sammensatte øjne eller rhabdomære. Menneskets øjne kaldes ciliære. Insektøjne er på mange punkter bedre end menneskers. Fx kan en guldsmed se både infrarødt og ultraviolet lys, fordi de har flere lysfølsomme proteiner end mennesker. Dette syn gør også bier i stand til at se specielle mønstre på blomster. Mønstrene virker lidt som en landingsbane for dem.

Skorpionens syn er også ret specielt, for det tyder på at hele deres krop agerer som en form for basalt øje, der kan opfange ultraviolet lys, som de kan navigere efter. Desuden reflekterer de selv ultraviolet lys, og de bruge derfor denne egenskab til at finde en mage.

Visse fuglearter kan også se andre dele af lysspektret end vi mennesker kan. En helt almindelig solsort kan faktisk se helt anderledes ud for en hun, der søger en mage [Læs mere...](#)





## LYSFØLSOMME CELLER

I den oprindelige fotofon brugte Bell stoffet selen, som den lysfølsomme komponent. Andre stoffer kan dog også bruges. I den fotofon, som du har bygget, bruger vi en silicium-diode som lysmodtager. Silicium-diode producerer mere eller mindre elektricitet alt efter hvor kraftig lys den bliver udsat for.

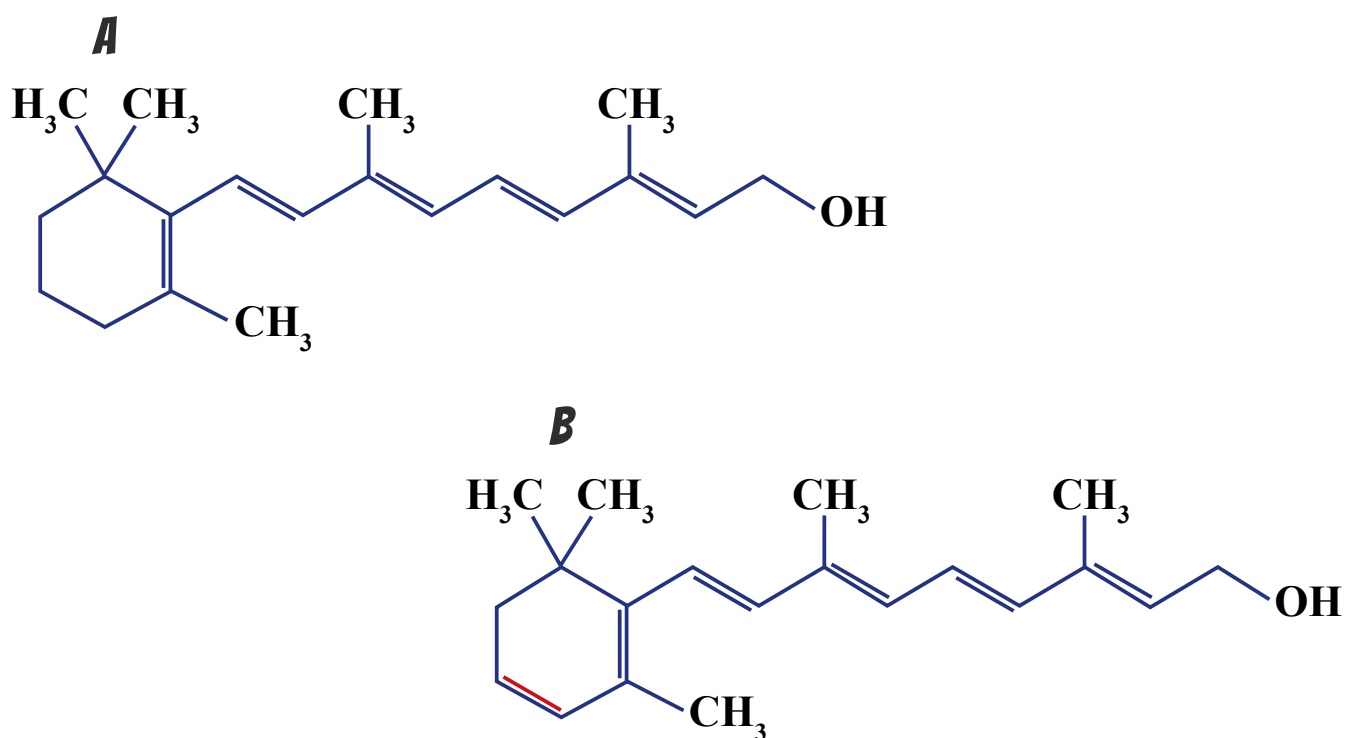
Menneskets øje indeholder ligesom fotofonmodtageren et lysfølsomt stof. I dit øje er der to forskellige typer af lysfølsomme celler; tappe og stave. Tapceller findes hovedsageligt i den gule plet på nethinden, mens stavcellerne er fordelt rundt på resten af nethinden. Det molekyle, der står for at aktivere de lysfølsomme celler, er et pigment-protein, der hedder rhodopsin. Rhodopsin kaldes også for lyspurpur, på grund af dets pink farve.

## LYSETS VEJ IGennem ØJET

Når lyset bevæger sig ind gennem hullet i øjets regnbuehinde (det vi kender som pupillen) fokuseres det i linsen. Herefter bevæger det sig igennem glaslegemet og rammer nethinden. Her laves lyset om til elektriske signaler, der via synsnerven sendes op til hjernen. I hjernen tolkes signalerne og der dannes et billede. Det lyder måske ret simpelt, men øjet er et meget komplekst organ.

## A-VITAMIN

Du har måske hørt, at det er vigtigt, at du spiser vitaminer. En af grundene til det er, at mange af de vigtigste molekyler, der produceres i vores krop, opbygges ved hjælp af vitaminer. Vitamin A indgår i opbygningen af rhodopsin. Det betyder, at hvis du er natteblind, kan det skyldes mangel på A-vitamin (fig. 38).



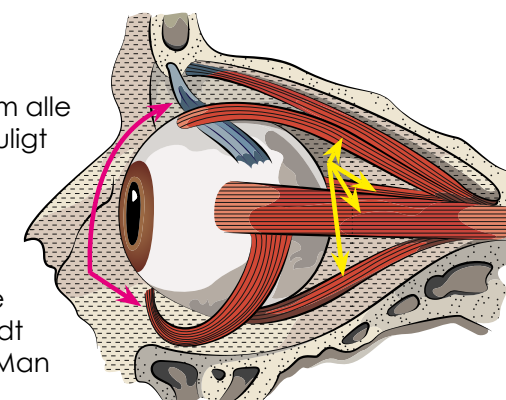
Figur 38: Vitamin A findes i to former. Her kan ses den kemiske opbygning af begge. A) vitamin A1, retinol, som findes i fisk og pattedyr. B) vitamin A2, dehydroretinol, som findes i ferskvandsfisk.

# MENNESKEØJETS OPBYGNING

## MUSKLER

Rundt om øjet sidder fire "lige" muskler og to "dreje" muskler, som alle hæfter på kraniet. Musklerne giver øjet fleksibilitet og gør det muligt at se til siden samt op og ned.

Musklene omkring øjet skal trænes ligesom kroppens øvrige muskler ellers kan der opstå spændinger, som kan føre til forringet syn og/ eller hovedpine. Hvis man fx ser på en skærm hele dagen eller læser mere end man plejer i en periode, kan det godt give spændinger. Så må man i gang med at træne sine øjne. Man kan fx gå sig en tur og se på verden udenfor.



Figur 39: Øjets muskler.

## IRIS OG PUPIL

Farven i dine øjne skyldes tilstedeværelsen af pigment i din regnbuehinde - også kaldet iris. Farven er styret af dine gener. For ikke så lang tid siden troede man, at hvis to forældre har blå øjne, så kan de kun få børn med blå øjne. I dag ved vi, at det ikke passer. Faktisk kan forældre med blå øjne godt få børn med brune eller grønne øjne. Du kan læse mere om hvordan gener arves i vores [ekstramateriale](#). Det hul som er i iris kaldes pupillen. Iris kan trækkes sammen eller slækkes således, at hullet bliver større eller mindre. På den måde kan der lukkes mere eller mindre lys ind i øjet.

## ØJETS TO KAMRE

Øjet deles op i to kamre. I det forreste kammer lige bag ved iris ligger linsen, mens glaslegemet fylder det bagerste kammer ud (fig. 40).

### Linsen

Linsens opgave er at fokusere (altså stille skarpt) på det, som du gerne vil se. Linsen er spændt op i en masse tynde tråde, der kan spændes eller slækkes. Når trådene spændes op trækkes linsen flad. Når trådene slækkes slapper linsen af og bliver tyk.

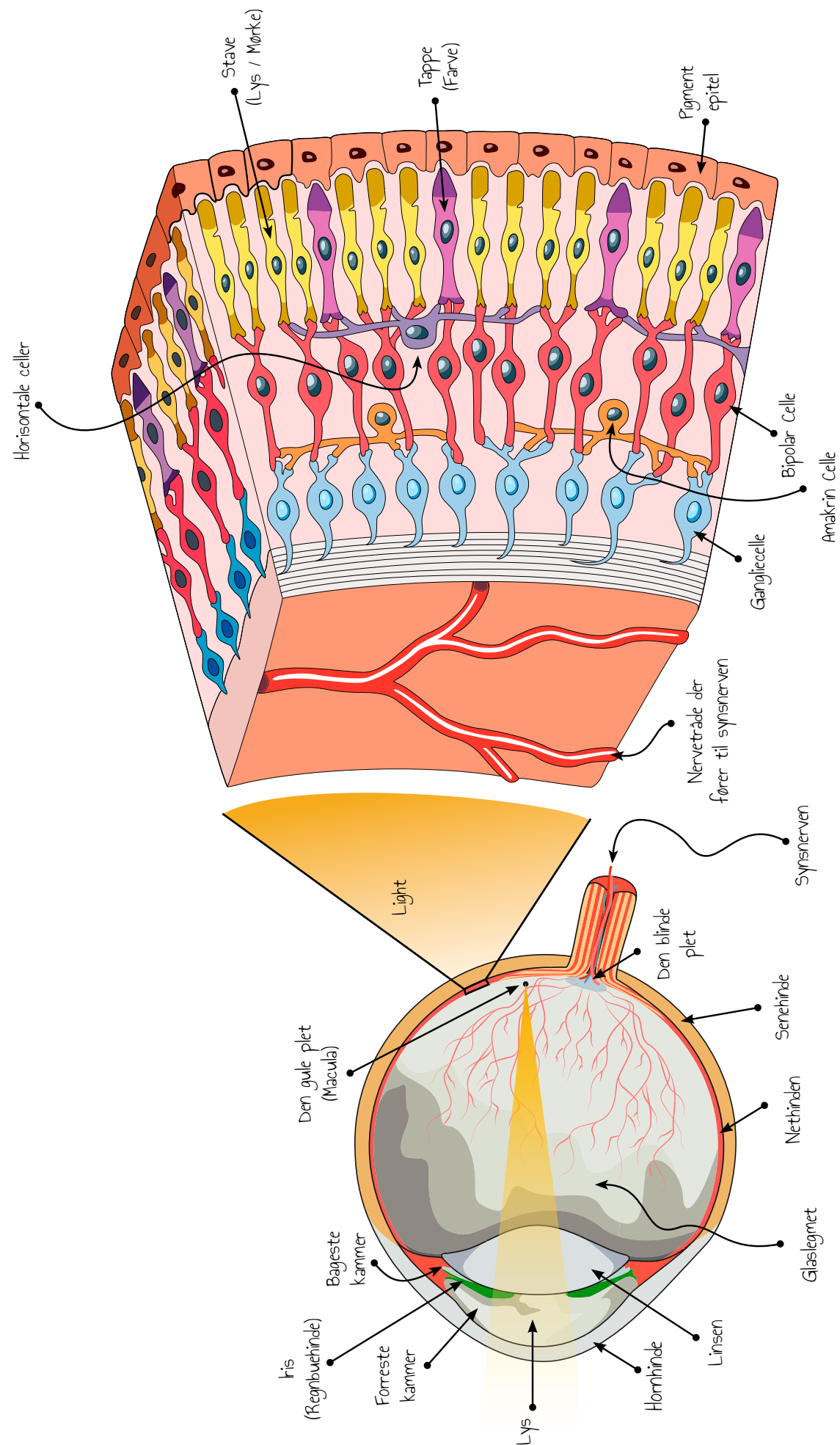
### Glaslegemet

Selve øjet bliver holdt udspilet af et vandmandsagtigt legeme. Dette er helt klart og kaldes derfor for glaslegemet.

## NETHINDEN

Nethinden er det netværk af nerver, der findes på bagsiden af øjet. Her sidder alle de lysfølsomme celler, som opfanger det lys, der kommer ind i øjet. Når lyset rammer nethinden laves det om til et elektrisk signal - lidt som det sker i fotofonen. Dette signal sendes igennem synsnerven op til hjernen, der laver signalet om til et billede.

Nethinden har et pigmenteret lag, som kaldes tapetlaget. Tapetlaget er interessant, fordi det er her mange pattedyrs øjne afviger fra hinanden. Hos mennesker og grise er tapetlaget fx sort, hvilket gør os i stand til at se skarpt. Andre dyr har et lysreflekterende lag, som gør at de kan udnytte lyset dobbelt. Hos disse dyr er tapetlaget gulligt. Faktisk kender du det sikkert godt. Hvis du lyser med en lommelygte på en kat i mørke, lyser dens øjne op. Hos koen er der kun en nethinde halvvejs op i øjet og tapetlaget er perlemorfarvet.



Figur 40: Øjets opbygning

## STAVE OG TAPPE

Inde på øjets nethinde (retina) findes de to typer af sanseceller, som modtager lys. Stavcellerne er meget lysfølsomme og bruges til at opfange gråtoner. Tapcellerne mindre lysfølsomme, men er til gengæld specialiserede i at se farver og små detaljer. Tapcellerne er hovedsageligt koncentreret i en lille fordybning på ca. 1 mm i diameter kaldet den gule plet (fig. 40). I den gule plet er der kun tapceller og det er det sted hvor synsstyrken er størst. Hjernen modtager flere informationer fra den gule plet end fra hele den øvrige nethinde. Udenfor den gule plet indeholder nethinden overvejende stave.

### Stave

Der er ca. 125 millioner stavceller fordelt over størstedelen af nethinden i hvert øje. Stavene er ca. 100 gange mere lysfølsomme end tapcellerne. De reagerer kun på hvidt lys og kan derfor registrere lys og mørke og fungerer som nattevise. Stavens lysfølsomhed skyldes den måde som pigment-proteinet rhodopsin ligger indlejret i stavcellerne ([læs mere på s. 478 her...](#)). I det øjeblik rhodopsin udsættes for stærkt lys spaltes det, hvilket betyder at øjet hurtigt kan omstille sig til at se i skarpt lys. Når lyset slukkes eller man bevæger sig ind i et mørkt rum, fyldes stavcellerne op med rhodopsin. Det gør øjet i stand til gradvist at kunne registrere mere og mere lys. Efter ca 30 minutter er stavene fyldt op med rhodopsin og øjet ser nu så meget som det er muligt at se i mørke.

### Tappe

Tapcellerne registrerer farve. Man kan huske på at de kaldes tapceller, fordi man "tapper" maling. Øjet indeholder ca. 7-8 millioner tapceller, som inddeles i tre typer: S-, M- og L-tappe. Hver af disse tre typer indeholder hvert deres pigment, der er følsomt over for forskellige bølgelængder. S-tappene, som indeholder pigmentet Cyanolabe, er de mest følsomme, og de registrerer de korte bølgelængder som findes i blåt lys (ca. 420 nm). M-tappe indeholder pigmentet Chlorolabe som er følsom overfor det grønne lys' mellemlange bølgelængder (ca. 530 nm). Og L-tappene registrerer de lange bølgelængder i rødt lys (ca. 560 nm) og indeholder pigmentet Erythrolabe. Hvis øjet rammes af lys med en bølgelængde på ca. 570 nm vil dette påvirke de røde og grønne tappe. Dette vil af hjernen vil blive fortolket som gult lys. Farveblindhed skyldes manglende eller defekte tapceller. Rhodopsin ligger meget anderledes i tapcellerne end i stavene ([læs mere på s. 482 her...](#)). Derfor er disse langt mindre lysfølsomme og fungerer af samme årsag dårligt i mørke, hvilket er forklaringen på, at det er svært at se farver om natten.

### Fra fotoner til nerveimpulser

Når lys (altså fotoner) rammer de lysfølsomme tap- og stavceller, som findes allerbagerst i øjet, omsættes lyset til nervesignaler. Disse impulser sendes herefter videre - først gennem et netværk af nerveceller, som kaldes bipolære celler, og herefter gennem endnu et netværk af nerveceller, kaldet gangliacellerne. Når lyset kommer ind i øjet skal det altså i første omgang passere disse cellelag for at nå frem til tap- og stavcellerne bagerst på nethinden. Dette kan virke en smule ulogisk, når man tænker på øjets konstruktion. Gennem nethindens 10 lag samles de mange millioner fotoreceptorer i de ca. 1 million nervefibre, der tilsammen danner synsnerven, som løber bagud gennem øjenhulen.

## DEN BLINDE PLET

Området, hvor synsnerven ledes ud af øjet, kaldes den blinde plet (fig. 40). Dette punkt er det mindst følsomme sted i nethinden. Den blinde plet har en diameter på ca. 1,2 mm. I dette område er der ingen synsceller. Det kan være svært at forestille sig, at den blinde plet eksisterer. Dette skyldes, at når en del af det vi ser mangler, foretager vores hjernen en retouchering. Hjernen udfylder altså det manglende område ved hjælp af de nærmeste omgivers billedmæssige indhold. Da vores øjne hele tiden er i bevægelse, har hjernen tilstrækkelig med information til at udfylde det, som er usynligt for øjet. Det sker ved hjælp af ubevidste hjernerreflekser.



# SKRAMLOTEKET'S FOTOFON

## HVAD SÅ NU?

Nu har vi været gennem teorien bag fotofonen. De emner, som vi har med her i kompendiet, kan du sagtens tage op til eksamen, men der er mange flere emner der kan undersøges i relation til dette projekt.

Via følgende link ([Skramloteket.dk](http://Skramloteket.dk)) kan du finde inspiration til flere emner, en loddevejledning og små film der forklarer nogle af alle de emner vi har beskrevet i kompendiet. Desuden kan der findes en vejledning til samling af de to apparater som fotofonen består af, nemlig senderen (transmitter, fig. 41) og modtageren (receiver, fig. 42).



Figur 41: Fotofonens transmitter



Figur 42: Fotofonens receiver



## **Skramloteket**

Norgesgade 3, 2. sal  
2300 København S

Tlf: 93 10 04 44

skram@skramloteket.dk

www.skramloteket.dk

Se også Skramloteket på facebook