

V. INLEDNING I OPTIK

Källor:

- L. Simmons, Fysiikka, WernerSöderström Oy, Borgå, 1970.
- F. W. Sears och M. W. Zemansky, University Physics, Addison-Wesley, Reading, U.K., 1964.
- J. E. Stewart, Infrared spectroscopy, experimantal methods and techniques, Marcel Dekker, New York, U.S.A., 1970.
- F. A. Jenkins och H. E. White, Fundamentals of optics, McGraw-Hill, Singapore, 1981.

V.1. Ljus

Ljus är **elektromagnetisk strålning** och har således dual karaktär. I många experiment beter det sig som en **vågrörelse**, bl. a. får man interferens. Därför kan ljuset karakteriseras med **våglängd** eller med **frekvens**. I vissa experiment beter ljuset sig som en ström av **fotoner**, bl. a. i det fotoelektriska fenomenet. Därför kan ljuset karakteriseras med **energiinnehållet** hos en foton. Eftersom samma ljus beskrivs på två olika sätt, måste det finnas ett samband mellan dessa karakteristika. **Plancks formel**

$$E = h\nu \quad (\text{V.1})$$

och formeln

$$\lambda = c/\nu \quad (\text{V.2})$$

ger sambandet.

Hela det elektromagnetiska spektret från radiovågor till γ -strålning beter sig fundamentalt på samma sätt, endast energiinnehållet varierar. Med **ljus** avses oftast det infraröda, synliga och ultraviolette området av det elektromagnetiska spektret. Ljusets och den elektromagnetiska strålningens egenskaper har diskuterats tidigare kapitel I.

Fält

Om en fysikaliskt observerbar storhet är definierad i varje punkt i den tredimensionella rymden bildar den ett **fält**. En skalär storhet (t. ex. temperaturen) bildar ett **skalärt fält** och en vektorstorhet (t. ex. hastighet) ett **vektorfält**.

En vektor har en viss riktning och en viss längd. **Riktningen** anges med hjälp av platskoordinater men **längden** behöver inte ha någonting med den vanliga tredimensionella rymden att göra. Vektorns längd **visualiseras** ofta genom att rita längden i någon lämplig skala i den tredimensionella rymden.

Elektromagnetisk strålning

Den elektromagnetiska strålningen består av ett **elektriskt fält** och ett **magnetiskt fält**. Båda är vektorfält. Dessa fält visas i Fig. V.1.

Den elektriska fältvektorn ligger vinkelrätt mot strålningens färdriktning. Den magnetiska vektorn ligger vinkelrätt mot strålningens färdriktning och mot den elektriska vektorn. Deras relation ges av **Maxwells ekvationer**, vilka inte behandlas i denna kurs.

I spektrometriska sammanhang är det elektriska fältet av större betydelse än det magnetiska. Existensen av det magnetiska fältet är underförstådd.

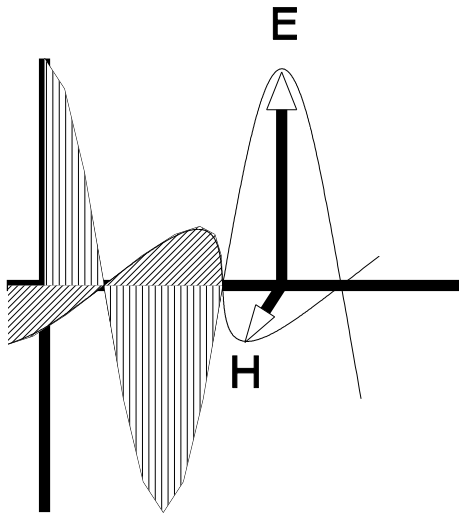


Fig. V.1. Det elektriska och magnetiska fältet i elektromagnetisk strålning.

Våglängd

Den elektromagnetiska strålningens **våglängd** λ är avståndet i rummet mellan två likvärdiga punkter. Detta illustreras i Fig. V.2. Strålningens **amplitud** beskriver fältets maximala styrka under oscillationen. Den är alltså inte en längd i platsrymden.

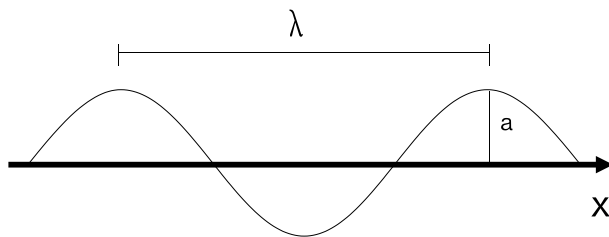


Fig. V.2. Den elektriska strålningens våglängd är λ och amplitud a .

Frekvens

Den elektromagnetiska strålningens **frekvens** ν anger hur många cykler vågrörelsen gör per tidsenhet. Vågrörelsens **period** T anger hur lång tid en cykel tar. Perioden är

$$T = \frac{1}{\nu}. \quad (\text{V.3})$$

Amplituden är givetvis den samma även i denna representation. Dessa storheter visas i Fig. V.3.

Vågrörelsens våglängd kan tänkas vara viktig om man betraktar hela vågrörelsen vid en given tidpunkt. Frekvensen är viktig om man följer fältets inverkan på en viss punkt under en tidsperiod.

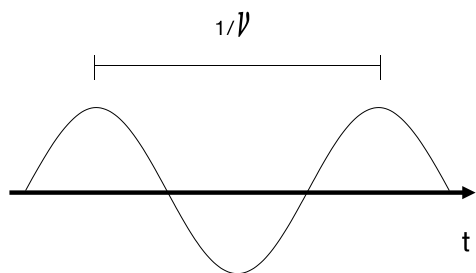


Fig. V.3. Den elektromagnetiska strålningens period $T = 1/\nu$.

Vågtal

Vågtalet $\tilde{\nu}$ anger hur många våglängder som ryms i en längdenhet. Använder man SI enheter är längdenheten en meter och därav följer enheten m^{-1} . I spektrometrin används dock oftast enheten cm^{-1} , dvs. antalet vågor per centimeter.

Fas

Vågrörelsens **fas** anger i vilket skede av oscillationen vågrörelsen är. Detta illustreras i Fig. V.4.

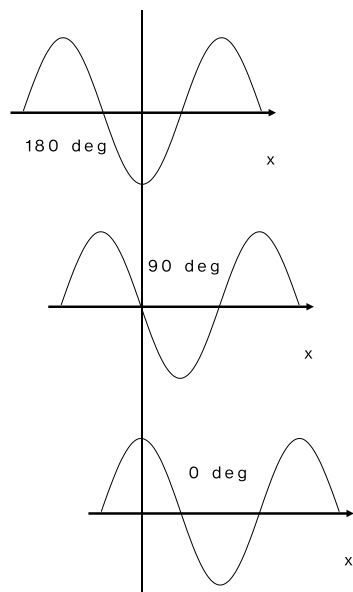


Fig. V.4. Den elektriska strålningens fas.

En vågrörelse kan beskrivas matematiskt med hjälp av en cosinus funktion,

$$\vec{E} = E \cos(\nu t + \phi) \vec{e}, \quad (\text{V.4})$$

där E anger vågrörelsens amplitud, ν dess frekvens, t tidpunkten, ϕ **fasen** och vektorn $\vec{e}$ anger riktningen av den elektromagnetiska vektorn.

V.2. Polarisering

Betrakta en viss foton. Den elektriska vektorn har samma riktning i varje punkt av rummen. Strålningens färdriktning och den elektriska vektorns riktning definierar ett **plan** i vilket oscillationerna sker. Oscillationsplanet och strålningens amplitud illustreras ofta med en dubbelpil som ligger vinkelrätt mot strålningens färdriktning. Ljus består av ett stort antal enskilda vågrörelser (eller fotoner).

Vanligt ljus är **opolariserat**, dvs. alla riktningar av den elektriska vektorn förekommer lika ofta. Opolariserat ljus visas schematiskt i Fig. V.5.

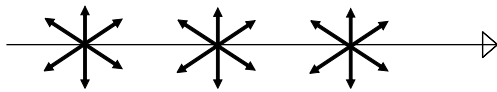


Fig. V.5. Opolariserat ljus schematiskt.

Om ljuset endast består av vågor med samma oscillationsplan är ljuset **planpolariserat** såsom Fig. V.6. visar schematiskt. Om ljuset består av vågor vars oscillationsplan vrids ständigt är ljuset **cirkulärt polariserat**. Detta visas i Fig. V.7.

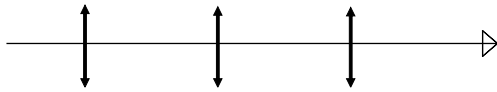


Fig. V.7. Planpolariserat ljus schematiskt.

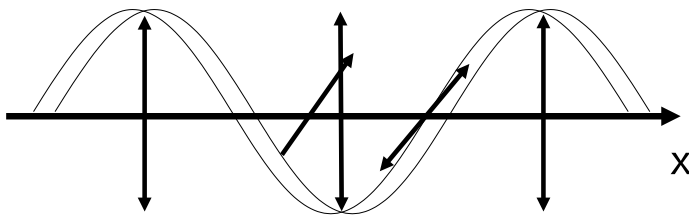


Fig. V.7. Cirkulärt polariserat ljus schematiskt.

V.3. Brytningsindex

1. OPTISK TÄTHET

Varje medium genom vilket ljus (eller mera allmänt elektromagnetisk strålning) kan passera är **Optiskt material**. **Optisk täthet** beskriver hur snabbt ljuset kan framskrida i det optiska materialet. Den optiska tätheten anges m.h.a. **brytningsindexet** (eng. *refractive index*) n .

Observera att optisk täthet har inte någonting att göra med hur genomskinligt materialet är. Denna egenskap bestäms av absorption. Den har inte heller någonting att göra med materiets vanliga täthet.

Ljusets hastighet i vakuum är $c = 299792458$ m/s. Om ljusets hastighet i mediet är v är mediets brytningsindex

$$n = \frac{c}{v}. \quad (\text{V.5})$$

Olika material har olika brytningsindex. Vakuumets brytningsindex är exakt 1. Exempel på andra ämnen:

Glas	$n = 1.520$
Vatten	$n = 1.333$
Luft	$n = 1.000$

Preciseringar:

- För luft (273 K, 101325 Pa, natriums D-linje) $n = 1.000292$
- För olika typer av optiskt glas varierar brytningsindexet mellan 1.52 och 1.72.

Ljusets **frekvens** ν är konstant, dess hastighet och **våglängd** beror på mediets brytningsindex. Om λ är ljusets våglängd i vakuum och λ_m våglängden i mediet är

$$\frac{\lambda}{\lambda_m} = n. \quad (\text{V.6})$$

Mediets optiska täthet är inte lika för alla frekvenser.

2. OPTISK VÄG

Ljuset framskrider avståndet

$$d = vt \quad (\text{V.7})$$

på tiden t i ett medium där ljusets hastighet är v . Eftersom

$$v = \frac{c}{n} \quad (\text{V.8})$$

enligt ekvation (V.5) följer det att

$$d = \frac{ct}{n} \quad \Rightarrow \quad nd = ct. \quad (\text{V.9})$$

Den **optiska vägens längd** defineras som

$$\Delta = nd. \quad (\text{V.10})$$

De optiska väglängderna då ljuset passerar flera olika optiska media är additiva,

$$\Delta = nd + n'd' + n''d'' + \dots \quad (\text{V.11})$$

Detta visas i Fig. V.8.

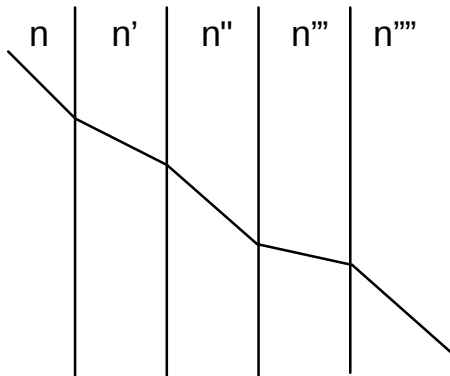


Fig. V.8. De optiska delvägarna är additiva.

Fermats princip:¹

En ljusstråle följer den kortaste optiska vägen.

¹ Pierre de Fermat (1601 - 1665). Fransk matematiker. Arbetade i sin ungdom tillsammans med Pascal inom talteorin, på vilken han baserade sina teorier om sannolikheter. Han är mest känd för sina matematiska teorier om egenskaper av tal. Han var också en bra lingvist och hade en mycket bred vetenskaplig utbildning. Han var dessutom parlamentledamot i Tolouse och fick beröm för sina juridiska kunskaper och sin opartiskhet.

3. BRYTNING OCH REFLEXION

När en ljustråle träffar en gränsyta mellan två optiska material kan två fenomen förekomma: **reflexion** och **brytning** (eller **refraktion**).

Reflexion

Den infallande strålen och den **reflekterade** strålen bildar **lika stora vinklar** ϕ med ytans normal, se Fig. V.9.

Snells lag:²

Betrakta gränsytan mellan två optiska material med brytningsindexen n och n' . Om den infallande strålen bildar vinkeln ϕ med gränsytans normal bildar den brutna strålen som har passerat gränsytan vinkeln ϕ' med ytans normal. Vinkeln ϕ' kan räknas från formeln

$$\frac{\sin \phi}{\sin \phi'} = \frac{n'}{n}. \quad (\text{V.12})$$

Detta visas i Fig. V.9.

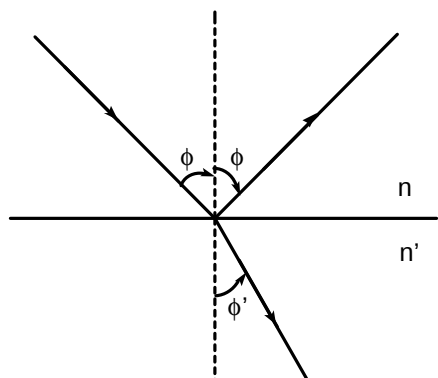


Fig. V.9. Brytning och reflexion.

² Willebrord Snell (1591 - 1626). Holländsk astronom och matematiker. Vid 21 års ålder efterträdde han sin far som professor i matematik vid Leyden universitet. År 1617 bestämde han jordklotets radie på basen av kurvaturen mellan Alkmaar och Bergen-op-Zoom. Han skrev refraktionslagen i en opublicerad artikel år 1621. Han baserade sin formel på cosekant funktionen. Descartes var den första att ange lagen uttryckt med sinus funktioner. Lagen kallas också i Frankrike Descartes lag.

4. DISPERSION

Dispersion innebär att olika våglängder separeras vid brytning därför att mediets brytningsindex inte är samma för alla våglängder. Det vita ljuset består av alla synliga våglängder. Dess dispersion visas i Fig. V.10.

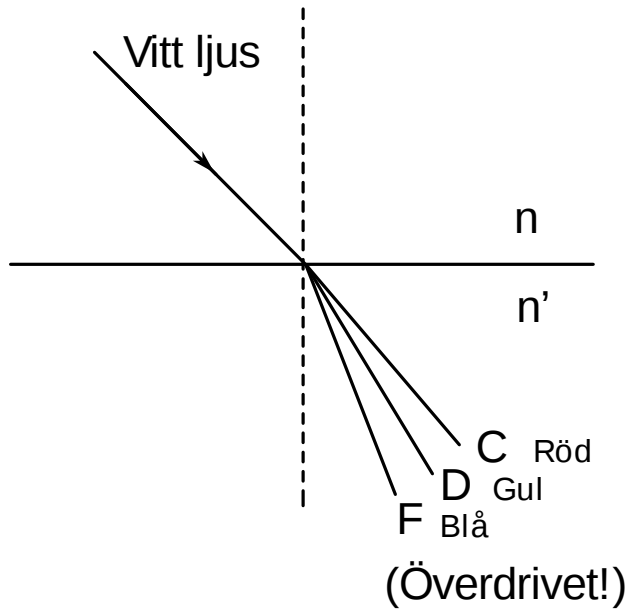


Fig. V.10. Dispersion.

Atomerna emitterar vid hög temperatur ljus med för atomen karakteristisk våglängd. **Fraunhofers notation** för dessa våglängder används ofta i spektroskopisk jargong. I tabellen nedan ges några exempel på dessa våglängder samt brytningsindexen för dem i vanligt optiskt glas och i kvarts.

Tabell V.1. Brytningsindex av optiskt glas och av kvartsglas vid vissa våglängder.

Linje	Atom	Våglängd [nm]	Optiskt glas	Kvarts
C	H	656.3	1.52042	1.66650
D	Na	589.2	1.52300	1.67050
F	H	486.1	1.52933	1.68059
G'	H	434.0	1.53435	1.68882

5. TOTAL REFLEXION

Total reflexion betyder att allt infallande ljus reflekteras och inget ljus passerar gränsytan.

Mekanismen för fenomenet är att vinkeln för den passerande strålen (vinkeln ϕ' i Snells lag, ekvation (V.12)) är 90° . Då kan inte något ljus passera gränsytan. Det infallande ljuset måste alltså komma från optiskt tätare material till gränsytan.

Den **kritiska vinkeln för totalreflexion** ϕ_c är den minsta vinkeln av infallande ljus som ger totalreflexion. Den fås från formeln

$$\sin \phi_c = \frac{n'}{n}. \quad (\text{V.13})$$

Fenomenet visas i Fig. V.11.

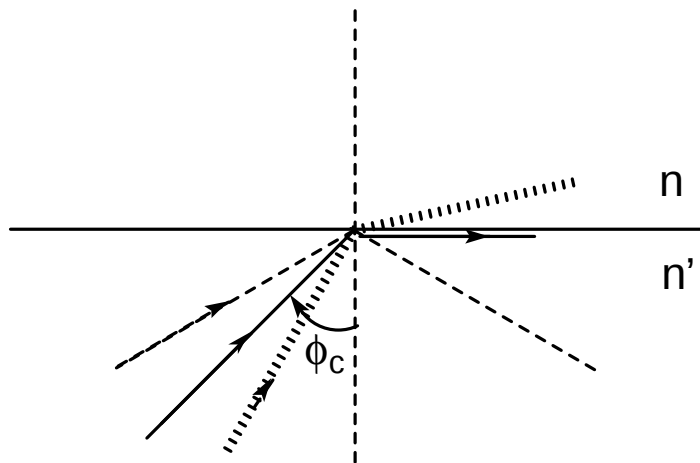


Fig. V.11. Total reflexion. Den prickade strålen infaller i en vinkel som är mindre än den kritiska vinkeln och refraction sker. Den hela linjen visar den kritiska vinkeln för totalreflexion. Den streckade linjen infaller i en vinkel som överskrider den kritiska vinkeln och totalreflexion observeras.

6. DUBBELBRYTNING

Dubbelbrytande material är media där strålgången beror på ljusets polariseringsplan.

Många naturliga mineralkrystaller är dubbelbrytande, t. ex. kalcit och kvarts. Mineralkrystallerna är oftast dubbelbrytande endast längs vissa kristallkoordinataxlar. Om man tittar igenom kristallen längs en sådan axel ser man två bilder av ett föremål. Vrider man kristallen ser man bara en bild precis som man skulle vänta sig.

Opolariserat ljus (en våg med ett ospecificerat polariseringsplan) kan uttryckas enligt vektorkalkyl som summan av två polariseringsriktningar. När opolariserat ljus styrs i en kristall beter sig den vågrätt och lodrätt polariserade komponenten på olika sätt vilket ger två strålgångar. Den ena komponenten följer Snells lag (**ordinärt stråle**) medan den andra avviker från Snells lag (**extraordinärt stråle**). Dessa strålar visas i Fig. V.12.

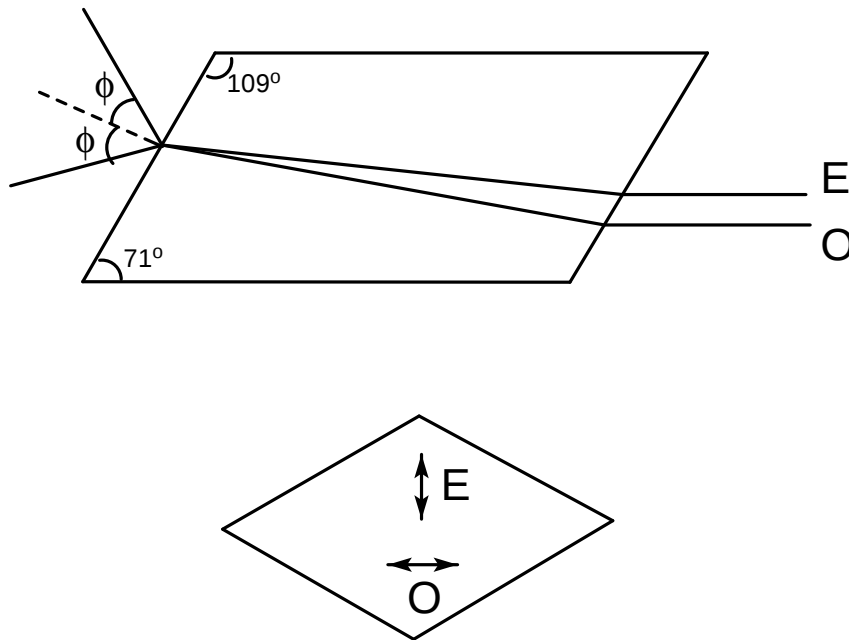


Fig. V.12. Dubbelbrytande material (kalcit).

V.4. Geometrisk optik

Geometrisk optik beskriver de enkla optiska instrumentens egenskaper utgående från reflexion och refraction av ljusstrålar som beskrivs som rätta linjer. I många fall betraktar man ett föremål (som här ritas som en fylld pil) och ett avbildat föremål (som ritas som en ihålig pil). Varje punkt i ett föremål fungerar som ett spridningscentrum, dvs. från varje punkt emitteras ljusstrålar i varje riktning. I geometrisk optik ritas man endast de strålar som på något sätt är extrema, ofta strålar som ligger vinkelrätt mot det optiska instrumentet eller går genom instrumentets mittpunkt.

1. GLASSKIVA

En glasskiva förskjuter strålen som infaller snett mot skivan. Förskjutningen kan räknas ut från skivans tjocklek och brytningsindex med hjälp av Snells lag. Ett exempel visas i Fig. V.13.

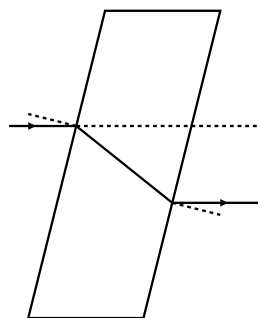


Fig. V.13. Förskjutning av ljusstråle i en glasskiva.

2. PRISMOR

En prisma som är gjord av optiskt tätt material kan användas som en reflektor. Dess funktion baserar sig i sådana sammanhang på totalreflexion. Ljuset penetrerar prisman genom en vägg som ligger vinkelrätt mot den infallande strålen men totalreflekteras vid de sneda kanterna. Prismans form måste vara sådan att den kritiska vinkeln överskrids. Prismen vänder bilden. Två allmänt förekommande optiska system visas i Fig. V.14.

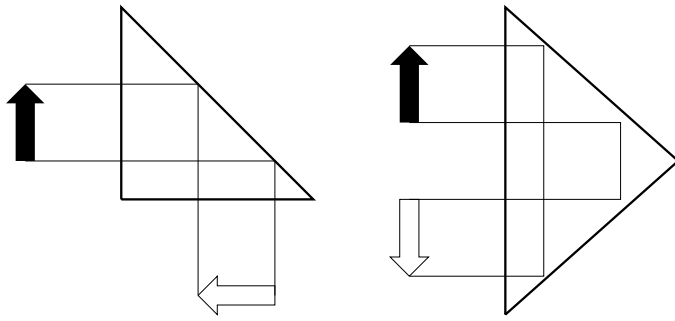


Fig. V.14. Prismor.

En avhuggen prisma (*Dove prism*) kan användas i lineära optiska system för att vända en bild. Även här baserar sig funktionen på totalreflexion. Principen visas i Fig. V.15.

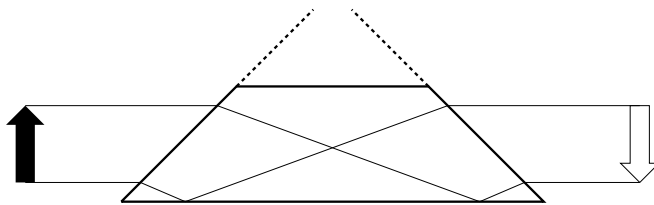


Fig. V.15. En avhuggen prisma.

Som en kemisk tillämpning av prismor visas ett optiskt instrument för att bestämma vätskans brytningsindex, en Pulfrich **refraktometer**. Instrumentet består av en prisma med känt brytningsindex. En liten droppe av provet placeras på prisman så att det bildar ett tunt skikt. Instrumentet belyses med en ljustråle som bryts i prismans gränssyta och framskrider i prisman tills den träffar prismans andra vägg. Man avläser positionen av strålen vid den andra väggen och räknar ut vätskans brytningsindex på basen av Snells lag. Principen för instrumentet visas i Fig. V.16.

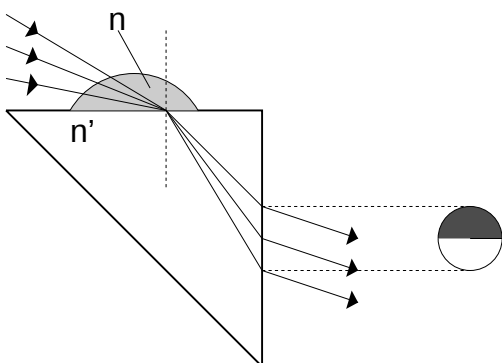


Fig. V.16. Pulfrich refraktometer.

3. SPEGEL, LINS

En spegel kan vara **plan**, inåt böjd (**konkav**) eller utåt böjd (**konvex**). Reflexionen från ytan följer den normala lagen, m.a.o. är vinkeln från ytans normal för den reflekterade strålen samma som för den infallande. Spegeltyperna visas i Fig. V.17.

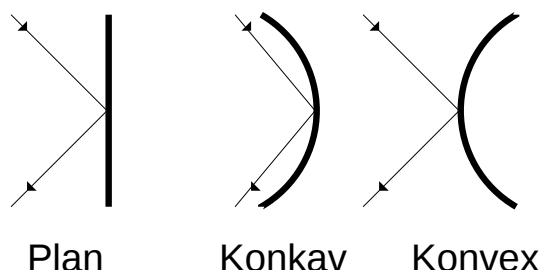


Fig. V.17. Plan, konkav och konvex spegel.

En spegel för optiska ändamål tillverkas oftast genom att slipa en glasskiva och sedan avdunsta ett några atomlager tjockt aluminium- eller silverskikt på den. Då får man en reflektans på ca. 90 % i det synliga området. En typisk reflektanskurva visas i Fig. V.18. Högreflekterande speglar ytbehandlas med ett dielektriskt skikt (flera lager med varierande brytningsindex) i stället för metall och då får man en reflektans på 99 %. Spegelytans jämnhet anges oftast med hjälp av våglängden för det ljus som spegeln är avsedd för. En standardspegel är slipad till jämnhet $\lambda/4$ medan hög kvalitet innebär en jämnhet på $\lambda/10$.

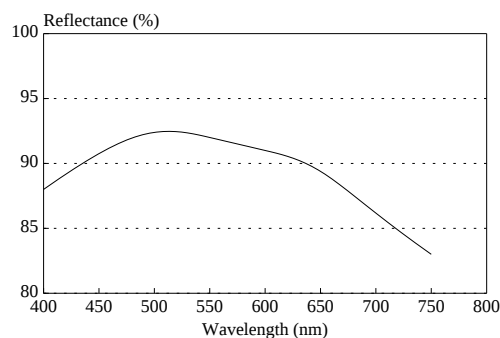


Fig. V.18. Typisk reflektanskurva för en spegel med aluminiumyta.

En lins kan vara antingen utbuktad (**konvex**) eller inböjd (**konkav**). Undertyperna bikonvex eller bikonkav, plankonvex eller plankonkav och konvexkonkav (*meniscus lense*) finns. De visas i Fig. V.19.

Centralt för linser och speglar är att de kan bryta (reflektera) en ljustråle. Den egenskapen bestäms av ytans (ytornas) kurvatur och för linser av materialets brytningsindex. Förmågan att bryta en stråle mäts med brännvidd.

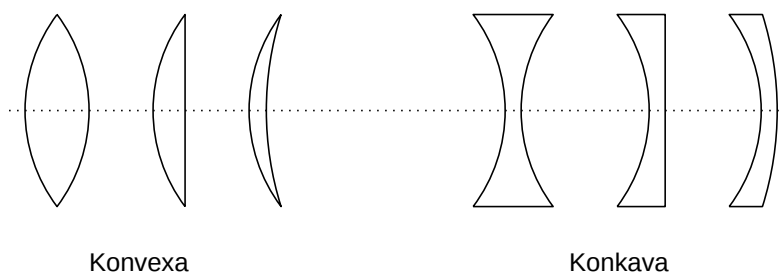


Fig. V.19. Konvexa och konkava linser.

Det optiska instrumentets **optiska axel** är linjen som ligger vinkelrätt mot instrumentet och går igenom dess mittpunkt. Den optiska axeln är utritad i figurerna i detta kapitel med en prickad linje.

En ideal konvex lins fokuserar alla infallande ljustrålar som är parallella med den optiska axeln till en punkt som ligger på den optiska axeln. Den punkten kallas **brännpunkt** eller **fokalpunkt** F (*focus*). Avståndet från linsens mittpunkt till brännpunkten är linsens **brännvidd** f (*focal length*). En konkav spegel fokuserar också alla ljustrålar i brännpunkten. En konkav lins bryter ljustrålarna utåt så att de tänkta förlängningarna av de brutna strålarna fokuseras till brännpunkten. Samma gäller för en konvex spegel. Brännvidden är **positiv** om de verkliga brutna strålarna fokuseras och **negativ** om de tänkta förlängningarna fokuseras. Dessa definitioner illustreras i Fig. V.20.

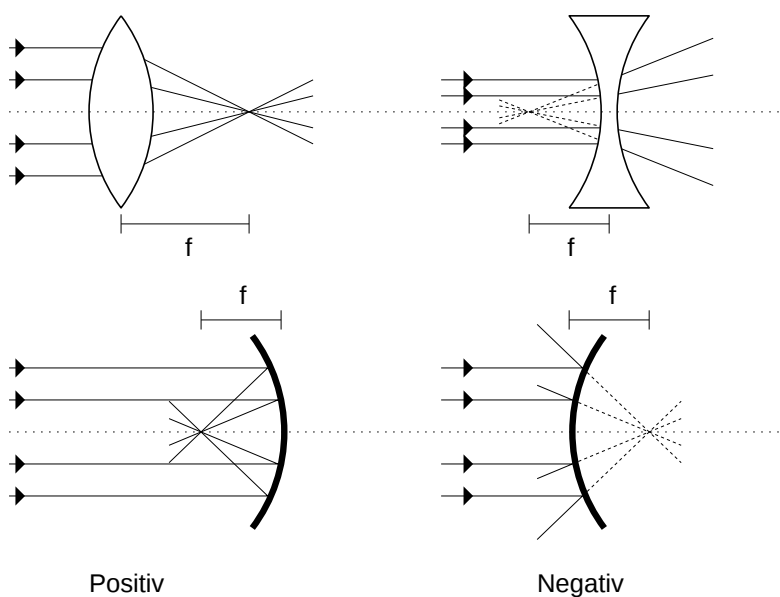


Fig. V.20. Brännviddens definition.

Den fysikaliska storheten som beskriver linsens eller spegelns förmåga att bryta ljustrå-

lar är **brytningsstyrka** B . Den definieras som

$$B = \frac{1}{f}, \quad (\text{V.14})$$

där f är brännvidden. Enheten för brytningsstyrkan är **dioptri**,

$$[B] = \text{D} = \frac{1}{\text{m}}. \quad (\text{V.15})$$

En plan spegel har en oändlig brännvidd.

Om parallella strålar infaller på en ideal lins snett vilket visas i Fig. V.21. fokuseras alla strålar även då i en punkt. Den punkten ligger i ett plan som ligger parallellt med den optiska komponenten och på avståndet f (brännvidd). Planet kallas **brännplan** (*focal plane*).

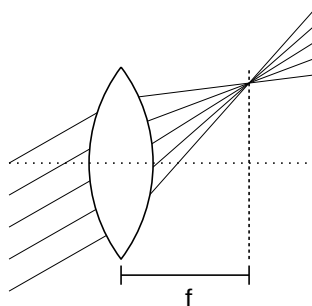


Fig. V.21. Brännplan.

Spegelformeln: Låt en ljuskälla ligga på avståndet a från en spegel på den optiska axeln. En stråle som reflekteras från spegelns yta träffar den optiska axeln på avstånd b från spegeln. Avståndet b är negativt om den tänkta fortsättningen av strålen skär den optiska axeln. Då gäller

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (\text{V.16})$$

där f är spegelns brännvidd. Formeln gäller såväl för konkava som för konvexa speglar. En illustration för en konkav spegel visas i Fig. V.22.

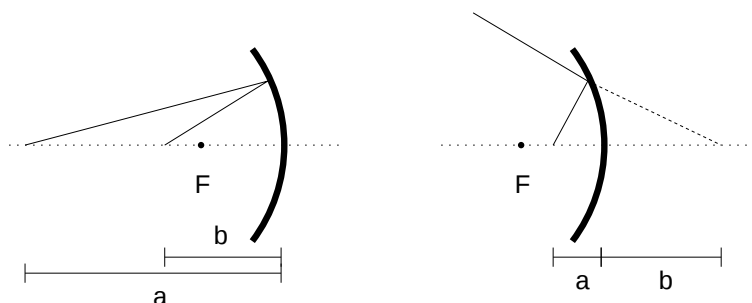


Fig. V.22. Spegelformeln: $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$.

Spegelns förstoring: Låt ett föremål ligga på avståndet a från en spegel och bilden på avståndet b . Då är spegelns **förstoring**

$$M = \frac{b}{a}. \quad (\text{V.17})$$

Detta illustreras i Fig. V.23.

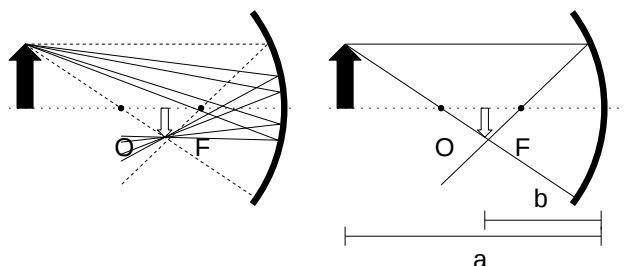


Fig. V.23. Spegelns förstoring.

Observera att om spegelns brännvidd f är känd kan bildens läge b räknas ut från spegelformeln som

$$b = \frac{af}{a - f} \quad (\text{V.18})$$

och förstoringen beror endast på föremålets avstånd från spegeln,

$$M = \frac{f}{a - f}. \quad (\text{V.19})$$

Observera att om de reflekterade (brutna när det gäller en lins) strålarna verkligen fokuseras får man en **verklig bild**. Om de tänkta fortsättningarna fokuseras får man en **virtuell bild** istället.

Linsformeln: Låt ett föremål ligga på avståndet a från en lins och bilden på avståndet b . Här är b negativ om bilden är virtuell. Då gäller

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (\text{V.20})$$

Förstoringen är

$$M = \frac{b}{a}. \quad (\text{V.21})$$

Dessa storheter illustreras i Fig. V.24.

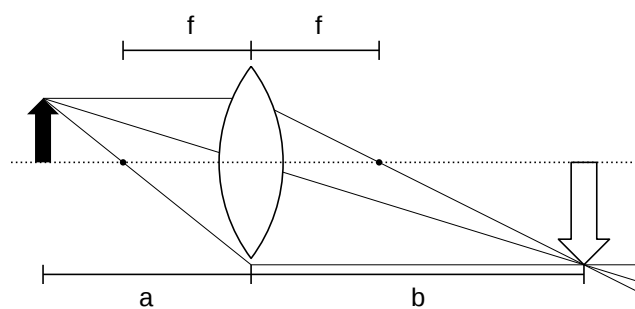


Fig. V.24. Linsens förstoring.

4. LINSFEL

Verkliga optiska komponenter är inte ideala. Delvis är formen och jämnheten inte perfekt och dels har linserna alltid en viss tjocklek. Formler för tjocka linser (dvs. inte oändligt tunna ideala linser som har diskuterats ovan) existerar. Med **linsfel** avser man fel i linsens form. Några av de mest typiska distorsionerna är aberration, koma och astigmatism.

Sfärisk **aberration** som illustreras i Fig. V.25. betyder att strålarna som faller på linsens kanter inte fokuseras till samma brännpunkt som strålarna nära linsens mittpunkt. Detta innebär att bilden inte är skarp.

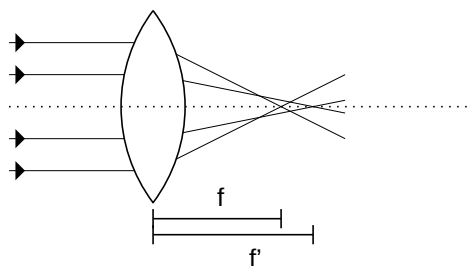


Fig. V.25. Aberration.

Koma innebär att parallella strålar som faller snett på linsen inte fokuseras i en punkt som i en ideal lins. Resultatet blir en punkt med svans ungefär som i en komet. Principen visas i Fig. V.26.

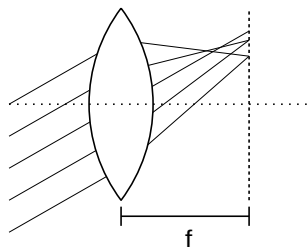


Fig. V.26. Koma.

En **astigmatisk** lins har olika brännvidder i vertikalt och horisontellt led vilket visas i Fig. V.27. Bilden blir oskarp. Vid den ena brännpunkten är bilden av en skarp punkt ett vertikalt streck och vid den andra ett horisontellt streck. Mellan dessa punkter avbildas en punkt till en sfär.

Effekten av aberration kan elimineras nästan helt genom att använda kombinationslinser istället för enskilda linser. Den kan minskas genom att använda endast den centrala delen av linsen genom att placera en **bländare** (**apertur**) framför linsen. Astigmatism

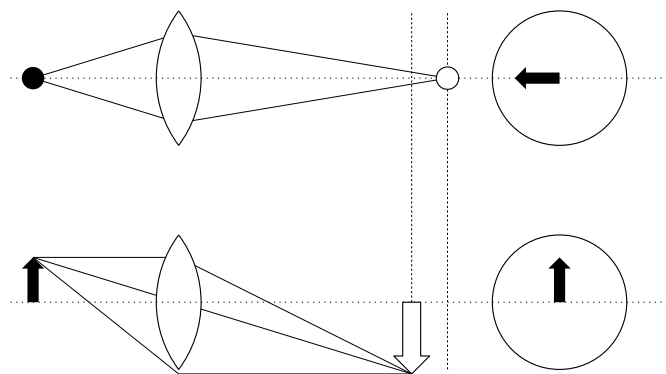


Fig. V.27. Astigmatism.

kan också elimineras i stor utsträckning genom att använda kombinationer av flera linser av olika glastyper och speciell slipning.

Färgfel uppstår eftersom optisk material har olika brytningsindex för olika våglängder. Detta leder till att de röda färgerna inte fokuseras till samma punkt som de blåa. En **akromatisk** lins, som egentligen är en kombinationslins, avlägsnar detta problem.