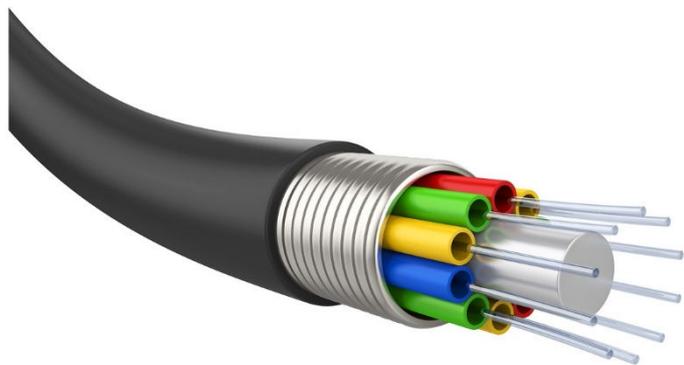


Brydning, refleksion og totalrefleksion



© Erik Vestergaard

© Erik Vestergaard, Haderslev, maj 2022.

Billedliste

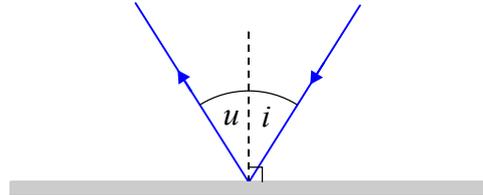
- Forside: ©iStock.com/Hans-Martens (Sæbeboble)
Forside: ©iStock.com/kwasny221 (Øje)
Forside: ©iStock.com/ Nerthuz (Optisk fiber)
Forside: ©iStock.com/BlackJack3D (Diamant)
Side 3: ©iStock.com/Ben-Schonewille (Refleksion i spejl)
Side 4: ©iStock.com/Pat_Hastings (Brydning i vandglas)
Side 9: ©iStock.com/STRINGERimage (Lysleder kabel)
Side 14: ©iStock.com/prill (Fatamorgana, luftspejling)

1. Refleksion

I fysik betyder *refleksion* tilbagekastning af bølger. Vi kender det fra et spejl, hvor lys tilbagekastes fra en person eller en genstand, så vi ser billedet af personen eller genstanden i spejlet. Her gælder en simpel fysisk lovmæssighed.

Refleksion

Ved en refleksion er *udfaldsvinklen* u lig med *indfaldsvinklen* i .



2. Brydning

Når lysbølger passerer en grænseflade mellem to medier, kan der forekomme *brydning*, hvilket betyder en ændring i bølgens udbredelsesretning. Den overordnede årsag til lysets brydning er forskellen mellem lysets hastighed i de to medier. Man indfører et såkaldt *brydningsindeks*, som er forholdet mellem lysets hastighed i vakuum (det tomme rum) og lysets hastighed i det pågældende medium:

Brydningsindeks

Brydningsindekset n for et medium er givet ved

$$(1) \quad n = \frac{c}{v}$$

hvor $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s er lysets hastighed i vakuum og v er lysets hastighed i mediet.

Stof	Brydningsindeks	Stof	Brydningsindeks
Luft	1	Kronglas (let)	1,46
Vand	1,33	Rudeglas	1,51
Ethanol	1,36	Kvartsglas	1,46
Flaskeglas	1,52	Polycarbonat (plast)	1,56
Flintglas (tæt)	1,61	Diamant	2,42

NB! Brydningsindekser afhænger faktisk en smule af bølgelængden af lyset. Det er derfor, man kan opleve en farveopsplitning, når en tynd stråle hvidt lys brydes i for eksempel et trekantet prisme. Vi ser dog bort fra denne lille bølgelængdefølgende i de følgende eksempler.

Eksempel 1

Vi kan bruge (1) til at bestemme lysets hastighed i flaskeglas. Vi omskriver først (1):

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

hvorefter vi indsætter talværdier:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,52} = 1,97 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

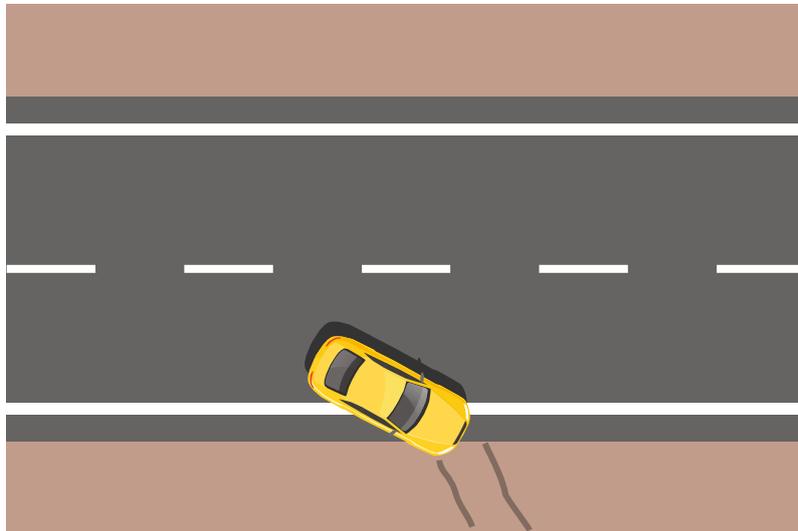
□

Fænomenet brydning kan iagttages mange steder i dagligdagen. På fotoet til højre, ser vi en blyant anbragt i et glas med vand. Den del af blyanten, som står under vand, ser ud til at befinde sig et andet sted, end den i virkeligheden befinder sig. Lysets brydning i glasset og især i vandet snyder os. Vi skal senere se mange eksempler på, hvor det også kommer i spil hensigtsmæssige og brugbare situationer. Fænomenet skyldes som nævnt forskellig bølgehastighed i de to medier og kan forklares ved hjælp af *Huygens princip* for bølgeudbredelse. Vi skal ikke nærmere ind på dette princip her. Den interesserede læser kan se mit korte tillæg *Tillæg til brydningsformlen*. Heri udledes også den såkaldte *brydningsformel*, som vi skal anvende i det følgende.



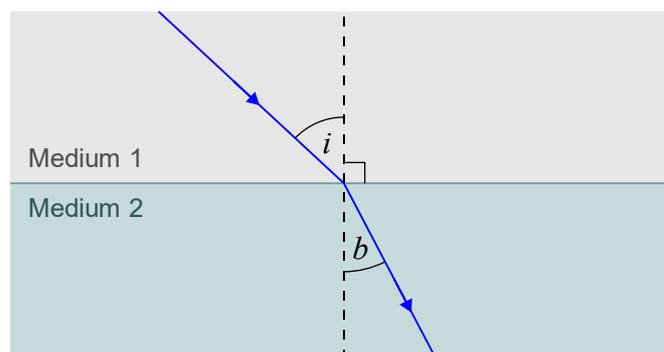
Bemærkning (En analogi)

At lys ændrer retning på grund af dets forskellige hastighed i de to medier, kan illustreres ved en situation på en landevej, hvor en bil kommer kørende. Ved en fejl kommer chaufføren til at køre skråt ud i den bløde rabat. Idet bilens forreste højre hjul når ud i rabatten, hvor det ikke kan køre så hurtigt, vil de øvrige hjul stadig kunne køre uhindret. Det betyder en udskridning, hvor bilens retning ændres, som antydnet på figuren.



□

På figuren nedenfor bevæger en tynd lysstråle sig i et medium 1 skråt ned mod grænsefladen til et andet medium 2. Indfaldsvinklen i regnes i forhold til den stiplede linje, som står vinkelret på grænsefladen. Efter passage ind i medium 2 ændrer strålen retning, Brydningsvinklen er b og regnes også i forhold til den stiplede linje.

**Brydningsformlen**

En tynd lysstråle passerer fra medium 1 ind i medium 2. De to medier har brydningsindeks henholdsvis n_1 og n_2 . Idet indfaldsvinklen er i og brydningsvinklen er b gælder følgende formel:

$$(2) \quad \frac{\sin(i)}{\sin(b)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Bemærk, at brydningsindekset for medium 2 står øverst i brydningsformlen (2). Så formelen er ikke helt "symmetrisk". Brydningsformlen har også en alternativ version, men lidt mindre anvendelig udgave, nemlig én, som involverer lysets hastighed i de to medier.

Brydningsformlen (Alternativ version)

En tynd lysstråle passerer fra medium 1 ind i medium 2. Idet lysets hastighed i medium 1 betegnes v_1 og lysets hastighed i medium 2 betegnes v_2 , gælder følgende:

$$(3) \quad \frac{\sin(i)}{\sin(b)} = \frac{v_1}{v_2}$$

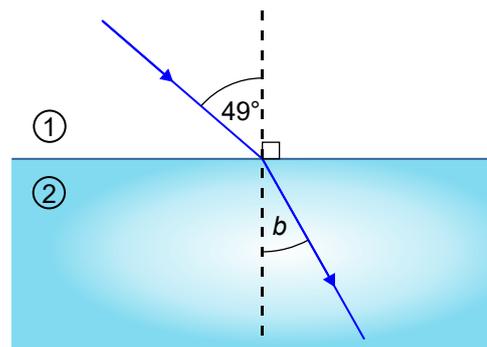
Bevis: Formel (3) kommer direkte af formel (1) ved at udnytte (2):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{c}{v_2} \cdot \frac{v_1}{c} = \frac{v_1}{v_2}$$

□

Eksempel 2

En tynd lysstråle passerer fra atmosfærisk luft ind i glas med brydningsindeks 1,5. Indfaldsvinklen er 49° . Bestem brydningsvinklen.



Løsning: Vi indsætter de kendte størrelser i brydningsformlen (2):

$$\frac{\sin(49^\circ)}{\sin(b)} = \frac{1,5}{1} \Leftrightarrow b = 30,2^\circ$$

hvor et CAS-værktøj er anvendt til at løse ligningen. Brydningsvinklen er altså $30,2^\circ$.

□

Eksempel 3

En tynd stråle lys sendes fra luft ind mod et glasprisme af ukendt glastype. Indfaldsvinklen er 51° og brydningsvinklen er 29° . Bestem brydningsindekset for det ukendte glas.

Løsning: Vi indsætter de kendte størrelser i brydningsformlen (1). Medium 1 er her luft og medium 2 er glas.

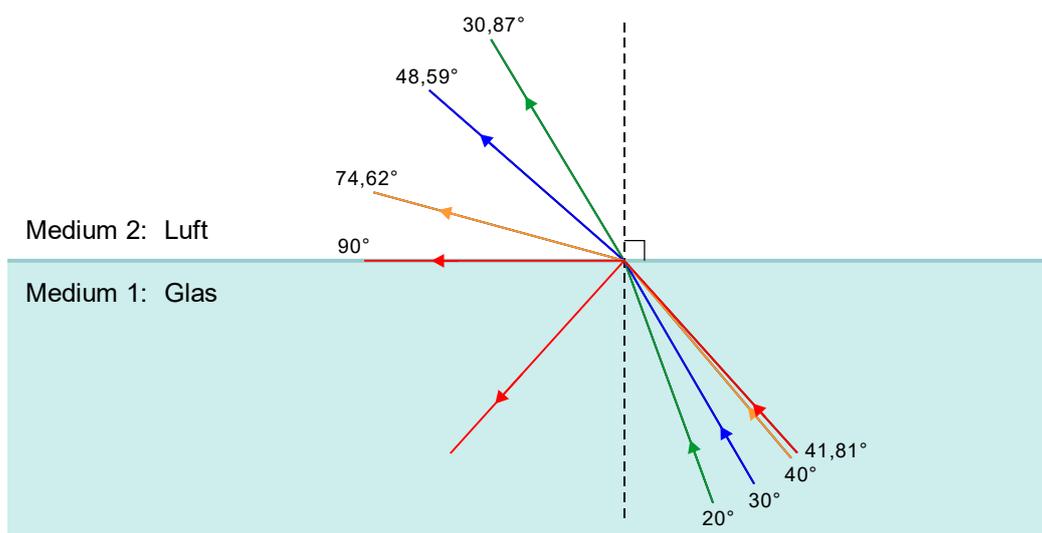
$$\frac{\sin(51^\circ)}{\sin(29^\circ)} = \frac{n_{glas}}{1} = n_{glas}$$

Ved udregning af venstresiden fås brydningsindekset for det ukendte glas til 1,60.

□

3. Totalrefleksion

Det er ret normalt, at når lys bevæger sig fra et medium ind mod et andet medium, så vil noget af lyset brydes, mens en lille smule vil reflekteres. Det sidste med refleksion har vi undertrykt i forrige afsnit, da det er uvigtigt til vores formål. Hvis en lysstråle rammer ind på en grænseflade til et andet medium med *højere* brydningsindeks kan man opleve det fænomen, som kaldes *totalrefleksion*. Hermed menes, at *al* lyset reflekteres. Det kan illustreres på nedenstående figur, hvor lys bevæger sig fra glas med brydningsindeks 1,5 ind mod luft. Der er valgt fire forskellige indfaldsvinkler 20° , 30° , 40° og $41,81^\circ$. De vil ifølge brydningsformlen (2) resultere i brydningsvinkler på henholdsvis $30,87^\circ$, $48,59^\circ$, $74,62^\circ$ og 90° . Indfaldsvinklen på de $41,81^\circ$, som resulterer i en brydningsvinkel på 90° , kaldes for *grænsevinklen for totalrefleksion* og benævnes ofte i_g . Vinklen kaldes undertiden også for den *kritiske vinkel*. Alle indfaldsvinkler, som er større end i_g , vil føre til totalrefleksion. Øges indfaldsvinklen blot minimalt fra de $41,81^\circ$, vil man se den reflekterede stråle vist med en pil på figuren. Den reflekterede stråle vil selvfølgelig adlyde reglen for refleksion, dvs. at udfaldsvinkel er lig med indfaldsvinkel.



Grænsevinklen for totalrefleksion

Grænsevinklen for totalrefleksion i_g fås af følgende ligning:

$$(4) \quad \sin(i_g) = \frac{n_2}{n_1}$$

Bevis: Formlen fås straks af brydningsformlen (2), idet $\sin(90^\circ) = 1$:

$$\frac{\sin(i_g)}{\sin(90^\circ)} = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow \frac{\sin(i_g)}{1} = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow \sin(i_g) = \frac{n_2}{n_1}$$

□

Bemærkning

Man ser straks af formlen for grænsevinklen for totalrefleksion på forrige side, at totalrefleksion kræver at strålen kommer fra et medium med højt brydningsindeks til et medium med lavere brydningsindeks. Er det modsatte tilfældet, vil højresiden i (4) nemlig give et tal, som er større end 1. Men sinus ligger altid mellem -1 og 1 , så der vil ikke være nogen løsning! En måske mere intuitiv måde at betragte det på er, at ved overgang fra et medium med lavt brydningsindeks til et medium med højere brydningsindeks vil brydningsvinklen blive større end indfaldsvinklen, mens det omvendte vil være tilfældet, hvis overgangen er fra et medium med højt brydningsindeks til et medium med lavere brydningsindeks. I det sidste tilfælde vil det være umuligt at finde en indfaldsvinkel, som giver en brydningsvinkel på 90° .

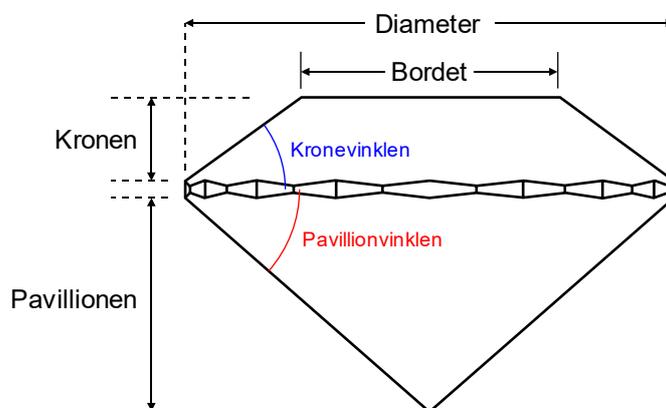
□

Eksempel 4 (Diamant)

Ifølge tabellen med brydningsindekser side 4 har diamant et brydningsindeks på $2,42$. Vi kan bruge formel (4) herpå, idet medium 2 er luft:

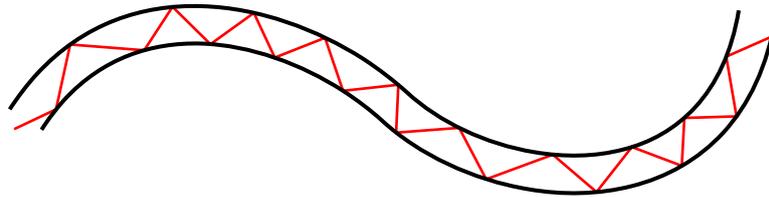
$$\sin(i_g) = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{2,42} \Leftrightarrow i_g = 24,4^\circ$$

Det høje brydningsindeks for diamant giver altså anledning til en temmelig lille grænsevinkel for totalrefleksion. Der vil med andre ord nemmere kunne forgå totalrefleksion i en diamant end hvis smykket var lavet af glas. Denne egenskab udnyttes kraftigt i slibningen af en diamant, idet det gælder om at slibe diamanten på en måde, så der går så lidt lys "til spilde" ved brydning i bunden af ringen, hvor diamanten sidder påmonteret. Det gælder om at så meget som muligt af lyset brydes *op* igennem toppen af diamanten, så den kan funkke og også gerne give et farvespil. Man har fundet frem til en helt bestemt måde at slibe en diamant på, at den kaldes *brilliant-slibning*. Du kan se en model af den herunder. Derudover er der afbildet en diamant for tillæggets forside.



Eksempel 5 (Lysleder)

En meget vigtig anvendelse af totalrefleksion finder man i en *lysleder*, også kaldet et *optisk fiberkabel*. Et sådant kabel bliver i dag anvendt overalt i Danmark til at levere bredbånd til danskerne og deres Internet og meget andet. I stedet for at levere data gennem almindelige kobberledninger, kan data sendes i større mængder og mere effektivt via lys i lysledere. Den fysiske pointe her er, at det gælder om, at lys ikke går til spilde, eller i hvert fald ikke for meget. Derfor handler det om at skabe så meget totalrefleksion som muligt. Bryder lys ud gennem et kabel, fører det til tab! Figuren nedenfor viser, hvordan lyset i dets vej gennem et kabel foretager totalrefleksion og ikke brydning. I virkeligheden vil det nok ikke foretage så mange refleksioner som antydnet på figuren, da et lyslederkabel vil have længere lige stræk.

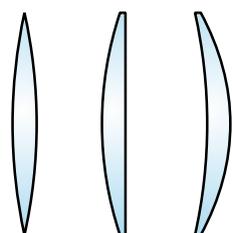


4. Anvendelser af brydning

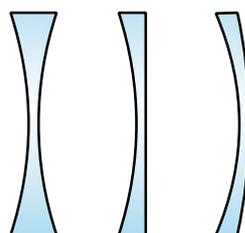
Til slut vil vi gennem en række fotos/figurer illustrere, hvor begrebet *brydning* forekommer eller finder anvendelse i vores dagligdag. Det kan være gennem menneskets egne opfindelser eller fordi brydning i forvejen findes i naturen. De næste par sider vil være afsat til dette formål. Vi vil dog ikke gå i detaljer med de enkelte dele.

Samle og spredelinser

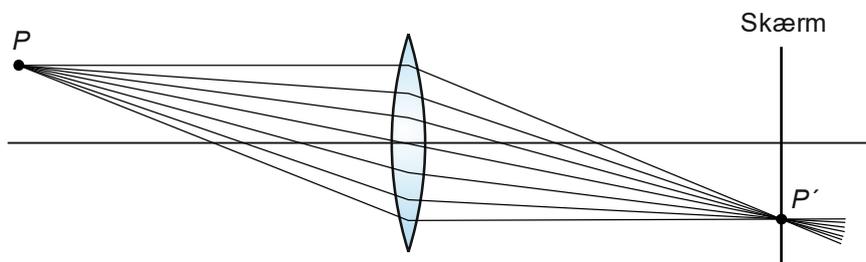
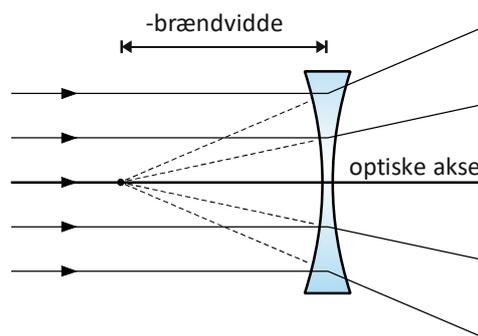
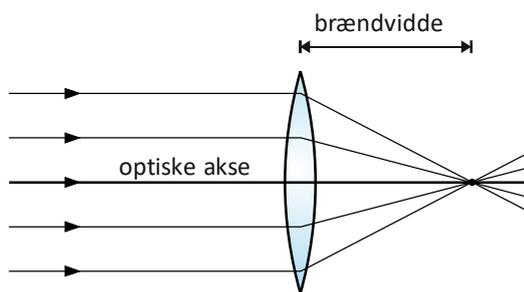
Når lys rammer en linse, foregår der *brydning*, dvs. lyset skifter retning. I en *samlelinse* vil parallelle stråler samles, mens de i en *spredelinse* vil spredes. Det kan udnyttes i briller, i en lup, et brændglas, etc. En samlelinse kan også bruges til at skabe et skarpt billede af et punkt P på en skærm bag samlelinse. Billedannelse er i det hele taget en vigtig egenskab for en linse, og det udnyttes til en lang række formål.



Samlelinser

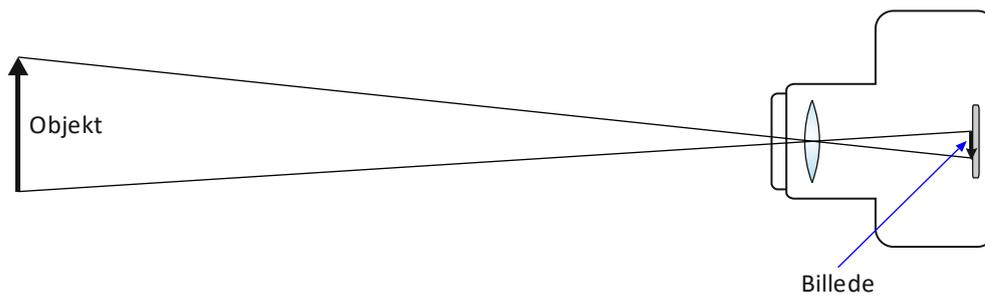


Spredelinser



Kamera

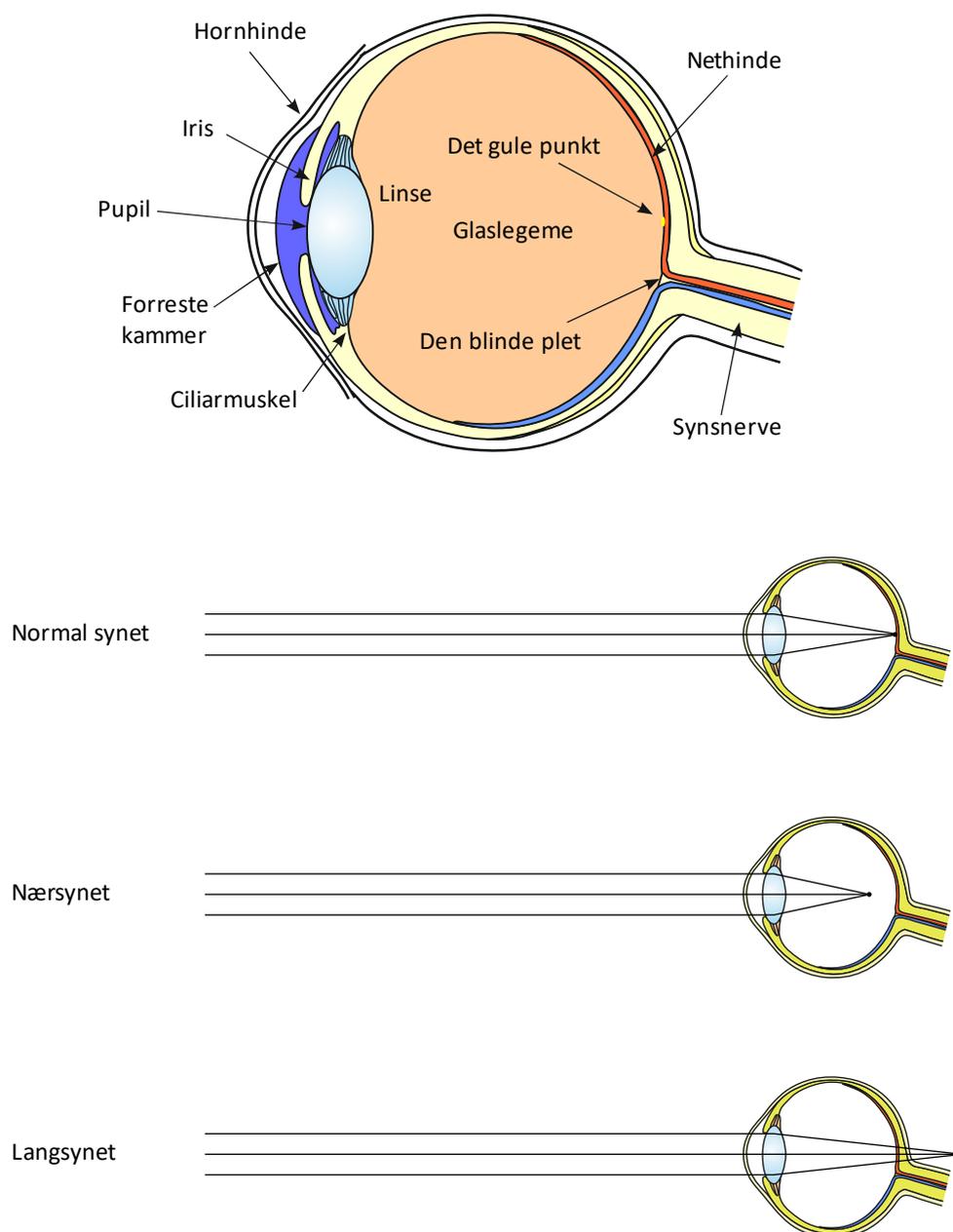
Man ønsker at fotografere et objekt med et kamera. Lys fra objektet finder vej ind i kameraet og *brydes* i et linsesystem, som skaber et billede af objektet på en billedsensor bag i kameraet. Linsesystemet er på figuren meget simplificeret vist som en samlelinse.



Øjet hos et menneske

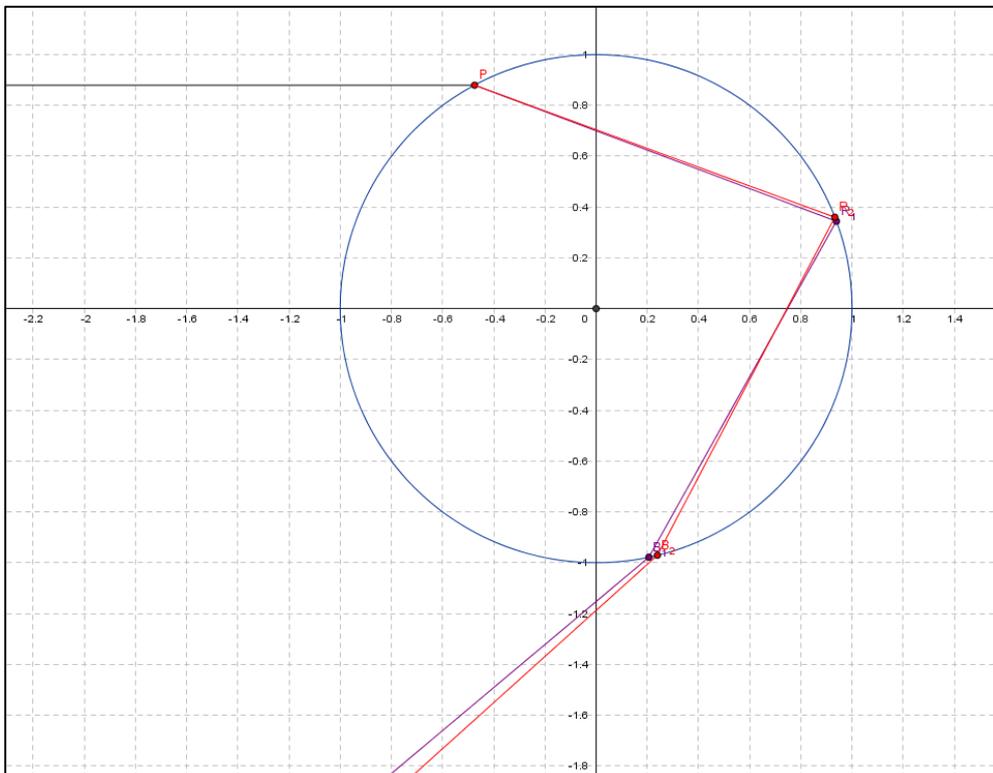
Mennesket er så viseligt indrettet, at vi har et øje, indeholdende en linse. Lyset kan *brydes* i denne linse, hvilket sætter os i stand til at se objekter. Øjet kan endda *akkommodere*, hvormed menes, at muskler kan ændre linsens tykkelse og dermed linsens brændvidde. Det sætter personen i stand til at fokusere skarpt på objekter i forskellige afstande.

På nederste del af figuren er vist situationen for en normalsynet person, en nærsynet person og en langsynet person. Den normalsynede kan dannede et skarpt billede på nethinden for både rimelig nære objekter og meget fjerne objekter. For at den nærsynede kan danne et skarpt billede af objekter langt væk, kan denne anvende en *spredelinse* foran øjet (negativ dioptri værdi). En langsynet behøver derimod en *samlelinse* (positiv dioptri værdi) foran øjets egen linse for at kunne se meget nære objekter skarpt.



Regnbuen

En regnbue opstår undertiden på himlen, når der både har været regn og solen skinner derefter. Der sker det, at solstrålerne *brydes* og *reflekteres* i regndråberne, som vist på figuren. Det hvide lys består af mange bølgelængder. De forskellige bølgelængder har en smule forskelligt brydningsindeks, hvilket bevirker en farveopsplitning ...



Fatamorgana - luftspejling

Forskellige temperaturer i forskellige luftlag giver anledning til *brydning* og et virtuelt billede. Vi har før regnet med, at brydningsindekset for atmosfærisk luft er 1. Det er nu kun en tilnærmelse. Den er en lille bitte smule over 1 og afhænger desuden af temperaturen. Det bevirker, at lys nær jorden vil afbøjes (*brydes*). Iagttageren oplever derved, at genstanden (her bilen) befinder sig et andet sted, end den i virkeligheden gør ... På fotoet ser noget af himlen ud til at befinde sig under horisonten. Vi har altså at gøre med en *luftspejling*.

