

# Brydningsloven udledt fra et virkningsprincip

Jacob Nielsen

Fra det syttende til det tyvende århundrede foregik der med jævne mellemrum en diskussion af, om lys kan betragtes som partikler eller bølger. Vi skal nedenfor se, at brydningsloven kan udledes for både bølger og partikler ved hjælp af to forskellige ekstremumsprincipper, hvor det for partiklernes vedkommende drejer sig om virkningsprincippet.

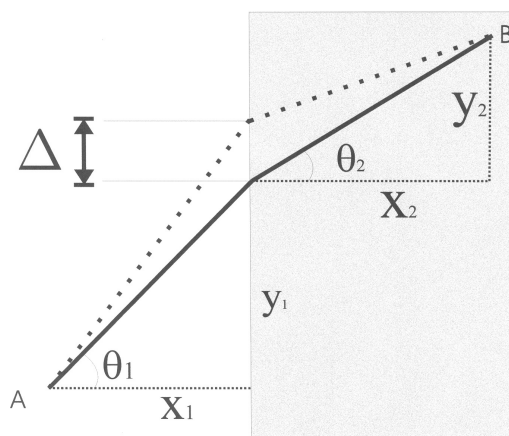
## Brydningsloven:

Descartes (1596-1650) opdagede brydningsloven. Hvis en lysstråle passerer grænsen mellem to medier med brydningsindeks  $n_1$  henholdsvis  $n_2$ , da opfylder indfaldsvinklen  $\theta_1$  og brydningsvinklen  $\theta_2$  ligningen:

Heron's ekstremumsprincip forklarer ikke brydningsloven, men allerede i det syttende århundrede fandt fysikerne et ekstremumsprincip, hvorfra brydningsloven kan udledes. Dette ekstremumsprincip bygger på begrebet optisk vejlængde. Vi definerer den optiske vejlængde som produktet af den geometriske vejlængde og brydningsindekset, ekstremumsprincippet udtrykker:

Lyset følger en bane, hvor den optiske vejlængde har ekstremum.

Lyset vil ikke vælge den lige vej mellem to punkter A og B, men banen vil knække, så lyset løber lidt længere i det medium, der har det mindste brydningsindeks og lidt kortere i det medium med størst brydningsindeks. På næste side udledes brydningsloven ud fra princippet om ekstremum for optisk vejlængde.



På figuren ses lysets vej fra punktet A til punktet B. Desuden ses en varieret vej, hvor det punkt, hvor lyset rammer overgangen mellem de to medier er forskudt stykket  $\Delta$ .

. Ekstremumsprincippet for optisk vejlængde siger så, at differentialkvotienten med hensyn til  $\Delta$  er lig med nul for  $\Delta=0$ , eftersom  $\Delta=0$  svarer til den virkelige geometriske vej. I det følgende betegnes optiske vejlængder med  $\sigma$ , geometriske vejlængder med  $l$  og brydningsindeks med  $n$ . Lidt hjælp til forståelse af de matematiske detaljer findes i fodnoten<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Andet lighedstegn i første linje følger af Pythagoras sætning. I tredje linje skal man huske at funktionen er sammensat; nemlig af kvadratrodsfunktionen, kvadrat og produkt af funktion og tal.

Betragtes lys som bølger defineres brydningsindekset som bekendt :

hvor  $c$  er lysets hastighed i vacuum og  $v$  er udbredelseshastigheden i det aktuelle medium. Eksperimentelt fandt man, at brydningsindeks altid er større end en. Bølgéhastigheden er altså mindre en  $c$  i ethvert materiale.

Lad os nu betragte lyset som partikler, hvis baner er fastlagt af mekanikkens love. Virkningsintegralet svarende til lysets vej fra A til B er:

Vi kan nu gå frem præcis som på forgående side; blot skal brydningsindices overalt erstattes af impulser. Resultatet bliver:

Hvis lys betragtes som partikler, viser eksperimenterne altså, at lyspartiklernes impuls og dermed hastigheden i et materiale altid er større en hastigheden i vacuum.

**I teorien kan vi altså afgøre om lys er bølger eller partikler, ved at måle om lyshastigheden - i f.eks. glas – er større eller mindre end  $c$ .**

Desværre kunne man ikke måle lyshastigheden i glas i det syttende århundrede. Vi er altså her i en situation, hvor teoretikerne (filosofferne) ikke kan komme videre, før et afgørende eksperiment bliver udført. Vi vender os nu til den omvendte situation. Kort før år 1900 stod man i den situation, at man ikke kunne komme videre, uden en ny ide. Det var som bekendt Planck, der fik den.

## **Planck**

Planck arbejdede omkring år 1900 med varmestråling og varmestråling er jo elektromagnetisk stråling ligesom lys. Han fandt en empirisk strålingslov det vil sige en formel, der beskriver sammenhængen mellem udstrålet intensitet og bølgelængde og temperatur. Denne formel kunne imidlertid ikke forklares ud fra datidens termodynamik.

Planck antog at varmestrålingen udsendes af svingende elektriske ladninger ( harmoniske oscillatorer ) præcis som når elektronerne i en antenne udsender radiobølger – langbølget elektromagnetisk stråling. Problemet var fordelingen af energien mellem oscillatorer med forskellig frekvens. Den kinetiske molekyleteori, der blandt andet forklarer idealgassernes tilstandsligning, forudsiger at energien fordeles ligeligt. Det fører imidlertid til et paradoks, nemlig at varmeudstrålingen vil blive uendelig stor. Der må altså lægges et bånd på oscillatorernes udfordelse. Planck fik i 1901 den ide, at oscillatorernes virkningsintegral er kvantiseret – nemlig i portioner af  $h$ . Det var en ide, der i løbet af de næste par årtier skulle vise sig, at have meget vidtrækkende konsekvenser.