

Georg Vogl
**INSTRUMENTAL
OPTIK**

*En praktisk
handledning*

LAURELIUS

Instrumentaloptik

GEORG VOGL **Instrumentaloptik**

EN PRAKTISK HANDEDNING

▷ **FORUM** ◁

ILLUSTRERAD MED 31 FOTOGRAFIER
OCH 101 TECKNINGAR

© 1954 Bokförlaget Forum AB, Stockholm
Printed in Sweden

STOCKHOLM 1954/STOCKHOLMS BOKINDUSTRI AB

Innehåll

FÖRORD av professor Manne Siegbahn	7
AVBILDNINGSFEL	9
FOTOOBJEKTIV	16
Upplösningsförmåga	20
Ljusstyrka	22
Djupskärpa	23
Kontroll av fotoobjektiv	27
LUPPEN	29
MIKROSKOPET	33
Upplösningsförmåga och numerisk apertur	33
Förstoring	37
Objektiv och okular	42
Kondensor och belysningen	45
Ultraviolet mikroskop	48
Faskontrastmikroskop	49
Mörkfältsbelysning	51
Belysning av ogenomskinliga föremål	52
Mikroskop för finmekanisk industri	56
Binokulära mikroskop	61
Mikrofotografi	63
PROJEKTIONSAPPARATER	66
Projektion	66
Profilprojektorer	70
KIKARE	83
Förstoring och pupiller	83
Ljusstyrka	86
Upplösningsförmåga	88
Objektiv, synfält, okular	90
Kikarens skarpställning	99
Kikare för geodetiska instrument, laboratoriekikare	101

Astronomiska kikare	102
Holländska kikare	104
Terrestriska kikare, gevärssikten	107
Prismakikare	109
Periskop	116
Avståndsmätare	121
KOLLIMATORER OCH JUSTERING AV INSTRUMENT	128
Justerkollimatorer	128
Autokollimatoren	133
Sikt-kollimatorer	137
SPEGELOPTIK	141
Asfäriska speglar	142
Manginspeglar	143
Schmidtsystem	144
Koncentriska system	144
Konstruktiv utformning av spegelsystem	145
OPTISKA INDIKATORANORDNINGAR	148
ÖGAT SOM OPTISKT INSTRUMENT	151
Seendets mekanik och ackommodationen	151
Dag- och nattseendet	153
Ögats upplösningsförmåga	154
Emmetropi och ametropi	155
Korrektionsglas och bilduppfattningen	158
Presbyopi	160
Glasögonglas	161
Astigmatiskt öga	164
Avbildningsformler	169
Mätning av glasögonglas	171
Plastiskt seende	173
INTERFERENS OCH REFLEXSKYDD	177
Interferens	177
Reflexskydd	181
LITTERATURFÖRTECKNING	187

Förord

Även om optiken har mycket gamla anor och länge spelat en stor roll inom vissa forskningsgrenar är det dock först under de senaste decennierna som ett flertal optiska instrument och hjälpmedel har börjat intressera den stora allmänheten. Glasögon var tidigare ett privilegium för samhällets spetsar. Idag söker man hjälpa alla — från de yngsta till de äldsta — att häva sina synfel med glasönglas anpassade till de individuella kraven. Forskningen har klarlagt de väsentliga optiska egenskaperna hos ögat, och tekniken kan nu frambringa de glasönglas som behövs för att tillsammans med ögats optiska avbildningsmekanism ge tillfredsställande bilder på näthinnan. Ett kapitel i denna bok lämnar en redogörelse för dessa förhållanden.

Även om utvecklingen på det nämnda området har gjort anmärkningsvärda framsteg är det dock på andra fält av optiken som de mest krävande uppgifterna förelegat och i stor omfattning lösts genom samverkan mellan forskning och teknik. Efter hand som dessa resultat har utvunnits och utformats till optiska konstruktioner i industriell produktion, har också de olika optiska apparaterna fått en ständigt vidgad användning. Den fotografiska kameran som för inte så länge sedan var ett redskap endast för några få yrkesutövare är numera en populär hobbysak, som i händerna på skickliga amatörer kan lämna högklassiga bildresultat.

Kikaren hör också till de optiska instrument som jämte de viktiga fackanvändningarna fått stor spridning bland allmänheten för de mest skilda ändamål. De tekniska framstegen ifråga om kikarkonstruktionerna är kanske inte så revolutionerande som inom andra områden av optiken, men här har bl. a. de förbättrade framställningsmetoderna och införandet på senaste tiden av antireflexbehandling av linserna bidragit till att höja kvaliteten på bilderna.

Mikroskopet är mera fack- och nyttobetonat, men området för dess utnyttjande har vidgats avsevärt genom det utvecklingsarbete som utförts på detta gebit. Under de allra senaste åren har här ett viktigt nytt moment tillkommit genom införandet av den s. k. faskontrastmetoden.

Överhuvudtaget kan man säga att de optiska instrumenten och hjälpmedlen, varom denna bok handlar, numera är av intresse för en mycket stor krets inom industri, teknik och forskning och därjämte har en vidsträckt användning för skilda ändamål i vardagslivet.

Det måste därför hälsas med stor tillfredsställelse att en man med omfattande erfarenhet inom den optiska tekniken och fackmässig insikt i de teoretiska och praktiska grunderna på detta område givit sig tid att ge en populär och översiktlig redogörelse för de viktigaste optiska apparaterna och hjälpmedlen. Framställningen tillgodoser önskemålen både för dem som vill få en allmän orientering i ämnet och för dem som vill skaffa sig en grundligare inblick i de optiska instrumentens möjligheter och begränsningar. Boken måste betecknas som ett mycket värdefullt tillskott till den svenska facklitteraturen inom ett hittills föga tillgodosett område av modern teknik.

Manne Siegbahn

FÖRSTA KAPITLET Avbildningsfel

En samlande lins avbildar ett avlägset objekt nära sin brännpunkt. Denna omständighet har sedan länge varit känd och använd för olika ändamål, men först med utvecklingen av fotografien blev behovet av ljusstarka och skarptecknande objektiv aktuellt.

En vanlig lins är att betrakta endast som ett byggelement till ett optiskt system. Denna lins är behäftad med fel, vilka gör att bilden blir mer eller mindre oanvändbar. Man talar om olika avbildningsfel, men gör så endast för att genom analysen kunna finna lämpliga korrektionsmedel och få bilden inom godtagbara gränser. I realiteten härskar bakom linsen ett virrvarr av strålar, vilka knappast i sin helhet kan bemästras matematiskt, men dock lyder mycket komplicerade lagar.

Man sänder först en stråle parallellt med axeln och mycket nära denna (*paraxialstråle*), och fastställer var den av linsen brutna strålen skär axeln (*brännpunkt* F'). Man registrerar även skärningspunkten av den in- och utgående strålen och kallar den för linsens *huvudpunkt* (H'). Avståndet mellan huvudpunkten och brännpunkten är linsens *brännvidd* (f'). Avståndet mellan F' och närmaste linsyta kan betecknas som *snittvidd* (s'_0) (jfr sid. 169). Sedan ökas strålens avstånd från axeln, varvid två fel kan observeras: man ser att skärningspunkten med axeln närmar sig linsen samtidigt som motsvarande huvudpunkt ändrar sitt läge. Strålar i ett brett, cylindriskt strålnippe förenas inte i en punkt, utan skär axeln på olika ställen. (Fig. 1.) Detta fel benämns *sfärisk aberration*, då det är den omedelbara följd av linsens sfäriska form. Man kan genom att förse linsen med en asfärisk yta fullständigt upphäva den sfäriska aberrationen (cartesiansk yta), men det andra

10 AVBILDNINGSFEL

felet — olika brännvidd för strålar med olika infallshöjd (zon) — återstår. Följden av denna aberration, kallad *sinusfelet*, blir att ett litet objekt avbildas med olika förstoring av linsens olika zoner (sid. 10). — Man kan dock bestämma ett läge bakom linsen, där bilden tycks vara bäst, och kallar detta för den *minst spridda fläcken*.

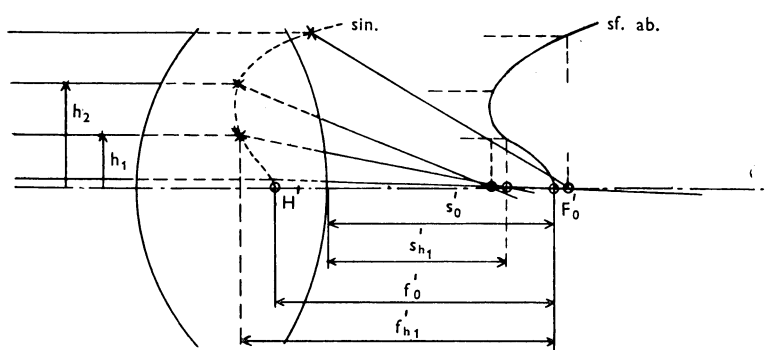


Fig. 1 Förlopp av sfäriska aberrationen och sinusfelet i ett linssystem. För sfäriska aberrationen fastställer man differenser mellan snittvidden s'_h och den paraxiala snittvidden s'_o . Kurvan för sinusfelet ger differenser mellan den paraxiala brännvidden f'_o och brännvidder för olika infallshöjder

Sfäriska aberrationens natur kvarstår även när det parallella strålnippet bildar en vinkel med axeln. Den hittills symmetriska bildfläcken, som uppfångas på en skärm, får en osymmetrisk, kometliknande form, och därför kallas felet för *koma*. Tyngdpunkten i bildpunkten, dvs. den minst spridda fläcken, flyttas närmare linsen så att de tydligaste bilderna för strålnippen med varierande vinklar mot axeln kommer att ligga på en krökt yta (*bildfältskrökning*). Dessutom ligger de inte på huvudstrålen, dvs. på den linje som förbinder objektet med linsens huvudpunkt eller vid en mycket tunn lins, dess centrum. Man kan även säga, att huvudstrålens riktning ändras. Delningen av t. ex. en avbildad skala kommer att bli större och större ju mer man avlägsnar sig från axeln (*distorsion*, felteckning). Det enklaste medlet

att minska sfärisk aberration och samtidigt komafelet, är att av linsen använda endast en liten del i centrum; men även då möts de sneda strålarna, inte i en punkt, utan i två linjer (*astigmatism*) (fig. 2). Man kan uppdelas strålknippen i flera snitt, både parallellt med huvudstrålen och med axeln. Strålar i papperets plan kommer att ha en längre brännvidd än de som går i ett plan vinkelrätt mot papperet: Ett meridiansnitt på en sfär har den största möjliga krökningsradien. Ett snitt vilket däremot inte går genom sfärens centrum har en mindre krökningsradie, dvs. strålar i detta plan möts närmare ytan. I stället för att bilda ett kägelformigt strålknippe får man en kropp enligt

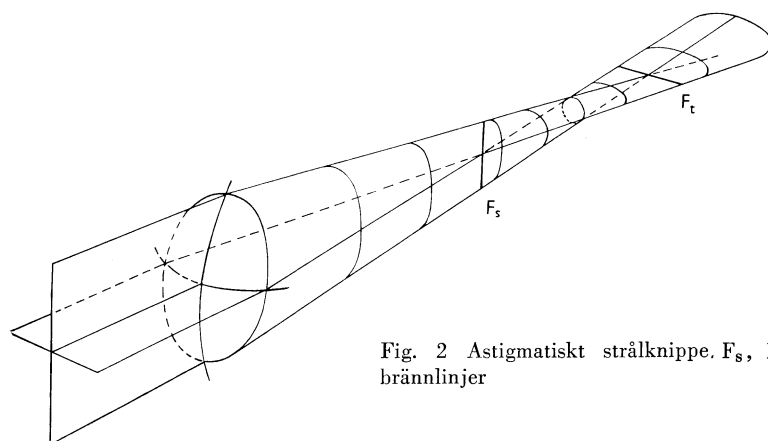


Fig. 2 Astigmatiskt strålknippe. F_s , F_t brännlinjer

fig. 2; ljuset samlas i två linjer (astigmatiska brännlinjer). Mellan dessa båda finns det ett ställe där man kan lägga ett cirkelrunt snitt genom strålknippen (minst spridda bildfläcken). Fig. 3 visar hur ett objekt (kors) avbildas med ett nedbländat linssystem: korsets armar avbildas på olika avstånd. Koncentriska ringar med centrum på axeln avbildas skarpt på en rotationsyta, med toppen i den axiala bildpunkten, medan bilden av ekrarna i ringfiguren ligger på en annan rota-

12 AVBILDNINGSFEL

tionsyta (astigmatiska bildskålar). På ett plant, mekaniskt definierat bildfält uppfångas bilden tydligt endast på axeln; korset avbildas i vår skiss alldeles suddigt, möjligen med den vertikala armen tydligare. Geometrisk orten för de tydligaste bilderna — givna av de minst spridda fläckarna — är en tänkt bildyta mellan de båda astigmatiska

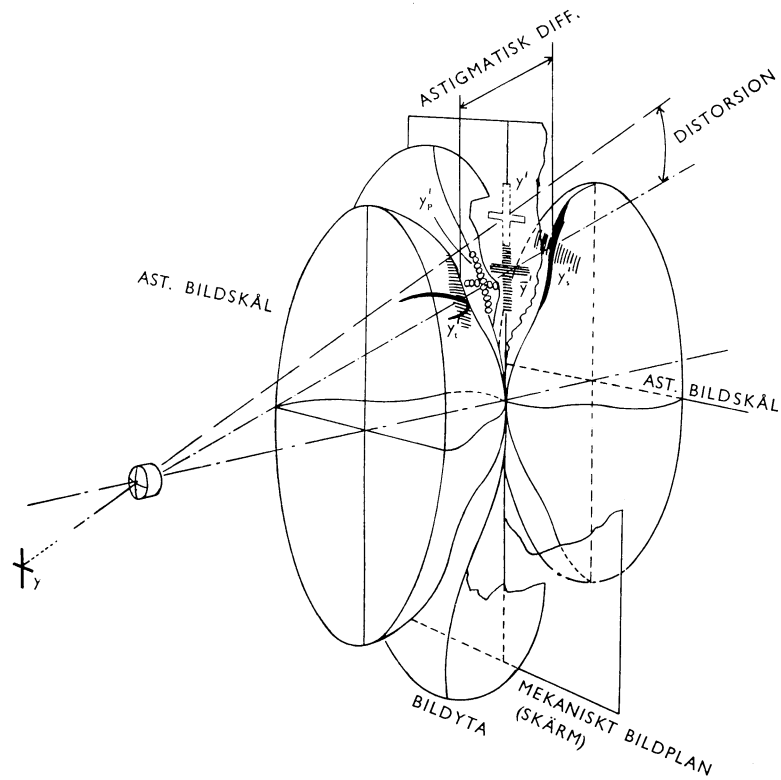


Fig. 3 Avbildning av ett objekt utanför axeln medelst en lins med liten öppning. y = objekt, y' = den ideala bilden, $y'p$ = den verkliga bilden på skärmen, $y'p$ = den skarpaste bilden, $y's$, $y't$ = de astigmatiska bilderna

skålarna. I praktiken representerar denna bildyta den s. k. bildfältskrökningen. På figuren har även inritats läget av den ideala bilden; dess avstånd från den verkliga bilden beror på distorsionen (felteckningen). Ökar man nu linsens öppning sällar sig till dessa fel de båda axiala felen (sfärisk aberration, sinusfelet) och koma. De hittills skarpt avbildade linjerna på de båda astigmatiska bildskålarna blir nu osymmetriskt suddiga och så att säga utdragna i en riktning; en punkt t. ex. får en kometliknande form. Dessutom försämras bilden även i skärmens centrum och dess tyngdpunkt förskjuts. Till yttermera visso utgör vart och ett av de här omnämnda felen en viss funktion av brytningsindex; med andra ord, det blir för varje färg olika förlopp av den sfäriska aberrationen, sinusfelet, distorsionen osv.

Det optiska glaset uppdelas i olika typer och varje glastyp förekommer i flera varianter med noga uppmätta data, en glaskatalog omfattar sålunda uppgifter över mer än hundra olika glas. Om man tänker sig att av varje glassort tillverkas en kil med brytande vinkel α , så är en stråles avlänkning γ beroende på brytningsindex n . ($\gamma = [n-1] \alpha$). Brytningsindex är olika för olika färger (minst brytes rött, mest violett). På en skärm kan man följaktligen uppfånga ett spektrum, där den röda delen ligger närmast den ursprungliga strålens riktning, gult i mitten och blått och violett är mest avlänt. Optiska glasbrukens kataloger uppger brytningsindex för gult ljus (n_d), för blått (n_f), för rött (n_c) etc; samt differenser för olika färger (partiella dispersionen).

Uttrycket $\frac{n_d-1}{n_f-n_c} = \nu$ (Abbes tal, relativ dispersion) är en viktig

karaktistik av glasets färgspridning (i vårt exempel är det förhållandet mellan avlänkningen och spektrats längd). De minst brytande glasen är fluorkroner ($n_d = 1,44$ till $1,49$ $\nu = 66-70$). Mest brytande är tunga blyglas (flintglas) ($n_d = 1,65-1,92$, $\nu = 34-21$).

Vanliga kronglas, liknande glasögonmaterialet har $n_d = 1,50$ — $1,52$ och $\nu \sim 60$, borkron och normalflint för kikarobjektiv $n_d = 1,50/64$ resp. $1,60/36$ samt tunga kronglas för t. ex. trelinsiga fotoobjektiv har en karakteristik $\sim 1,55/60$.

Det är naturligt att en enkel lins inte kan göras fri från alla avbildningsfel. Möjligen kan ett eller annat nedbringas till ett minimum.

Genom att på en linskombination tillämpa invecklade matematiska operationer samt använda vedertagna konstruktionselement och läro-satser uppnår man efter ofta månadslånga kalkyler en viss bildkvalitet, vilken kan representeras av grafiska uppställningar och tabeller. Här-efter utförs ett eller flera obetydligt varierande provexemplar, vilka underkastas stränga tester. Det slutliga systemets brytkraft fördelas till olika linser, vilka får gynnsamma böjningar och tjocklekar. Tjockleken — och även luftavståndet mellan linserna (ett sådant representerar en lins med brytningsindex $n = 1$) — är en viktig korrektionsfaktor; en tjock lins med i det närmaste koncentrisk ytor förekommer i många system. Man känner till linsformer som är fria från det sfäriska felet och uppfyller sinusvillkoret: en aplanatisk lins (t. ex. en yta koncentrisk med bildpunkten, den andra n gånger kupigare) är en byggnadssten för mikroskopobjektiv och alla slags kondensorer. Även läget av aperturbländaren (bländaren som bestämmer systemets öppning) ingår som en viktig faktor för förbättring av avbildningsfel, och dess läge får inte rubbas.

Den optiska matematikens uppgift är alltså att med ett antal linser med lämpliga radier och glastyper uppnå den bästa bilden såsom en kompromiss mellan de olika avbildningsfelen. Förloppet av restfel (sekundära fel) kan ge en uppfattning om systemets fullkomlighet. Sfäriska aberrationen och sinusfelet representeras grafiskt av en kurva där infallshöjder (zoner) införs i vertikalled, och motsvarande stråles skärningspunkt med axeln i horisontalled (fig. 1). På liknande sätt uppritas en överhöjd profil av astigmatiska bildskålar (fig. 4). Distor-

sionens förlopp utläses ur en kurva, representerande olika objektvinklar och deras avvikelser på bildsidan i procent, dvs. proportionen mellan felsträckan $\bar{y}'y'$ till avståndet från axeln.

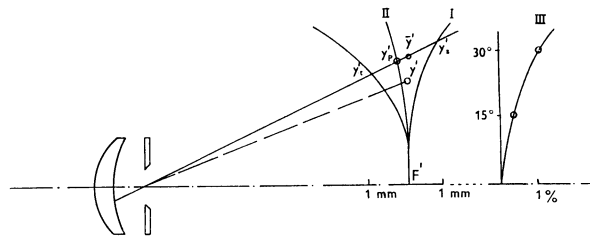


Fig. 4 Avbildningsfel utanför axeln. Kurvor I: astigmatism. Kurva II: bildfältskrökning. Kurva III: distorsion. (Se även fig. 3.)

ANDRA KAPITLET Fotoobjektiv

För ett fotografiskt objektiv gäller följande:

Det bör ha en given brännvidd; det skall vara korrigerat för sfärisk aberration, sinusfel, koma, astigmatism och distorsion; färgfelen skall nedbringas till en av det givna ändamålet bestämd gräns.

För att i möjligaste mån kunna uppfylla alla dessa krav, måste man åtminstone ha lika många variabler till förfogande. Härifrån utgick Dennis Taylor när han år 1895 föreslog *tripletten*, som består av två positiva och en negativ lins (fig. 5), vilket troligen är det vanligast förekommande objektivet. Detta tämligen enkla objektiv tillåter en relativ öppning (se sid. 22) av omkring 1:3 och ett synfält upp till 60°. Tripletten har sedan ytterligare utvecklats och förbättrats till ett otal varianter där i regel en, två eller alla systemdelar sammansatts av två linser. Denna form har de berömda Tessar-, Heliar- och Hektarobjektiven. Man strävar antingen efter en förbättring av felrester eller efter en högre ljusstyrka. Till dessa kan man kanske räkna de hyper-

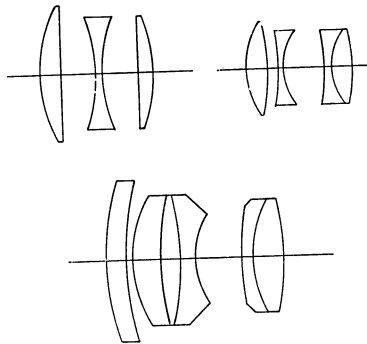


Fig. 5 Triplet 1:3 (Nife). Tessar 1:4,5 (Zeiss). Sonnar 1:2 (Zeiss)

ljusstarka objektiven av typen Sonnar (fig. 5) med en relativ öppning på upp till 1:1,4.

Tämligen tidigt uppmärksammade man bländarlägets inflytande på bildkvaliteten. I synnerhet konstaterade man en nästan fullkomlig korrektion av distorsion och komatiska fel, om man placerade två lika system på vardera sidan av bländaren. Dessa fick en yttre form av en tjockväggig skål med ungefär samma krökning in- och utvändigt (noll-lins) och bestod av två till fyra hopkittade linser. På detta sätt konstruerade von Hoegh år 1892 Dagor-objektivet (fig. 6). Detta objektiv har sedermera lanserats av många tillverkare, med förbättringar huvudsakligen beträffande synfältet. *Vidvinkelobjektiv* är för det mesta av denna symmetriska typ, även om symmetrin inte alltid bibehålls. Ett dylikt objektiv med synfält 90° och relativ öppning 1:6,8 visas på fig. 6.

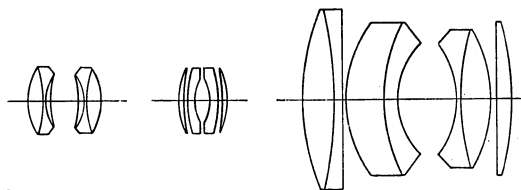


Fig. 6 Dagor 1: 6,8 (Goerz). Vidvinkel 1: 6,8 (Nife). Summitar 1: 2 (Leitz)

Den tjocka noll-linsen och den symmetriska byggnaden är också typiska för en grupp ljusstarka objektiv tillverkade av Zeiss (Biotar), Leitz (Sumitar), Ross, Taylor & Hobson m. fl.

Det första ljusstarka objektivet beräknades 1840 av Petzval och används för en del ändamål ännu idag. Petzval har gått den teknisk-logiska vägen. Han försökte behålla den utmärkta axiala korrektionen av en två-linsig akromat, och endast genom att tillfoga ytterligare två linser på lämpligt avstånd från denna förbättrades extra-axiala fel. Han uppnådde redan då en relativ öppning 1:3,4, men lyckades där- emot inte få bildfältet plant, även om det astigmatiska felet förlöper

18 FOTOOBJEKTIV

mycket jämnt. Bildfältskrökningen och objektivets längd gör att det numera endast används för mindre bildvinklar, mest för filmprojektion, där det är överlägset de flesta andra. I marknaden och i patentlitteraturen finns otaliga efterbildningar, en del med relativa öppningar ända

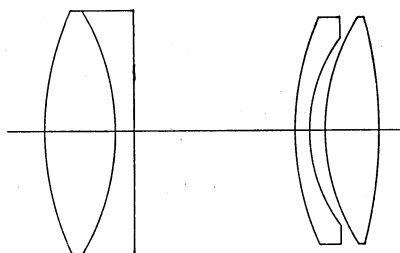
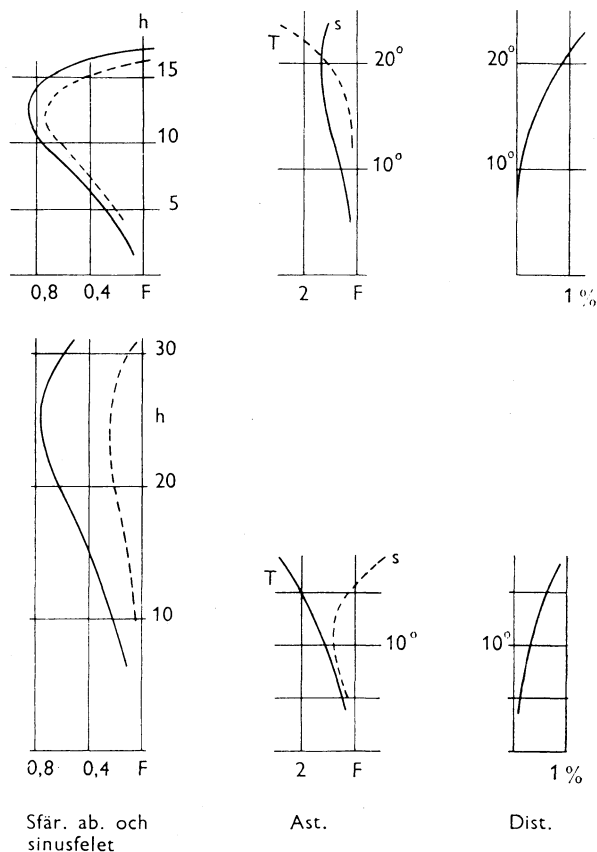


Fig. 7 Petzval-objektiv 1: 1,6 (Nife)

upp till 1:1,4. Fig. 7 visar ett dylikt objektiv med relativ öppning 1:1,6. Petzval-objektivet kan inte räknas till anastigmater, då de båda astigmatiska bildskålarna vid de flesta konstruktionerna ej skär varandra. Den gamla uppdelningen av objektiv i anastigmater och aplanater kan ifrågasättas, då en hel del moderna ljusstarka system har en icke-anastigmatisk korrektion, men i övrigt ger utmärkta resultat.

Tripletten, symmetriska och Petzval-objektiv, har konstruktivt kombinerats så, att även sådana beteckningar inte är specifika för prestationen. Visserligen kan en fackman genom att studera felkurvor för ett objektiv (fig. 8) dra en hel del slutsatser, men bildkvaliteten kan ytterligare påverkas av aberrationernas färgvariationer samt tillverkningstoleranser och övrig omsorg vid beräkningen och fabrikationen.

Vid fotografering av avlägsna föremål ger det normala objektivet ($f \sim$ diagonalen i formatet) alltför små, detaljfattiga bilder, vilka på grund av objektivets och/eller emulsionens dåliga upplösning kanske inte tål den behövliga förstoringen. Man vill ofta åstadkomma samma bildintryck som genom en kikare. En sådan kan verkligen placeras framför kameraobjektivet, men resultatet blir säkert mycket otillfredsstäl-

Fig. 8 Avbildningsfel i triplett 1:3, $f = 100$ och Petzval 1:1,6, $f = 100$

lande. Däremot finns det särskilda, för ändamålet konstruerade holländska kikare (sid. 105), som förstorar t. ex. $2\times$, så att bilden får en storlek motsvarande dubbla objektivbrännvidden. Totala kamerälängden blir emellertid kortare (fig. 9). Man kan föreställa sig kikarens negativa del förenad med kameraobjektivet till en enda negativ grupp samt korrektionstekniskt samräknad med frontaldelen. Resultatet blir då ett objekt med en brännvidd som är dubbelt så stor som den ursprungliga.

20 FOTOOBJEKTIV

tatet blir ett objektiv — vid det givna exemplet med $f = 200$ — med en totallängd till filmen av ca 150 mm. Med andra ord: i ett dylikt s. k. *teleobjektiv* flyttas huvudplanet framför den positiva delen (fig. 9).

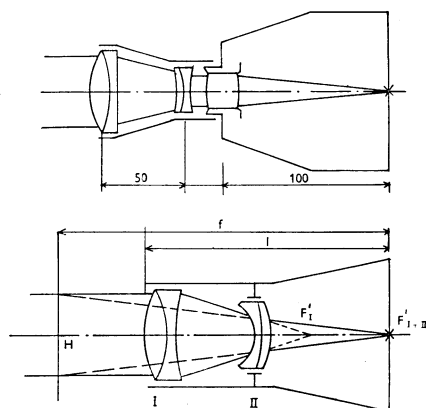


Fig. 9 Ett teleobjektiv kan tänkas uppstå genom att en holländsk kikare kopplas framför kameraobjektivet

Teleobjektiv uppnår sällan några betydande ljusstyrkor eller synfält och uppvisar i regel en större distorsion än vanliga objektiv. Dess kännetecken — kort byggnad trots lång brännvidd — betyder en längdbesparing av mellan 25—50 %.

För småbildskameror saluförs objektiv för fjärrfotografering, men dessa har konstruktivt ingenting gemensamt med teleobjektiv. De är snarare långbrännviddiga objektiv av normaltypen, eventuellt beräknade med särskild hänsyn till ett mindre synfält och därmed följande bättre bildskärpa.

Upplösningsförmåga

Ett fotoobjektiv bör återge små detaljer på objektet med en skärpa motsvarande den fotografiska emulsionens struktur, eller rättare sagt

motsvarande den skärpa som den framkallade emulsionen kan återge. De i gelatinen emulgerade bromsilverpartiklarna bildar anhopningar, och dessa bestämmer delvis skiktets upplösningförmåga. Dessutom tillkommer ljusets brytning och reflektion på dessa partiklar, vilket gör att även intilliggande korn blir indirekt belysta. Deras eventuella svärtning beror på materialets gradation. Emulsionen har en viss tjocklek och filmen eller plåten avviker från en plan yta. Vid framkallningen ökar kornstorleken och även kopierings- och förstöringsprocessen inverkar.

På ett fotografiskt skikt kan för närvarande registreras ett raster med ca 50—100 linjer/mm, men för att kunna urskilja dessa med ögat, måste plåten förstöras så pass mycket att emulsionens struktur verkar störande. Man nöjer sig följaktligen i de flesta fall med en oskärpa av 0,03 till 0,1 mm.

I tripletten $f = 100$, 1:3 (fig. 5) har enligt formel **19** den av ljusböjningen framkallade diffraktionsskivan en radie $r = 3 \cdot 0,0005 = 0,0015$ mm. Endast färgfelet på axeln ger däremot en ströfigur med $r = 0,005$ mm och denna täcks ungefär av oskärpan på grund av sfärisk aberration. Den optiska fullkomligheten uppnår följaktligen inte den av ljusets vågnatur givna gränsen för oskärpan. Däremot motsvarar den, eller överträffar i vissa fall, emulsionens upplösningförmåga. — I en småbildskamera med $f = 50$, normalkamera med $f = 100$ och flygkamera med $f = 500$ används i stort sett samma film. Om nu objektivet konstruktion vid dessa tre kameror utförs efter samma princip, kommer bildskärpan i småbildskameran att vara 10 gånger större än vid flygkameran. Denna enkla överläggning har vittgående följder. På fotokemins nuvarande stadium får ett objektiv för en småbildskamera därför ha procentuellt sett sämre korrektion. I regel utnyttjas denna frihet till att skapa mycket ljusstarka objektiv med kort brännvidd. Deras konstruktion är olämplig för större kameror och om kemisterna i framtiden ytterligare förbättrar emulsionen, kommer vid

kraftigare förstoring objektivfelen kanske att visa sig störande. Objektivet med lång brännvidd måste följaktligen ge en relativt sett betydligt skarpare bild. Om med givna medel den av emulsionen definierade skärpan inte kan uppnås, är det fördelaktigare att välja en till emulsionen anpassad brännvidd och sedan förstora bilden.

Ljusstyrka

Ett bildelement träffas av allt ljus inom en kägla, vars bas bildas av objektivets diameter $2h$. Ljasmängden beror endast av toppvinkeln i denna kägla, dvs. av förhållandet

$$A = \frac{f}{2h}$$

Detta uttryck kallas för *bländarnummer*; ett objektiv $f = 100$ och $2h = 33$ t. ex. har bländarnummer 3. Oftare använder man formen 1:3 — den *relativa öppningen* — och tillämpar här även benämningen ljusstyrka, vilket ej är helt korrekt. Vid konstant brännvidd är ljusmängden och därmed även emulsionssvärtningen given av objektivets yta, dvs. av kvadraten på diametern. Exponeringstiden ökar med andra ord med kvadraten av den relativa öppningen. Man förser bländarfattningen med en rad tal så bestämda, att vid övergång från ett lägre bländarnummer till ett högre, exponeringstiden fördubblas.

Den numeriska ljusstyrkan kan vara missvisande då ingen hänsyn tagits till förlusterna genom reflektion och absorption av ljuset i linserna. Särskilt vid ljusstarka objektiv med ett flertal linser kan denna ljusförlust bli påtaglig. Man började därför använda sig av fotometriska värden för ljusstyrkan, men efter allmänt införande av reflexskydd på linserna är kanske denna åtgärd mindre aktuell.

Som redan tidigare nämnts består objektivet inte av en tunn lins, utan av en följd av linser, ofta på ganska stort avstånd från varandra.

En punkt utanför axeln mottar följaktligen inte ljuset från en kägla med objektivöppningen som bas, utan denna beskärs av linsfattningarna till en form liknande ett kattögas pupill. Nedbländningen kan vara avsevärd och används även som en korrektionsfaktor för utomaxiala avbildningsfel. Särskilt vid vidvinkelobjektiv är dessa förluster påtagliga, även om man vid dessa objektiv ger frontlinsen en mycket större diameter än den uppgivna relativa öppningen kräver. Det är alltså inte frontlinsens eller bländarens diameter som bör sättas i

formeln $A = \frac{f}{2h}$. Vid uppmätning av objektivets relativa öppning bör man helst i bildplanet placera en pappskiva försedd med ett litet hål. Kameran riktas mot en ljuskägla och ingångspupillens diameter mäts på en genomskinlig pappersremsa, placerad nära objektivet (telecentrisk strålgång, sid. 71), eller också observerar man genom detta hål en millimeterskala lagd på objektivet.

Att kontrollera objektivbrännvidden är ganska omständligt. Objektivet huvudplan är beläget inuti objektivet, på ett avstånd som endast tillverkaren kan uppge. Utan hjälpmedel är den säkraste metoden den, att från en och samma punkt fotografera ett avlägset objekt dels med ett objektiv med känd brännvid och dels med ett objektiv, vars brännvid skall bestämmas, och att därefter jämföra bildstorleken. Ett annat sätt är att mäta objekt, objektavstånd och bild och beräkna brännvidden ur triangelarnas likformighet.

Djupskärpa

Emulsionens och ögats upplösningsförmåga kan föranleda antagandet att en oskärpefläck upp till en viss diameter utan vidare kan tillåtas, då den i alla fall kommer att synas som en punkt. Med andra ord, även om plåten inte sammanfaller med objektivets bildplan blir bilden skarp, dvs. ett visst område framför och bakom det inställda avståndet

24 FOTOOBJEKTIV

återges med tillräcklig skärpa. Diametern av oskärpefläcken på plåten borde egentligen bestämmas så, att den, sedd genom objektivet (eller en lupp med objektivets brännvidd), får en vinkelstorlek av 1 bågminut (ögats upplösningförmåga), eller vid $f = 50$ en diameter av ca 0,02 mm, vid $f = 250$ en diameter av 0,1 mm. I regel antar man denna diameter till 0,03 mm för negativ avsedda för förstoring och 0,1 mm för kontaktkopior. Oskärpefläcken m på fig. 10 kan tänkas projicerad fram till objektet, där den får en diameter $M = m \cdot G$, där G är objektivets förstoring $\approx \frac{E}{f}$. Ur triangelarnas likformighet följer att det skarpa området sträcker sig framåt från det inställda avståndet E till

$$e_1 = \frac{M \cdot E}{2h - M} \quad \mathbf{1\ a}$$

och bakåt

$$e_2 = \frac{M \cdot E}{2h + M} \quad \mathbf{1\ b}$$

Införandet av M kan vara av värde, ty detta värde ger oss besked om storleken av den minsta detaljen i objektet som ännu kan särskiljas.

För större objektivdiameter eller kortare objektavstånd räcker ofta en noggrannhet av

$$e_{1,2} \sim \frac{E \cdot M}{2h}$$

Om man sätter in $M = \frac{m \cdot E}{f}$

$$\text{ernås } e_{1,2} = E^2 \frac{m}{2h \cdot f}$$

Om man inför bländarnummer $A = \frac{f}{2h}$ (sid. 22) så blir

$$e_{1,2} \approx E^2 \cdot A \cdot \frac{m}{f_2} \quad \mathbf{1\ c}$$

Då uttrycket $\frac{m}{f^2}$ är konstant vid en och samma kamera, kan formeln synnerligen lätt användas.

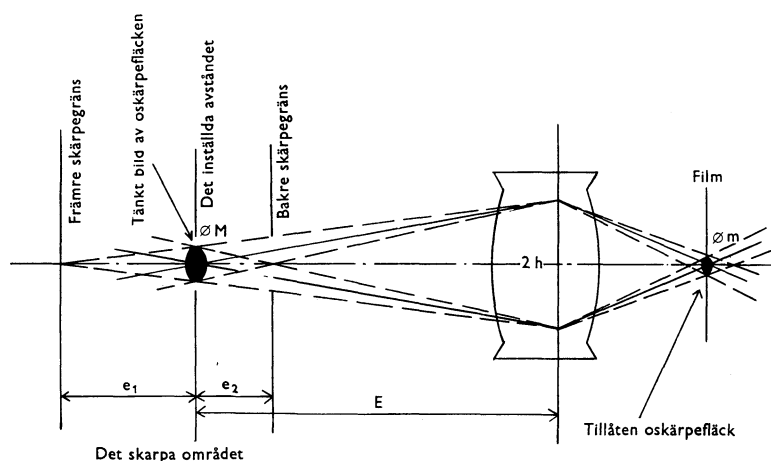


Fig. 10 Djupskärpa

Ett objektiv $f = 50$, 1:1,5, inställt på 3 m avstånd, avbildar allting skarpt enligt (1 c) inom ett område av $3 \text{ m} \pm e_{1,2}$.

$$e_{1,2} = 3000 \cdot 3000 \cdot 1,5 \frac{0,03}{50 \cdot 50}$$

$$e_{1,2} = 16 \text{ cm}$$

Dessa formler är lagda till grund för alla mer eller mindre sinnrika djupskärpetabeller och räknestickor. Vid användning bör man förvissa sig om, vilken diameter m som valts. Man måste även göra klart för sig att de uppgivna skärpegränserna inte betyder någon markant ändring i bildkvaliteten; skärpan snarare tilltar tills den, vid det inställda avståndet, uppnår det av konstruktionen betingade maximum,

varefter den avtar så att vid gränsvärde e_2 den valda oskärpefläcken m :s storlek överskrids.

Alla faktorer som påverkar upplösningsförmågan har, om också obetydligt, inflytande på djupskärpan. I synnerhet kan korrektionstillståndet mildra övergångarna (mjuktecknande objektiv). Bildfältskrökning, minskning av ingångspupillen för sneda strålar och deras infallsvinkel förändrar djupskärpeförhållandet utanför den optiska axeln. Det beräknade skärpeområdet gäller följaktligen endast i centrum och förändras alltmer ut mot periferin, varför det kan tänkas överflödigt att beräkna djupskärpan med alltför överdriven noggrannhet.

Formeln **(1a, 1b)** ger oss ett intressant besked. Djupskärpan växer om man minskar brännvidden och behåller den relativa öppningen. Ett objektiv $f = 100$, 1:3,5, inställt på 5 m, ger skärpa mellan 4,75 och 5,25. Ett objektiv med samma ljusstyrka men $f = 25$, avbildar, inställt på 5 m, allting skarpt mellan 2,7 och 31 m. Vid objektiv med kort brännvidd behövs därför knappast någon inställningsmekanism. Det enda sättet att uppnå en stor djupskärpa samtidigt med hög ljusstyrka är att tillgripa en kort brännvidd på objektivet. Detta är småbildskamerans största fördel och förutom det ringa omfånget den största anledningen till deras popularitet. Med mycket kort brännvidd kan avståndsställningen helt slopas (vissa smalfilmskameror) och även vid låg ljusstyrka (boxkameror). Dylka fixfokuskameror bör inte vara inställda på oändligt avstånd, utan enligt formeln **(1a, 1b)** på ett avstånd där bilderna blir skarpa inom ett område mellan oändligheten och kameran, och inte på båda sidor om oändligheten.

Denna analys ger också vid handen att ett objektiv med hög ljusstyrka och/eller kort brännvidd, bör justeras med större omsorg och de mekaniska elementen måste tillverkas noggrannare än vid objektiv med längre brännvidd. Det anförda exemplet upplyser oss även om att med den långa brännvidden en 1,5 mm stor detalj M kan registreras, i det andra fallet — under annars samma villkor — sjönk den

verkliga upplösningen till 6 mm. Detta är en naturlig, men kanske ej så uppmärksammas nackdel hos alla småbildskameror. Ett objektiv $f = 50$ mm kan inte återge en finare struktur på en meters avstånd än i storleksordningen 0,5 mm — oberoende av nerbländningen. Även om särskilt beräknade objektiv och finkornig emulsion kan bättra på resultatet, vore det meningslöst att använda en småbildskamera för t. ex. teknisk fotografering.

Kontroll av fotoobjektiv

Tidigare (sid. 23) har omtalats hur objektivets ljusstyrka och brännvidd kan kontrolleras. Man tillämpar både för den verksamma diametern och för brännvidden en tillverkningstolerans av ca 3—6 %.

Att bedöma, mäta och jämföra olika objektiv kräver ganska invecklade anordningar. Grövre fel, som uppstått genom felaktig tillverkning eller ovarsam behandling, är påtagliga och yttrar sig genom osymmetriskt växande suddighet (vid felaktigt centrerad eller förskjuten lins) eller genom stora astigmatiska och komatiska fel utanför axeln. Ett eller annat avbildningsfel kan göra sig mera gällande och kan med några enkla medel identifieras och åtminstone kvalitativt bedömas. Men vid användningen av objektivet är man dock föga intresserad av varför detta inte uppnår en för ändamålet lämplig upplösning. Snarare vill man konstatera objektivets upplösningsförmåga på olika ställen av bildformatet. Färgfelen är mera påtagliga vid längre brännvidder och särskilt störande vid färgfilm. Ett med alltför stora färgfel behäftat objektiv kan på pankromatiskt material ge mjuka till suddiga bilder, även om det på en vanlig emulsion inte ger anledning till missnöje.

Fabrikskontrollen utförs med stora testtavlor eller tester i en kollimator (sid. 128). Här bör omnämnas den klassiska metoden enligt Wetthauer, där testen avbildas på en snedställd plåt och objektivet

28 FOTOOBJEKTIV

beläggs med olika bländare, vilka skär ut strålar behövliga för mätning av felet ifråga. Metoden blev avsevärt förbättrad i testanläggningen enligt Ingelstam (fig. 11).

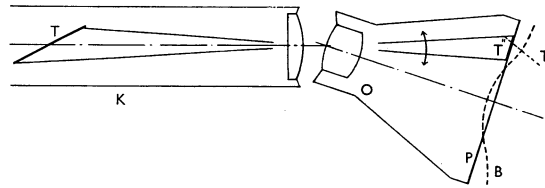


Fig. 11 Testanläggning enligt Ingelstam. K kollimator. O det testade objektivet. P plåten. B bilden. T testplatta

För fabriksmontering och kontroll av småbildskameror lämpar sig en autokollimator (sid. 133), vars märke projiceras genom det undersökta objektivet på film och denna bild observeras i autokollimatorns okular.

TREDJE KAPITLET Luppen

Ju närmare ögat flyttas mot objektet, desto större och detaljrikare syns detsamma. Ögats förmåga att se skarpt på nära håll är emellertid begränsat av dess ackommodationsförmåga (sid. 160). Man kan ersätta den otillräckliga ackommodationen med ett linssystem, som avbildar objektet på ögats normala läsavstånd, dvs. 250 mm, eller på oändligt avstånd. Om t. ex. linsen ger oss möjlighet att se på 50 mm i stället för på 250 mm, så har den $5\times$ förstoring och en brännvidd på 50 mm. På fig. 12 ser man att ögat bakom luppen har möjlighet att se objektet under en vinkel $w' = \frac{y}{f}$. Utan lupp får objektet en vinkelstorlek av endast $w = \frac{y}{250}$.

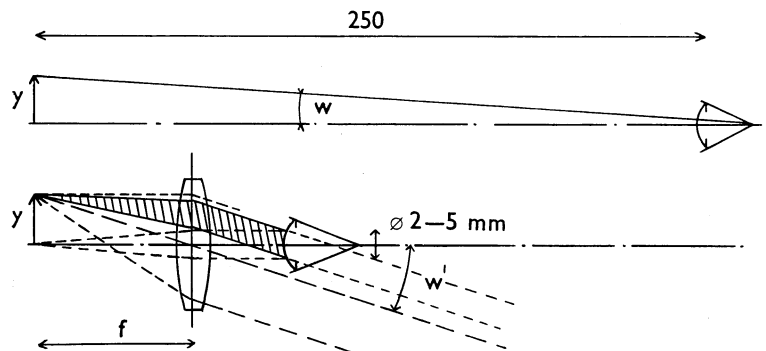


Fig. 12 Luppens förstoring

Förhållandet mellan båda vinklarna ger förstoringen G , dvs.

$$G = \frac{w'}{w} = \frac{250}{f} \quad 2$$

I verkligheten lägger man objektet inte i luppens brännpunkt, utan $\frac{f^2}{250}$ innanför; ögat föredrar nämligen en bild på 250 mm avstånd framför en bild i oändligheten; även för att minska de ofta störande avbildningsfelen förs linsen närmare objektet. Somliga instrument-skalor förstoras medelst en stor lins och observeras på flera meters avstånd. Förstoringen beräknar man här genom att jämföra objektets vinkelstorlek, sedd med blotta ögat, med vinkeln under vilken bilden syns på det givna avståndet.

För många ändamål räcker en bikonvex eller plankonvex lins, men så snart förstoringen och synfältet växer, kommer särskilt distorsionen och färgförstoringsfelet att verka störande. Två plankonvexa linser med plana ytorna utåt förbättrar resultatet. För högre förstoringar måste 2- eller 3-linsiga akromater komma till användning. Dessa beräknas för ögats läge bakom luppen, och strålar som passerar här bör icke vara behäftade med fel. På fig. 13 a ser man att så länge luppens brännvidd är förhållandevis stor jämförd med ögats pupill, blir objektets centrala del avbildad utan några större fel, eftersom ögats pupill har en diameter av 2—5 mm och luppens utnyttjade öppning följaktligen är obetydlig. Däremot kommer en punkt utanför axeln att synas med stor distorsion (ifall luppen inte är korrigerad härför) då det av ögonpupillen utskurna strålnippet inte är parallellt med huvudstrålen. Med andra ord, en svagare lupp måste sfäriskt korrigeras för ögonpupillens läge och mindre hänsyn tas till objektet. En akromatisk dubblett, beräknad som kikarobjektiv, lämpar sig alltså endast ifall ögat hålls i närheten av brännpunkten vid linsens flatare yta. Vill man däremot hålla ögat långt ifrån glaset, bör detta vändas med den flata sidan

mot objektet. Synfältet blir i detta fall mindre (fig. 13 b). Akromatiska lupper har i det närmaste lika kupiga ytterytor (fig. 13 c). Detta framkommer som en korrektionsteknisk åtgärd och har dessutom fördelen att man kan vända vilken som helst av ytorna mot objektet. Lupper med förstoring över $10\times$ har knappast några fördelar i jämförelse med ett mikroskop, utom möjligen att de har små dimensioner.

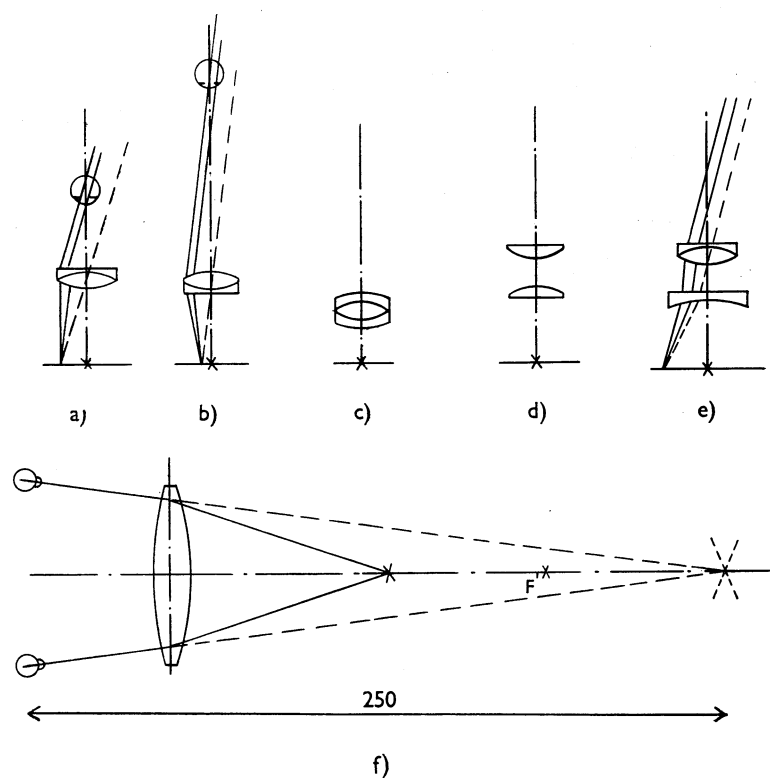


Fig. 13 Olika luppkonstruktioner. a. Akromat eller plankonvexlins, ögat nära. b. Akromat eller plankonvexlins, ögat på långt avstånd. c. Steinheiltriplt. d. Aplanatisk lupp. e. Lupp med stort synfält. f. Binokulär lupp

Av speciella konstruktioner kan nämnas lupper i form av halvkulor, som samlar ljuset i synfältet, samt lupper försedda med inbyggd belysning; ett kraftigt belyst synfält har en mindre ögonpupill till följd och ger därigenom bättre bild, då luppens nyttjade relativa öppning minskas.

Binokulära lupper förekommer utförda dels som en stor lins i en lämplig hållare med inbyggd ljuskälla, dels som två excentriska linser i en skärm som fästs på huvudet. För att inte trötta ut ögonen bör även dessa enkla linser väljas så, att ögonens ackommodation motsvarar konvergensvinkeln, dvs. objektet bör avbildas 250 mm från ögat (fig. 13 f). Naturligtvis är förstoringen vid dessa enkla lupper obetydlig, men fullt tillräcklig för många ändamål. För att minska felteckningen utformas dessa lupper antingen enl. fig. 13 d eller som en stark menisklins. Fördelaktigast är en asfärisk yta, då denna tillåter en högre förstoring.

FJÄRDE KAPITLET Mikroskopet

I ett mikroskop förstoras objektet stegvis. Ett objektiv framställer först en förstord bild — t. ex. fem gånger — i okularets brännplan och detta förstordar — liksom en lupp — denna bild ytterligare, t. ex. tio gånger. Ögat ser då en skenbar, $50 \times$ förstord bild. Med vissa inskränkningar kan objektivets brännvidd fritt väljas vid given objektivförstoring, så att arbetsavståndet blir några cm i stället för några mm vid motsvarande lupp.

Mikroskopet anses ha uppfunnits av den holländske glasögonsliparen *Hans Janssen* omkring år 1600. Kikarens uppfinnare *Lipperhey* och *Kepler* kände till, att man genom att öka avståndet mellan kikarens objektiv och okular kunde få mycket nära liggande föremål förstordade, och *Galilei* försåg sitt mikroskop med en fokuseringsanordning.

Mikroskopvärldens existens och mikroskopets betydelse har först upptäckts och studerats av *Leeuwenhoek*. Hans mikroskop var egentligen bara en mycket stark lupp, försedd med en objekthållare. Med detta primitiva instrument gjorde han en lång rad värdefulla observationer. Vid samma tidpunkt (senare hälften av 1600-talet) utvecklade *Robert Hooke* ett tekniskt högstående mikroskop, och därmed påbörjades den långa raden av forskning och upptäckter som många framstående män offrat hela sitt liv åt.

Upplösningsförmåga och numerisk apertur

Man tänker sig som objekt ett gitter eller en spalt, belyst av parallellt monokromatiskt ljus. I spalten böjs ljuset enligt kända lagar till

flera strålnippen, vilka med den optiska axeln bildar vinklarna u_1 , u_2 och u_3 . Dessa strålnippen samlas i objektivets bakre brännplan till en rad böjningsbilder L_0 , L_1 av den på oändligt avstånd belägna ljuskällan (fig. 14). Vid en bredare spalt ligger dessa bilder (böjningsmaxima) tätare än vid en smalare, och flera ryms i objektivets öppning. Minskas spalten blir böjningsfigurerna glesare och slutligen tränger endast den direkta strålen L_0 in i objektivet. Man kan även ha flera spalter intill varandra, så att ett gitter, här kallat amplitudgitter, uppstår. Effekten blir med ett gitter mycket mera markant.

Spalten y (fig. 14) avbildas som ett band y' vars ljusintensitet avtar mot kanterna och är lika med noll vid M' . Man kan betrakta ljuskällans böjningsbilder L_1 och L'_1 som två ljuskällor, vilka alstrar ljus av samma fas. Vågen L'_1M' är gentemot L_1M' försenad, och om vid M' svängningarna sker i motsatt riktning blir ljuset här utsläckt. Det är tydligt, att om man skär bort L_1 med en skärm eller bländare, eller om objektivets öppning är för liten, så blir punkten M aldrig mörklagd, eftersom det inte finns någon våg som kan interferera med L'_1M' . Bilden y' kommer alltså icke till stånd. *Det minsta objekt som objektivet kan avbilda får alltså inte vara mindre än att det första maximet ännu upptas av objektivets öppning.*

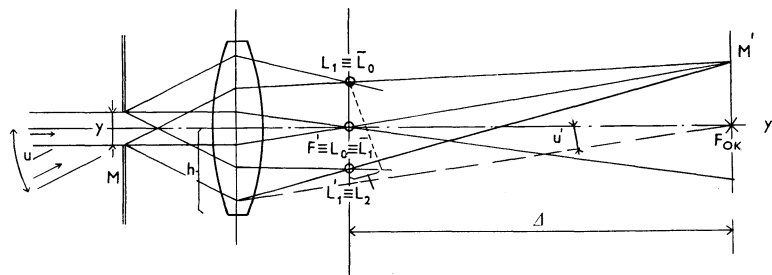


Fig. 14 Mikroskopets upplösningsförmåga

Av fig. 14 framgår att

$$y' \approx \frac{\lambda \mathcal{A}}{h} \text{ och} \quad \mathbf{3}$$

$$\sin u' = \frac{h}{\mathcal{A}} \quad \mathbf{4}$$

där h är halva öppningen, $\mathcal{A}$ tublängden (sid. 37) och λ ljusets våglängd.

Ett geometriskt-optiskt korrigerat objektiv (för att ge objektlika bilder) skall uppfylla det s. k. sinusvillkoret (sid. 10)

$$y \cdot n \cdot \sin u = y' \cdot n' \cdot \sin u'$$

På grund av ekvationerna **3** och **4** blir högra ledet lika med λ , och man får för det minsta avbildbara föremålet

$$y = \frac{\lambda}{n \cdot \sin u} \quad \mathbf{5}$$

I praktiken belyser man objektet inte med axiala utan med sneda strålar under vinkeln u , så att böjningsfigurerna i objektets bakre brännplan förskjuts och man även får in andra maximet L_2 ($L_0 \equiv L_1$, $L_1 \equiv L_0$), varigenom y tillåts vara hälften så stort.

$$y = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin u} \quad \mathbf{6}$$

Detta värde är ett minimum som inte kan underskridas, men som däremot påverkas ogynnsamt av objektets och ljuskällans struktur och beskaffenhet. (En del författare uppger 20—50 % sämre upplösning.)

Uttrycket $n \sin u$ kallas för *numerisk apertur* (N.A.) och är ett viktigare kriterium för objektivet än själva förstoringen.

För att få hög upplösningsförmåga (litet y) bör N.A. vara så stor som möjligt, men så länge objektivet befinner sig i luft (*torrt objek-*

tiv) kan sin u aldrig bli större än 1. I verkligheten kommer man på sin höjd till $N.A. = 0,95$. Med detta objektiv kan man inte avbilda

mindre detaljer än $y = \frac{0,00055}{2 \cdot 0,95} = 0,29\mu$, vilket alltså är den högsta

möjliga upplösningsförmågan för ett torrt objektiv i det gula området av spektrum. Vanliga torra objektiva har sällan större $N.A.$ än 0,65 och kan alltså inte avbilda mindre detaljer än $0,42\mu$.

Större apertur uppnår man genom att fylla området mellan objekt och objektiv med en vätska (vatten, $n = 1,3$, cederolja, $n = 1,515$, glycerin, $n = 1,42$, monobromnaftalin, $n = 1,656$). Objektiv, konstruerade härför, kallar man *immersionsobjektiv*. I ett högbrytande medium trängs brytningsmaxima ihop och flera kan uppfångas av objektivet. Vanligen använder man cederoljeimmersion med samma brytningsindex som glas (homogen immersion) och $N.A. = 1,25$. Upplösningen stegras här till $0,22\mu$. Med den största i handeln förekommande $N.A. = 1,6$ kan man avbilda ett objekt med en storlek ned till $0,14\mu$.

Bilden i mikroskopet är en brytningsprodukt: ett punktformigt objekt avbildas som en liten skiva (airy-fläcken) med svaga koncentrisk ringar runt om. För att kunna urskilja två punktformiga objekt måste centra i båda bildelementen ha ett avstånd av åtminstone radien. Liksom vid kikare (sid. 88) kan man med utgång från detta räkna sig till samma resultat som ger formeln **6**.

Slutsatsen av detta resonemang är, att *man i ett mikroskop inte kan avbilda ett objekt som är mindre än ca hälften av det använda ljusets våglängd*.

Diffractionsteorins principer har definitivt klarlagts av Abbe 1883, och detta årtal betyder den viktigaste milstolpen för mikroskopets utveckling. Under de efterföljande fyrtio åren har hela den moderna mikroskopin uppbyggts.

Förstoring

Av fig. 15 framgår att mikroskopets totalförstoring $G = G_{\text{obj}} \cdot G_{\text{ok}}$.

Objektivets förstoring, $G_{\text{obj}} = \frac{y'}{y}$, är förhållandet mellan bilden y' i objektivets bildplan och objektet y . Förstoringen $G_{\text{ok}} = \frac{250}{f_{\text{ok}}}$ är oku-

larets luppförstoring (sid. 29). I stället för objekt- och bildstorlek kan man även använda objektavstånd b och bildavstånd a . Förstoringen

$G_{\text{obj}} = \frac{a}{b}$ kan med hjälp av ekv. 26 uttryckas som $G_{\text{obj}} = \frac{\mathcal{A}}{f_{\text{obj}}}$,

där $\mathcal{A}$ är den optiska tubuslängden (avståndet mellan objektivets bildsidiga brännpunkt F' och bilden).

Mikroskopets totalförstoring $G = G_{\text{ok}} \cdot G_{\text{obj}}$ blir

$$G = \frac{250}{f_{\text{ok}}} \cdot \frac{\mathcal{A}}{f_{\text{obj}}} \quad 7$$

Vid starka objektiv skiljer sig objektavståndet b mycket litet från brännvidden. Det fria arbetsavståndet $\bar{b}$ beror däremot på objektivets konstruktion och är vid starka objektiv bara någon tiondels mm stort. Bildavståndet a eller den optiska tubuslängden $\mathcal{A}$ ersätts med den s. k. *mekaniska tubuslängden* $\bar{\mathcal{A}}$: det är avståndet mellan objektivets och okularets anslagsflänsar och fastställs i regel till 160 mm; dock förekommer även tubuslängder varierande mellan 170—250 mm. Man kan sätta upp en approximativ formel för objektivförstoringen:

$$G_{\text{obj}} \approx \frac{\bar{\mathcal{A}}}{f_{\text{obj}}}.$$

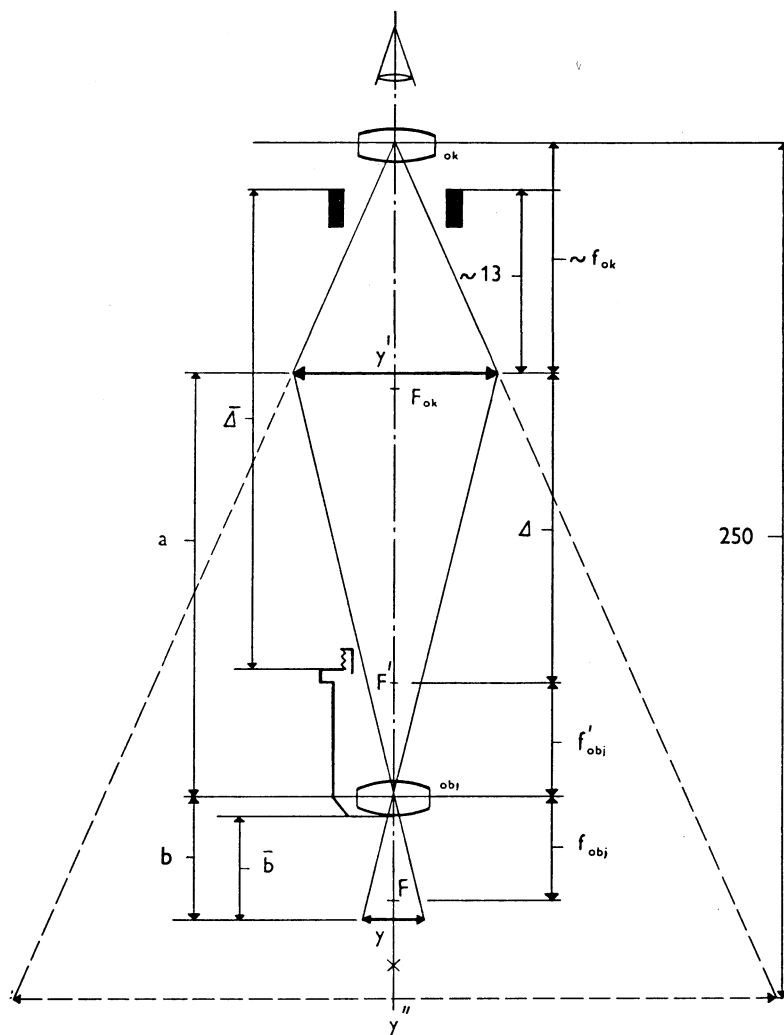


Fig. 15 Mikroskopets förstoring

$$\text{Objektivförstoring } G_{obj} = \frac{y'}{y} = \frac{a}{b} = \frac{\Delta}{f_{obj}} \approx \frac{\bar{\Delta}}{f_{obj}}$$

$$\text{Okularförstoring } G_{ok} = \frac{250}{f_{ok}}$$

$$\text{Totalförstoring } G = \frac{y''}{y} = \frac{y''}{y'} \cdot G_{obj} = \frac{250}{f_{ok}} \cdot \frac{\Delta}{f_{obj}} = G_{obj} \cdot G_{ok}$$

Ett mikroskop kan betraktas som sammansatt av en stark lupp och en kikare. Objektivet kan sägas bestå av två tänkta delar, en stark, med kort brännvidd (luppen) och en svag (kikarobjektivet); mellan dessa förlöper strålarna parallellt (fig. 27). Här blir totalförstoringen

$$G = G_{\text{kikare}} \cdot G_{\text{luppen}} \quad 8$$

Om man bestämmer kikarobjektivets brännvidd till $f = 160$ får man

$$G = \frac{160}{f_{\text{ok}}} \cdot \frac{250}{f_{\text{obj}}}$$

dvs. samma resultat som förr.

Enligt formeln 8 beräknar man förstoring av *kikarlupper*, dvs. kikare försedda med försättsobjektiv, samt av mikroskop utrustade med objektiva för oändligt bildavstånd (sid. 55).

Ögat kan särskilja två punkter endast om synvinkeln mellan dem är större än 1 minut. På 250 mm avstånd blir deras inbördes avstånd ca 0,1 mm. För att underlätta observation vid mätningar kan mikroskopets förstoring väljas så, att den minsta detaljen som skall synas förstoras till 0,2 mm. Att överskrida 0,4 mm vore meningslöst: man kan inte urskilja mindre detaljer, då gränsen är given av aperturen, ej av förstoringen — däremot blir synfältet och eventuellt arbetsavståndet mindre samt inställningen svårare. En god regel är att *förstoringen skall ligga mellan $500 \cdot N.A.$ och $1000 \cdot N.A.$*

Mikroskopets utgångspupill, vilken kan uppfångas några mm bakom okularet, får i detta fall en diameter av 0,5—1 mm. Utgångspupillen syns om ögat placeras ca 250 mm ifrån okularet. Med en enda blick kan man övertyga sig om mikroskopets apertur motsvarar förstoringen. Är pupillen mindre, drar man lätt den slutsatsen att mikroskopet har en onödig överförstoring eller en otillräcklig apertur, är den däremot större, utnyttjas inte den diffraktiva upplösningsförmågan. I tabellen, fig. 16, har sammanställts några förekommande objektiva, deras upp-

40 MIKROSKOPET

lösningförmåga för gult ljus samt den lämpliga förstoring, vid vilken upplösningförmågan helt kan utnyttjas. Denna beräknades så, att den minsta detaljen får en skenbar storlek 0,1—0,2 mm. Här uppges även den för varje objektiv lämpliga okularförstoringen och det ungefärliga arbetsavståndet.

G_{obj}	$\sim f_{\text{obj}}$ mm	N.A.	y (minsta synliga obj) mm	Arbets- av- stånd ~	G_{ok} för $y'' =$ 0,1—0,2 mm	G_{total}	Skärpe- område μ
3 ×	36	0,12	0,0025	40	13—26 ×	40— 80 ×	177 —49,7
10 ×	16	0,3	0,0010	9	10—20 ×	100— 200 ×	31,1—10,7
20 ×	8	0,4	0,0007	1,6	7—14 ×	140— 280 ×	16 — 5,7
40 ×	4	0,65	0,0004	0,5	6—12 ×	250— 500 ×	6 — 2
60 ×	2,5	1,25	0,0002	0,3	8—16 ×	500—1 000 ×	1,3— 0,5
100 ×	1,6	1,25	0,0002	0,2	5—10 ×	500—1 000 ×	1,3— 0,5

Fig. 16 Data över några av de vanligast förekommande objekten, storleken av den minsta synliga detaljen samt den härtill behövliga totalförstoringen. Skärpeområde enligt fig. 17

Det är inte alldeles likgiltigt hur den totala förstoringen uppdelas mellan objektivförstoringen och okularets luppförstoring. Till en viss grad är det fördelaktigt att — vid samma apertur — välja en låg objektivförstoring: arbetsavståndet blir härigenom längre och objektivet blir lättare att tillverka samt dessutom mindre känsligt för åverkan. Samtidigt blir emellertid avbildningsfelen större, då dessas absoluta storlek naturligtvis växer med brännvidden. Även en hög okularförstoring är mindre lämplig. I regel undviker man starkare okular än 15 × och svagare objektiv än ca $G_{\text{obj}} \approx 50 \cdot \text{N.A.}$

Objektivets skärpeområde är, liksom vid fotoobjektiv, beroende på aperturen, och då denna vid mikroskop uppnår betydligt större vär-

den bör man här ta hänsyn till den av ljusets vågnatur betingade faktorn (jfr sid. 23). En stor del av mikroskopets djupskärpa beror på ögats förmåga att ackommodera.

Under förutsättning att ögat kan inställas mellan ∞ och 250 mm blir det härav följande djupområdet

$$P_0 = \frac{250}{G^2}$$

Diffractionen bidrar med ett värde

$$P_d = \frac{\lambda}{2(N.A.)^2}$$

och den av ögats upplösningsförmåga och aperturen givna faktorn är

$$P_R = \frac{0.1}{(N.A.) \cdot G}$$

$\frac{G}{N.A.}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
0,3	31,1	10,7	6,7	5,2	4,4	4,0	3,8	3,6	3,5	3,4
0,4	29,1	9,1	5,2	3,7	3,1	2,7	2,4	2,3	2,2	2,1
0,5	28,0	8,2	4,4	3,1	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4
0,6	27,4	7,8	4,0	2,6	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1
0,7	26,9	7,5	3,8	2,4	1,8	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9
0,8	26,6	7,3	3,6	2,3	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,8
0,9	26,4	7,1	3,5	2,2	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,7
1	26,2	7,0	3,4	2,1	1,4	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
1,1	26,1	6,9	3,3	2,0	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5
1,2	26,0	6,8	3,2	1,9	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
1,3	25,9	6,8	3,2	1,9	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,5

Fig. 17 Skärpeområde i μ vid olika förstoringar och aperturer. (Ackommodation ∞ — 250 mm, ögats upplösningsförmåga motsvarande 0,1 mm på 250 mm avstånd)

I tabellen, fig. 17, har med hjälp av dessa tre formler beräknats skärpområde för olika förstoringar och aperturer. Vid stora aperturer och höga förstoringar är skärpområdet så smalt (i runt tal 0,001—0,002 mm), att man kan lägga optiska snitt genom ett tjockare preparat och sondera objektet i djupled (sid. 44).

Objektiv och okular

Den av N.A. definierade upplösningsförmågan får inte nedsättas genom felaktig beräkning eller tillverkning. Däremot vore det ekonomiskt med korrektion utöver denna gräns.

Vid beräkning av upplösningsförmågan, då begreppet $y \cdot n \cdot \sin u = y' \cdot n' \cdot \sin u'$ infördes, förutsattes att ett litet objekt y uppförstorades till y' lika mycket av objektivets alla zoner. Det räcker alltså inte att objektivet är sfäriskt korrigerat och att strålar utgående från en punkt på objektet förenas i en enda bildpunkt, utan den för varje stråle gällande brännvidden bör vara densamma för objektivets samtliga punkter. I annat fall kan ett litet objektelement inte avbildas av objektivets alla zoner med samma förstoring

$$\frac{y'}{y} = G = \frac{\sin u}{\sin u'} \quad 9$$

System som uppfyller detta s. k. sinusvillkor (se sid. 10) och samtidigt är sfäriskt korrigerade, benämns aplanatiska. Optimum av detta korrektionstillstånd kan endast nås för ett enda bild- och objektavstånd. Man beräknar mikroobjektiv så, att bildavståndet motsvarar den tidigare omnämnda tubuslängden 160 mm. Om detta vid användning icke respekteras blir en bildförsämring märkbar.

Objektiv beräknade för bildläge i oändligt avstånd används tillsammans med ett hjälpopjektiv, vilket med mikroskopets okular bildar en kikare. Mellan objektivet och hjälplinsen löper strålarna pa-

rallellt: man kan öka eller minska avståndet efter behov samt mellan dessa förlägga optiska element för opakbelysning, polarisation, förstöringsväxel o. d. (se sid. 55).

För de flesta ändamål lämpar sig de s. k. *akromaterna*, korrigerade för röd och blå färg. Man förenar den röda och blå bilden, och genom en omsorgsfullt utförd kalkyl kan man kombinera de övriga färgerna (sekundärt spektrum) tillsammans med rester av sinusfel och sfärisk aberration (zonfel) och härigenom hjälpligt uppnå den av diffraktionen bestämda upplösningen.

Svaga objektiv med $1-5\times$ förstoringen består vanligen av en enkel tvålinsig akromat, beräknad för given bild och givet objektavstånd. Sådana förekommer i regel i lågförstorande betraktnings- och mätmikroskop, men även vid denna enkla lösning bör objektivet ha en till förstoringen avpassad apertur. Litet starkare objektiv ($10\times$)

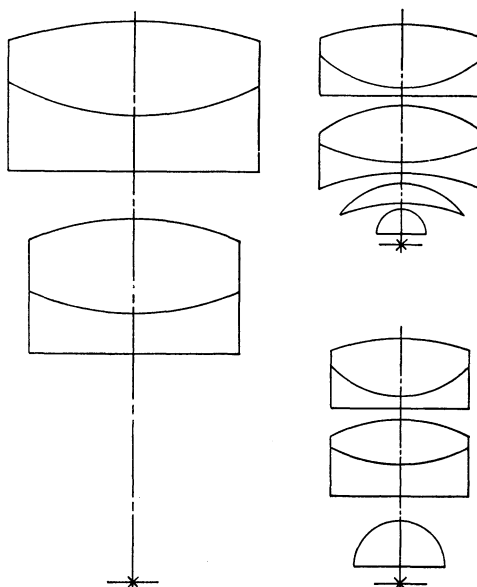


Fig. 18 Akromater $10\times$, $40\times$, $60\times$. (Förstoring 3:1)

brukar konstrueras av två dylika akromater, som uppdelar den för aperturen behövliga brytkraften (Listerobjektiv). Starka objektiv samt immersionsobjektiv utmärker sig genom en halvsfärisk frontal-lins och ett flertal aplanatiska menisker bakom denna (fig. 18).

Färgkorrektionen har förbättrats genom införandet av nya glas samt fluoritlins. Dessa s. k. *apokromater* är fria från sekundärt spektrum. De betingar dock ett mycket högt pris. Något enklare, men kanske praktiskt lika fullgoda objektiv, är *semiapokromaterna* eller fluoriterna. Apokromater, fluoriter (och även starka akromater) förstorar mer i blått ljus än i rött. Därför måste dessa objektiv användas tillsammans med *kompensationsokular*, som utjämnar färgförstoringsfelet.

Det tunna täckglaset (vanligen 0,17 mm tjockt) uppvisar i det starkt divergerande strålnippet ett mycket utpräglat sfäriskt fel, och vid kalkyl av starkare objektiv måste man ta hänsyn härtill. Det finns objektiv där avståndet mellan främre och bakre linsgruppen kan varieras för att åstadkomma en kompensation av olämplig täckglastjocklek, men om så stränga krav ställs är det lika lämpligt att ändra tubuslängden. Många mikroskop har utdragbar tub och vid tunnare täckglas dras tuben ut. I metallmikroskop och liknande, utan täckglas arbetande system, bör vanliga objektiv ej förekomma.

Objektiven är inte korrigerade för utomaxiala fel, varför särskilt bildfältskrökningen gör sig gällande; det optiska snittet (sid. 42) genom ett preparat vars tjocklek är större än djupskärpan blir inte en plan utan en kupig yta. Ett tunnare objekt ses skarpt endast i centrum av synfältet, men genom fokusering flyttas skärpan närmare kanten (fig. 54). Detta fel kan inte kompenseras med ett samlande okular. För fotografiska ändamål är ett negativt okularsystem mycket lämpligt. Utgångspupillen ligger här inne i instrumentet, så att visuell observation är omöjlig. Det förekommer objektiv som särskilt beräknats för att ge ett plant synfält (*planakromater*), där man som korrektionselement tillgripit tjocka noll-linser, kända från fotografiska objektiv.

Tillverkningen av mikroskopobjektiv är en av den optiska teknikens svåraste uppgifter. Om man betänker att frontallinsen i ett immersionobjektiv består av en halvkula med en radie av 0,5 mm som skall infattas, förstår man lätt vilka svårigheter som föreligger. Linsernas ytor får inte avvika från tolken mer än 1λ — 2λ och bör vara centriska med en tolerans av endast några tusendels mm. Dessutom måste linstjocklekar och inbördes avstånd mellan dessa hållas med mycket stor precision.

Som okular använder man vanligtvis ett Huyghensokular (fig. 51), vilket ger ett synfält av 25 — 30° . Det verkliga synfältet i mm kan härledas ur formeln $2y \approx 100/G$. För många arbeten är detta otillräckligt, särskilt vid svagare förstoringar i preparerings- och verkstads-mikroskop. Man använder sig då av Kellnerokular eller liknande mer komplicerade system, med vilka man uppnår $2y \approx 200/G$. Med dessa kan i viss mån objektivets ofrånkomliga bildfältskrökning förbättras (periplanatiska okular). (Se sid. 96).

Kompensationsokular, som utjämnar de kromatiska förstöringsfelen vid starka akromater och apokromater samt negativa fotookular har tidigare omnämnts.

Kondensor och belysningen

För att kunna utnyttja objektivets upplösningsförmåga bör objektet belysas med ett system med lika stor apertur. Man skulle då kunna tänka sig att använda ettektiv som kondensor, men brännpunkten ligger alltför tätt intill frontlinsen, och korrektionen är här onödigt långt driven. För de flesta ändamål är en 2-linsig s. k. Abbe-kondensor lämplig. Vid avancerade arbeten, då högklassig optik används, avviker Abbe-kondensorns strålgång så pass mycket från fordringarna på en aplanatisk avbildning, att den troligtvis förorsakar en bildförsämring.

En 3-linsig aplanatisk kondensor är här bättre och kan dessutom göras med apertur upp till 1,4. En akromatisk kondensor (fig. 19), som i själva verket är ett förstorat immersionsobjektiv, motsvarar alla tänkbara anspråk.

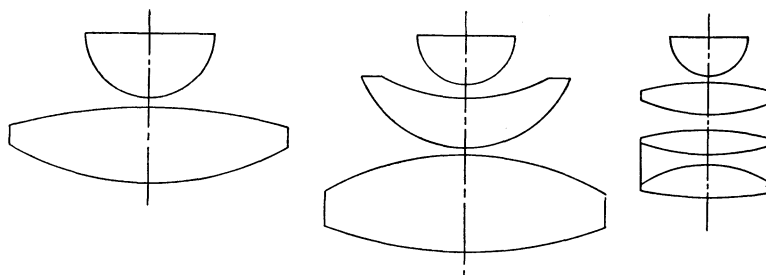


Fig. 19 Abbekondensor N.A. = 1,2; aplanatisk kondensor N.A. = 1,4; akromatisk kondensor N.A. = 1. (Förstoring 1,3:1)

En nedsättning av kondensoraperturen har emellertid inte samma följder som objektivets, utan — som framgår av upplösningsförmågans härledning [5 och 6] — sänks denna i sämsta fall till ca hälften. Förhållandena blir här tämligen invecklade, då objektets struktur, brytningsindex och kontraster spelar en synnerligen stor roll.

Som ljuskälla tjänstgör numera oftast en lågvoltslampa med liten glödkropp, vilken avbildas med en kraftig illuminationslins (även kallad kollektorlins) förstorad i kondensorns brännplan. Här befinner sig en irisbländare (kondensoriris) som reglerar kondensorns apertur. Glödkroppens bild måste fylla hela irisöppningen, då i annat fall inte hela kondensoraperturen utnyttjas. Kondensorn projicerar illuminationslinsen i preparatet. Därför placerar man intill denna en irisbländare, kallad illuminatoriris eller kollektoriris, med vilken man kan reglera den belysta ytans diameter så att den motsvarar synfältet (*Köhlerska belysningsprincipen*, fig. 20). Med denna strålgång kan

hela synfältet belysas jämnt och utan skuggor. Storleken av den belysta ytan kan med hjälp av kollektoriris anpassas efter mikroskopets synfält, så att ovidkommande strålar inte kan tränga in i systemet och framkalla reflexer. Kondensoriris kontrollerar ljusstyrkan och kontrasterna, ehuru dock till pris av nedsatt upplösningsförmåga. Vid mindre anspråksfulla observationer klarar man sig med vanliga glödlampor, eventuellt med en mattskiva placerad framför dessa, men om det gäller att uppnå en ytterst kraftig belysning, kan t. o. m. den Köhlerska belysningen ha sina svagheter. Enligt vissa författare är den s. k. *kritiska belysningen* att föredra. I denna projiceras en *jämnt* lysande glödkropp (handlampa, pointolite) i oändligt avstånd, och strålarna förenas igen till en bild av glödkroppen i preparatet.

På sista tiden har en del nya, för mikroskopin lämpliga lampor utvecklats. Bland dessa kan nämnas zirkonbåglampan. Den består av två wolframelektroder, varav den ena är preparerad med zirkonium. Kolven i dessa är fylld med argon och det uppstår en intensiv ljusbåge med 0,1—1,5 mm i diameter mellan dessa elektroder. På kvicksilverhögtryckslamporna har man nedbringat kolvdiametern till 1—5 mm, och för svaga förstoringar har särskilt små lysämnesrör framställts.

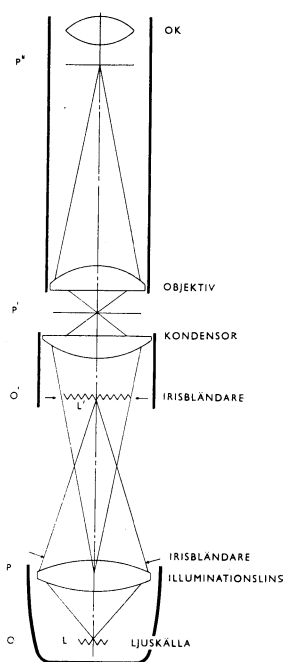


Fig. 20 Köhlerska belysningen. Ljuskällan avbildas i kondensoriris, illuminatorlinsen i objektet

Ultraviolett mikroskop

Upplösningsförmågan i ett mikroskop ökas enligt formeln **6** till det dubbla om man använder sig av UV-ljus. Dessutom har somliga objekt specifika absorptionsställen i ofta strängt avgränsade ultravioletta "färger", eller visar typiska fluorescensspektra. Glas är ogenomskinligt för våglängder under 3000 Å. Vill man observera med ljus av kortare våglängd, måste därför mikroskopsystemet tillverkas av kvarts. Ursprungliga kvartsobjektiv är inte akromatiserade utan endast aplaniska för en viss ljusvåglängd och ger följaktligen fullgoda bilder för strängt monokromatiskt ljus. Man har då utvecklat UV-akromater bestående av en kombination av kvarts- och litiumfluoritlinser samt spegelobjektiv akromatiserade för både synligt och UV-spektrum.

För den långvågiga delen av UV-spektrat (4000—3500 Å) kan dock glasoptik användas tillsammans med en kraftig kvicksilverlampa. Under ca 2000 Å är även kvarts ogenomskinligt, och optiken måste göras av litiumfluorid eller också måste spegelobjektiv komma till användning. Bilden uppfångas fotografiskt, men för inställning placerar man ovanför kvartsokularet ett fluorescensokular. I själva verket är detta

en kikare med kvartsobjektiv, vilket projicerar den av mikroskopet framställda bilden på en fluorescerande uranhaltig glas-skiva. I denna omvandlas den osynliga bilden till en fluorescerande bild, som sedan kan betraktas med ett vanligt glasokular (fig. 21).

För fluorescensspektrala undersökningar tillverkas endast belysningsdelen och objektglaset av kvarts; bilden analyseras däremot med glasoptik.

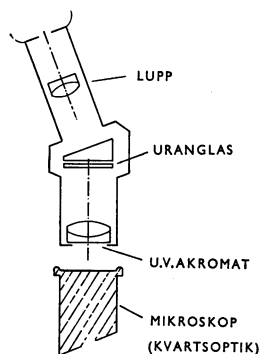


Fig. 21 Fluorescensokular

Faskontrastmikroskop

Objekt, vilkas färg ligger nära det omgivande mediets, är svåra eller omöjliga att observera. Den vanligaste metoden att göra exempelvis bakterier synliga är att behandla dem med färg som fastnar olika på olika delar av objektet. Denna teknik är ganska besvärlig och dessutom dödar färgen dessa organismer. Olägenheten har helt eller delvis övervunnits i faskontrastmikroskopet, som kan sägas vara det största framsteget inom mikroskoptekniken på den senaste tiden. Det uppfanns av Zernicke 1934, utvecklades till praktisk användbarhet under kriget och har sedermera tagits upp av alla större fabriker.

Effekten kan förklaras på följande sätt. I fig. 22 tänker man sig som objekt en smal glasstrimla, t. ex. $0,1\ \mu$ tjock, eller flera dylika strimlor lagda bredvid varandra med ett visst intervall (fasgitter). Ljuset undergår vid genomgången en böjning liknande den som uppstår i ett vanligt amplitudgitter (sid. 34). I objektivets bakre brännplan får man alltså som tidigare en rad diffraktionsmaxima, men i bildplanet ser man ingen struktur, ty objektet är helt genomskinligt.

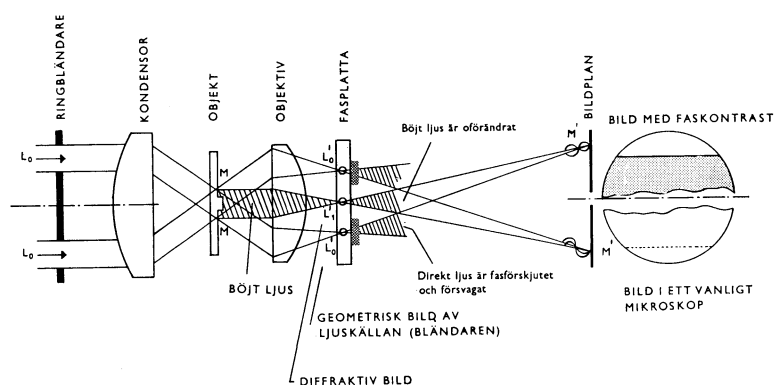


Fig. 22 Faskontrastmikroskop. Fasplattan ändrar faser och amplituden av det direkta ljuset

Man måste dra den slutsatsen, att de strålar som tidigare (vid amplitudgitter) släckte ut varandra nu blir fasförskjutna, så att punkten M förblir osynlig.

Amplitudgitter och faszgitter ger alltså till synes likadana böjningsfenomen, men med olika fas. Om man emellertid lyckas förskjuta fasen vid L'_1 , kommer L'_1M' och L'_0M' att försvaga varandra som vid ett vanligt gitter, och det osynliga objektet blir synligt. För att uppnå detta lägger man en bländare i kondensorns brännplan. Bländaren skall släppa igenom ljus endast inom en tämligen smal ring. Objektet belyses alltså med ett ljusknippe i form av ett koniskt skal. I objektivets bakre brännplan uppstår en reell bild av kondensorbländaren. I denna bild läggs en fasplatta, bestående t. ex. av en smal gelatinring, inbäddad i kanadabalsam mellan två glasplattor. Skillnaden i brytningsindex ger den erforderliga fasförskjutningen. De direkta, oböjda strålarna faller på fasplattans ring; diffraktionsstrålarna passerar förbi. Nu får i en böjningsfigur den direkta bilden ca 90 % av allt ljus, och därför brukar man tillverka ringen i fasplattan av absorberande material, t. ex. genomskinligt aluminium, för att åstadkomma bättre jämvikt mellan amplituderna. Beroende på om man fördröjer eller påskyndar fasen, får man antingen en positiv eller negativ kontrast, dvs. bakgrunden, som i regel har lägre brytningsindex, blir antingen ljus eller mörk.

Det praktiska utförandet av faskontrastanordningen består av en rad objektiv med lämpliga förstoringar och aperturer, där en fasplatta är inmonterad antingen för sig själv eller lagd på en linsyta som befinner sig i objektivets brännplan. Under kondensorn finns ett särskilt revolveraggregat med ringbländare passande för olika objektiv. Ett hjälpmikroskop tjänstgör för centrering av kondensorbländaren gentemot fasplattan. Före användningen ersätter man okularet med detta mikroskop och centrerar kondensorbländarens bild till koincidens med fasplattan.

Det kan visa sig nyttigt att kunna variera fasringens mörkhetsgrad (amplituden) och/eller tjocklek (fasändring). Man använder sig härvid av polaroidfolier, som emellertid menligt kan påverka upplösningsförmågan.

Fasplattan behöver inte nödvändigtvis vara ringformad, även andra former (linje, kors) förekommer. Det är inte heller nödvändigt att fasplattan läggs i objektivets utgångspupill som vid det klassiska utförandet. Ett projektionsokular kan återavbilda pupillen (och bilden av objektet) utanför mikroskopet där fasplattan sedan placeras.

Faskontrasten har också använts för ogenomskinliga objekt, t. ex. i metallografin eller för undersökning av optiskt bearbetade ytor, men den kan endast användas för speglade föremål. Faskontrastens känslighet lämpar sig utmärkt för allmänna fysikaliska mätningar av otydliga brytningsvariationer eller deformationer av optiska ytor och medier. Utvecklingen är antagligen inte avslutad och man kan vänta nya lösningar och utföringsformer.

Mörkfältsbelysning

I föregående avsnitt visades, att ett ingrepp i den diffraktiva bilden i objektivets brännplan har till följd ändrade förhållanden i bildplanet och ökad synbarhet av vissa objekt. Man kan ersätta fasplattan med en ogenomskinlig ring (amplitudkontrast, Töppler 1866) och låta endast det böjda ljuset forma bilden. För att inte på detta sätt förlora en del av objektivaperturen, utformas kondensorn hellre så, att objektet belyses med en mycket öppen, urholkad kon. Eftersom konens apertur är större än objektivets, kan inget direkt ljus tas upp av den fria öppningen, men däremot flera av ljuskällans diffraktionsbilder. Man kan uppnå denna mörkfältseffekt genom en decentrering av kondensoririsen eller med en *mörkfältskondensor*. I sin enklaste utformning består den-

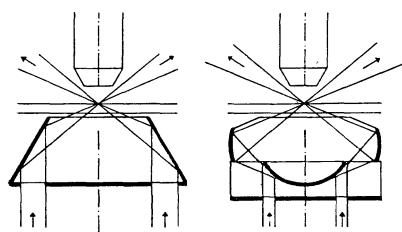


Fig. 23 Mörkfältskondensorer

na av en paraboloidkropp med avskuren topp, men oftare används kardiodkondensorer (fig. 23). Mörkfältskondensorer kräver en omsorgsfull centrering samt mycket kraftig ljuskälla. *De förbättrar inte upplösningförmågan*, utan ökar endast kontrastverkan vid färglösa eller icke absorberande objekt, vilka sålunda kommer att lysa på mörk botten. Till skillnad från faskontrast är konturerna mera kantade av störande böjningsfigurer och formen återges i missvisande proportioner. Partiklar, vilkas storlek ligger långt under upplösningförmågans gräns, uppträder som lysande punkter; man kan registrera partiklarnas förekomst och antal, men inte deras storlek och form (ultramikroskop).

Belysning av ogenomskinliga föremål

Ogenomskinliga objekt kan ha en absorberande, diffust reflekterande eller speglande struktur, och belysningen bör omsorgsfullt väljas för att lämpa sig efter ytans beskaffenhet. För att få ett påtagligt intryck av objektets karaktär skiftar man ljusets infallsvinkel. Små detaljer med kraftig spegelverkan (små kristallytor, bearbetningsspår o. d.) kan ibland befrämja upplösningförmågan, ibland störa observationen och förvränga helhetsintrycket om man förlitar sig på en enda fast belysningsriktning.

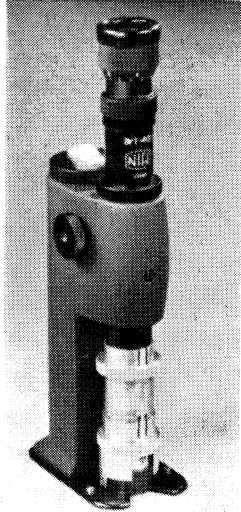


Fig. 24 Vertikalilluminator med färgkontrast

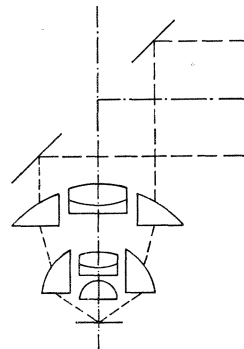


Fig. 25 Ultraviolettbelysning (Leitz)

För svaga förstoringar, vid t. ex. stereoskopiska mikroskop, anordnar man lampaggregatet rörligt på ett segment vars centrum ligger i objektet. Man kan då lätt variera infallsvinkeln mot objektet utan risk att ljusknippet plötsligt lämnar synfältet (fig. 36). En annan konstruktion visas på fig. 24, där belysningslinsen är fast anordnad och variationen av infallsvinkeln uppnås genom att man flyttar glödlampan i vertikalled. Vid större förstoringar medger inte utrymmet mellan objektet och objektivet en dylik enkel anordning. Ljusstyrkan blir också otillräcklig. Man fäster här objektivet i ett genomborrat kondensor-system, vars brännpunkt sammanfaller med objektplanet. Det parallella ljuset från lampaggregatet reflekteras i en snedställd planspegel, som är försedd med ett hål för observationsstrålarna (fig. 25). I stället för den genomborrade kondensorn kan ett spegelsystem med samma apertur komma till användning.

Med de hittills beskrivna belysningsanordningarna träffar ljuset objektet under en större vinkel än objektivets apertur. På sätt och vis kan man betrakta dessa som mörkfältsbelysning: en speglande yta kommer teoretiskt att synas svart, och endast störningar i denna kommer att reflektera eller böja ljuset in i objektivet så att de blir mer eller mindre ljusa.

En helt annan effekt uppnås om man i strålgången placerar en snedställd tunn glasplatta och reflekterar ljuset mot objektet i samma riktning i vilken observationen sker. Ett reflekterande objekt alstrar då i synfältet en ljus bild med mörk struktur (vertikalilluminator). Också här gäller det att uppfylla den Köhlerska principen (sid. 47) för att med två irisbländare kunna reglera aperturen och storleken av det belysta fältet. I regel kan strålgången avsevärt förenklas. Man avbildar ljuskällan med en hjälpkondensor, så att strålar träffar objektivet som om de hade kommit från bilden och ljuskällan avbildas nära objektet. Genom att anordna hjälpkondensorn förskjutbart kan man uppnå variationer i ljusintensiteten. Fig. 26 visar hur bilden ändras vid olika belysningar. Vissa detaljer accentueras; andra undertrycks vid varje belysningsart, så att man får intrycket, att det inte är ett och samma objekt. Bilderna är tagna med anordning enl. fig. 24, med på ∞ inställd laddkamera (jämför fig. 38 b).

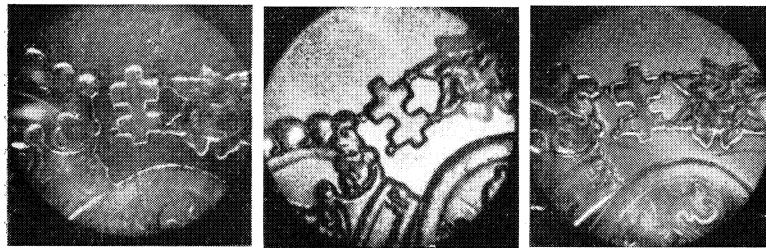


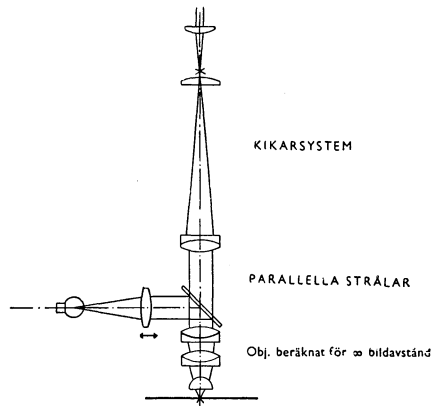
Fig. 26

Tangerande
belysning

Vertikal
belysning

Tangerande och vertikal
belysning

Fig. 27 Mikroskop med objektiv för ∞ bildavstånd och vertikalilluminator



Använder man ett för oändligt bildavstånd beräknat objektiv (sid. 43), kan reflexplattan placeras i den parallella strålgången och ljuskällan avbildas i ∞ (fig. 27).

Reflexplattan kan tillåtas ha en liten vridningsvinkel samt ersätts (ofta genom utdragning) med ett litet prisma, vilket täcker objektivets halva apertur. Ljusutbytet är visserligen obetydligt med reflexplattan, men tillräckligt i synnerhet om den beläggs med hög brytande skikt av t. ex. zinksulfid. Med prismat utnyttjar man mer ljus, men genom avbländningen av halva aperturen förlorar man dock upplösningförmågan, vilket bör undvikas. Vid alla dessa belysningar är det viktigt att förse objektivlinserna med reflexskydd. Särskilt vid observationer av absorberande och diffust reflekterande objekt kan reflexerna från linsytorna vålla stort besvär och t. o. m. omöjliggöra användning av ett eller annat belysningssystem.

Olika slags opakilluminatorer ingår som huvuddel i metallografiska mikroskop. I enklaste form är det vanliga mikroskop som försetts med vertikalilluminator (fig. 27), men det finns även stora instrument, i vilka ogenomskinliga preparat kan observeras, både med mörkfältsbelysning, vertikal- och prismabelysning. Objektet studeras där under-

ifrån och kan fotograferas, mätas etc. Ett enkelt belysningsaggregat för låga förstoringar visas på fig. 24. Man kan här från tangerande belysning övergå till diffus sidobelysning och kombinera dessa med vertikalbelysning. Dessutom kan de vertikala strålarna färgas, varvid man uppnår en lämplig färgkontrast för mätning av metallprov och undersökning av mynt.

Mikroskop för finmekanisk industri

Inom industrin använder man sig av mikroskop för skiftande ändamål. Det har framkommit en del mekaniska konstruktioner och optiska system som särskilt inriktats för industrins behov, och det är dessa som här kommer att omnämnas.

Enkla mätmikroskop med mätskala placerad i okularet är ett allmänt använt verktyg, särskilt för mätning av hårdhetsprov. För mätningar i synfältet kan man inte tillåta bildfältskrökning och distorsion. På objektivet ställs då helt andra krav, vilka är svåra att uppfylla med endast två linser, och optiken måste här bli avsevärt komplicerad, särskilt om man förenar objektivet med ett vidvinkelokular i syfte att t. ex. uppnå ett synfält $2\gamma \sim 300^\circ/G$ (se sid. 97). Man kan då ifrågasätta om en profilprojektor inte är lämpligare. Det förekommer enkla

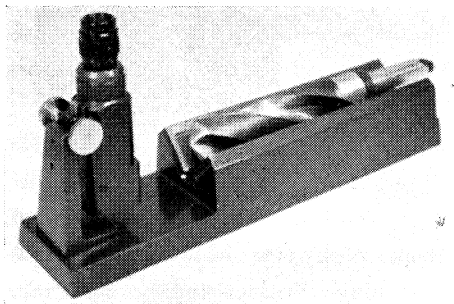


Fig. 28 Instrument för kontroll av borrar

instrument där hänsyn tagits till ett givet, avgränsat ändamål, t. ex. instrument för kontroll av borrar (fig. 28), vinklar o. d., och även stora universalinstrument där en mängd olika mätningar kan utföras. I många maskiner utgör optiken bara en länk av konstruktionen, t. ex. vid mätmaskiner, jiggborrmaskiner, slipmaskiner etc.

Vid mätning i genomfallande ljus kan man lätt få mätfel vid t. ex. höga cylindriska föremål, om bildplanet inte befinner sig i det konstruktiva snittet genom objektet. I viss mån blir mätvärdet oberoende av skarpinställningen om man belyser med parallella strålar. I detta syfte återavbildar man ljuskällan i en liten bländare och parallelliserar sedan strålarna medelst en kollimationslins. Objektet träffas då av ett parallellt strålnippe och strålarna samlas därefter i objektivets brännpunkt, där en bild av ljuskällan uppstår. Alternativt kan man i detta brännplan placera en liten bländare och med en lämplig utformning av objektivet kan man med stor noggrannhet undersöka profiler på spetsiga nycklar och liknande föremål (fig. 29).

En distorsionsfri bild får man om man mellanavbildar objektet i naturlig storlek genom ett symmetriskt linssystem på en mätplatta med den önskade teckningen, t. ex. av en skruvprofil e. d. Denna observeras sedermera med ett mikroskop.

Dessa *telecentrisk* *avbildningar* behandlas närmare i kapitlet om profilprojektorer (fig. 41).

Apparater där mikroskopet endast ingår som riktinstrument är optiskt sett väsentligt enklare. Dessa består av en mekanisk mätanordning, försedd med ett eller flera mikroskop för avläsning av en skala eller inställning mot objektets mätpunkt. Okularet på dessa kan givetvis förses med mikrometeranordning för precisionsavläsning av huvudskalan. Man bör dock för-

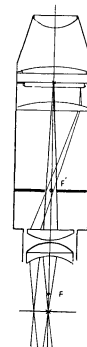


Fig. 29 Mikroskop med telecentrisk strålgång. (Aperturbländare i objektivets brännplan)

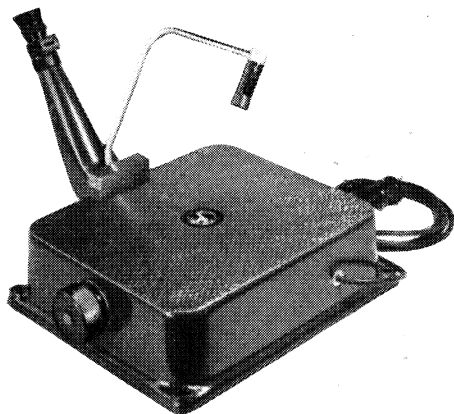
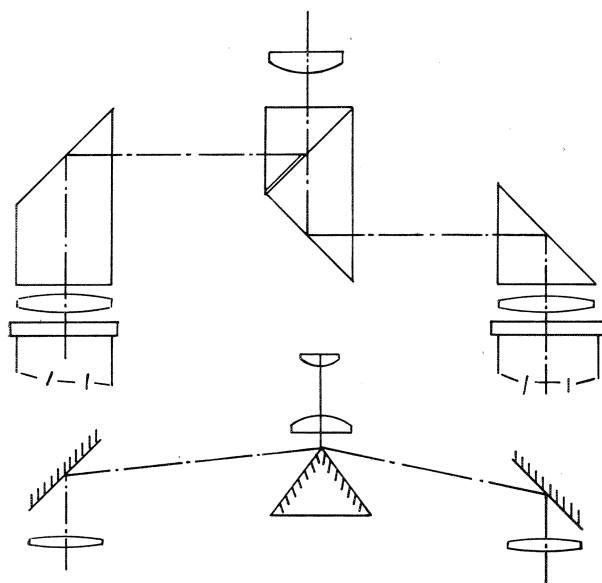


Fig. 30 Avsyningsmikroskop

säkra sig om att huvudskalans delningsfel, fel i det mekaniska utförandet, mikrometers mätfel samt mikroskopets distorsion ligger inom det tillåtna totalfelet. Inom denna kategori av maskiner kan nämnas

Fig. 31
Komparatorprismor

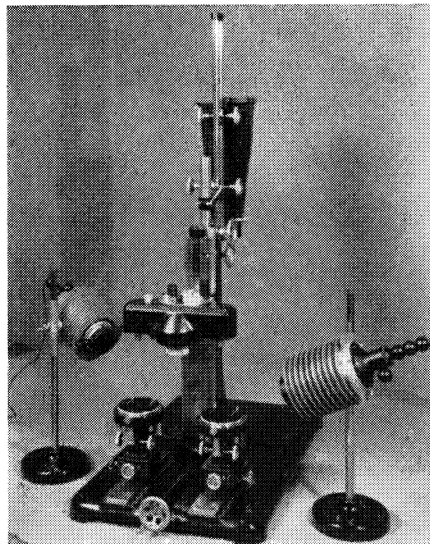


Fig. 32 Mikroskopkomparator

mätmaskiner, koordinatmätmaskiner, komparatorer i allmänhet, vinkelmätnanordning etc.

Som redan nämnts (fig. 27) består objektivet vid vissa mikroskopkonstruktioner av två delar, mellan vilka strålarna förlöper parallellt, som t. ex. i ett periskop. Man strävar då antingen efter en viss längd på instrumentet, eller då man söker möjlighet att skarpställa på olika arbetsavstånd utan att dock behöva ändra okularets läge eller mikroskopets förstoring, som t. ex. vid avsyningsmikroskop enl. fig. 30. Här kan också nämnas instrument för invändig kontroll av rör o. d., där flera mellanbilder och parallella strålgångar följer varandra i syfte att uppnå en instrumentlängd av upp till flera meter.

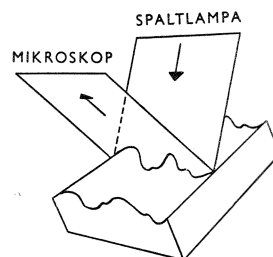


Fig. 33 Ljussnittsförfarandets princip

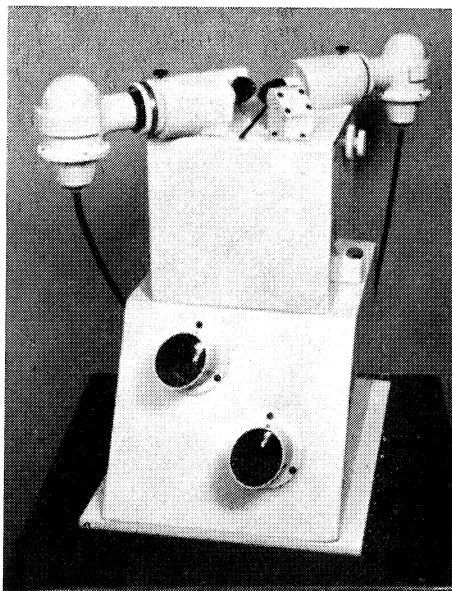


Fig. 34 Ljussnittprojektor för två profiler (Nife)

En grupp instrument, benämnda mikrokomparatorer, används för att jämföra två olika preparat med hänsyn till ytbeskaffenhet o. d. De består av två objektbord med tillhörande objektiv, vars båda bilder sammanförs i ett okular. Genom att förena två standardmikroskop med ett komparationsokular (fig. 31) erhåller man ett enkelt instrument, men ofta utförs instrumenten som stora universalkomparatorer (fig. 32).

Av optiska ytindikeringsmetoder är ljussnittförfarandet enligt Schmaltz det mest kända. En lysande spalt projiceras på den undersökta ytan under 45° vinkel; ljusbandet formar sig enligt ytans terräng och observeras med ett mikroskop. Fig. 33 visar ljussnittets princip, och fig. 34 ett dylikt instrument för kontinuerlig kontroll av en stålbandsprofil.

Binokulära mikroskop

Binokulära mikroskop är särskilt lämpliga för tidsödande observationer eller där plastiken i bilden är av betydelse.

Vanliga forskningsmikroskop förses med binokulära tillsatser, där de av objektivet framställda strålnippena delas av en genomskinlig metalliserad prismayta så att två bilder kommer till stånd. Förlusten genom absorption i delningsskiktet är ca 30 %, varför en kraftigare belysning bör anordnas utan ökning av aperturbländaren i kondensor-systemet. Det binokulära prismasystemet förlänger mikroskopets tubuslängd. Då objektiven är korrigerade för en tubuslängd av 160 mm, lägger man, för att inte försämma bilden, nära objektivet en negativ kompensationslins. Denna svaga lins inverkar inte mycket på den av den längre tubuslängden vållade förstöringsökningen ($1,2-2\times$).

Vid preparering, avsyning o. d. vill man dra nytta av det stereoskopiska seendet. Man utformar instrumentet som två mikroskop som bildar en vinkel motsvarande seendet på 250 eller 300 mm avstånd (ca 15°). Bilden får inte vara omvänd som i gängse mikroskop. Detta skulle nämligen resultera i en *pseudostereoskopisk* effekt. (Dalar i objektet framträder då som toppar och vice versa.) Stereomikroskop är därför alltid utrustade med bildvändande prismor.

Vid stereomikroskop ställer man stränga krav på stabilitet: genom små deformationer i objektivtuberna kan en förskjutning lätt uppstå i bildernas läge, varvid fördelen med den binokulära observationen förvandlas till besvär, och när ögonen genom skelning inte kan förena de båda bilderna, ser man dubbelt.

De tätt liggande objektiven kan vid höga förstoringar tvinga konstruktören att minska aperturen så att mikroskopet kommer att arbeta med tom förstoring och ge mörka bilder. Man bör därför övertyga sig om att utgångspupillen inte är mindre än ca 1 mm (sid. 39).

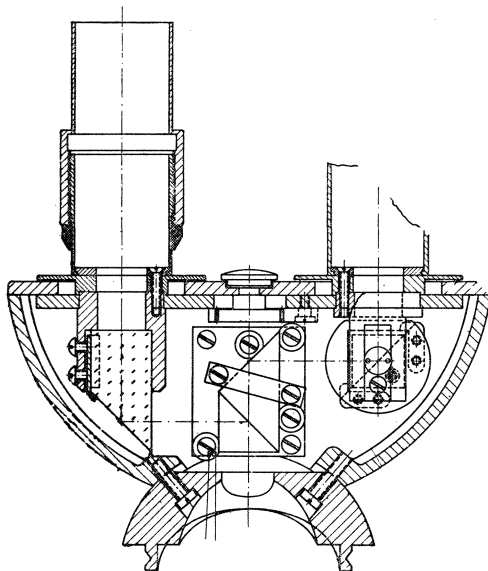


Fig. 35 Prismahuset i ett binokulärt mikroskop

Såväl felriktad belysning som orenheter på optiken stör stereoseendet avsevärt.

Fig. 35 visar ett binokulärt mikroskop i genomskärning, fig. 36 ett

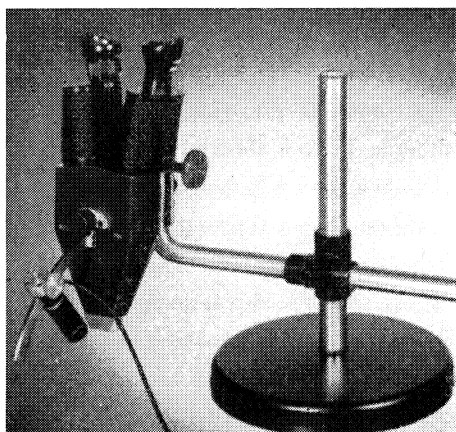


Fig. 36 Stereomikroskop

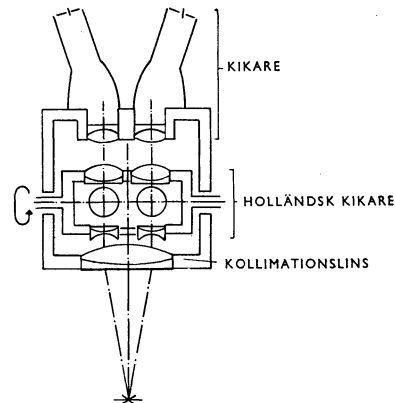


Fig. 37 Stereomikroskop med inbyggd förstöringsväxel (Zeiss)

stereomikroskop. Även stereomikroskop utrustas med utbytbara objektiv, ev. fastsatta på en revolver, eller som på fig. 37, där förstoringen ändras genom ett vridbart holländskt kikarsystem mellan en för båda ögonen gemensam kollimationslins och en binokulär kikare.

Mikrofotografi

Bilden i ett mikroskop uppstår 250 mm framför ögat (y'' i fig. 15). Den är skenbar och kan ej uppfångas på en skärm. Emellertid kan man bakom okularet placera en kamera inställd som ögat på 250 mm avstånd och omedelbart få skarpa bilder. Det gäller endast att samtliga strålar, som lämnar okularet, passerar kameraobjektivet. Detta bör alltså helst ligga i mikroskopets utgångspupill. Ett bättre sätt är att flytta tuben obetydligt ifrån preparatet tills bilden y' faller precis i F_{ok} (fig. 38). För pålitlig fokusering av mikroskopet använder man en på långt avstånd inställd kikare. De strålar som nu lämnar okularet är parallella, och för upptagning kan användas en vanlig lådkamera. Ökas mikroskopobjektivets arbetsavstånd ytterligare, uppstår

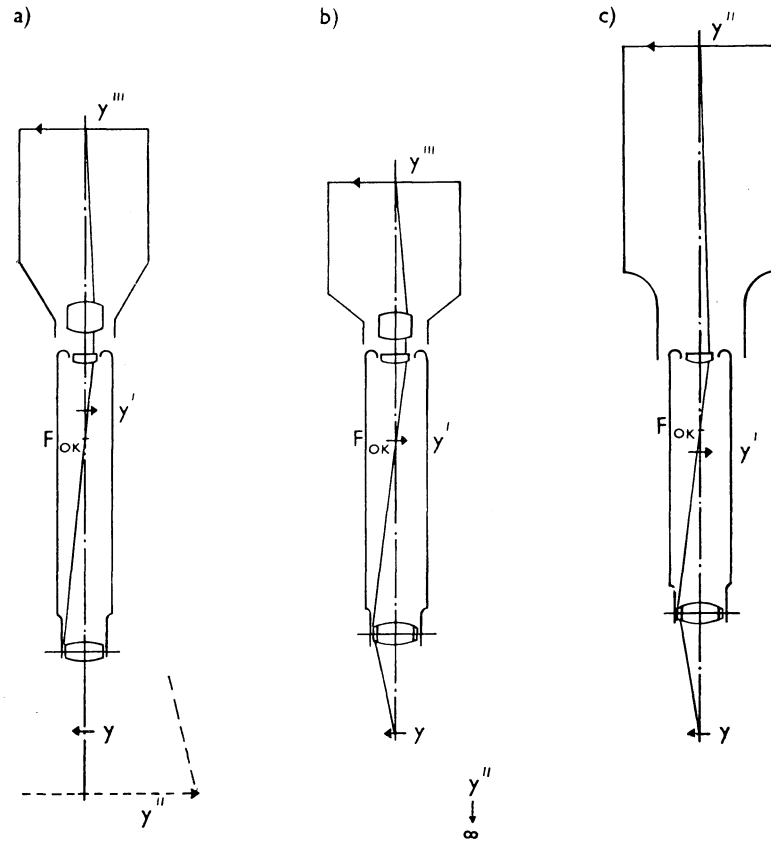


Fig. 38 a. Mikrofotografering med kameran inställd på 250 mm avstånd. b. Kameran inställd på ∞ avstånd. c. Bilden projiceras av okularet

bakom okularet en reell bild, som kan uppfångas direkt på skärmen eller plåten utan något hjälpobjektiv. För att inte försämrå bilden, bör avståndet till plåten inte vara alltför litet.

Det är visserligen endast vid det första alternativet (kameran inställd på 250 mm) som mikroobjektivet används korrekt för den strål-

gång som det har beräknats för, men några större bildfel vid de andra två anordningarna kan knappast skönjas.

Förstoringen vid mikrofotografering eller mikroprojektion beräknas enligt

$$G_{\text{foto}} = \frac{A}{f_{\text{obj}}} \frac{p}{f_{\text{ok}}} \quad 10$$

där p är projektionsavståndet, resp. kameraobjektivets brännvidd. Formeln kan härledas på samma sätt som 7, i vilken den övergår vid projektionsavstånd $p = 250$ mm.

Emulsionens upplösningsförmåga är ca 0,03—0,1 mm (sid. 21), så att förstoringens övre gräns vid mikrofotografering sammanfaller med nedre gränsen för visuell observation. Man kan använda sig av approximationen $G_{\text{foto}} \sim 250$ (N.A.) till 500 (N.A.) och man bör helst hålla förstoringen vid nedre gränsen, då ljusutbytet härvid blir bäst.

Mekaniskt realiserar man en mikrofotografisk anordning genom att på mikroskopet sätta en småbildskamera (schema fig. 38 b) eller en linslös tratt eller bälge med kassetthållare (schema fig. 38 c). Båda kan kompletteras med ett sidookular för inställning.

Avbildningsfel, som vid okulär observation kan tolereras, gör sig vid fotografering mera gällande. Man bör därför utnyttja ett mindre synfält och/eller använda särskilda system (fotookular, objektiv med plant synfält).

Projektion

Ett objekt som är beläget på ett något större avstånd från objektivet än dess brännvidd, avbildas förstorat och omvänt. Gränsen ligger vid dubbla brännvidden, där avbildningen sker i naturlig storlek, och vid brännpunkten. Ett i brännpunkten befintligt objekt projiceras på oändligt avstånd.

För en föreskriven förstoring G blir bildavståndet

$$a = f \cdot (G + 1) \quad 12$$

och objektavståndet

$$b = f \cdot \left(1 + \frac{1}{G}\right) \quad 13$$

Dessutom kan för a och b tillämpas gängse linsformler, vilka i större förstoringsapparater ligger till grund vid beräkning av automatiska styrmekanismer för skärpeinställning. a , b och f mätes man från objektets huvudplan och dessa ligger någonstans inne i systemet, vid vanliga 3-linsiga objektiv ungefär i mitten av detta. Ofta lämnar objektivets tillverkare noggranna uppgifter härom.

En projektor består av ett objektiv, som projicerar objektet på skärmen, en ljuskälla samt kondensor, vilka på lämpligt sätt belyser objektet (film eller diapositiv). Allt ljus från objektet måste passera objektivet, i annat fall arbetar projektorn oekonomiskt. Varje objekt-punkt kommer följaktligen att lysa med en kägla vars bas bildas av objektivet. Kondensorsystemet har till uppgift att rikta och utforma dessa käglor på lämpligt sätt (jfr kollektivlinsen i okularet). Varje

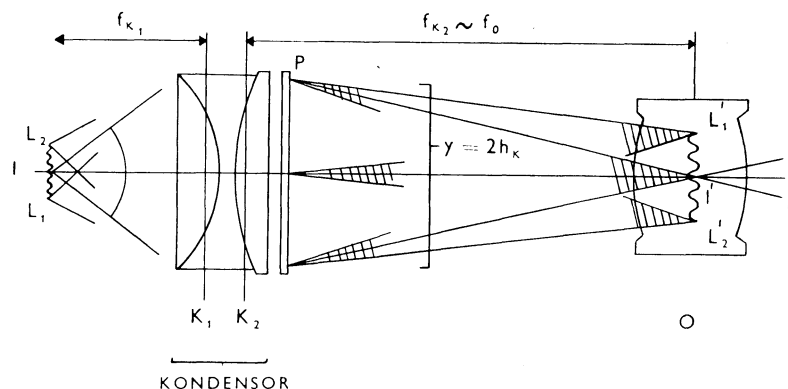


Fig. 39 Belysning i en projektor

punkt L'_1 , L'_2 av objektivet (fig. 39) tar emot ljus från kondensorns hela yta, som i sin tur belyses av motsvarande punkter på ljuskällan (L_1 , L_2). Med andra ord, ljuskällan avbildas i objektivet.

Ljusförlusterna är otroligt höga. Man bör beakta att ljuset som träffar en bildpunkt på skärmen fördelas i 180° rymdvinkel, förutom absorptionen i skärmen. Därför bör stor omsorg ägnas åt skärmens ytbeskaffenhet, vilken väljs så att maximum av spridda strålar träffar observatören. Man förser skärmen med ett skikt av aluminiumfärg eller med små glaskulor (Ballotini).

Objektivets relativa öppning, kondensorns konstruktion och ljuskällans storlek måste anpassas efter det givna filmformatet och projektionsavståndet. Kondensorn kan uppdelas på det ställe där strålarna löper parallellt med axeln i lampdelen K_1 och objektivdelen K_2 ; i F_{k1} resp. F_{k2} befinner sig sedan ljuskällan L resp. objektiv O . Kondensorns prestation mäter man genom mängden av ljus som den kan uppfånga, dvs. genom lampdelens K_1 aperturvinkel resp. relativ öppning. Som redan omtalats skall objektivet ha så pass stor fri diameter, att den uppfångar alla strålar från objektet, men det vore meningslöst

att göra det större. Om man betecknar ljuskällans storlek l , så blir objektivets öppningstal

$$A_o \sim \frac{f_{k1}}{l} \quad 14$$

Kondensorns diameter bestäms av objektets P storlek y och man kan skriva

$$A_k \sim \frac{f_{k1}}{y} \quad 15$$

De båda sista formlerna ger

$$A_o = A_k \cdot \frac{y}{l} \quad 16$$

och detta definierar projektorns öppningar som funktion av bildens och ljuskällans storlek. Man skall sträva efter kort f_{k1} , dvs. stor aperturvinkel vid ljuskällan. Ljusstarkare objektiv drar med sig större kostnader. Projektionsavståndet bestämmer brännvidden: vid så givet objektiv kan ljusstyrkan på skärmen höjas endast genom att öka kondensoraperturen, dvs. kondensorns förstoring l'/l . Därför måste ljuskroppens storlek l vara så liten som möjligt.

Denna överläggning gäller inte helt för smalfilm och kinoprojektion. Formatet är här så litet, att om man vill uppnå en användbar apertur A_k kommer kondensorn så pass nära lampan att den blir förstörd av värme. Därför väljer man f_{k1} och kondensorns diameter förhållandevis mycket stor. Filmen placeras långt ifrån kondensorn i objektivdelens K_2 ljuskägla, men inte alltför nära ljuskällans bild då ojämnheter i ljusstyrkan på skärmen kan uppstå härav. Man arbetar med betydligt större kondensoraperturer än vid vanlig projektion, varvid l' blir så stort, att man måste tillgripa objektiv med öppningstal 1,6 till 1,4.

Här följer några exempel som kan visa tillämpningen av anförda principer. I enklaste fall avbildar man ljuskällan i objektivet i samma storlek, dvs. $l/l' = 1$ (fig. 40). För format 24×36 använder man

vanliga kondensorlinser, som brukar ha en relativ öppning av 1:1,6. Vid $\varnothing_k = 60$ blir $f_{k1} = f_{k2} = 100$. Glödtråden placeras ca 100 mm från linsens huvudplan. Vid glödkroppens storlek $l \sim 20$ mm behöver man inte större A_o än 4,5 vid $f_o = 100$. Även om man väljer objektivet relativa öppning 1:3, blir bilden för den skull inte ljusare. För att kunna utnyttja detta objektiv måste kondensoraperturen, dvs. kondensorförstoringen l'/l , ökas. Man placerar då nära lampan en kraftig lins I med t. ex. $f = 65$ och $\varnothing = 50$ i ett avstånd b så att glödkroppen avbildas, t. ex. $1,5 \times$ större i ett avstånd a . Enligt 25 blir $a \sim 80$ vid $b \sim 36$, allt räknat från resp. huvudplan. Denna bild l' lägger man i linsens II brännpunkt. Lins II och III kan vara samma som vid första exempen: då $l' = 1,5 l$ så blir även $l' = 1,5 l$ eller m. a. o. glödtrådens bild fyller hela objektivets öppning 30 mm. Ännu högre aperturer uppnår man med aplanatiska kondensorer, där närmast ljuskällan ligger en eller flera aplanatiska menisker. Kondensorn byggs då enligt samma riktlinjer som mikrooptik.

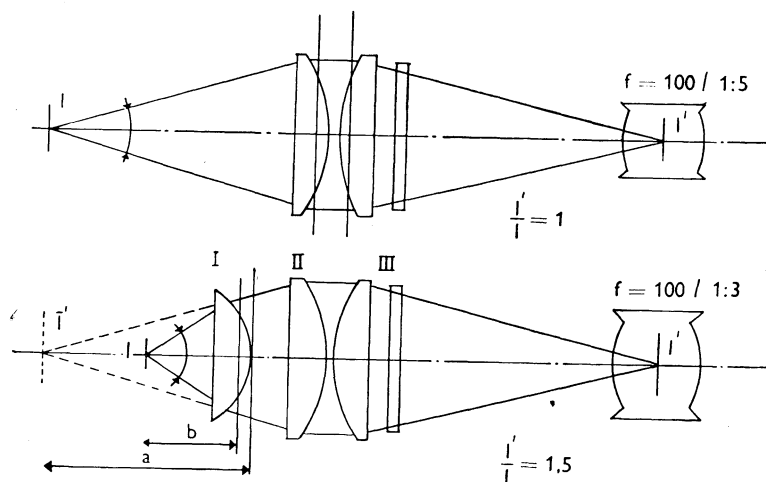


Fig. 40 Projektor för format 24×36 . Objektivet verksamma diameter är beroende på ljuskroppens storlek och på kondensorns förstoring

En dylik kondensor utnyttjar givetvis lampan mera ekonomiskt: den i exemplet behövliga 100 W lampan kan ersättas med ca 20—30 W. Vid t. ex. kondensorförstoring $l'/l = 6$ och samma objektiv som tidigare, får glödkroppen inte vara större än ca 5 mm.

Lampeffekten ökas med en sfärisk spegel med sitt centrum i glödtråden. Det är viktigt att den återspeglade glödtrådsbilden inte faller på lampans glödspiraler utan i mellanrummet mellan dessa, då i annat fall lampans livslängd minskas. Filmen skyddas med värmeabsorberande glasfilter.

Glödkroppen avbildar man helst så, att bilden inte ligger direkt på en lins, eftersom denna genom uppvärmning kan skadas eller försämma bilden.

För projektion av större bildfält använder man som objektiv 3-linsiga anastigmat. Korrektionen behöver inte drivas så långt som vid fotoobjektiv. Större bildvinkel än 60° förekommer sällan, då detta kan orsaka svårigheter med belysningsdelen. För specialändamål (fotogrammetri) existerar projektorer med över 90° synfält, dock utrustade med asfäriska kondensorer. För kinofilm används som redan omtalats objektiv med relativ öppning upp till 1:1,4. Att överstiga denna gräns vore besvärligt, då på grund av minskad djupskärpa störningar vid filmens frammatning kan uppkomma. Det lilla bildfältet tillåter användning av modifierade Petzvalobjektiv. Vid bedömning av objektivens kvalitet måste man tänka på att åskådarna ofta är närmare skärmen än objektivet, vilket gör att bildens brister blir mera störande.

Profilprojektorer

Inom verkstadsindustrin är en profilprojektor för avsyning och uppmätning numera oundgänglig. I sin enklaste form består den av ett mikroskop, försett med ett aggregat för projicering. Är mikroskopet

icke konstruerat för detta ändamål, blir bilden mycket dålig och kan knappast tillfredsställa ens mycket små anspråk. Man bör nämligen komma ihåg att vid seende genom ett okular kompenserar ögat omedvetet en del brister i bildkvaliteten, vilka dock gör sig gällande vid projektion på en mattskiva. Ett mikroskop som är utrustat med projektionsokular ger visserligen en fullgod bild, men synfältet blir mycket litet.

Ett mikroskop eller ett projektionsmikroskop brukar ha ett synfält av $y = 150/G$ mm (t. ex. 1,5 mm vid förstoringen $G = 100$ gånger). En profilprojektor i enklare utförande ger dubbla, och med den bästa optiken ungefär fyrfaldiga synfältet $y = 600/G$ mm. Synfältet y betyder här diametern av den i instrumentet synliga delen av objektet och G linjärförstoringen.

Finmekaniska detaljer har alltid en viss tjocklek, och objektets profil består ofta av buktiga ytor (man vill t. ex. projicera cylindrar, koner, skruvar). Ritningen med vilken man jämför profilen är en förstord geometrisk parallellprojektion av objektet; en optisk avbildning i ett mikroskop eller i en projektor är däremot en centralprojektion: den projicerade bilden ändrar hastigt storlek vid defokusering, och en cylindrisk kropp kan avbildas i fel mått.

Med tämligen enkla medel uppnår man en lämplig telecentrisk strålång. Även om här avses parallella strålar, får icke detta tas rent matematiskt, utan avvikelser från parallelliteten kan vara ganska avsevärd. Ett enkelt sätt är att man med en kondensorlins, eller rättare sagt en kollimatorlins K , fig. 41 a, avbildar en punktformig ljuskälla på oändligt avstånd, dvs. ljuskällan placeras i kondensorlinsens K brännpunkt. Objektet placeras sedermera i de parallella strålarna. Den härvid uppstående skuggan förstoras sedan på skärmen med ett objektiv O .

I verkligheten är ljuskällan ganska utbredd, och man måste nöja sig med divergerande, resp. konvergerande strålnippen, vilkas öpp-

ningsvinklar vid objektet dock bör ligga symmetriskt till den teoretiska parallella strålgången. I sådant fall vållar en eventuell defokusering minst besvär.

Om detta fel är alltför störande, kan ljuskällan avbildas med en hjälpkondensor K_2 på en bländare L' , fig. 41 b. Bländarens öppning avbildas sedan med en kollimationslins K_3 på oändligt avstånd. Genom att minska bländaren till ett lämpligt mått kan man på detta artificiella sätt reducera glödtrådens utbredning. Naturligtvis förlorar man därvid en del av ljuset.

Genom att välja en lämplig proportion mellan linsernas K_2 och K_3 brännvidd kan man minska diametern på strålknippena, varigenom en högre intensitet på skärmen uppnås. Denna kan sedan reduceras med irisbländaren L' . Härvid uppnår man både en lämplig belysning på skärmen och en ökning av strålarnas parallellitet. Irisbländaren bör dock icke tillslutas alltför mycket, eftersom ljusets böjning, i synnerhet vid höga förstoringar, menligt kan påverka bildskärpan. Detta belysningssystem användes av de flesta tillverkare, då det tillåter ganska stora synfält. För svagare förstoringar klarar man sig med enbart kollimationslinsen K , fig. 41 a.

Man kan även ha en bländare L' i brännplanet till objektivet O , fig. 41 c. Bländaren skär ur strålgången telecentriska knippen, och dessa parallelliseras genom ett annat objektiv O_2 . Lämpligen kan båda systemens brännvidd göras lika, så att en bild i naturlig storlek Y' uppstår. Skuggbilden projiceras sedan med hjälp av ett tredje objektiv O_3 . Denna metod tillåter att förstoringen ändras enbart genom att man byter objektivet O_3 och att avståndet O_1 förblir konstant, oberoende av den inställda förstoringen. I mellanbilden Y' kan även placeras en likare, mätplatta e. d. Denna konstruktion är emellertid betydligt mera invecklad och tillåter inga stora synfält. Vid dess uppbyggnad har man alltså alltför mycket avvikit från profilprojektorns huvudfördel.

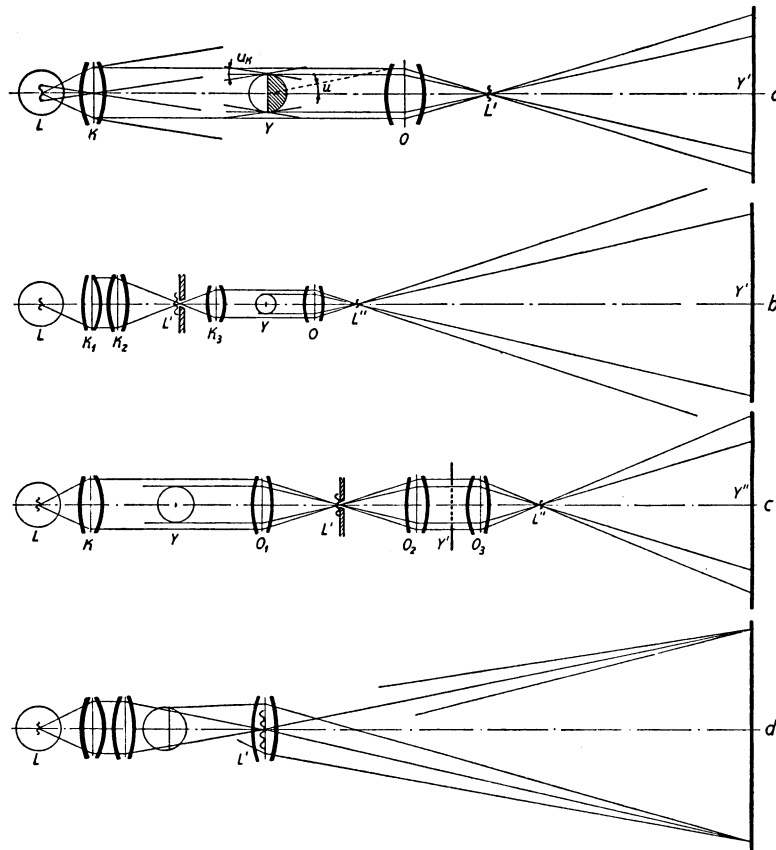


Fig. 41. Profilprojektor. a. Telecentrisk strålgång med hjälp av kondensor. b. Mellanavbildning av ljuskällan. c. Mellanavbildning av objektet. d. Vanlig projektor

Objektivet måste beräknas för den telecentrisk strålgången och korrigeras i synnerhet med hänsyn till distorsionen. Som gräns för den erforderliga precisionen kan anges 0,1—0,2 mm på skärmen. Inga mått bör vid uppmätningen synas med större fel, men det är onödigt att driva kraven högre, då ögat i alla fall icke kan urskilja mindre

mått. Den av böjning och bildfel framkallade oskärpan samt skärmens struktur tillåter icke användning av en starkare lupp. Man kan således mäta vid 20 gångers förstoring med maximala felet 0,005—0,01 mm.

Det är svårt att konstruera så distorsionsfria objektiv och därför begränsar man sig till relativt små synfält. Vid de bästa konstruktionerna uppgår bildvinkeln till ca 17° , men 10° bildvinkel är mera normalt. Objektivet fria öppning är lika stor som synfältet; dess relativa öppning begränsar följaktligen möjligheten till stort synfält och samtidigt hög förstoring. Där man dock önskar ett stort synfält vid stor förstoring, har man endast att välja ett långt projektionsavstånd.

I en profilprojektor med projektionsavståndet $m = 2000$ mm användes t. ex. för 50 gångers förstoring ett objektiv med brännvidden 43 mm och verksamma öppningen 14 mm. För 100 gångers förstoring får objektivet brännvidden 20 mm och en verksam öppning av endast 7 mm. Det enda sättet att utvidga synfältet är att öka projektionsavståndet m till exempelvis 4000 mm. Då uppnår man med det första objektivet 100 gångers förstoring och 14 mm synfält. För att kunna hålla instrumentets storlek inom rimliga gränser, bryts strålgången en eller flera gånger genom speglar. Samtidigt kan då bilden rättvändas, vilket kan spela en roll vid serieavsyning. Strålgången i en profilprojektor, fig. 42, är t. ex. sådan att bilden vänds rätt i ett takprisma och två ytaluminiserade speglar. Belysningen här är ordnad enligt fig. 41 b, dvs. med mellanavbildning av glödkroppen. Objektivet är korrigerat för telecentrisk strålgång, dvs. för strålar parallella med axeln. Hela brytkraften är förlagd till första linsgruppen; den andras uppgift är endast att korrigera restfel, i synnerhet felteckning (distorsion).

En vanlig projektionsanordning byggd enligt samma riktlinjer som t. ex. en film- eller diapositivprojektor bör ej användas för profilmätning, även om den förses med ett högklassigt objektiv. I en vanlig pro-

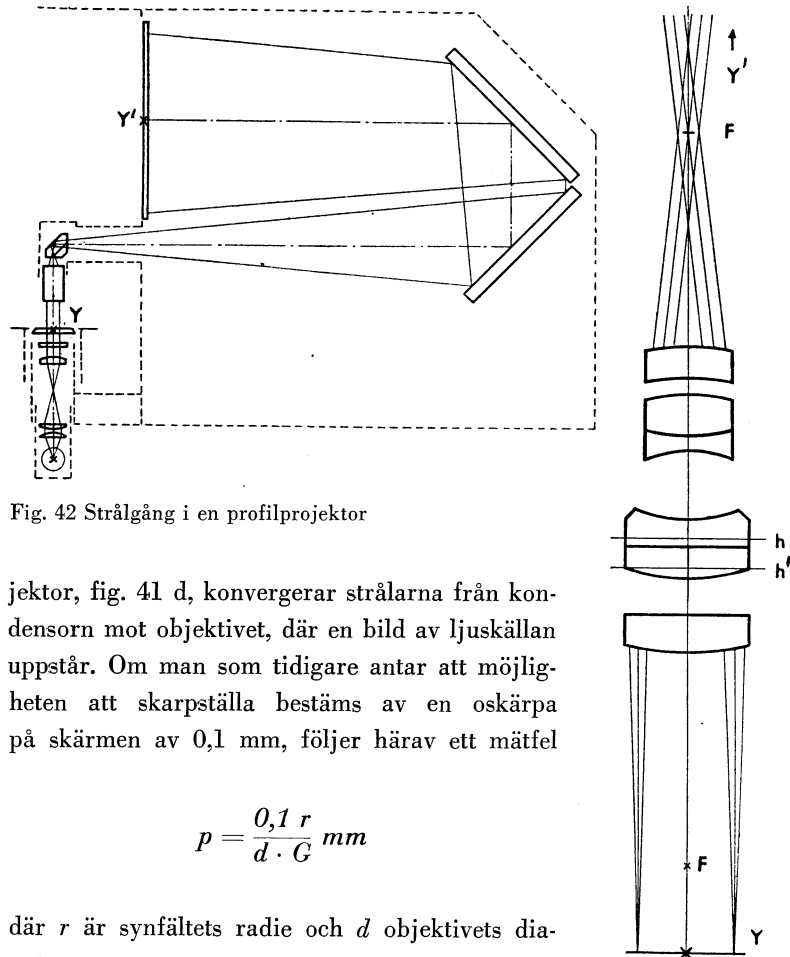


Fig. 42 Strålgång i en profilprojektor

jektor, fig. 41 d, konvergerar strålarna från kondensorn mot objektivet, där en bild av ljuskällan uppstår. Om man som tidigare antar att möjligheten att skarpställa bestäms av en oskärpa på skärmen av 0,1 mm, följer härav ett mätfel

$$p = \frac{0,1 r}{d \cdot G} \text{ mm}$$

där r är synfältets radie och d objektivets diameter.

Vid t. ex. $G = 20$, $r = 15$, $d = 20$ (objektiv med 100 mm brännvidd och bländaröppningen 1:5, 20 gångers förstoring och 30 mm synfält) blir $p = 0,004$. Det naturliga felet $0,1/G$ ökar alltså från 0,005 till 0,009 mm dvs., bildens storlek ändrar sig med fokuseringen,

utan att ögat kan varnas av oskärpan. Detta kan vid mätning av en axel med 30 mm diameter och $20\times$ förstoring sålunda vålla ett fel av ca 0,01 mm utöver det naturliga felet 0,005—0,01 mm. Dessutom kommer runda, t. ex. cylindriska objekt, på grund av centralprojektion att avbildas med mindre mått. En cylindrisk axel med diameter $2r$ avbildas i stället som $2r' = 2r \cos \varphi$ där $\varphi \approx r/f$. Om man såsom i förra exemplet har $2r = 30\text{ mm}$, belöper sig mätfelet vid synfältets kant till ca 0,012 mm.

Samma överläggning gäller även för projektmikroskop. Mikroskopets kondensor måste för att kunna användas ge parallella strålar, i stället för att samla dessa nära objektplanet. Ett normalt mikroobjektiv kommer då knappast att vara till någon nytta.

Trots dessa uppenbarliga brister användes i några fall en konvergent strålgång, antingen i besparingssyfte eller då man vill komma åt annars otillgängliga mätställen.

Ljusets vågnatur sätter gränsen för mätnoggrannheten. Över det av böjningen givna värdet kan skärpan aldrig komma. Däremot kan en olämplig konstruktion eller felaktig tillverkning försämra resultatet. Liksom vid mikroskopet är upplösningsförmågan beroende på objektivets apertur, och man använder formeln $\Delta y = \frac{\lambda}{n \sin u}$. Objektet belyses med parallella strålar och därför är upplösningen bara hälften.

Varje avvikelse från parallelliteten förbättrar resultatet, och när belysningsstrålarnas vinkel $u_k = u$ (se fig. 41 a), stiger upplösningen till det dubbla. Naturligtvis kan en sådan försämring av ljusets parallellitet leda till ovidkommande fel.

I en profilprojektor är objektivets diameter $2r$ minst lika stor som synfältet, så att $u \approx r/f$. Man får vidare skärmens diameter $2R = 2r \cdot G$ och avståndet mellan objektiv och skärm, projektionsavståndet, $m = f \cdot G$. Man får då det minsta avbildbara föremålet

$$Y_{\min} \approx \frac{m \lambda}{R}$$

Den högsta tillåtna förstoringen, vid vilken böjningen i bilden ej är alltför störande, blir

$$G_{\max} \approx \frac{0.1}{y_{\min}} = \frac{0.1 R}{m \lambda}$$

Förstoringen kan eventuellt bli dubbelt så stor, om man tillåter ett stort parallellitetsfel i belysningsdelen.

Vid en högklassig projektor med $m = 2000$ mm och $R = 300$ mm blir maximala förstoringen 30—60 gånger.

För att kunna höja förstoringen ytterligare, bör r göras större utan att man ökar synfältet. Samtidigt kan man här konstatera, att en billigare projektor med skärmradien $R = 150$ mm ej kan ge fullgoda resultat, om förstoringen överskrider ca 15—30 gånger.

Detta gäller emellertid belysning av små detaljer, fina skalor eller vid bearbetningsundersökningar. För profilmätning kan användas större förstoring. Böjningsfenomenet yttrar sig på skärmen genom en smal ljuskant runt om alla detaljer och även runt om skuggan. Denna kant kan verka betydligt mindre störande, när den lägger sig runt om en profilsugga. Praktiskt kan man bevisa, att vid profilmätning kan dubbla förstoringen användas, dvs. ca 100 gånger i det första numeriskt behandlade fallet och 50 gånger i det andra.

Sammanfattningsvis kan man konstatera, att böjningsfiguren blir mer störande ju mer parallella belysningsstrålarna är, men på samma gång minskar inflytandet av objektivets avbildningsfel och även djupskärpan blir gynnsammare. För studium av fina detaljer bör då möjligen icke parallella strålar användas, men för mätning av profiler kan dessa bländas av mer.

De i marknaden förekommande profilprojektorerna kan indelas i grupperna mätprojektorer, avsyningsprojektorer, profilprojektorer

kombinerade med mätmaskin eller bearbetningsmaskin, anordningar för ytprojicering, projektorer med konvergerande belysningsstrålar samt specialprojektorer.

Mätprojektorer är universala instrument byggda enligt tidigare nämnda principer. De finner en utbredd användning överallt, där det visar sig att en mätmaskin är alltför ömtålig, och mätningar med en dylik är tidsödande och för mycket laboratoriebetonade. En mätprojektor med skärmstorlek ca 600×500 mm och utbytbara förstoringar 10, 20, 50 och 100 gånger är optiskt uppbyggd enligt fig. 41 b. Ett stort synfält — vid bibehållen tolerans på distorsion — är vid denna grupp av instrument av särskild betydelse (fig. 43).

Avsyningsprojektorer (fig. 42) är avsedda för en snabb avsyning av detaljer. Projektionens fördel gentemot mätmaskinen eller mekaniska mätanordningar som exempelvis mätdon med indikatorklocka är påfallande. Man kan rita hela profilen i förstord skala, t. ex. 10 eller 20 gånger, och förse ritningen med toleransmått. Lämpligen utförs alla konturer med dubbla linjer. Kravet på ett stort synfält är vid denna kontroll mindre viktig. Däremot är det nödvändigt att bilden är rättvänd, dvs. alla rörelser på objektet bör ske i samma riktning som på skärmen. Frångår man något av dessa krav, t. ex. den rättvända bilden, kan användningen som avsyningsprojektor bli ganska problematisk och en del svårigheter vid kontrollen kan uppstå.

Profilprojektorer kombinerade med mätmaskiner ger egentligen större synfält än enbart en profilprojektor, vars begränsning ligger i synfältet. Med en projektor kan man sålunda ej alltid projicera stora detaljer i sin helhet på en gång, trots att synfältet är betydligt större än mätmikroskopets, utan man är tvungen att antingen fördela mätningen i flera avsnitt eller också förse objektbordet med en mätanordning. Objektbordet förvandlas alltså till ett koordinatbord eller till en koordinatmätmaskin. I de flesta fall kan dylika svårigheter lösas med en enkel fixtur eller med ett hjälpstycke.

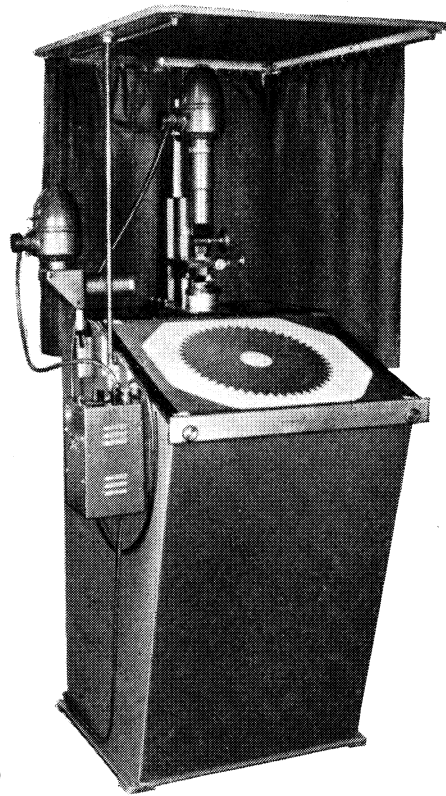


Fig. 43 Mätprojektor (Nife)

Mätmaskinens precision och avläsningsmöjlighet bör naturligtvis överensstämma med profilprojektorns. Vid 10 gångers förstoring behöver mätmaskinen icke garantera större precision än 0,01 mm. För 100 gångers förstoring är en dylik mäthanordning oanvändbar, då projektorn arbetar med en precision av 0,001 mm. Bordets mätton bör då tillåta en precision av 0,001 mm. Man kan även ta steget fullt ut och minska projektorns synfält och använda enbart centrum av skärmen som siktanordning och utföra hela mätningen på själva mätmaskinen.

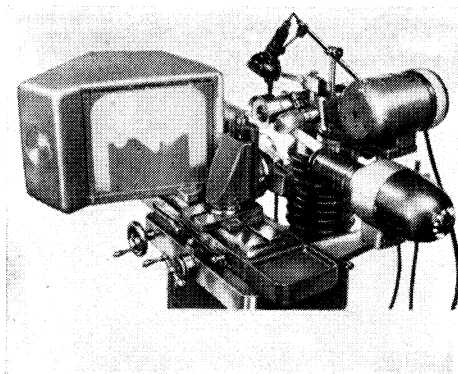


Fig. 44 Profilslipmaskin (Nife)

Profilprojektorer kombinerade med bearbetningsmaskiner kan underlätta arbetet i många fall. En bearbetningsmaskin försedd med projektionsskärm, på vilken både verktyget och arbetsstycket syns i förstord skala och där hela operationen kan följas, är säkert den rätta lösningen för många tillverkningsproblem. Man utrustar exempelvis en slipmaskin med en projektionstillsats, så att invecklade profiler kan ritas i t. ex. 10 gångers förstoring och följas med manövreringsrattar, fig. 44. Även svarvar och andra maskiner kan utrustas med projektionsaggregat, men i regel stöter man på svårigheter, då projektionen tarvar ett visst utrymme, som inte alltid står till förfogande.

Anordningar för ytprojicering kan man använda, om arbetsstyckets utformning hindrar uppkomsten av en skuggprofil. Det är naturligt, att precisionen härvid eventuellt kan bli lidande, då man frångått profilprojektorns grundprincip; det är icke längre fråga om någon parallellprojektion utan om en vanlig optisk avbildning, såsom den förekommer i fotokamera eller vanliga projektorer. Man bör då iaktta betydligt större noggrannhet vid skarpställningen och eventuellt vidta vissa kontrollåtgärder, t. ex. uppmäta ett avstånd på objektet med andra medel.

Belysningen kan ske enligt två olika principer. Antingen tillämpar

man den från mikroskopin kända vertikalilluminatorn eller också kastas ljuset snett mot objektet med lämpligt utformade speglar.

Det är svårt att säga vilken av dessa båda belysningsprinciper som är lämpligast för olika ändamål, men vertikalilluminationen kan säkerligen ge bättre mätresultat vid större förstoring. Mörka, ljusabsorberande ytor kan naturligtvis aldrig projiceras med denna metod, men man kan uppnå vissa resultat om dessa besprutas eller bepudras med talk eller metalliseras i vakuum.

Projektorer med konvergerande belysningsstrålar kan man ibland vara tvungen att använda, varvid strålgången blir densamma som vid en vanlig projektor, fig. 41 d. Ett dylikt fall uppstår vid projektion av stora profiler på en vägg. Den tidigare behandlingen av denna fråga visar att i en riktig profilprojektor måste objektivets diameter vara lika stor som synfältets. Skall man bygga en projektor med 200 mm synfält, kommer objektivet knappast att kunna tillverkas till ett rimligt pris. Man kan då i stället välja ett objektiv med betydligt mindre diameter, och från början räkna med vissa ofrånkomliga fel på grund av avvikelser från parallellprojektion.

Det är av stor vikt att man alltid kontrollerar en profilprojektor innan mätningen påbörjas. Man måste övertyga sig om att belysningsstrålarna är parallella sinsemellan och även parallella med optiska axeln. Det enklaste sättet härvid är att använda ett svarvat rör med diameter lämplig för förstoringen och höjden 10—20 mm. Konvergerande belysningsstrålar ger en oskarp skugga vid rörets inre kant och man behöver då endast flytta lampan närmare kondensorn tills en jämvikt mellan en otydlig skugga vid rörets inre kant och yttre kant uppnås. Ett transversalt fel av lampans läge förråder sig genom en ensidig skugga på något ställe av bilden. Man får då flytta lampan i lämplig riktning tills detta fel försvinner.

Det finns även särskilda justeranordningar, t. ex. ”justerkollimatorn”. Detta instrument består av ett objektiv och en mattglasskiva för-

sedd med hårkors. Båda dessa element är monterade i en cylindrisk kropp vars basyta är noga bearbetad. Kollimatoren ställes på objektbordet och hårkorset skarpställs på skärmen. Man justerar lampan i axialled, tills glödkroppens bild sammanfaller med hårkorsets centrum.

Vid konstruktionen av instrumenten vållar felteckningen de största svårigheterna, och man kan vänta att vissa instrument kan ge avbildningsfel som ganska avsevärt överskrider den tolererbara gränsen. Även tillverkningsfel — i synnerhet i fråga om speglarnas planhet — kan fördärva ett betydligt bättre teoretiskt resultat. Naturligtvis kan felen vid ett mindre synfält icke uppnå några farligare värden, men genom att begränsa synfältet frångår man profilprojektorns huvuduppgift.

Förstoringen kontrollerar man bäst genom att placera en passbit av lämplig storlek på objektbordet och mäta bilden på skärmen. På detta sätt kan man kontrollera inställning och förstoring i synfältets mitt. Sedan gör man en rad mätningar både i vertikal och horisontal led och felet åskådliggöres grafiskt. Man kan härvid tolerera en avvikelse av 0,1, möjligen 0,2 mm men absolut icke mer.

SJÄTTE KAPITLET Kikare

I fokalplanet av en samlande lins uppstår en reell och omvänd bild av ett avlägset objekt. Om man betraktar bilden med ett förstoringsglas eller ett linssystem, här benämnt okular, blir objektet större än om man ser det med blotta ögat. Denna kikare konstruerades av *Kepler* år 1611 och används nu inom astronomin, där nackdelen av en omvänd bild ej är till hinder.

Redan år 1608 framställdes av *Lipperhey* i Holland en kikare där okularet utgjordes av en negativ lins. Ett år senare förevisades av Galilei en dylik kikare i Venedig. *Galileis kikare* (även kallad den *holländska*) ger en rättvänd bild, men används numera endast för vissa ändamål. Senare har bilden rättvänts i den astronomiska kikaren medelst linser (terrestrisk kikare) och i slutet på 1800-talet med prismor (Porro).

I den av *Porro* uppfunna och av *Abbe* utvecklade kikaren sker omvändningen med ett system av totalreflekterande prismor. Först i början av detta århundrade har genom den glastekniska utvecklingen massproduktion av prismakikare möjliggjorts.

Förstoring och pupiller

Ett avlägset objekt y (fig. 45) avbildas av objektivet som y' i objektivets och okularets gemensamma fokalplan. Okularet återger denna bild y' på oändligt avstånd. Den slutliga bilden som når ögat har en storlek y'' . Ett obeväpnat öga kan se ett objekt under en vinkel w .

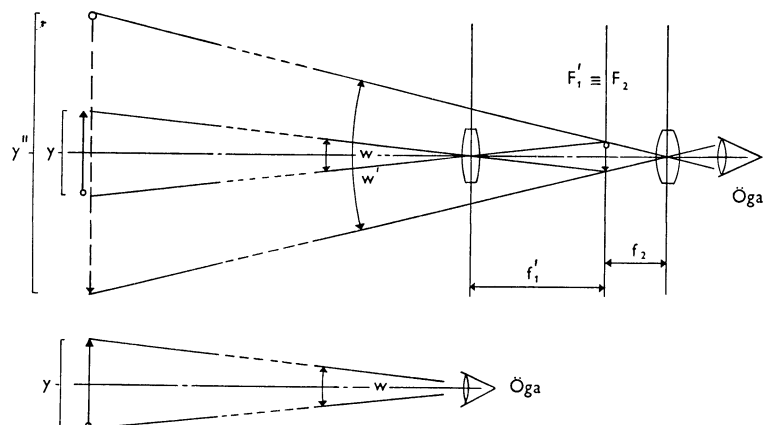


Fig. 45 Förstoring i en kikare. Ett oöppnat öga ser objektet under vinkeln w . Kikaren förstörar denna vinkel till w' . Objektet y avbildas som y' i objektivets brännpunkt. Sett genom okularet får det storleken y''

Genom kikaren förstöras denna till w' . Dessa vinklar är givna av objektivets, respektive okularets, brännvidd och ger förstoringen

$$G = \frac{w'}{w} = \frac{f_1}{f_2} \quad \begin{array}{l} f_1 = \text{obj. brännvidd} \\ f_2 = \text{ok. brännvidd} \end{array} \quad 17$$

Öppningen som bestämmer den av kikaren intagna ljusmängden kallas ingångspupill och sammanfaller i regel med objektivfattningen. Den yttersta med axeln parallella strålen (randstrålen) passerar ingångspupillen på en höjd h från axeln och lämnar kikaren på höjden h' . Okularet avbildar ingångspupillen som en ljus skiva med diametern $2h'$. Då förstoringen är given av förhållandet $\frac{f_1}{f_2}$, kan den även bestämmas av $\frac{h}{h'}$, (Fig. 46.)

$$G = \frac{h}{h'} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{w'}{w} \quad 18$$

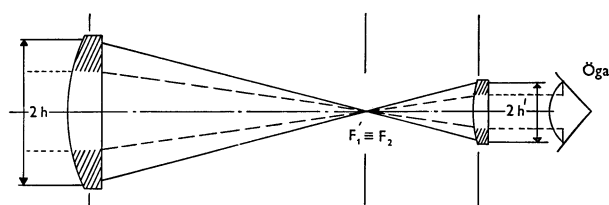


Fig. 46 Ingångspupill $2h$ och utgångspupill $2h'$. Det stora objektivet är onödigt ifall ögonpupillen inte kan uppnå diameter $2h'$

Förstoringen och den verksamma objektivdiametern är för en kikare de viktigaste kriterierna och är därför graverade på varje kikare, t. ex. 6×30 , där 6 anger förstoringen och 30 objektivets verksamma diameter.

Utgångspupillen kan uppfångas bakom okularet på en pappersremsa eller linjal om man riktar kikaren mot en ljuskälla. Utgångspupillens storlek kan även bedömas genom att hålla okularet på längre avstånd (250 mm) från ögat. Vanligen mäts utgångspupillen med hjälp av en dynameter. Denna består i princip av en glasskala, graderad med 0,1 mm intervall samt en lupp. I luppens brännpunkt är en liten bländare placerad genom vilken ögat betraktar skalan. Dynametertuben är förskjutbart anordnad i ett rör, vilket hålls mot det okular som skall mätas. Genom att förskjuta tuben i röret skarpställs utgångspupillen, och dess läge avläses på en skala som är anbragt på utsidan av dynametertuben. Pupilldiametern avläses på glasskalan. Bländarhålet begränsar den s. k. telecentriska strålgången, vilket gör avläsningen mindre beroende av skarpinställningen (fig. 47).

Förstoringen bestäms genom att mäta objektivdiametern $2h$ och dividera denna med $2h'$. Vid en del kikarkonstruktioner har man placerat en bländare bakom objektivet i syfte att förbättra en dåligt beräknad eller tillverkad optik. Med ovan angivna bestämningsmetod erhålls då vid en sådan kikare en större förstoring än vad denna i

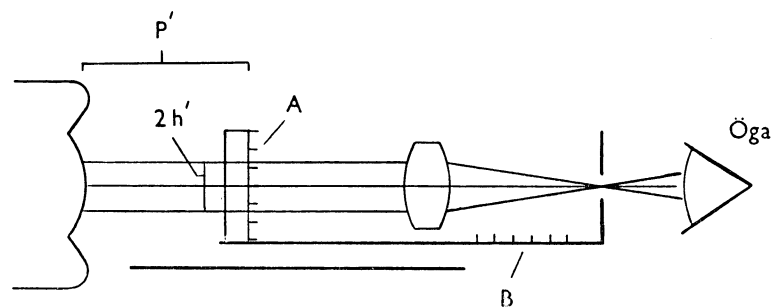


Fig. 47 Dynameter. A-skalan för avläsning av utgångspupillens diameter $2h'$. B-skalan för avläsning av utgångspupillens avstånd P'

själva verket äger. Fria objektivdiametern uppmäts t. ex. till 30 mm, men genom nämnda bländare utnyttjas endast 25 mm. Utgångspupillen bestäms till 5 mm och man kunde då utgå ifrån att kikaren har en förstoring av $6\times$, vilket ofta även anges. Om man i stället placerar ett skjutmått inställt på t. ex. 20 mm framför objektivet och avläser detta i dynametern, erhåller man en förstoring av endast $5\times$. Kikarens data borde således ha varit 5×25 och inte 6×30 .

Ljusstyrka

Då allt utgående ljus passerar utgångspupillen, är det viktigt att ögats pupill hålls just på denna plats för att ögat skall kunna tillgodogöra sig hela denna ljusmängd. Ögonpupillen varierar med belysningen och är i vanligt dagsljus 3—4 mm, i skymning och i mörker ca 7 mm. Hos äldre personer kan denna emellertid inte bli större än 4—5 mm. Följaktligen behöver icke för vanliga kikare utgångspupillen vara större än 3—5 mm, men för nattkikare 6—8 mm. Det är onödigt för en äldre person att använda sig av en nattkikare då ögat inte kan tillgodogöra sig den stora utgångspupillen. Man besvärar sig bara av den förhållandevis större vikten som denna kikare har (fig. 46). Vissa

instrument görs dock med större utgångspupill, t. ex. gevärssikten och stridsvagnsinstrument, de förra för att medge en viss rörelsefrihet utan att man skall förlora synfältet, de senare för att man skall kunna följa målet trots skakningar. Vid dylika instrument kan utgångspupillen uppgå till 20—30 mm.

Allt ljus som samlas av objektivet kommer in i ögats pupill. Man kunde då anta att objektet kommer att synas ljusare. Men objektets bild på näthinnan förstoras i samma proportion, och bilden blir därför lika ljus som utan kikare. Detta gäller med en viss modifikation. Praktiken visar, att i skymningen framträder ett objekt kontrastrikare och ökningen är en funktion av förstoringen, förutom av en del andra faktorer och beror inte enbart på ljusstyrkan. En kikare 9×45 ger t. ex. ljusare bilder än 7×50 , trots att utgångspupillen är mindre.

Vissa mätinstrument där mätresultatet huvudsakligast beror på förstoringen, t. ex. geodetiska instrument, avståndsmätare samt laboratorieinstrument, brukar sällan ha större utgångspupill än 2,5 mm. Mindre utgångspupill än 1—2 mm bör man helst undvika, då annars störande böjningsfenomen i ögat och kikaren gör sig gällande.

Den genom en kikare passerande ljusmängden är definierad av utgångspupillens yta. Om man som enhet antar en kikare med $2h' = 1$ mm, så kan man som jämförelsetal på ljusstyrka använda kvadraten på utgångspupillens diameter. En kikare 6×30 med $2h' = 5$ mm har en ljusstyrka 25, och en kikare 7×50 med $2h' = 7,1$ mm är följaktligen dubbelt så ljusstark. Klassificering av kikare med hänsyn till ljusstyrkan tycks vara ganska missvisande; att som kriterium endast använda utgångspupillens diameter är enkelt och tillräckligt om man inte tar hänsyn till ljusförluster genom absorption, reflektion och avbländning.

I en 6×30 kikare passerar ljuset genom ca 100 mm glas, men det finns instrument där glasväggen uppgår till 200—400 mm. Absorptionen är mindre störande så länge den är jämnt fördelad för alla

färger, men i regel får bilden en svagt gulbrun ton. Ljusförluster genom reflektion utgör ca 4 % vid varje mot luft angränsande yta. Dessa återkastade strålar vållar dessutom obehagliga reflexer och slöjor. Kraftiga ljuskällor i och nära bildfältet åstadkommer synnerligen störande "spökbilder". Vid en kikare 6×30 är reflektionsförlusterna ca 40 % och samtidigt försämras resultatet genom ovidkommande reflexbilder och absorption. Genom detta exempel kan man klart se betydelsen av reflexskyddet, som nedbringar dessa förluster till 15—20 % samt dessutom försvagar reflexbilderna. Vid instrument med större antal linser, t. ex. periskop, blir verkan av reflexskyddet ännu mer påfallande (sid. 181).

Ljusstyrkan definierar ljusmängden numeriskt i centrum av synfältet, men kan inte ge besked om hur den verksamma ingångspupillen minskar om man närmar sig kanten av synfältet. Gångse kikarokular brukar vid synfältets periferi motta ljuset från endast halva objektivet. Härtill kommer ytterligare förluster genom avsiktliga och tillfälliga nedbländningar i prismasystemet. Vid periskop och liknande instrument får kanten av synfältet ljus från en smal springa utan att ögat registrerar en störande minskning av ljusstyrkan (fig. 60).

Upplösningsförmåga

Även om man i de flesta fall behandlar en optisk avbildning rent geometriskt, måste man vara på det klara med att ljusets vågnatur bestämmer gränsen för upplösningsförmågan.

Objektivet avbildar en punkt som en liten ljus skiva med runt omkring liggande ringar med hastigt avtagande ljusstyrka. För att kunna särskilja två närliggande bildpunkter, måste mittpunkterna av deras respektive böjningsskivor (Airys skiva) ligga med böjningsskivans radie r från varandra.

$$r = \frac{\lambda}{2u}$$

där u är aperturvinkel

$$u = \frac{h}{f}$$

Om man inför öppningstalet

$$A = \frac{f}{2h} \quad \text{fås}$$

$$r = A \cdot \lambda \quad \mathbf{19}$$

Vid t. ex. ett objektiv med relativa öppningen 1:10 blir $r = 10 \lambda = 0,005 \text{ mm}$.

Okularet skall förstora r till 0,1 mm (sett på 250 mm avstånd, sid. 29), om ögat skall kunna tillgodogöra sig objektivets upplösning. För okularförstoringen G_{ok} gäller följaktligen:

$$G_{\text{ok}} = \frac{0,1}{r} = \frac{0,1}{0,0005 A}$$

$$G_{\text{ok}} = 200/A \quad \mathbf{20}$$

Vid denna okularförstoring är böjningen redan tydlig i bilden. Till-sammans med ovan anförda objektiv bör inte kraftigare förstörande okular än $G_{\text{ok}} = 200/10 = 20 \times$ användas. Okularet betraktat som

lupp har en förstoring $G_{\text{ok}} = \frac{250}{f_2}$, varför man även kan skriva

$$\frac{250}{f_2} = 200 \frac{2h}{f_1}$$

och då kikarförstoringen $G = \frac{f_1}{f_2}$ får man

$$G \approx 2h. \quad \mathbf{21}$$

Formeln 21 betyder att böjningsfenomenet gör sig gällande först då kikarförstoringen uppnår ett värde lika med objektivets diameter mätt

i mm, eller med andra ord: böjningen framträder först när utgångspupillens diameter är mindre än en millimeter. Utom vid astronomiska instrument och laboratoriekikare förekommer knappast någons en så hög förstoring, men man bör komma ihåg att utgångspupillen helst inte bör understiga 0,5 mm. En sämre bild kan i sådant fall inte skyllas på felaktig montering eller korrektion, utan beror på ljusets böjning.

Objektiv, synfält, okular

Geometrisk aberration och tillverkningsfel bör inte resultera i större oskärpa än vad diffraktion och förstoring bestämmer. En punkt får inte avbildas som en större fläck än Airys skiva medger, men i det fall förstoringen inte uppnår det värde som diffraktionen tillåter, dvs. förstoringen är mindre än vad som motsvaras av ca 1 mm utgångspupill, bestäms bildfläcken av ögats upplösningsförmåga och kikarens förstoring. Summan av alla avbildningsfel får då i bildplanet resultera i en fläck av storleksordningen $0,1/G_{ok}$. På grund av intensitetsfördelningen i bilden, korrektionens förlopp, och ögats fysiologiska egenskaper kan man i praktiken sträcka sig längre.

Följaktligen måste objektiv som helt utnyttjas för den diffraktiva upplösningsförmågan ($UP = \text{ca } 1 \text{ mm}$) ha en högt uppdriven korrektion. För att med endast 2 linser kunna bemästra problemet, väljs relativa öppningen till maximalt 1:10 (för astronomiska objektiv, äldre geodetiska instrument etc.). Mindre ansträngda objektiv, i kikare, sikten o. d., har i regel en relativ öppning 1:4 och motsvarande mindre noggrann korrektion.

Objektiven korrigeras för axiella fel, dvs. sfärisk aberration och sinusfel samt för två färger (C- och F-linjen). (Sid. 13.)

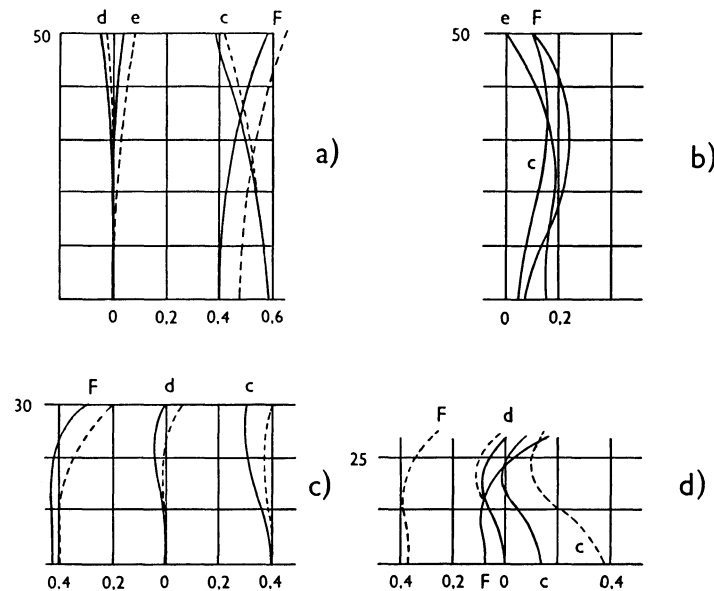


Fig. 48 Förlopp av det sfäriska felet ————— och sinusfelet - - - - -
a. Astroobjektiv 1:10, $f = 1000$. b. Apokromat 1:10, $f = 1000$. c. Kollimatorobjektiv 1:6, $f = 350$. d. Kikarobjektiv 1:3,7, $f = 183$

Då det sekundära färgfelet vid höga förstoringar är mycket störande, har man beräknat 2- till 3-linsiga objektiv med högre färgkorrektur (s. k. apokromater). Dessa innehåller glassorter med onormalt färgspridningsförlopp. Sådana system har krökta ytor och är ytterst känsliga för centreringsfel. Fig. 48 visar korrektionskurvor för astronomiska objektiv: $f = 1000$ mm, öppning 1:10, apokromat med samma data, kollimatorobjektiv $f = 350$ mm, öppning 1:6 samt kikarobjektiv $f = 183$ mm, öppning 1:3,7. Man observerar utsträckningen av det sekundära spektrat och det sfäriska felet, som vid det astronomiska objektivet upphävs för en zon av 0,9 h storlek. Färgfelet utgör ca 0,6 ‰ av brännvidden. I det andra fallet är det endast

0,2 ‰. Vid det första objektivet är avståndet mellan den gula (d) och den blå (F) brännpunkten ca 0,5 mm. Vid inställningen på gula brännpunkten lägger sig de blåa strålarna runt om denna som en fläck med diameter ca 0,05 mm. Oskärpefläcken på grund av sfäriska aberrationen av gula strålar, har en diameter av ca 0,007, och objektivets diffraktiva upplösning enligt **12** är $r = 0,005$. Man drar den slutsatsen att astronomiska akromater kan korrigeras sfäriskt tillfredsställande, medan det sekundära färgfelet — som redan sagts — blir mycket störande. Kikarobjektivet är behäftat med ganska betydande aberrationer, delvis avsiktliga, för att kompensera för strålgången i prismorna, vilka i en kikare 6×30 representerar en glasplatta av 80 mm tjocklek. Glas i konvergerande strålgång — dvs. prismor på objektivets bildsida — uppvisar nämligen en avsevärd sfärisk och kromatisk aberration (jfr täckglaset vid mikroskop). I parallella strålar framför objektivet är däremot en ljusväg i glas utan betydelse för korrektionen. Sinusfelet följer ungefär samma kurva som sfärisk aberration, men påverkas ej av prismorna. Kurvorna bedöms inte med det diffraktiva måttet, utan man nöjer sig med en oskärpa $0,1/G_{ok}$, dvs. vid $10 \times$ okular kan bildfläcken gärna få en diameter av 0,01 mm och även mer.

Som synes är det inte alldeles rätt att tro att man genom nedbländningen av ett förefintligt objektiv kan förbättra bildkvaliteten. Visserligen minskas felfläcken, men den axiella färgkorrektionen samt färgförstoringsfelet och den sfäriska aberrationens förlopp förblir oförändrad inom den nedbländade objektivdiametern. Ett objektiv bör således beräknas för en given öppning och för bländarläge samt glasväg bakom objektivet.

Genom val av glassorter kan kalkylen utföras så, att mot varandra vända ytor får samma radie utan att korrektionen blir lidande härav. Linserna kan då kittas med kanadabalsam, varigenom monteringen blir betydligt lättare och inget ljus går förlorat genom reflektion på

de klistrade ytorna. Större linser än ca 60 mm kittas endast i undantagsfall och ej heller mindre, till det yttersta utnyttjade objektiv, bör kittas. Kanadabalsams utvidgningskoefficient skiljer sig från glasets, vilket kan åsamka en deformation av linserna eller släppning i balsamskiktet vid temperaturändring.

Objektiven är i allmänhet inte korrigerade för fel utanför axeln. Ett synfält av 8—12° anses dock som godtagbart. Bildfältskrökningen kan vara störande, särskilt då den förvärras av fel i efterföljande linser och i okularet (fig. 54). Vid speciella konstruktioner, där man strävar efter ett stort synfält, förekommer derivater av fotoobjektiv, ofta innehållande tjocka nollinser (fig. 78) eller vid lägre förstoringar helt enkelt okularliknande objektivkonstruktioner (fig. 82).

För högre relativa öppningar (över 1:2) ges objektivet formen av ett aplanatiskt linssystem och kan liknas vid ett förstorat mikroskopobjektiv. I dylika fall visar sig ofta ett spegelobjektiv vara den fördelaktigaste lösningen.

Man skulle kunna använda en enkel lins för att betrakta den av objektivet framställda bilden, men för att då erhålla ett något så när godtagbart synfält måste linsen ha en mycket stor diameter. Man måste ställa följande krav på okularet (fig. 49):

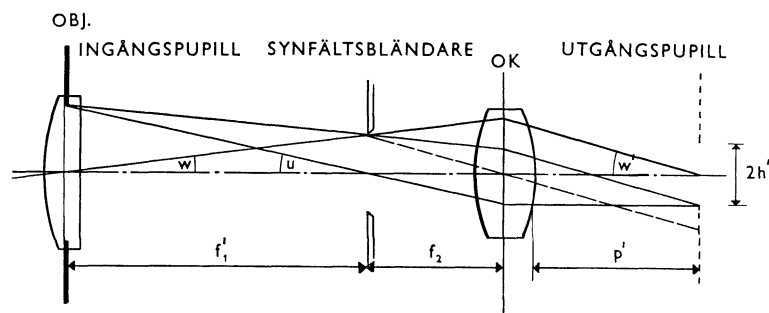


Fig. 49 Strålar som är viktiga för okularets korrektion

1. Okularet skall ha en bestämd brännvidd (för att ge en given kikarförstoring $G = \frac{f_1}{f_2}$).

2. Det skall kunna uppta åtminstone en del av strålarna från synfältets kant (för att få en vignettationsfri bild).

3. Strålar med apertur $2u$, motsvarande utgångspupillens diameter $2h'$, skall om möjligt passera aberrationsfritt, dvs. utan sfäriska fel. Att uppfylla detta krav är mindre viktigt vid små pupiller, men är däremot av betydelse vid stora utgångspupiller (jfr Luppen).

4. Strålar som passerar centrum av objektivet under vinkeln w , bör passera utgångspupillen under vinkeln w' , varvid $G = \frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w}$, (i annat fall är okularet behäftat med distorsion). Det är svårt att hålla detta krav för alla färger. En avvikelse betyder färgförstoringsdifferenser, dvs. detaljer i bilden blir behäftade med färgkanter.

5. Strålnippen från samma bildpunkt skall på ögonsidan förlöpa parallellt både i papperets plan och vinkelrätt mot detta. Ett fel här emot betyder bildfältskrökning resp. astigmatism.

6. Utgångspupillen bör ligga på ett givet avstånd p' bakom sista okularytan.

Dessa krav kan icke uppfyllas genom en enkel lins. Emellertid kan vid låga anspråk på synfältet (dock ej över 30°) en lämpligt korrigerad lins ha den fördelen gentemot andra okularsystem att huvudplanet är beläget mycket nära sista glasytan, så att pupillavståndet p' blir stort. Detta är särskilt viktigt vid mycket korta okularbrännvidder och vid sikten för eldvapen, där ögat kan skadas av rekyl. Sådana från en enkel lins härledda okular liknar egentligen luppen, som syns på fig. 13 c (monocentriskt okular). Fig. 56 visar ett orthoskopiskt okular, konstruerat med hänsyn till ringa distorsion (lämpligt för geodetiska instrument). Kravet att samtliga strålar förlöper aberrationsfritt genom utgångspupillen betyder med andra ord att ingångs-

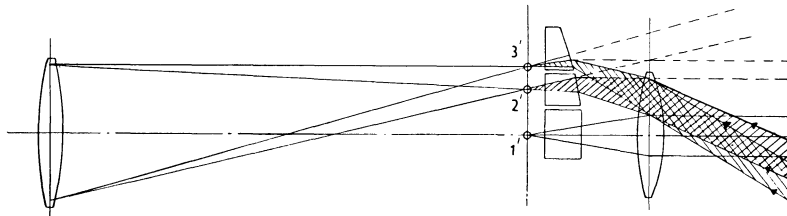


Fig. 50 Hur en kollektivlins verkar

pupillen skall avbildas aberrationsfritt i utgångspupillen. Härav följer att vid låga förstoringar och stor utgångspupill kan ett okular konstrueras av 2 akromater, sfäriskt korregerade för oändligheten med brännpunkter belägna i närheten av resp. pupill. De ger tillsammans den önskade brännvidden (fig. 70). Härav kan det ofta använda symmetriska okularet utvecklas, samt för stora pupillavstånd och öppningar den lämpliga tripletten (fig. 60). Dessa system är emellertid oanvändbara för stora synfält, men om de förses med asfärisk yta får man ett s. k. vidvinkelokular, vilket kan nå upp till 66° bildvinkel.

På grund av de stora diametrar och starka krökningar som de av luppen härledda typerna har, ställer sig dessa dyra i tillverkning. Dessutom är det långa pupillavståndet ovidkommande vid t. ex. kikare. En minskad diameter har till följd (fig. 50) att linserna visserligen tar upp strålar från punkt 1', men blott en del från punkt 2' och punkt 3' förblir osynlig. Man kan föreställa sig att medelst lämpliga kilar strålknippen bryts in i den lilla linsen — t. ex. en svag kil nära centrum och kraftigare kilar ju närmare synfältets periferi man kommer. Går man igenom hela synfältet på detta sätt, utvecklar sig dessa kilglas till en lins. Eftersom den samlar ljuset och ökar synfältet, kallas den för *kollektivlins* eller *fältlins*. Den lins som åstadkommer själva förstoringen benämns *ögonlins*. Ett okular i sin enklaste form består följaktligen av två enkla plankonvexa linser. För lämpligt valda brytkrafter och avstånd mellan dessa linser kan okularet i hög grad bli

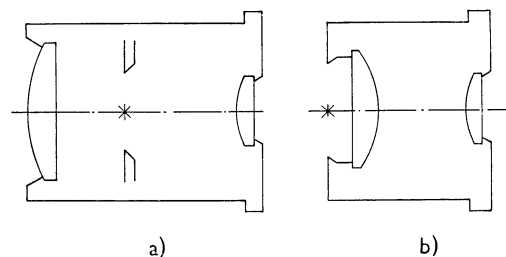


Fig. 51 a. Huyghensokular. b. Ramsdenokular (samma brännvidd)

fritt från färgförstoringsfel och distorsion. Den av *Huyghens* för 250 år sedan föreslagna lösningen används än idag vid mikroskop (fig. 51). I ett dylikt okular ligger bilden mellan kollektivet och ögonlinsen. Kollektivet förminskar här bilden, så att ögonlinsen får kortare brännvidd än okularets totalbrännvidd. Vid en kikare är Huyghens' okular mindre lämpligt, då en eventuell streckplatta endast kan observeras med ögonlinsen och alltså ses färgad. Med hänsyn härtill är *Ramsdenokulalet* bättre lämpat, ty bildplanet ligger här framför systemet; färgkorrektionen är däremot inte lika gynnsam.

Kollektivlinsen borde ligga direkt i bildplanet, men man godtar en obetydlig bildförsämring genom att flytta denna lins närmare ögonlinsen. I annat fall kommer varje litet fel i kollektivet (repor, blåsor o. d.) att observeras i synfältet. En förbättrad form av Ramsdenokulalet är *Kellnerokulalet*, där ögonlinsen är sammansatt av två linser. Denna okulartyp används oftast vid kvalitetskikare och mätmikroskop. Dess synfält kan uppnå ca 50° (fig. 52). Kellnerokulalet har utvecklats till ett *vidvinkelokular* med ett synfält upp till 65° (fig. 82). De sedvanliga fem- till sexlinsiga vidvinkelokularen har knappast någon likhet med de klassiska typerna. De kan snarare härledas ur den på fig. 60 återgivna formen. Utrymmet mellan bildplanet och ögonlinsen utfylls med linser av ofta mycket imponerande dimensioner i syfte att uppnå största användbara synfält med ringa bildfältskrökning, astigmatism och färgförstoringsfel (fig. 53).

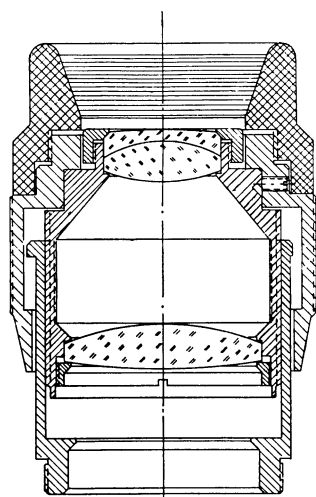


Fig. 52 Kellnerokular

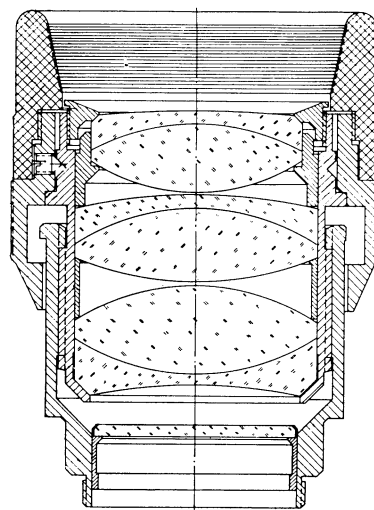


Fig. 53 Vidvinkelokular (kikare Nife 8×30)

Okularet får inte betraktas som en självständig konstruktionsgrupp som man efter behov kan kombinera med olika objektiv. Det måste befordra strålar från objektivet till ögat utan att ogynnsamt påverka deras riktning. Okularet beräknas med andra ord inte endast för ett visst synfält, utan också för utgångspupillens avstånd och storlek, dvs. för en viss objektivdiameter samt brännvidd. Vid given förstoring och utgångspupill skall man välja den längsta objektiv- och okularbrännvidden, då därvid fordringarna på okularets korrektion minskas.

Okularets stora bildfältskrökning adderas med objektivets fel till en ganska besvärande oskärpa vid kanten. Detta bidrar till att man är benägen att flytta okularet närmare bildplanet (fig. 54).

Det utnyttjade synfältet begränsas av en synfältsbländare, vars kant måste vara mycket fint bearbetad, då i annat fall fel i denna blir synliga i bilden. I synfältsbländaren placeras streckplattan och avpassas

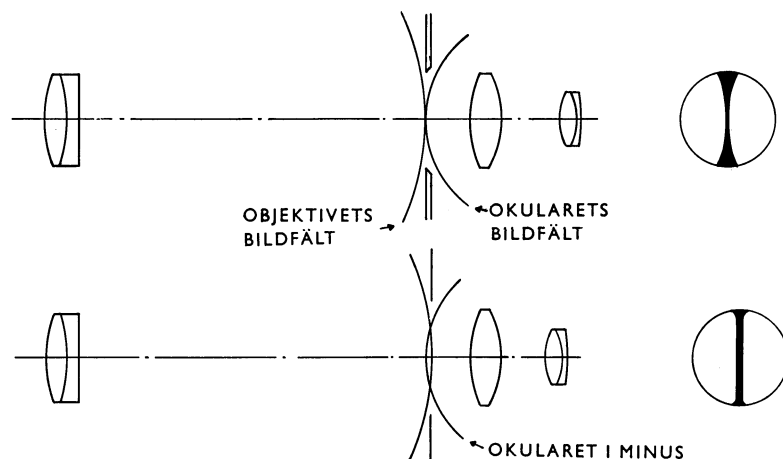


Fig. 54 Okularets och objektivets bildfältskrökning adderas. Genom att flytta okularet närmare synfältsbländaren förbättras bilden

noga i brännplanet (se kap. Justering) för att ge en parallaxfri bild. Synfältet mäter man i grader eller hellre i m/km. I en triangel med den ena kateten = 1 km och den andra = 1 m, blir vinkeln $1/6283$ delar av hela cirkeln eller ca 200 sekunder. Militära instrument är försedda med skalor, där cirkeln är uppdelad i 6300 delar och en del betecknas som ett *artilleristreck* (str.). Vid små vinklar (t. ex. skalan på en streckplatta), kan man utan vidare beteckna m/km som artilleristreck.

Med ett Ramsdenokular kan synfältets storlek uppnå ca 600/G streck, med ett Kellnerokular ca 900/G streck samt med ett vidvinkelokular 1200/G—1500/G streck. En kikare $8\times$ i billigaste utförande har vanligen ett synfält av $600/8 = 75$ m/km och med ett Kellnerokular $900/8 = 115$ m/km. En kvalitetskikare med $8\times$ förstoring bör däremot ge ett synfält av $1200/G = 150$ m/km. Synfältsbländarens diameter resp. delningen på streckplattan beräknas ur formeln:

$$y' = \frac{f_1}{1000} y$$

såsom framgår av triangelarnas likformighet. Det önskade synfältet resp. delningsenhet i streck $= y$, och motsvarande mått i bildplanet $= y'$.

Vill man göra ett förslag till en streckplatta, är det bäst att räkna ut okularets luppförstoring $G_{ok} = \frac{250}{f_2}$, rita plattan med denna förstoring och betrakta den på 250 mm avstånd.

Kikarens skarpställning

Ett närsynt öga kan inte se ett föremål skarpt om det befinner sig på större avstånd än ögats fjärrpunkt (punctum remotum, R, sid. 152). En på oändligt avstånd inställd kikare, såsom den hittills har behandlats, är här till föga nytta, men genom att flytta okularet närmare bilden kan utgående strålar få en sådan divergens, som om de hade kommit från den framför ögat belägna fjärrpunkten R. Med andra ord, okularet avbildar objektet i fjärrpunkten, där den kan synas skarpt (fig. 55). Vid ett översynt öga ligger fjärrpunkten bakom näthinnan, dvs. för att man skall kunna se utan att ackommodera måste strålar som lämnar okularet konvergera till denna punkt.

Avståndet RO resp. reciprokt värde av detta avstånd är ett mått för ögats ametropi. Ett öga med en dioptris närsynthet har fjärrpunkten

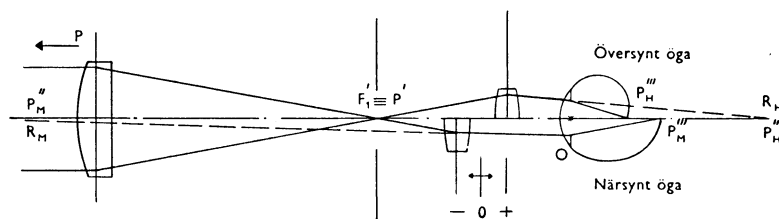


Fig. 55 Okularets dioptriinställning. Okularet flyttas så att det avbildar bilden P' i ögats fjärrpunkt R som P''_M resp. P''_H . För ett översynt öga skruvas okularet ut, för ett närsynt in

en meter framför ögat, där objektet således måste avbildas (sid. 156). I Newtons formel, $xx' = -f^2$, insätts $x = 1$ m, $x' =$ okularets förskjutning per 1 dioptri, $f =$ brännvidden i meter, varvid man erhåller $x' = f^2$. Ett okular med brännvidden $f = 20$ mm förskjuts t. ex. 0,4 mm per dioptri. Okularet förses med en dioptriskala för olika ögoninställningar samt med en lämplig mekanism för att åstadkomma denna förskjutning — i kvalitetskikare en trapetsgänga med ett flertal ingångar.

Ett ögas astigmatism kan inte kompenseras genom okularförskjutning, varför personer med dylika synfel måste använda glasögon och eventuellt skruva bort ögonmusslorna för att komma närmare instrumentets utgångspupill. En optiker kan emellertid fästa glasögonglas i en lämplig fattning på okularet, varvid den astigmatiska axelns läge måste beaktas vid inställningen.

Vid militära instrument som utsätts för oöm behandling är okularen i allmänhet fast inställda, men ej på noll utan på — 0,25 till — 1 dioptri. Erfarenheten visar nämligen att ögats upplösningsförmåga blir bättre genom denna inställning, särskilt i skymning. Dessutom blir kikares bildfältskrökning mindre störande (fig. 54).

Vid användning av ett optiskt instrument börjar ögat självmant att ackommodera. Detta är särskilt ansträngande vid binokulära instrument, då ackommodationen åtföljs av ögonaxlarnas konvergensställning. Instrumentets optiska axlar är emellertid parallellställda och en övervinning av konvergensvinkeln åsamkar obehag och smärtor, och vid högre ackommodationsvärden framträder helt enkelt en dubbelbild. En ackommodationsfri observation är följaktligen av stor betydelse. Vid okularinställning ställer man antingen in på ett värde mellan 0 och — 1 dioptri eller också skruvas okularet utåt — till plus — till dess bilden blir suddig, varefter man återigenom sakta skruvar inåt tills bilden för första gången ses skarpt.

Kikare för geodetiska instrument, laboratoriekikare

Vid geodetiska instrument och laboratoriekikare kan, liksom inom astronomin, en omvänd bild godtas. Dyliga instrument är ofta utrustade med en fokuseringsanordning för inställning på korta avstånd. I sin enklaste form består denna av en utdragbar tub innehållande streckplatta och okular. Mera komplicerade instrument fokuseras med en negativ lins. Vid moderna instrument, där man strävar efter små dimensioner, förekommer ofta ett 3-linsigt objektiv och ett 2-linsigt fokuseringssystem som tillsammans bildar ett teleobjektiv med imponerande egenskaper. I fig. 56 är teleobjektivets brännvidd 220 mm, längd 160 mm och relativa öppningen 1:7 vid $25\times$ kikarförstoring. En kikare med fokuseringslins har gentemot den gamla anordningen med utdragbar tub en hel del fördelar; instrumentet är mindre, kan lättare hållas fritt från smuts och siktlinjen säkras lättare vid olika fokuseringar. Avvägningsinstrument är försedda med en streckplatta i form av ett kors med två horisontella tvärarmar, s. k. konstant. Avståndet mellan dessa är $f/100$, varvid sträckan på en mätstav, vilken kan avläsas i konstanten, multiplicerad med 100 ger avståndet till mätstaven. Mätningens origo, den s. k. analaktiska punkten, ligger vid ett ordnärt instrument framför dess vertikalaxel, varför ett visst värde (additionskonstanten) alltid bör tilläggas. Vid korta instrument med foku-

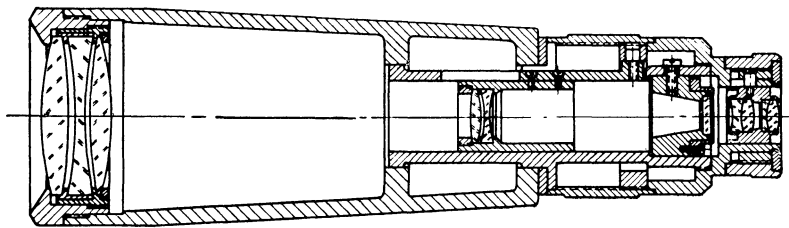


Fig. 56 Kikare för ett geodetiskt instrument

seringslins är den analaktiska punkten flyttad närmare vertikalaxeln, varvid additionskonstanten kan utelämnas.

I laboratorier, för avläsning av otillgängliga skalor samt vid montering av stora maskiner används liknande kikare. Här förekommer även instrument med positiva fokuseringslinser och med mikroskop istället för okular. Observation med större okularförstoring än $20\times$ medför vissa nackdelar. Om man i stället använder ett mikroskop med $2\times$ objektivförstoring blir okularets styrka endast $10\times$.

Astronomiska kikare

Inom astronomin har en kikare ett helt annat ändamål att fylla än vid observation av terrestiska, utbredda objekt. En fixstjärna kan aldrig synas närmare hur stor än förstoringen blir. Däremot upptar objektivet mer ljus än ögats pupill, så att även ytterst svaga ljuskällor blir synliga. Målet är således inte att se objektet större, utan ljusare. Ett mått på prestationen blir alltså förhållandet mellan objektivets och utgångspupillens yta. Utgångspupillen kan göras liten, 0,5—1 mm, vilket endast höjer kontrasten mellan den mörka utbredda bakgrunden och en punktformig fixstjärna. — Förstoringen är begränsad av den diffraktiva upplösningsförmågan samt av objektivets beräkning och tillverkning; dessutom kan brytningen och orenhet i atmosfären tvinga till lägre förstoring.

Tillverkning av stora objektivskivor är ett av glaskemins svåraste problem. Världens största objektiv har en diameter av 102 cm och en brännvidd av 19 m. Men det är även ett annat faktum som gör stora astronomiska refraktorer problematiska; det sekundära spektrat vid ett omsorgsfullt korrigerat objektiv utgör ca 0,0005 f. För att vid en mycket stor objektivdiameter få den härav betingade ströfiguren

lika stor som Airyska skivan borde objektivbrännvidden vara så pass lång, att instrumentet vore tekniskt utförbart.

En praktiskt fullkomlig färgkorrektio n uppnås med apokromatiska objekt i v. Linserna i dessa är mycket buktiga och tjocka, och de är därför omöjliga att tillverka vid stora diametrar. För diametrar ö ver 1 m anses den enda lämpliga lösningen vara att använda sig av speglar. Sådana astronomiska reflektorer har utförts i flera varianter och har lett till de moderna spegelobjektiven. I fig. 57 ses astronomiska reflektorer enligt Newtons, Cassegrains, Gregorys och Herschels principer. De tre första uppvisar i utgångspupillen en central fläck motsvarande hjälpspegelns skugga. Denna har inget inflytande på synfältet, men kan åsamka en obetydlig försämring av upplösning sförmågan, dock utan praktisk betydelse. Den sista lösningen är av mera historisk betydelse.

Speglar är inte behäftade med några kromatiska fel och kan lättare tillverkas med stora diametrar, då särskild hänsyn ej behöver tas till glasets renhet. Den största reflektorn i världen har en diameter av 5 m och $f = 19$ m (Mount Palomar). Den sfäriska aberrationen vid en

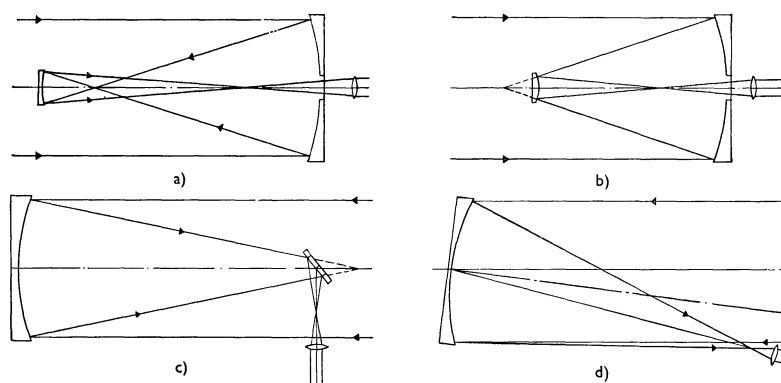


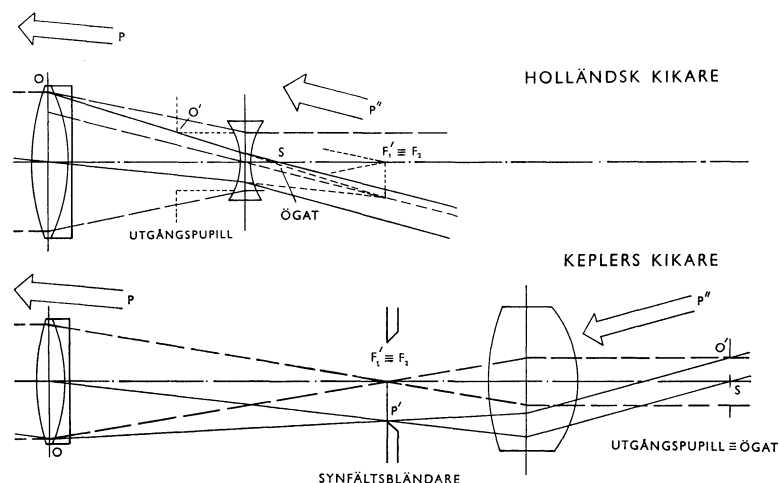
Fig. 57 Astronomiska reflektorer. a. Gregory. b. Cassegrain. c. Newton. d. Herschel

sfäriskt slipad spegel är dock avsevärd även vid en relativt liten öppning. Spegel måste paraboliseras genom en tidsödande retusch. Man kan också på hjälpspeglarna ha en från sfären avvikande krökning och därigenom öka den relativa öppningen, men av största betydelse är den av Schmidt införda kompensationslinsen — en tämligen flat platta i den sfäriska spegelns centrum (fig. 101). På en liknande tankegång baseras alla monocentriska (eller koncentrisk) spegelobjektiv, vilka tillåter en relativ öppning av 1:0,6 med primitivast tänkbara medel (se kap. Spegeloptik).

Holländska kikare

Den holländska kikaren, även kallad Galilei kikare, uppfanns år 1608. Okularet bildas av en negativ lins och befinner sig mellan objektivet och bildplanet. Liksom vid Keplers kikare sammanfaller okulalets och objektivets brännplan, men bilden är virtuell (skenbar); med okularet uppfångas och parallelliseras strålar från objektivet innan dessa förenas till en reell bild. Följaktligen kan man inte begränsa denna med en synfältsbländare eller komplettera med ett siktmärke. Av fig. 58 framgår att bilden blir rättvänd, eftersom strålar från en objekt-punkt lämnar kikaren, visserligen under en större vinkel, men åt samma håll. Kikaren blir kortare och har ej en reell, uppfångbar utgångspupill, då det negativa okularet endast kan avbilda objektivet framför sig som en virtuell öppning, genom vilken ögat observerar målet som genom ett nyckelhål. Det är därför lämpligt att ögat kommer så nära okularet som möjligt. Ingångspupillen, dvs. objektivet, begränsar här följaktligen inte bara ljusstyrkan, utan även synfältet. Enligt fig.

59 kan ögat överblicka ett synfält $2 w'$, varvid $\operatorname{tg} w' = \frac{h'}{m}$. För en kikare gäller:



Positivt okular	Negativt okular
Reell bild	Skenbar bild
Synfältet begränsas av en bländare	Synfältet vigneteras vid kanten, begränsas av objektivets fattning
Synfältets storlek w bestäms av okularets konstruktion, oberoende av kikarlängden och av objektivets diameter	Synfältets storlek bestäms av den yttersta stråle s , vilken passerar genom ögats pupill S' . Vinkeln w , given av objektivets diameter och kikarlängden
Utgångspupillen, uppfångbar bakom okularet	Utgångspupillen, skenbar (virtuell) inne i kikaren
Kikarlängden $l = f_1 + f_2$	$l = f_1 - f_2$
Bilden omvänd. P'' syns i omvänd riktning	Bilden rättvänd. P'' syns i samma riktning som P

Fig. 58 Jämförelse av kikare med positivt okular (Keplers, astronomisk) och kikare med negativt okular (Galileis, holländsk)

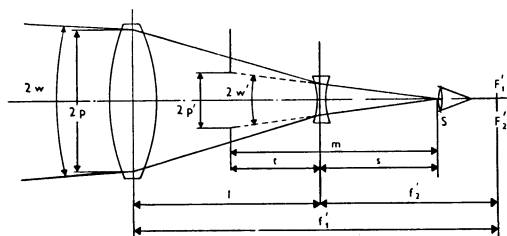


Fig. 59 Synfältet i en holländsk kikare är beroende av objektivets öppningstal

$$h' = \frac{h}{G} \text{ och}$$

$$\operatorname{tg} w = \frac{\operatorname{tg} w'}{G}$$

$$\text{tg } w = \frac{h}{mG^2}$$

där m = ögats avstånd från utgångspupillen. Detta bildas av ett mekaniskt fixerat värde s (som antas vara 6 mm),

och $t =$ utgångspupillens avstånd från okularet. Enligt formeln **25**
 där $b = t$ och $a = l$ (kikarens längd)

$$\text{blir } \frac{1}{t} = -\frac{1}{l} - \frac{1}{f_2}$$

och då förstoringen $G = \frac{f_1}{f_2}$, så blir

$$t = -\frac{1}{G}$$

$$\text{halva synfältet } \text{tg } w = \frac{h}{G (G_s - 1)}$$

Synfältet är direkt proportionellt mot objektivets diameter och minskas då kikarens längd ökas. Vid en holländsk kikare bör man alltså sträva efter stor objektivdiameter och kort kikalängd, dvs. stor

relativ öppning — krav som knappast går att uppfylla vid högre förstoringar. Vid förstoring över $3\times$ blir synfältet så litet att kikaren blir oanvändbar. Som teaterkikare vid låga förstoringar är den fördelaktig genom sin billiga konstruktion, höga ljusstyrka och obetydliga ljusförlust. I fig. 58 har strålgångar i de båda kikartyperna uppritats för en punkt på axeln och en annan punkt (P) utanför denna samt en jämförelse av dessa kikartypers för- och nackdelar uppställts.

Ett holländskt kikarsystem, vridbart anordnat framför en annan kikare i ett periskop, utgör ett lämpligt element för variation av förstoringen (fig. 78). Den negativa systemdelen har ett gynnsamt inflytande på bildfältets planhet. I liknande syfte kan den, vederbörligen korrigerad, monteras i mikroskop och framför ett fotoobjektiv i kameror med fast utdrag (Rolleiflex) för att variera brännvidden eller framför en prismakikare. Holländska kikare förekommer även som kameranöjare och som vidvinkelutblick genom smala öppningar.

Terrestriska kikare, gevärssikten

Bilden vänds enklast rätt om man betraktar den omvända bilden i en Keplersk kikare med ett annat kikarsystem. Den första kikarens okular har sedermera förenats med den andra kikaren till ett *terrestriskt okular* och för att instrumentet skall erhålla liten längd har den utförts så att den är ihopskjutbar. Sådana gammaldags teleskop kommer knappast till användning numera.

Gevärssikten och liknande kikare består av objektiv, omvändningssystem och okular. Omvändningssystemet brukar förstora den av objektivet framställda bilden $1,2\text{--}2\times$, så att okularet får en tillräckligt lång brännvidd för att utgångspupillen skall komma 60—100 mm utanför sista linsen.

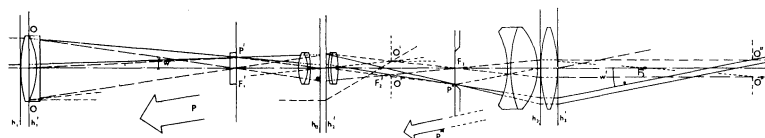


Fig. 60 Strålgång i ett gevärssikte 4×30

Okularets konstruktion bör göras så, att om möjligt huvudplanet förskjuts utanför linssystemet eller åtminstone nära sista glasytan. Förstoringen vid dylika kikare och sikten överstiger sällan $4\times$. Ofta används gevärssikten utan förstoring, då meningen är att avbilda sikt-märket parallaxfritt på målet; förstoringen kommer i andra hand.

På grund av det långa avståndet till utgångspupillen är okularets diameter även vid litet synfält ganska stor och ofta till och med större än objektivets. Fig. 60 visar ett dylikt gevärssikte. Vid 100 strecks syn-fält och $4\times$ förstoring är synfältsvinkeln på okularsidan 400 streck, vilket vid 100 mm pupillavstånd ger 40 mm okulardiameter. Strål-gången har konstruerats för paraxiala strålar och för en punkt P vid kanten av synfältet. Linserna representeras av respektive huvudplan. Ingångspupillen OO avbildas av omvändningssystemet i $O'O'$ och av okularet i $O''O''$. I övrigt kan man hitta utgångspupillen såsom skär-ningspunkt av strålen till F_1' och strålen gående till P' från objek-tivets periferi O. Ljusstyrkan bör väljas i överkant, inte endast för ljusstyrkans egen skull, utan även för att man skall vara oberoende av ögats placering bakom okularet. Omvändningssystemet måste beräk-nas som en helhet för att i möjligaste mån bli fritt från astigmatism och bildfältskrökning. Man kunde förledas att sammansätta omvänd-ningssystemet av två akromatiska objektiv. Resultatet blir dock inte tillfredsställande, då utomaxiala aberrationer inte beaktas vid korrek-tion av vanliga akromater.

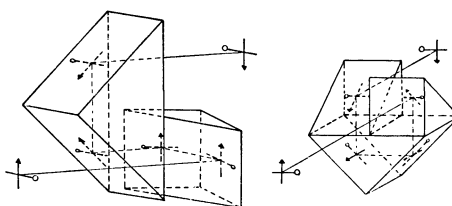
Prismakikare

Bildomvändning med linser gör kikaren inte bara längre, utan möjligen även sämre med hänsyn till bildkvalitet vid större synfält och förstoring. Bilden vänds därför oftast medelst prismor, i vissa fall även med speglar.

I parallell strålgång, dvs. framför objektivet, kan spegeln försilvras på baksidan, men då ställs högre krav på spegelns parallellitet. Prismor är i regel inte försilvrade då strålar reflekteras under större vinkel än totalreflektionens gränsvinkel. Av denna anledning väljs till moderna kikare glas med så pass högt brytningsindex som 1,56—1,60.

I vanliga prismakikare sker bildomvändningen medelst det första Porrosystemet (*Porro* 1850). Anordningen består av två rätvinkliga prismor med två reflektionsytor i varje. Det kan således sönderdelas i fyra rätvinkliga prismor med kvadratisk ingångsyta (fig. 61). Fig. 62 visar den vanligast förekommande kikaren 6×30 i genomskäring. Prismorna tillverkas noga både med hänsyn till mekaniska och optiska mått (längdtoleranser 0,05 mm, vinkeltoleranser 3 min, yttoleranser på planet 1000 m) och vilar i två avlånga utfräsningar i en lättmetallstomme, där de hålls fast av en tvärgående bladfjäder belägen över prismornas tak. Det akromatiska objektivet ($f = 120$ mm) är sfäriskt och kromatiskt korrigerat med hänsyn till ljusvägen i prismorna och noga justerat, så att bilden faller på streckplattan eller i synfältsbländaren. Objektivfattningen består av två excentriska ringar med

Fig. 61 Första och andra Porroprisma



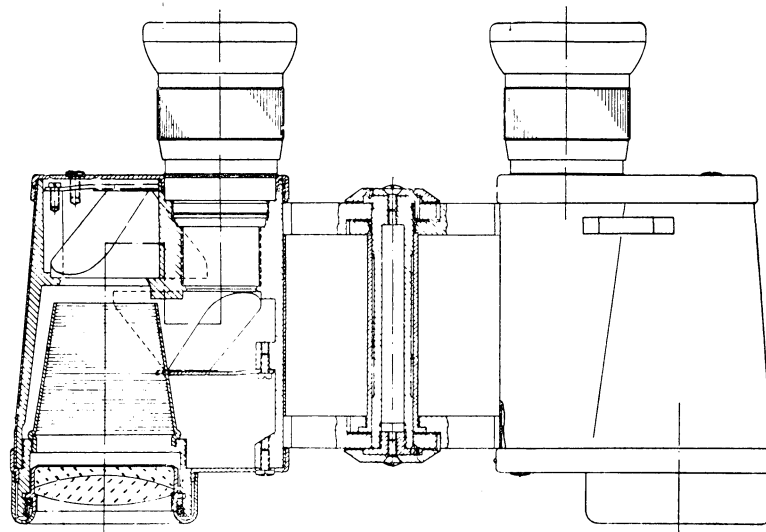


Fig. 62 Prismakikare 6×30 i genomskärning

vilka man kan inställa varje objektivaxel parallellt med kikarens centralaxel. Ett Kellnerokular ($f = 20$ mm) ger ett synfält av 150 m/km och skarpinställs genom en trapetsgängad fattning med flera ingångar. Somliga kikare är utrustade med en centralskruv som skarpinställningsanordning, men denna kan varken garantera en exakt parallellitet eller damm- och vattentäthet.

I stället för Kellnerokular kan man montera ett 5- eller 6-linsigt vidvinkelokular ($f = 15$ mm). Förstoringen blir här $8 \times$ vid oförändrat synfält.

Kikartypen 8×40 har större stomme och prismor. Den är annars byggd enligt samma riktlinjer som kikaren 6×30 . Genom att kombinera stommen med andra okular och objektiv erhåller man kikare av typen 7×50 , 10×50 och 12×60 etc.

Det andra Porrosystemet används vid mera avancerade instrument, där det av konstruktiva skäl kan ge vissa fördelar. I tillverkning stäl-

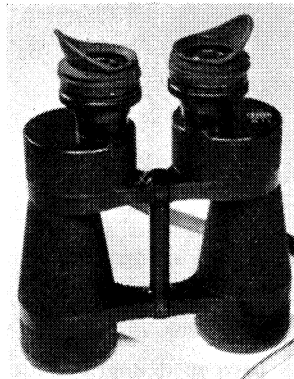


Fig. 63 Nattkikare 7×50 med prismor av andra Porrotypen

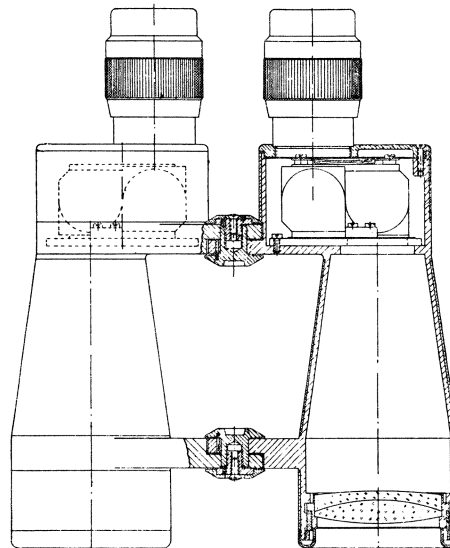


Fig. 64 Nattkikare 7×50 i genomsnitt

ler sig dessa prismor dyrare, men genom hopklistring av delprismorna förorsakas mindre ljusförluster än vid det första Porrosystemet. Vid den numera allmänt använda antireflexbehandlingen är skillnaden dock mindre utpräglad. Fig. 63 visar en typisk nattkikare 7×50 utrustad med dessa prismor och fig. 64 samma kikare i snitt.

Vid det första Porroprismat kan man se att omvändningen i en riktning sker genom reflektion på två mot varandra i rät vinkel stående ytor (fig. 65 a). Man kan tänka sig båda dessa ytor ihopträngda, tills den del av hypotenusan där strålar inträder i prismat sammanfaller med den del där strålar lämnar prismat. Bilden är då fortfarande omvänd i sidled (fig. 65 b). Detta prisma hopsätts nu med ett vanligt 90° prisma, så att bilden vänds även i höjdlid. Den slutliga bilden är då vänd i båda riktningarna (fig. 65 c). Ett sådant prisma benämns takprisma (Amiciprisma) och förekommer i en mångfald kombinationer. Vinkeln mellan de båda reflekterande ytorna måste

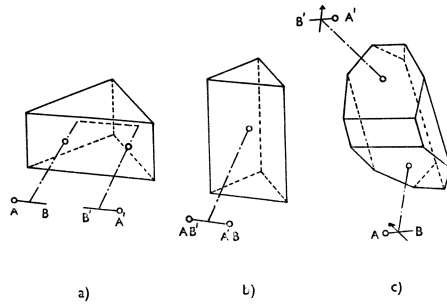
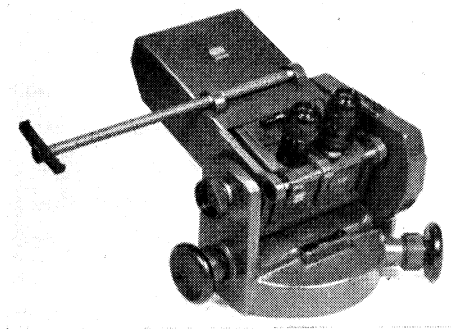


Fig. 65 Hur ett takprisma uppstår

tillverkas med ytterst stor noggrannhet, ofta bara med några sekunders vinkeltolerans, vilket kräver stor yrkesskicklighet.

Ett enkelt takprisma, som t. ex. kommit till användning vid kikkonstruktionen 8×50 (enl. fig. 66), har den jämförelsevis kortaste glasvägen av alla tänkbara prismakombinationer och den minsta glasåtgången.

Fig. 67 visar bildomvändande anordningar, dels sådana där axelriktningen inte förändras, dels sådana där de ingående och utgående strålarna bildar en viss vinkel med varandra. Bildomvändningen i en riktning sker här alltid med ett takkantprisma. Några typiska instrument, försedda med dylika prismor, syns på efterföljande figurer. Fig.

Fig. 66 Kikare 8×50 med takprisma (Nife)

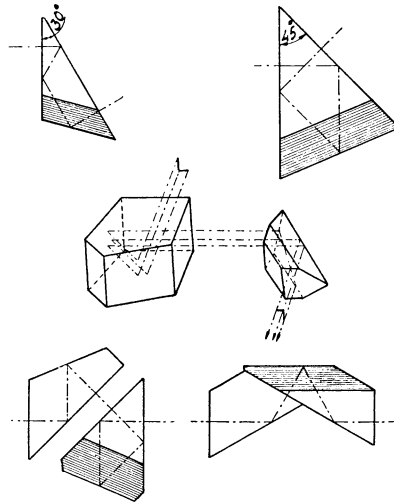


Fig. 67 Omvändningssystem med takprismor

68 är ett geodetiskt instrument med Abbeprisma, fig. 69 ett sikte med Schmidtprisma, fig. 70 ett sikte försett med Lemanprisma.

I optiska konstruktioner ingår ofta prismor som ändrar strålarnas riktning utan att inverka på bildställningen. Dessa har den eftersträfvade egenskapen att vinkeln mellan de in- och utgående strålarna samt bildlägena är oberoende av prismornas vridning kring en axel vinkelrät mot figurplanet. Ett sådant prisma är pentagonprismat (fig. 71). Detta används i monostatiska avståndsinstrument och som vinkelpris-

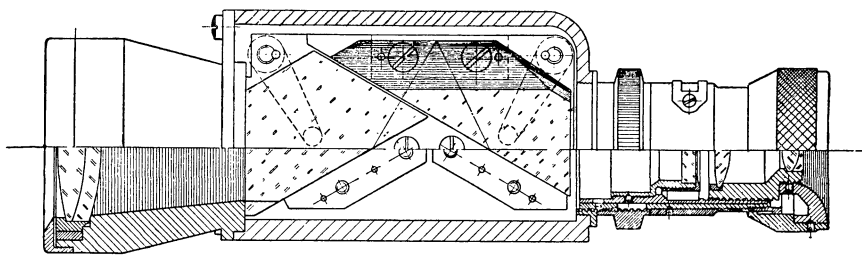


Fig. 68 Kikare med Abbeprisma

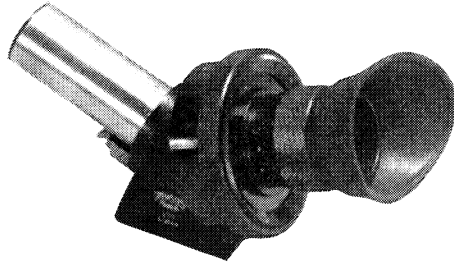


Fig. 69 Sikte med Schmidt-Pechanprisma (Srb-Stys)

mor inom lantmäteriet. Det rombiska prismet förekommer som fönster i stridsvagnar och är avsett att ge en viss höjdskillnad mellan in- och utblick. Det används också bl. a. som okularprisma vid stereoskopiska avståndsinstrument. Prismor av det slag som visas i figurens undre rad, kommer till användning bl. a. vid mikroskop med sned inblick.

Fig. 72 visar prismor där strålarna inte endast reflekteras, utan också bryts. De kan blott placeras i parallell strålgång, dvs. framför objektivet i en kikare. Mest känt i denna grupp är reversionsprismat (Wollastonprismat, Doveprismat), med vilket man vänder bilden i en panoramakikare. Genom vridning kring dess längdaxel med en vinkel

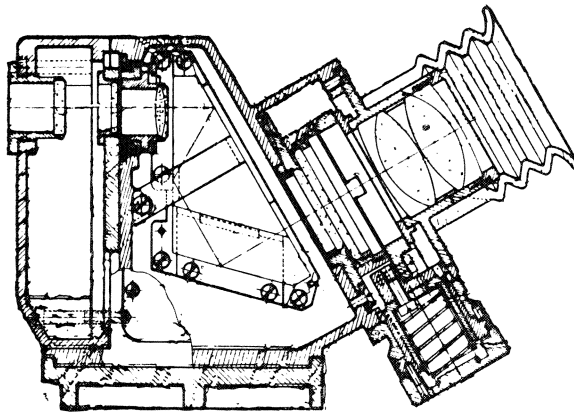


Fig. 70 Sikte med Lemanprisma och symmetriskt okular

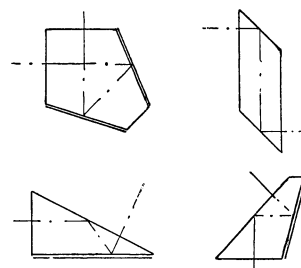


Fig. 71 Prismor som ej påverkar bildläget

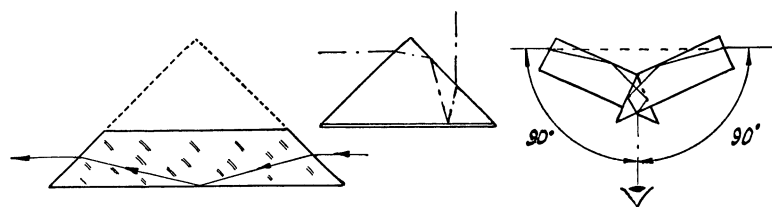


Fig. 72 Prismor med reflektion och brytning

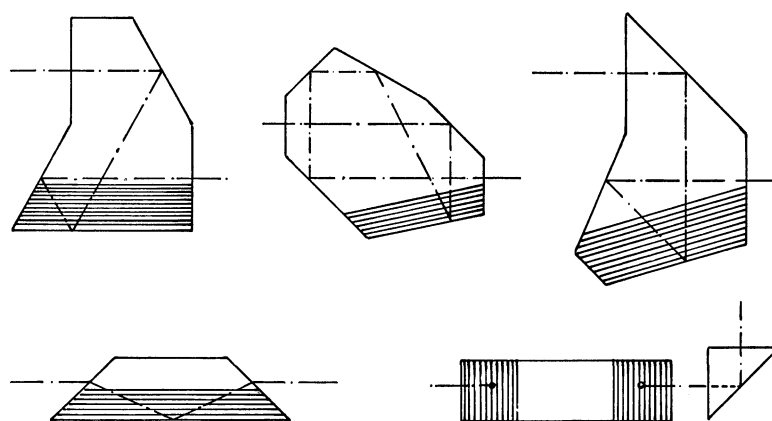


Fig. 73 Mindre vanliga omvändningsprismor

α vrids bilden 2α . De övriga används ibland i stället för pentagonprismor i vinkelspeglar för lantmäteri.

Det finns en hel del prismakombinationer som mera sällan förekommer i instrument, men som i vissa fall kan visa sig värdefulla. Om de innehåller ett Wollastonprisma, måste detta placeras framför objektivet (fig. 73).

Periskop

Vid periskop väljer man med avsikt en stor parallellförskjutning mellan in- och utgående axlar. Så länge avståndet inte är alltför stort och förstoringen så pass hög att den kräver en lång objektivbrännvidd,

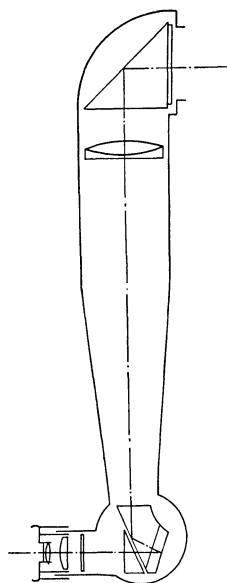


Fig. 74 Batterikikare

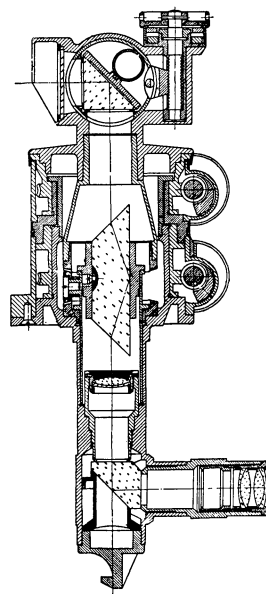


Fig. 75 Panoramakikare 4×16

kan konstruktionen göras analog med en prismakikares, där den första reflekterande ytan flyttats uppåt, ofta framför objektivet (fig. 74). Här är en särskild intressant tillämpning av ett takkantprisma med en 30° hjälpkil, vilken åstadkommer att ljuset lämnar glas under rät vinkel. Systemet används vid de s. k. batterikikarna med förstoring 10—15 gånger.

Ett periskop utrustas för vissa ändamål med ett vridbart huvudprisma, som tillåter riktning av instrumentet mot horisontens olika punkter utan att observatören behöver ändra

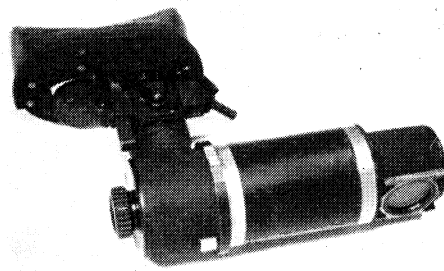


Fig. 76 Panoramakikare

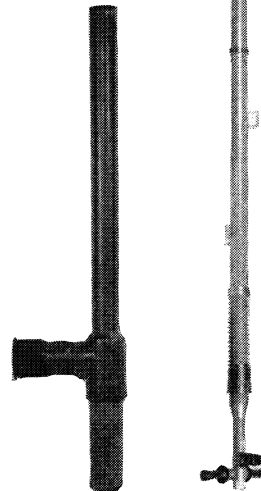


Fig. 77 Periskop med 0,4 och 4 m periskopisk höjd

synriktning. Dessa panoramakikare (fig. 75) innehåller ett reversionsprisma, vars rörelse är hälften så stor som huvudprismats. Bilden hålls på detta sätt hela tiden lodrät. En liknande kikare, men med längdaxeln horisontell, syns på fig. 76.

Oftast betraktar man som periskop ett optiskt system med förhållandevis ringa förstoring (1—4 $\times$), bestående av ett flertal kikarsystem i följd, vilka kan transportera bilden flera meter. Synfältet är

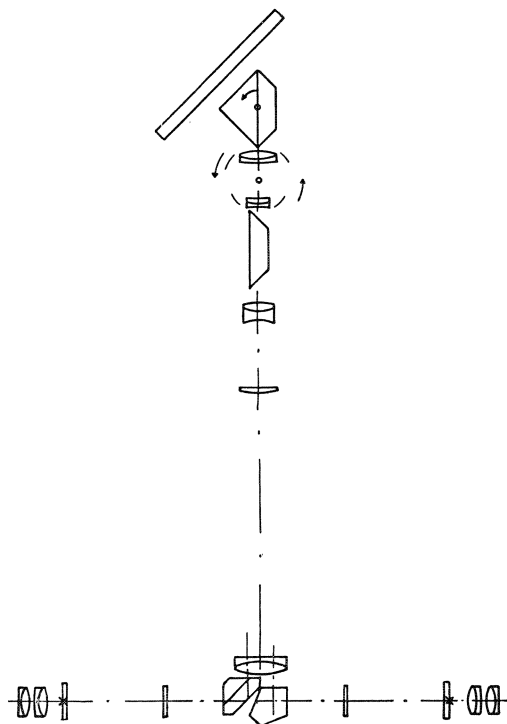


Fig. 78 Zenitpanoramatisk periskop för två observatörer

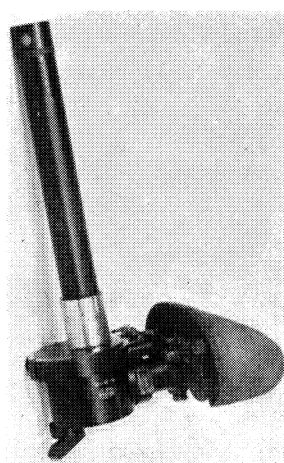


Fig. 79 Panoramaperiskop för stridsvagnar

stort, varför det är svårt att få en bild fri från bildfältskrökning och färgförstoring. Också om man här endast talar om enstaka kikarsystem, som sammansätts till ett periskop, gäller samma korrektionsförhållanden som vid gevärssikten: de bildtransporterande linserna är i allmänhet inte vanliga kikarobjektiv, utan beräknade med särskild hänsyn tagen till bildfältskrökning och andra fel utanför axeln. Fig. 77 visar ett enklare periskop med ca 400 mm periskopisk höjd; där bredvid ett med 4 m längd. Instrument med en periskopisk höjd av upp till 10—15 m förekommer även. Periskop med några mm diameter

används inom medicinen och benämns här cystoskop, gastroskop etc. Liknande, med något större diameter, används för kontroll av rör, behållare, motorcylindrar o. d.

Den tidigare omnämnda panoramaaanordningen kan också anbringas på mera invecklade periskop. Man väljer då storleken av delsystemens pupill så att reversionsprismats dimensioner kan hållas nere. Fig. 78 visar ett system med karakteristiken 6×30 . Reversionsprismat befinner sig mellan de två kikarsystemen, då pupillen reducerats från 30 till 15 mm. Det får här en längd av 68 mm, men hade detta fästs framför objektivet skulle det fått en längd av 136 mm, vilket knappast är möjligt. Fig. 79 visar ett observationsperiskop för stridsvagnar med en liknande strålgång.

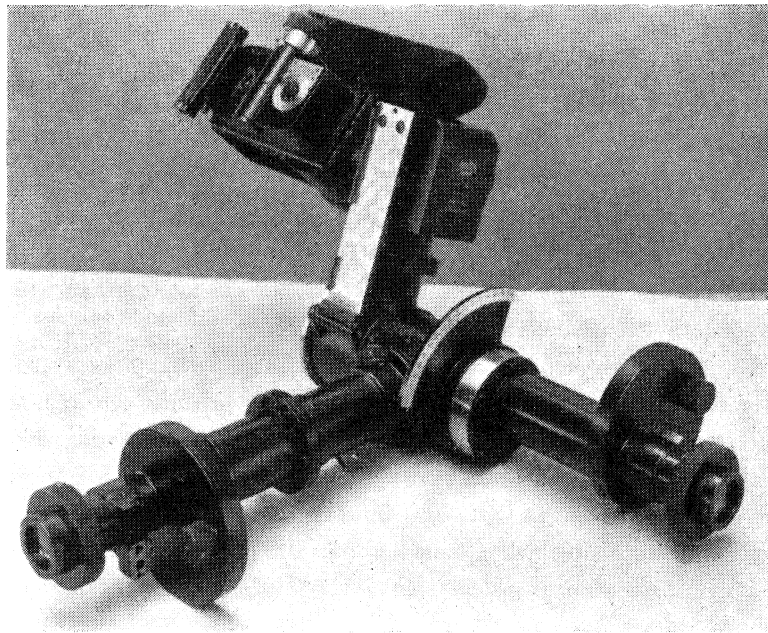


Fig. 80 Sikte där två observatörer använder samma ingångspupill

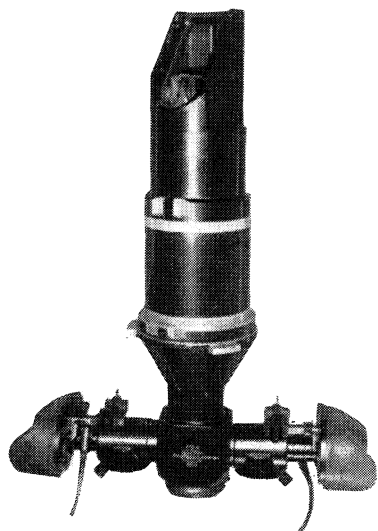


Fig. 81 Zenitopanoramatiskt periskop för två observatörer (Nife)

Det ena kikarsystemets pupill kan uppdelas i 2 observationsriktningar, så att 2 riktare kan sikta genom samma ingångspupill (fig. 78 och 80).

Vidare kan periskopets huvud försees med ett zenitalprisma för att ge observatören möjlighet att se åt alla håll och höjdvinklar utan att han behöver flytta på huvudet. De två sistnämnda kikarna kan även kombineras till maskinerier, som visas på fig. 81.

I stridsvagnar och bunkrar förekommer raka periskopiska system med en längd av $\frac{1}{2}$ —2 m, vilka i regel saknar prismor och är utan periskopisk höjd. Förstoringen i dessa är för det mesta obetydlig, men de har i stället stort synfält, som kan uppgå ända till 70° . Meningen med dessa är att optiskt flytta ögat fram till en annars otillgänglig eller farlig punkt. Som objektiv kommer här ifråga ett modifierat fotoobjektiv eller samma system som i vidvinkelokularer. Ingångsöppningen i dessa instrument brukar ha en diameter av 6—12 mm, och genom denna ringa öppning kan man från några meters avstånd över-

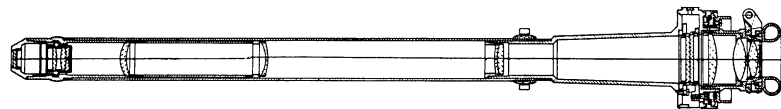


Fig. 82 Stridsvagnssikte

blicka allt som befinner sig inom $60\text{--}70^\circ$ vinkel. Fig. 82 visar ett dylikt instrument i genomsärning.

I kap. "Holländska kikare" har redan omtalats användningen av ett holländskt kikarsystem i syfte att variera en kikares förstoring. En elegantare lösning utgörs av det pankratiska systemet: mellan objektivet och okularet finns ett omvändningssystem bestående av två element som styrs i var sin cylindrisk kurvföring. Man kan på detta sätt uppnå en kontinuerlig ökning av förstoringen upp till det femdubbla.

Avståndsmätare

Vid monostatiska a-instrument (avståndsinstrument) har den teleoptiska tekniken drivits längst. Från en förhållandevis kort bas mäter man vinkeln vid målet med en otrolig precision. Vinkeln (*mätparallelaxen*) förstoras genom en kikare, och bilder tillhörande basens båda ändar sammanförs för att jämföra deras inbördes läge. För detta ändamål använder man sig av en deviator (sid. 125), som kan uppmäta vinkeln vid målet och därmed avståndet.

Fig. 83 visar a-instrumentets funktion schematiskt. Här betyder B kikanaxlarnas avstånd (*basen*), D objektavståndet, M målet, vilket av de båda objektiven avbildas som M'_H och M'_V . Genom att förstålla deviatorn V kan bilden M'_V flyttas till M''_V där den intar ett med M'_H koinciderande läge. Avståndet D kan sedan avläsas på deviationsmekanismens förskjutning.

Det sätt på vilket båda bilderna M'_V och M'_H hopförs, bestäms av

ändamålet och avgör i viss mån konstruktionen. För mätning av hastiga mål föredrar man att observera bilderna stereoskopiskt med båda ögonen och placerar i M'_V och M'_H två stereogram (sid. 174), med vilka objektet i rummen jämförs. Dessa stereogram kan t. ex. utföras som ett slag milstolpar lagda på vissa avstånd, och man bedömer där- efter vid vilket ryddmärke målet tycks vara beläget (fig. 83 a). För- delen med dessa *stereotelemetrar med fast märke* är att mätdeviatoren bortfaller, men precisionen är mindre och synfältet är till stor del ut- fyllt med stereogrammets teckning.

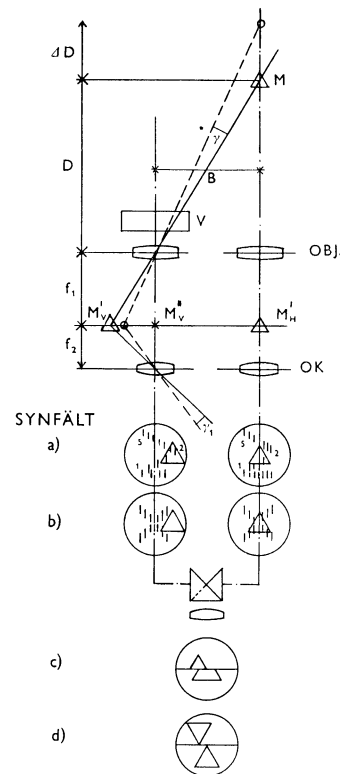


Fig. 83 Avståndsinstrumentets princip och synfältets utseende vid olika avläsningsmetoder. a. Stereoinstrument med fast märke. b. Stereoinstrument med rörligt märke. c. Koincidensinstrument. d. Koincidensinstrument med omvänd bild

Vid en *stereotelemeter med vandrande måtmärke* (fig. 83 b) förskjuts med hjälp av en deviator den ena bilden i sidled, vilket av ögat uppfattas som en fram- och bakåtgående rörelse av ett enkelt stereogram. Genom okularen ser man målet tillsammans med detta (vanligen i form av märken bildande ett X liggande i rymden) varvid vid felinställning X-ets mittpunkt ligger framför eller bakom målet.

Ett annat sätt är att förena båda bilderna i ett komparationsprisma (här kallat *centralprisma*) och observera dessa genom ett gemensamt okular. Centralprismat utförs antingen så, att båda bilderna ligger på varandra (förekommer vid fotokameror) eller på var sin sida av en skiljelinje (*koincidenstelemetrar*). Man kan då ställa bilderna så, att de vid koincidens förenas till en (fig. 83 c) eller också så, att den ena bilden vänds upp och ner (*inverttelementer*) (fig. 83 d).

Ögats upplösningsförmåga (sid. 154) är för två linjer ca 30 sek., men övad personal uppnår som medelvärde av upprepade mätningar en minimigräns av 10 sek., vilken har antagits som normal vid bestämning av mätnoggrannheten vid a-instrument (ett teoretiskt fel) och är densamma för både stereoskopiska och monokulära a-instrument. Vinkeln γ_1 (fig. 83) antas alltså vara 10 sek. och man kan härleda att detta motsvarar ett fel i det uppmätta avståndet i m

$$\Delta D = \frac{5 \cdot D^2 \cdot \gamma_1}{B \cdot G} \quad 22$$

där D = avståndet i km , B = instrumentbasen i m och G = förstoringen.

Om man vidare väljer ett a-instrument med $B = 1$ m och $G = 10$ som ett slags normal, så kan man med hjälp av denna formel beräkna följande tabell:

D	hm	km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔD	$\updownarrow$ dm	$\updownarrow$ m	5	20	45	80	125	180	245	320	405	500

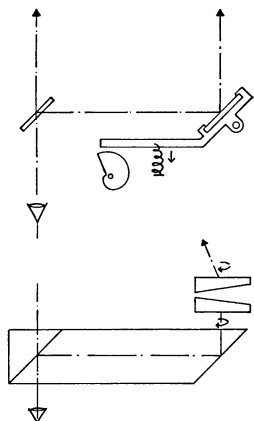


Fig. 84 Avståndsmätare för fotokameror

Härav kan felet för andra instrument lätt beräknas, genom att dividera dessa tabellvärden med $\frac{BG}{10}$.

Det enklaste a-instrumentet förekommer i en del kameror och består av en vridbar och en fast spegel, den senare genomskinligt folierad. Ögat ser en dubbelbild, och man vrider spegeln tills utgående axlar träffar objektet och bilderna förenas till en. I stället för den vridbara spegeln kan en deviator, ev. sammankopplad med objektivets skarpställningsmekanism, användas (fig. 84).

Deviatorer utgör inte endast vid a-instrument ett viktigt konstruktionselement, utan de används överallt där man vill utväxla en stor mekanisk rörelse till en liten obetydlig förflyttning av bilden. Fig. 85 visar olika typer. Utförande b, c och f används i a-instrument som mätsystem. Vridkompensatorn (b) förses med kugghjul så att båda kilarna kan vridas symmetriskt till drevet, varvid den åstadkomna avvikelserna alltid sker i ett plan. Vid linskompensatorer sker vanligtvis förflyttningen medelst en mikrometerskruv och vid flyttbara kilar utförs rörelsen på en lång skruv längs större delen av objektivbrännvidden. Typerna a, d, e lämpar sig mest som justerelement.

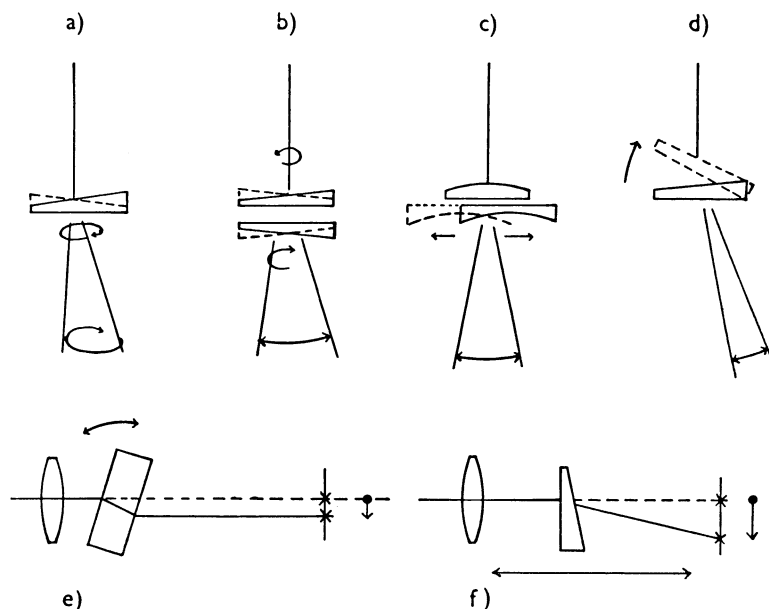


Fig. 85 Deviatorer. a. Vridkil. b. Vridkompensator (diasporameter). c. Linsdeviator. d. Svängkil. e. Plattdeviator. f. Flyttbar kil

A-instrumentens praktiska utförande syns på fig. 86. Då det är fråga om mätning av obetydliga vinklar måste särskilda åtgärder vidtas för att termiska och mekaniska deformationer skall få minsta möjliga inflytande på mätresultatet. De båda objektiven fästs i ett omsorgsfullt bearbetat rör av specialstål, upphängt på en sida i ett sfäriskt lager och på den andra i en kardanlänk. Yttre rörets deformationer kan följaktligen inte överföras till det inre röret. Basen är definierad av två pentagonprismor (sid. 113). Vid det stereoskopiska a-instrumentet förs bilden till okularet medelst ett takprisma och ett rombiskt prisma (för inställning av ögonavståndet). Då även obetydliga fabriktionsfel resulterar i olika objektivbrännvidd, förses den ena strålgången med en ställbar kompensationslins K. I stereoinstrumentet utgörs deviatorn

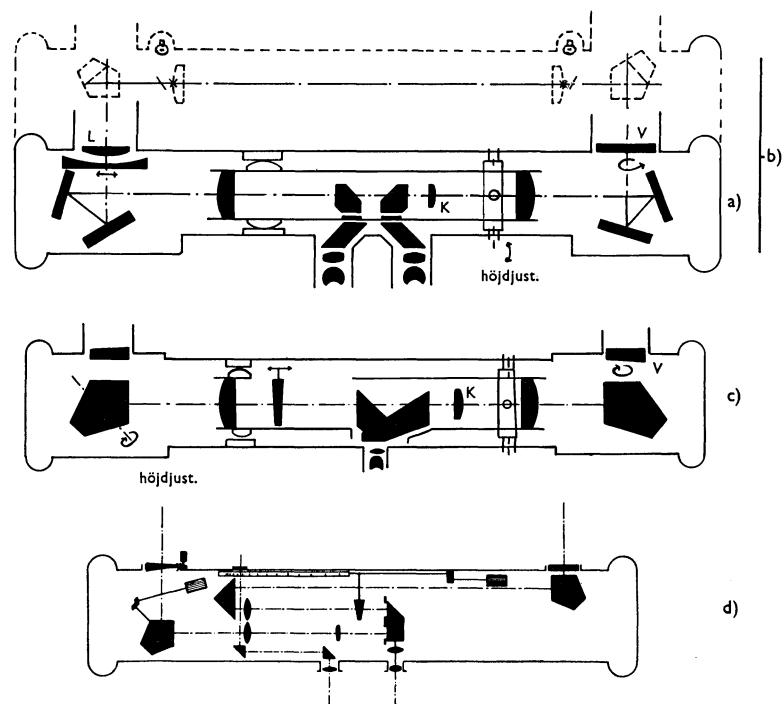


Fig. 86 Avståndsinstrument. a. Stereotelemeter. b. Stereotelemeter med inre justering. c. Koincidenstelemeter (Zeiss). d. Koincidenstelemeter (Nife)

av en linskompensator L, i koincidenzinstrumentet använder man sig av en vandrande kil.

Instrumentens känslighet för dagliga inflytanden gör att anordningar måste finnas för inställning av avståndet till ett känt mål (avståndsjustering) och för reglering av båda bildernas höjdläge (höjdstjustering). Vid lösningen enligt fig. 86 a utförs avståndsjustering medelst en vridbar kil V, och för höjdstjustering lyfts inre rörets ena lager med hjälp av en mikrometeranordning.

Vid en del mycket invecklade konstruktioner har man försökt

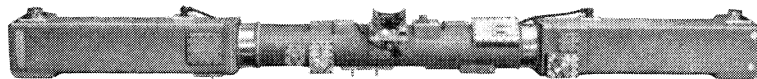


Fig. 87 Stereoskopiskt a-instrument med 3 m bas (Nife)

minska a-instrumentens ömtålighet eller bygga in artificiella tester för kontroll av avståndet. I fig. 86 b har man byggt in i instrumentröret en kollimator så beskaffad, att högra objektivet riktmärke är fastsatt vid vänstra objektivet och vice versa. Oberoende av alla deformationer utträder strålarna ur denna kollimator alltid parallellt på högra och vänstra sidan och tillförs a-instrumentet som från ett ∞ avlägset mål. I fig. 86 d har båda objektiven lagts intill varandra, och därmed elimineras fel vållade av det inre rörets deformationer.

Fig. 87 visar en 3 m stereotelemeter byggd enl. skiss 86 b.

Kollimatorer och justering av instrument

Justerkollimatorer

Ett i brännplanet av ett samlande system befintligt objekt avbildas på oändligt avstånd. Instrument som i princip består av ett siktmärke i brännplanet av ett objektiv kallas för kollimatorer. För justering, montering och kontroll av optiska apparater behöver man långt avlägsna, väl definierade referenspunkter, och för att vara oberoende av väder och ljusförhållanden använder man sig av dylika kollimatorer, i vilka man så att säga flyttar oändligheten till arbetsbordet.

Ett optiskt instrument kan i regel uppdelas i grupper, med parallell strålgång på gruppens ena eller båda sidor. Justeringen av varje grupp består av två principiella operationer:

1. Longitudinaljustering, dvs. objektivets inställning gentemot ett fast referensmärke (streckplattan i en kikare, mattskiva, film i en fotokamera), samt

2. transversaljustering eller inställning av axeln; den optiska axeln ställs parallellt med en annan, mekaniskt eller optiskt given referensaxel. Man ställer t. ex. in instrumentaxeln parallellt med fästanelordningens anslagsytor eller vid ett binokulärt instrument axlarna parallellt sinsemellan.

Longitudinalfel, även benämnt parallax, betyder att bildplanet ligger framför eller bakom referensmärket. Den oskärpa som följer av detta är ett för justering opålitligt kriterium. Man föredrar därför att använda sig av *parallaxen*. Ögat flyttas inom området av instrumentets

utgångspupill genom små rörelser av huvudet i sid- och höjdled. En likriktad rörelse av målets bild betyder att objektivet bör förskjutas närmare referensmärket. En motsatt rörelse av bilden betyder att objektivet ligger för nära referensmärket. Inställningen utförs antingen genom svarvning av anslagsytor eller med en skruv eller en på annat sätt förskjutbar fattning. Toleransen för parallax är vanligen ett artilleristreck vid ögats förflyttning tvärs över utgångspupillen. Det kan vara nyttigt att ange detta i objektivets förflyttning x' enligt nedanstående:

$$x' = \frac{f_1^2}{2000 h} \quad 23$$

Enligt denna lätt härledda formel måste objektivet i en kikare 6×30 , med objektivbrännvidd $f_1 \approx 125$, inställas noggrannare än 0,5 mm och vid en kikare med $f_1 = 50$ och diameter $2h = 20$ måste den inställas med större precision än 0,12 mm. En van justerare kan fastställa redan en parallax av 0,1 str, dvs. ca 0,05 mm i längd fel i det första fallet och 0,01 i det senare.

I stället för att rikta instrumentet mot en kollimator kan instrumentet självt fungera som kollimator, varvid man riktar en kontrollkikare mot objektivet. Kontrollkikarens objektiv bör ha minst samma diameter och vara av hög kvalitet.

Vid justering av skärpan arbetar man om möjligt i ackommodationsfritt tillstånd, dvs. man förskjuter alltid linsen sakta i riktning mot ögat tills skärpan är uppnådd, aldrig omvänt. Både för justering

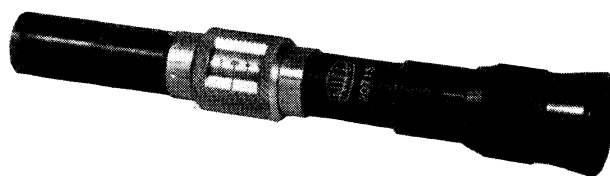


Fig. 88 Dioptrikikare

av skärpan och parallaxfriheten använder man sig av en *dioptrikikare*, en svagt förstorande ($3-6\times$) astronomisk kikare med förskjutbart objektiv. Förflyttningen kan avläsas i dioptrier på en skala (fig. 88). Man kan rikta en dioptrikikare mot okularet, fastställa lägena av streckplattan och av bilden i dioptrier (D) och härav beräkna den behövliga förskjutningen

$$x' = f_2^2 \cdot D \quad 24$$

Då man avläser dptr måste alla mått mätas i meter. Vid kikare 6×30 med $f_2 = 0,02$ m och $D = 0,3$ dptr, får man $x' = 0,0004$. $0,3 = 0,00012$ m. Vid mätning bör främre brännpunkten av dioptrirörets objektiv ligga nära kikarokularets bakre brännpunkt, annars ger dioptriröret fel utslag. På samma gång kontrolleras 0-ställning och delning av okularets dioptriskala. För precisionen är det av betydelse att kontrollkikarens förstoring är så stor som möjligt, dvs. utgångspupillen av det sammansatta systemet kikare + kontrollkikare bör vara 0,5 till 1 mm.

För att kunna ställa in objektivets axel i önskat läge (transversalförskjutning) är detta monterat i två vridbara excentreringar. Det är viktigt att deras excentricitet är lika (annars uppstår ett dött område)

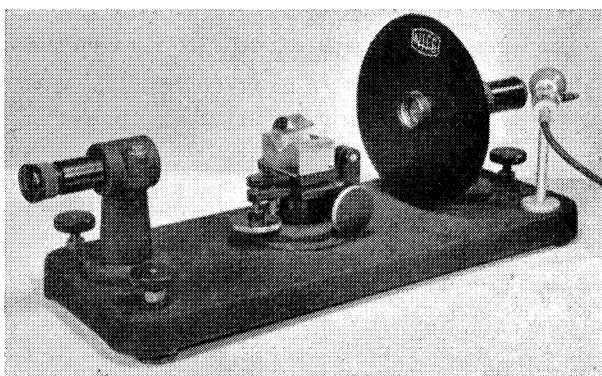


Fig. 89
Justerkollimator

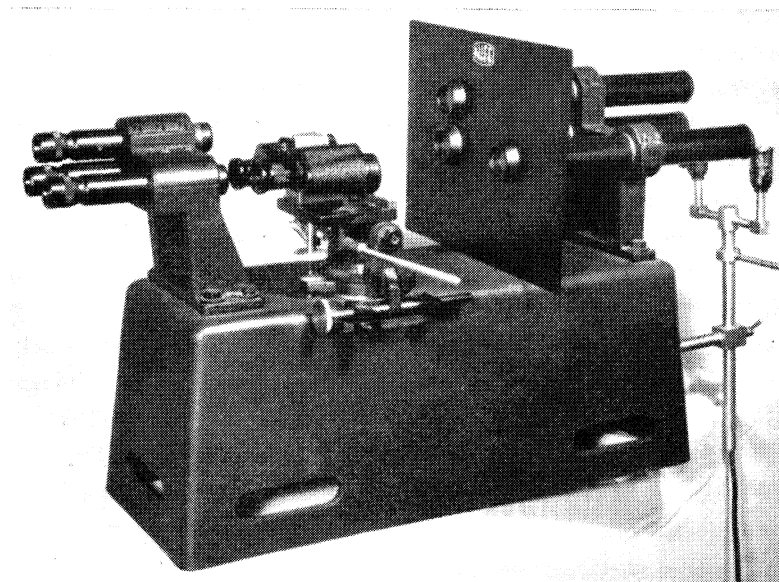


Fig. 90 Kollimator för justering av prismakikare

och att storleken av excentriciteten motsvarar det troliga felet. Mera påkostad är en mekanism där objektivfattningen trycks med fjädrar mot två i 90° liggande justerskruvar. Axeln kan även justeras med hjälp av särskilda deviatorer, såsom vridbara kilar eller tjocka plattor (sid. 124).

Instrumentet fästs mellan en kollimator och en kontrollkikare, vars siktmärken, eventuellt försedda med toleranstecken, är noggrant inställda i koincidens. Ett fel i det instrument som undersöks rubbar koincidensen, vilken återställs genom transversaljustering.

Fig. 89 visar en kollimator för inställning av optiska axelns parallellitet med hållaren. Man ser kollimatorröret och kontrollkikaren fastsatta i ett stadigt stativ samt en hållare för det undersökta instrumentet. Fig. 90 är en parallellkollimator, avsedd för binokulära instru-

ment. Kikaren spänns fast i hållaren och inställs medelst hållarens justerskruvar så att siktmärkena i ena halvan koinciderar. Därefter justeras den andra halvan tills kollimatorkorset ligger inom kontrollkikarens toleransmärke. En tredje kollimator med kontrollkikare är avsedd för kontroll av axlarnas parallellitet vid ändrat ögonavstånd.

Mycket användbara justerinstrument är *fyrkantkikare*. Dessa består av en kropp med noggrant parallella och sinsemellan vinkelräta ytor i vilken en kikare är inbyggd. Om de vänds så, att man observerar siktmärket genom objektivet, kan de tjänstgöra även som kollimatorer, och genom att bygga ihop flera sådana med lämpliga mekaniska element (vinkelhyllor, lod, vattenpass) kan många kontrollanordningar improviseras, även lämpliga för rent mekaniska ändamål (fig. 91).

För kontroll av synfältet kan olika metoder komma ifråga. Den mest praktiska anordningen består av en kollimator med ett välkorrigerat fotoobjektiv och en utbredd skala i brännplanet, som är graderad i grader eller streck. Denna skala bör vara graderad $\pm 10^\circ$, vilket täcker de flesta behov.

Även det bästa kollimatorobjektiv kan genom sekundära aberrationer, i synnerhet den sfäriska, menligt inverka på precisionen. Man minskar därför den relativa öppningen genom att välja en mycket lång brännvidd; vid relativa öppningar över ca 1:50 är det meningslöst att ha 2-linsiga objektiv. Med gott resultat kan man mycket väl använda noggrant tillverkade plankonvexa kollimatorlinser.

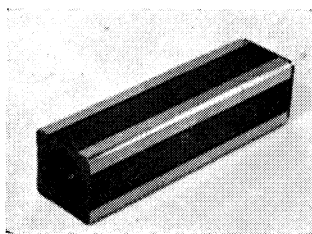


Fig. 91 Fyrkantkikare

Autokollimatoren

En kollimator förenad med en kontrollkikare till ett enda instrument kallas autokollimator. Man kan tänka sig att strålar reflekteras av en speglade yta tillbaka in i samma kollimator, vilken är försedd med ett okular. Genom okularet ser man då okularets referenskors och ett reflekterat märke. Alla vinkeländringar mellan den optiska axeln och spegeln yttrar sig i en förskjutning av det lysande, reflekterade märket. Principen förtydligas närmare av fig. 92. Ett genomlyst mätkors M är förskjutbart anordnat i objektivets brännplan. Strålar passerar den halvgenomskinligt metalliserade hypotenusan i kuben och parallelliseras av objektivet. De parallella strålarna reflekteras tillbaka av ett speglade objekt, så att i okularets brännplan uppstår en bild M' av det genomlysta märket. Avståndet mellan denna bild och okularets referenskors kan mätas genom förskjutning av mätkorset till läget $\bar{M}$, varvid reflexen M' rör sig i riktning mot okularets referenskors R tills båda koinciderar. Sträckan $M\bar{M}$ avläses på en mikrometer eller indikatorlocka. Objektivets brännvidd väljs så, att ett visst antal sekunders vridning av objektet motsvaras av ett helt antal delar på skalan. Vid det beskrivna instrumentet är ett delstreck $= 3$ sekunder. Genom att ersätta mikrometeravläsningen med en graderad skala i okularet blir instrumentet billigare, men också mindre noggrant. Vid

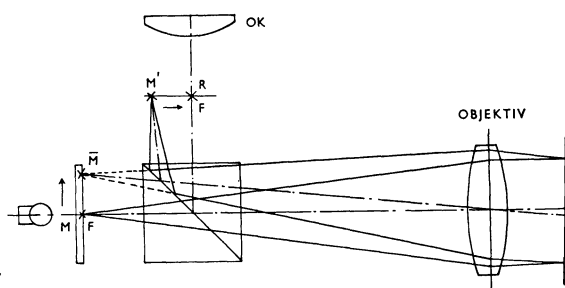
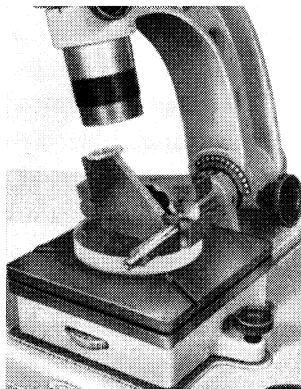
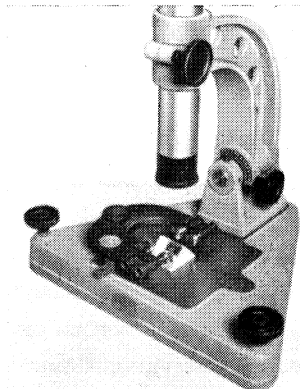


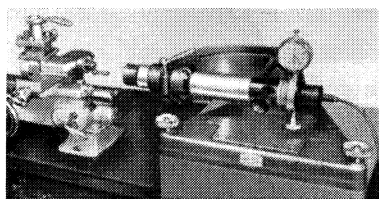
Fig. 92 Autokollimator



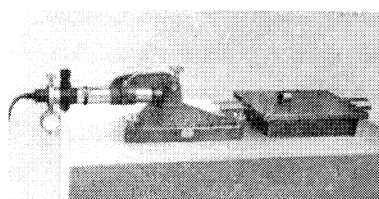
a



b



c



d

Fig. 93 Autokollimator. a. Vinkelmätning (komparation med sinuslinjal). b. Kontroll av parallellitet (hakmått). c. Kontroll av rakhhet (svärbädd). d. Kontroll av planhet

instrument med fast mätskala motsvarar ett delstreck vanligtvis 30 sekunder.

Autokollimatoren används för uppriggning av stora maskindelar, för kontroll av verktygsmaskiner, planskivor, tolkar samt svärkontrollerbara detaljer. Det är oftast fråga om komparativa vinkelmätningar, varför vinkeln först inställs med hjälp av en likare eller sinuslinjal. Inom synfältets mätområde får man dock absoluta mätvärden utan att behöva tillgripa en tolk. Några användningssätt visas i fig. 93.

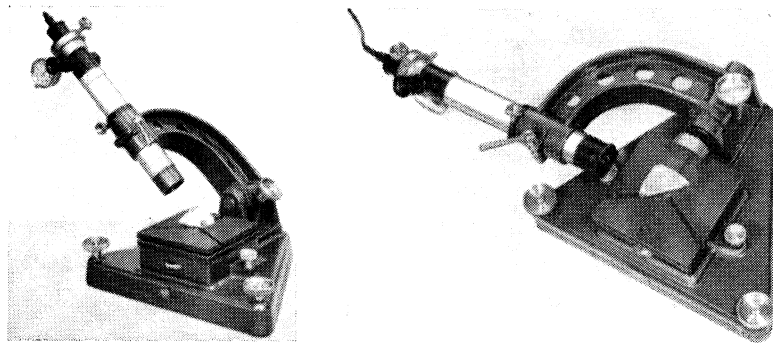


Fig. 94 Autokollimator. a. Kontroll av 45° prisma. b. Kontroll av takprisma

Detta instrument är i synnerhet viktigt i optiska fabriker vid vinkelkontroll av prismor, parallellitetsmätning av glasplattor och andra optiska detaljer. Noggrannheten kan här ökas genom reflektioner och brytningar. Stundom undviker man att använda en likare, och mäter hellre vinkelavståndet mellan reflexerna på två ytor. Om man betecknar avläsningen för enkelreflex med a , så ger ett kilglas reflexvärdet $\frac{2}{3} a$, ett 90° prisma mätt mot hypotenusan $\frac{1}{3} a$ och ett takkantprisma $\frac{1}{4} a$ (fig. 94).

För uppriggning av lagerhus, flygplansdelar etc. kombinerar man kollimatoren med ett avvägningssinstrument så att både vinkelfel och transversala fel kan fastställas. Framför en autokollimator kan man koppla ett svagt holländskt kikarsystem och genom denna anordning möjliggöra skarpställning av ett på mätspegeln ritsat kors. En vanligare anordning består av ett avvägningssinstrument och en kollimator (fig. 95). Tätt intill kollimatorns objektiv placeras en mätplatta försedd med mm-delning. Avvägningssinstrumentet skarpställs omväxlande på kollimatorplattan, då avläsning på vinkeln görs, och på försättsplattan, då avläsning av höjddifferenserna görs.

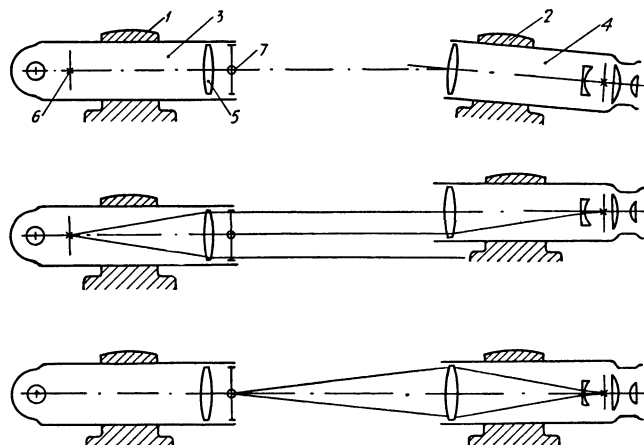


Fig. 95 Uppriggning av lagerhus med hjälp av en kollimator och en kikare. Kikaren fokuseras på kollimatormärke 6, varefter lagerhusen kan parallellställas. För avvägning fokuseras kikare på siktmärke 7

En modifierad autokollimator ingår egentligen i de flesta optiska utväxlingar (sid. 148).

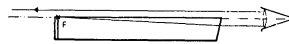
Sammanfattningsvis kan sägas, att en optisk monteringsverkstad bör förfoga över:

1. En uppsättning lupper för kontroll av ytor och pupiller
2. En dynameter (för mätning av pupillen och förstoringen)
3. Två fyrkantkikare
4. Dioptrirör
5. Kollimationslinser ($f \sim 10$ m) och testtavla
6. Autokollimator
7. Specialkollimatorer byggda för ett visst instrument (t. ex. parallellkollimator)

Siktkollimatorer

Små kollimatorer, i enklaste fall bestående av ett kort rör med ett siktmärke i ena änden och en plankonvex lins med ca 20—40 mm brännvidd i den andra används ofta som primitiva siktmedel. En sådan kollimator kan även ges formen av en rektangulär glasstav med en i ena änden sfäriskt slipad yta och i den andra ett siktmärke i form av en pil. Ögat siktar med dessa instrument så att hälften av ögonpupillen täcks av linsöppningen och återstoden ser målet. Båda dessa bilder smälter samman i ögat, varvid man ser siktmärket paralaxfritt ligga på målet (fig. 96).

Fig. 96 Enkel siktkollimator



Vid ett reflexsikte reflekteras strålar från en kollimator mot en snedställd planparallell glasplatta (fig. 97). Ögat ser här målet direkt genom glasplattan samtidigt som det mottar de strålar som lämnar kollimatoren. Varhelst ögat befinner sig inom objektivet, ser det dock centrum av siktmärket, och så länge det inte befinner sig innanför punkt 0 i fig. 97 kan det överblicka hela siktmärket, dvs. siktets hela synfält. I regel ligger reflexplattans centrum ca h mm över objektivet, så att det maximala ögonavståndet m för ett synfält w och halva objek-

tivdiametern h blir $m = \frac{h}{w} - h$. Vid t. ex. ett reflexsikte med $2h = 30$

och önskat synfält $2w = 200$ m/km kan ögat överblicka hela siktmärket överallt inom en kon med toppen 135 mm från siktets axel och med en bas av $2h$. Siktmärkets centrum är synligt överallt inom en cylinder med diametern $2h$. Ögat kan förflyttas tämligen obehindrat bakom reflexplattan utan att synfältet nämnvärt begränsas. Detta är

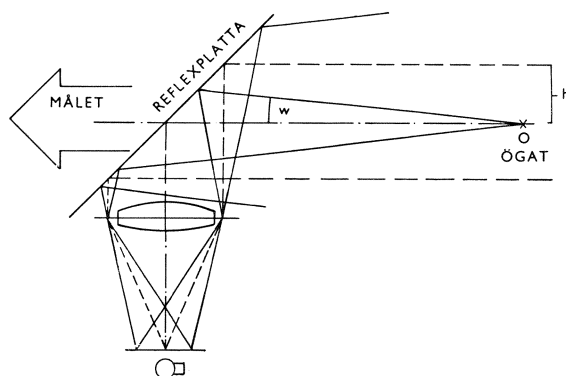


Fig. 97 Reflexsikte
(schematiskt)

reflexsiktets stora fördel gentemot kikaren, i vilken man är bunden till en förhållandevis liten utgångspupill. Dessutom är ljusförlusterna små och målbilden inte på något sätt försämrade. Reflexsiktets största

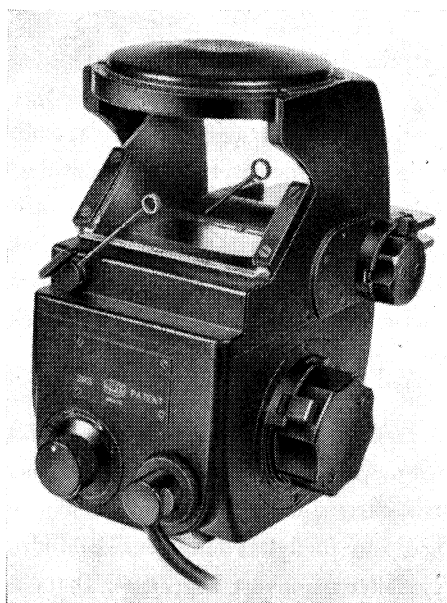


Fig. 98 Reflexsikte med spegel-
objektiv (Nife)

nackdelar är dels reflexglasets sårbarhet, dels att siktmärket ständigt måste belysas för att bli synligt.

Vid konstruktion av reflexsikten anstränger man sig att uppnå stora objektivdiametrar och synfält, samtidigt som man vill ernå små dimensioner. Där man inte ställer större krav på siktets egenskaper, använder man lämpligen ett 2-linsigt objektiv, men önskar man små dimensioner, bör man välja ett flerlinsigt aplanatiskt system med relativ öppning upp till 1:0,7. Man kan härigenom avsevärt nedbringa instrumentets dimensioner, men uppnår då endast små synfält. En bättre lösning utgör objektiv av Petzvaltyp, varvid utrymmesvinsten dock icke blir särskilt markant. Genom att lösa konstruktionen medelst spegelobjektiv vinner man förutom en stor relativ öppning även ett stort synfält, samt när reflexplattan placeras mellan siktmärke och spegel även minimala dimensioner. Nackdelarna är dels att spegelobjektivets reflekterande del kommer ovanför reflexplattan, dels den vid spegelobjektiv ofrånkomliga större känsligheten för stötar.

Fig. 98 visar ett spegelreflexsikte med objektivdiameter 90 mm och synfält över 30° . Objektivets relativa öppning är 1:1. Konstruktionen

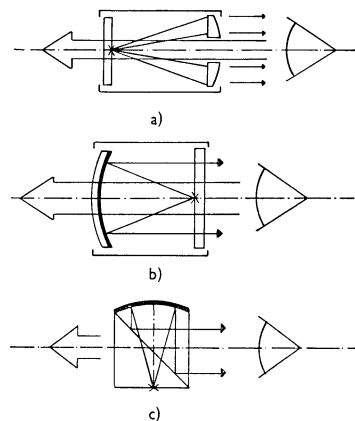


Fig. 99 Några enkla sikt-kollimatorer. a. Målet observeras genom en genomborrad lins. b. Siktmärket avbildas på ∞ avstånd av en genomskinligt metalliserad spegel. c. Reflexsikte i massivt glas

140 KOLLIMATORER OCH JUSTERING

möjliggör att båda ögonen medverkar vid siktopperationen. Med detta ökar man ögats fria arbetsområde samt underlättar följandet av målet.

Enkla siktkollimatorer och reflexikte kan naturligtvis ersätta en mekanisk diopter. Då en siktkollimator avbildar siktmärket på oändligt avstånd är siktlinjen inom objektivets apertur oberoende av ögats läge och ger dessutom en större siktnoggrannhet utan att åldern (ackommodationen) menligt inverkar på resultatet. Fig. 99 visar några konstruktioner.

ÅTTONDE KAPITLET Spegeloptik

Utvecklingen av spegelkikare (reflektorer) har underligt nog först på senare tid gjort några större framsteg. Före år 1930 byggde man dylika instrument enligt samma konstruktiva linjer som hade lagts av Zucci 1616 och senare av Gregory, Cassegrain, Herschel och Newton. Likaledes förekom endast undantagsvis speglade sfäriska ytor i objektivet för fotografi och mikroskopi.

Detta ringa intresse för spegeloptik beror på olika anledningar. Glasytornas ytmetallisering skedde tidigare genom amalgamering och genom reduktion av metalliskt silver ur silvernitratlösning, en omständlig procedur som dessutom ger ett obeständigt ytskikt. Numera tillåter den avancerade vacuumtekniken en masstillverkning av aluminiserade, rhodiserade eller försilvrade ytor med mycket motståndskraftigt skikt och dessutom till ringa kostnad. Spegel är svåra att handskas med och är känsliga för deformation och centreringsfel. Det avbildande strålnippet blir urholkat av hjälpspegelns skugga. Den mekaniska konstruktionen stöter på nya problem, och spegeloptikens specifika drag kan i övrigt fälla ett för linsoptiken gynnsamt utslag vid val av konstruktion.

En spegel har å andra sidan många fördelar jämfört med en lins. Den ger inga kromatiska fel. Vid samma relativa öppning är den sfäriska aberrationen endast $\frac{1}{8}$ av den som en lins av gynnsammaste form uppvisar. Det är lätt att föra koma, distorsion och astigmatism inom godtagbara gränser. Bildfältskrökningen, även om den i vissa fall är besvärande, har ett gynnsamt förlopp för utjämning av den brytande optikens fel. Sinusfelet (variationen av brännvidden för olika zoner)

har samma storleksordning som det sfäriska felet. Man ser att en enkel spegel jämfört med en brytande yta är ett förträffligt konstruktions-element. Man kan vid små aperturer och synfält använda enbart en sfärisk spegel direkt som objektiv både i kikare och mikroskop. Oftast försöker man dock att förbättra spegelns avbildningsfel med olika korrektorer. Det är inte meningen och inte heller troligt att spegelsystem helt ersätter vanliga optiska konstruktionselement i kikare, fotoobjektiv eller mikroskop. För speciella ändamål är däremot användningen av en eller flera speglade ytor ofta ofrånkomlig.

Asfäriska speglar

En paraboloidal spegel är rent geometriskt fri från sfärisk aberration inom alla zoner, förutsatt att bilden ligger i brännpunkten och objektet i oändligheten. En ellipsoid avbildar likaså objektet aberrationsfritt från ellipsoidens ena brännpunkt i dess andra brännpunkt. Sinusfelet och utomaxiala fel kommer dock att störa avsevärt, varför asfäriska speglar (och linser) endast finner användning vid obetydliga synfält eller där de övriga felen kompenseras med andra korrekationsmedel. Vid mindre anspråk på bildkvaliteten, t. ex. i strålkastare, utnyttjas de asfäriska ytornas egenskaper till det yttersta. En strålkastares maximala optiska prestation bestäms av den naturliga spridningen, dvs. den vinkel, under vilken ljuskroppen syns från spegelns huvudpunkt. Denna spridning kan inte minskas genom spegeln, men anger emellertid storleksordningen av det tillåtna avbildningsfelet och tillverkningsojämnheter. Man utformar antingen spegelns främre yta asfärisk och den bakre folierade ytan sfärisk eller tvärtom. Stora strålkastarspeglar, tillverkade genom sänkningsförfarande, har i allmänhet båda ytorna asfäriska. Tillverkningen av dessa ytor är en mycket besvärlig procedur, och ofta försämrar den låga noggrannheten ett teore-

tiskt uppnått resultat. Vid massproduktion undviker man helst asfäriska ytor, och man har, utom i astronomin och strålkastartekniken, nästan undantagslöst kunnat uppnå tillfredsställande resultat med sfäriska speglar.

Manginspeglar

Inom vissa områden används i stället för en asfärisk spegel ett spegelsystem med sfäriska ytor, den s. k. Manginspegeln. Det är en enkel negativ menisklins med försilvrad baksida. Den är inte fri från färgfel, men detta, liksom astigmatism, kan med enkla medel förbättras. Manginspegeln förekommer i mindre strålkastare (dess stora kanttjocklek omöjliggör användning vid stora diametrar), kikarsystem (fig. 100 b), reflexsikten (fig. 100 c) och även vid ljusstarka objektiver (fig. 100 a). Fig. 100 d visar en Manginspegel monterad som ett mikroskopobjektiv. Fördelen med en sådan spegel är att den metalliserade ytan inte

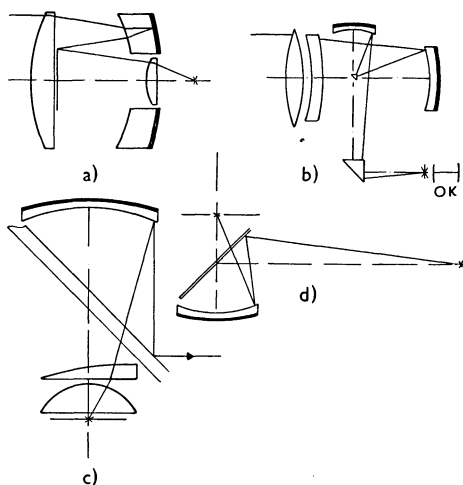


Fig. 100 Instrument med Manginspegel.
a. Objektiv
b. Kikare (Kern)
c. Reflexsikte (Nife)
d. Mikroskop (enl. Johnsson)

kan skadas, men däremot kan den inre, med bildpunkten koncentrisk ytan vålla reflex.

Schmidtsystem

Astronomen Schmidt utjämnade år 1930 den sfäriska spegelns avbildningsfel med en dioptriskt mycket svag asfärisk lins i spegelns centrum.

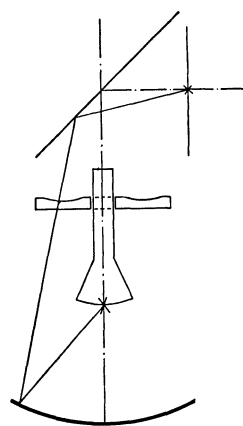


Fig. 101 Spegelobjektiv med Schmidtplatta i en TV-mottagare

Ett sådant Schmidtsystem har förbluffande goda egenskaper, även vid en relativ öppning 1:0,65. Korrektionslinsens ovanliga form kräver visserligen särskilda verktyg och tillverkningssätt, men upptäckten har blivit en utmärkt impuls för vidare utveckling. Sådana objektiv används i televisionsmottagare och skärmbildskameror (fig. 101). Gentemot andra konstruktioner, t. ex. med koncentrisk lins, har Schmidtplattan den fördelen att tjockleken inte ingår som korrektionselement. Detta är en fördel som särskilt gör sig gällande vid stora spegeldiametrar, när Schmidtplattans tjocklek kan hållas tämligen liten.

Koncentrisk system

Schmidtlinsen kan ersättas med tjock negativ menisk, och om dess ytor görs koncentrisk med spegelns centrum uppnår man t. o. m. bättre resultat. Spegelobjektivet har föreslagits av Maksutov och av Bowers 1941 och står som utgångspunkt för en lång rad nya lösningar. Den koncentrisk korrektionslinsen kan akromatiseras, då i annat fall

linsföljden skulle tillföras ett mindre kromatiskt fel. I och för sig är det likgiltigt på vilken sida av spegelns centrum korrektionslinsen placeras. Dess verkan kan i övrigt fördelas på två till centrum koncentriska linser. Dessa system är fria från koma och astigmatism, då varje stråle genom krökningscentrum kan betraktas som en optisk axel och passerar samtliga ytor utan brytning.

Konstruktiv utformning av spegelsystem

Utgående strålar bör helst få samma riktning som ingående, eller också bör bilden på annat sätt göras åtkomlig. Detta har som följd att en del av ingångspupillen skärmas bort, varför inte endast relativa öppningen minskas, utan även den beräknade upplösningsförmågan kan bli lidande härav. Intensitetsfördelningen i böjningsfiguren (se kap. Ögats upplösningsförmåga) ändras så, att Airyska skivan får mindre ljus och de koncentrisk böjningsringarna mera. Avskärmningen genom hjälpspegeln syns i en kikare som en svart fläck i utgångspupillens centrum, men stör i regel inte i synfältet. Fläckens diameter bör ej överstiga 0,5 mm, då i annat fall denna blir besvärande. Hjälpspegeln har emellertid en av konstruktionen given storlek. Man kan följaktligen inte bygga spegelkikare med mindre förstoring än i runt tal 10—12 gånger. Det har gjorts försök att komma ifrån

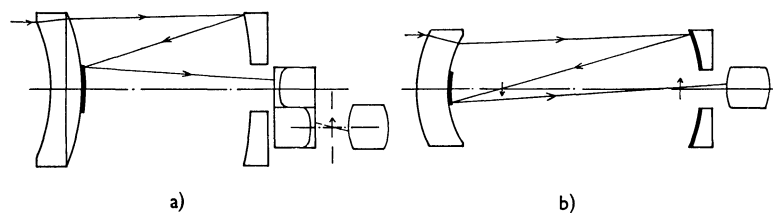


Fig. 102 Spegelkikare med koncentrisk korrektör. a. 22×60 Cassegrainspeglar med prismor. b. 12×35 Gregoryspeglar (enligt Maksutov-Bowers)

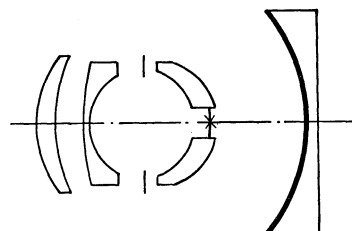


Fig. 103 Spegelobjektiv 1: 0,75
(Wynne)

denna olägenhet, t. ex. med ett tunt, reflekterande glas, som vid mikroskopet enl. fig. 100 d, eller med en tjock reflektionsplatta kombinerad med en cylindrisk kompensationslins, som vid reflexsiktet enl. fig. 100 c. Man kan också tänka sig att låta axeln gå nära spegelns periferi, men en kikare utan den centrala fläcken i pupillen kan knappast utföras. Efterföljande figurer visar några konstruktioner, där ett koncentriskt spegelobjektiv förekommer. Fig. 102 a visar en binokulär kikare 22×60 , där bilden vänds medelst Porroprismor. En kikare med Gregoryspeglar, enl. fig. 102 b, har den stora fördelen att bilden är rättvänd, varför prismorna bortfaller. Ett objektiv med ekvivalent relativ öppning 1:0,75 visas på fig. 103. Observera objektivets effektivitet beroende på det ringa antalet linsytor.

Liknande koncentrisk system kan också komma till användning vid mikroskopobjektiv, men utvecklingen tycks här bättre ha kunnat använda två på varandra följande speglar, där det parallella eller nästan parallella strålknipet först passerar en öppning i den stora spegeln. Skillnaden mellan detta *Schwartzschildsystem* och de vid koncentrisk system förekommande Cassegrainspeglarna framgår av jämförelse mellan t. ex. fig. 102 och 104. Schwartzschildska speglar har med framgång använts i Burchs objektiv (N.A. 0,65) där den ena spegeln gjorts asfärisk. Liknande objektiv, men med sfäriska ytor, tillverkas av Beck. I Förenta staterna har av Grey utvecklats en grupp objektiv, där en del av objektivets konvergens ombesörjs av linser gjorda av kvarts och fluorit.

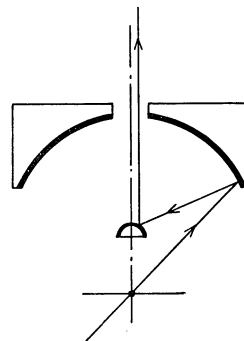


Fig. 104 Spegelobjektiv för mikroskop
(Burch)

Montering och justering av speglar är, som redan tidigare omtalats, mycket besvärlig. En del objektiv är försedda med mekanismer för transversal och longitudinal spegelförskjutning, varvid den senare även kompenserar det av täckglaset och av olika tublängder tillförda sfäriska felet.

Avbländningen genom den centrala spegeln gör sig visserligen inte gällande i bilden, men en skugga kan uppstå vid felaktigt kondensorläge. Man förlorar däremot en del av aperturen, med sänkning av upplösningförmågan som följd. Beroende på konstruktionen utgör förlusten på aperturen 10—25 %.

Rena spegelobjektiv är strängt akromatiska inom hela det ultraviolettera, infraröda och synliga spektret. Lins-spegel-system däremot akromatiseras för 2 våglängder och det sekundära färgfelet kan göras obetydligt. Spegelobjektiv är överlägsna linsobjektiv vid forskning inom det ultraviolettera och infraröda området. För vanliga ändamål har man ingen anledning att förkasta gängse linssystem.

Spegelobjektiven befinner sig i stark utveckling och en del av de här anförda konstruktionerna existerar endast som experimentexemplar. Det är således svårt att här bedöma vilken lösning som i framtiden kommer att bestå.

NIONDE KAPITLET Optiska indikatoranordningar

Varje optiskt instrument kan i viss mån betraktas som en utväxling, men här skall endast behandlas anordningar där optiska medel samverkar med mekaniskt eller elektriskt rörliga delar i syfte att förstora utslag eller möjliggöra en lättare avläsning i olika mätinstrument.

Optisk-mekaniska mätinstrument och indikationsanordningar består för det mesta av en mekaniskt påverkad spegel, som träffas av parallella strålar från en kollimator och reflekterar dessa in i ett projek-tionsobjektiv eller in i en kikare. Projektionslinsen kan i enklaste fall (som vid de vanligaste galvanometerinstrumenten) utgöras av ett glas-ögonglas och projektionsskärmen av en grov väggfast skala. Instru-mentet kan också byggas ihop till en liten transportabel enhet. Den önskade förstoringseffekten beror, utom på mekanismen, på de *optiska armarnas längd* (projektionsavståndet), *utväxlingen* (kikarförstoring-en) samt *speglingsfaktorn* (speglarnas inverkan på utslaget).

Den optiska armen har ringa vikt. Den består endast av en liten tunn (ca 0,1—0,4 mm) spegel; med vilken mekanismen belastas. Därför används optisk avläsning på många känsliga elektriska instrument (galvanometrar, oscillografer etc.).

Man utformar antingen instrumentet med en fast, lång skala och ett rörligt, på denna projicerat index, eller med ett litet avläsningsfönster med index, på vilket man projicerar en rörlig skala. Den sistnämnda lösningen är naturligtvis fördelaktigare, men oftast även kostsammare på grund av den vanligen mikroskopiskt fina skalan. Som exempel kan nämnas projektionsvågar, där skalan är fastsatt på den mekaniska

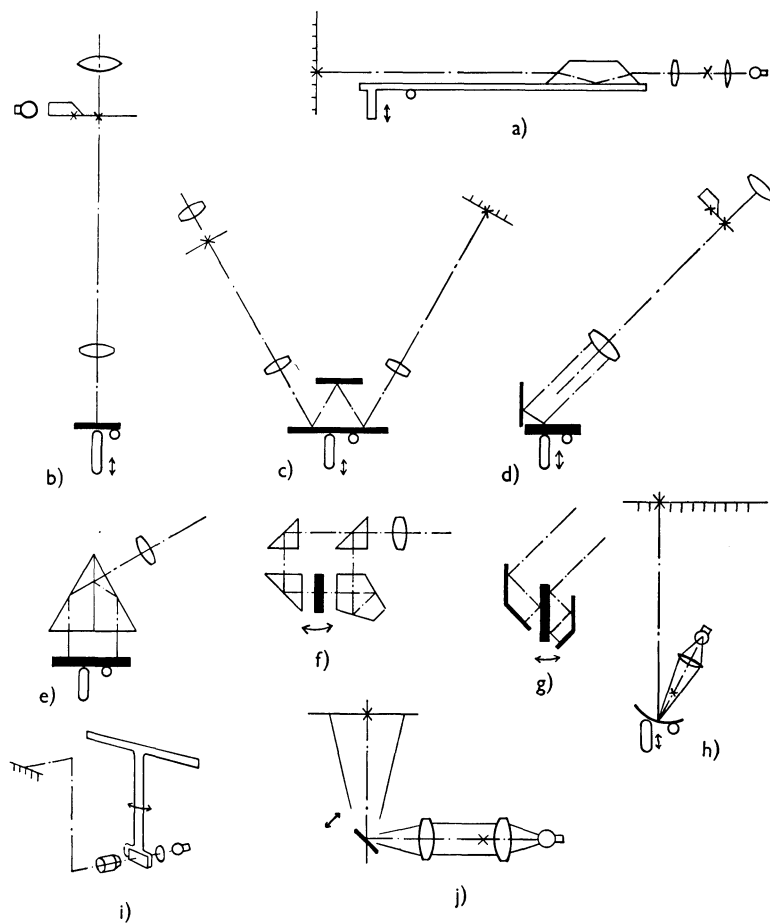


Fig. 105 Optiska indikatoranordningar

armen och hela anordningen liknar en vanlig projektor utrustad med ett mikroskopobjektiv (fig. 105 i).

En för indikeringsändamål lämpad autokollimator har fördelen av en kompakt uppbyggnad och är därför relativt okänslig för åverkan,

Som exempel kan anföras Zeiss' optimeter (fig. 105 b). Autokollimator-delen bygger på samma princip som på fig. 92. Strålarna reflekteras av spegeln, vilken direkt påverkas av mätkolven. Spegelns storlek bestämmer objektivet diameter och begränsar därigenom möjligheten att öka känsligheten genom högre kikarförstoring. (Utgångspupillen bör ej understiga 0,5 mm.) I stället ökar man speglingsfaktorn från $2 \times$ vid enkelspeglings till $4 \times$ eller mer. Vid Zeiss' ultraoptimeter avläses med en kikare en i en kollimator befintlig längdskala, varvid ljuset reflekteras av en fast och en rörlig spegel (fig. 105 c). Utslaget kan vidare förstöras genom att man låter strålarna passera ett prismasystem enligt fig. 105 e. En annan utformning av prismorna visas i fig. 105 f.

Det finns åtskilliga lösningar, men de flesta har dock bara kuriositetsintresse, även om de i vissa fall är ändamålsenliga. Bland de här relaterade möjligheterna har endast plana speglar kommit till användning, dvs. strålgången framför objektivet har varit parallell. Om man frångår den plana spegeln och i stället använder en sfärisk spegel, ernår man en större speglingsfaktor (fig. 105 h).

Vid anordningar med okularobservation är belysningen lätt ordnad med hjälp av en mattskiva mellan mätmärket och lampan. För projektion måste man däremot ordna ett mycket ljust fält med en svag lampa (värmeutvecklingen kan menligt inverka på precisionen). Helst avbildar man glödkroppen på spegeln, då den utgör systemets smalaste ställe, och dimensionerar övriga linser härefter (fig. 105 j). Annars kan strålgången även utformas som i en projektor. För registrering på ljuskänsliga skikt använder man långa cylindriska linser både i kondensorsystemet och som kollektiv nära filmer.

TIONDE KAPITLET Ögat som optiskt instrument

Seendets mekanik och ackommodationen

Ögat är en klotformig kropp, på framsidan mera buktig. Denna del är genomskinlig och kallas för *hornhinnan* (cornea). Ca 3 mm bakom hornhinnan befinner sig *regnbågshinnan* (iris) med en öppning i centrum, bildande *ögats pupill*. Tätt intill denna är linsen upphängd. Utrymmet framför linsen är fyllt med *kammarvatten*, bakom linsen med *glaskroppen*. Ögats inre vägg är klädd med ett invecklat skikt (*näthinnan*, retinan), bestående av olika slags synceller i några lager. Det ljuskänsliga organet består av *stavar* och *tappar*, vilka gränsar till ett skikt av pigmentceller. Nära axeln bildar retinan en liten fördjupning klädd med endast stavar (*gula fläcken*, fovea centralis). Syncellerna har en diameter av ca 0,005 mm och i deras mosaik ökar antalet tappar med avståndet från gula fläcken. Näthinnans tjocklek varierar mellan 0,1 mm i gula fläcken och 0,5 mm i blinda fläcken (den punkt där synnerven inträder i ögat).

Ögats optik framkallar på näthinnan en omvänd bild av objektet. Denna del av seendet har utforskats av H. von Helmholtz och A. Gullstrand. Statistiskt har ett s. k. schematiskt öga beräknats och alla dess optiska egenskaper fastställts. Fig. 106 visar ett öga enligt Gullstrand, ritat som ett optiskt instrument. Man ser att "instrumentet" varken har korrigerats för sfärisk aberration eller kromatiska fel. Ögats brännvidd är 17 mm. Vid en pupill av 3 mm blir enligt **19** böjningsfläckens diameter $2 r = 2 A \lambda \cong 0,005$ mm. Ögats bländarnummer A är vid dagsljus 4 till 10 och vid dessa värden håller sig faktiskt det av den då-

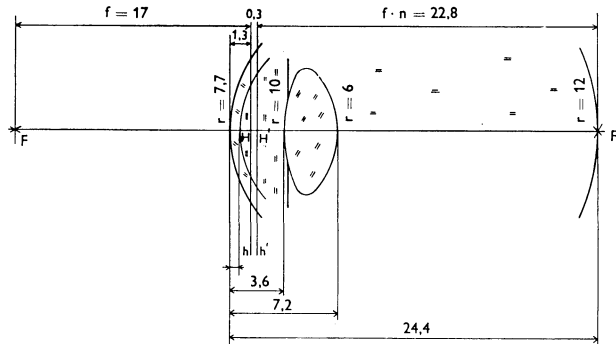


Fig. 106 Ögats optik

liga korrektionen betingade bildfelet inom denna böjningsskiva. Samtidigt är näthinnans synelement av samma storleksordning. — Ögats system är av naturen väl avvägt och motsvarar — trots skenbara brister — seendets alla faktorer.

Vid seende på kort avstånd ändras linsens form genom inverkan av upphängningsmusklerna. Främre radien minskar i linsens centrala del från 10 till 6 mm. Ögat kan därvid skarpställas (*akkommodera*) inom området mellan en avlägsen punkt (*fjärrpunkt*, punctum remotum, *R*) och en nära belägen punkt (*närpunkt*, punctum proximum, *P*). Akkommodationen mäts i dptr, och differensen mellan närpunktsavståndet och fjärrpunktsavståndets vergens (inverterade värde, sid. 170) kallas för akkommodationsbredd. Närpunkten ligger hos 10-åringar på ca 70 mm, men avlägsnar sig med tilltagande ålder och uppnår vid ca 42 års ålder normalavståndet för tydligt seende (250 mm). Samtidigt med minskande akkommodationsbredd minskar förmågan att öka pupillens diameter över ca 5 mm.

Dag- och nattseendet

Näthinnans och synnervernas arbetssätt går inte att belysa så entydigt som den "instrumentaloptiska" sidan. Man kan följa olika teorier som försöker förklara på vilket sätt den bild som uppkommer på näthinnan förmedlas till vårt medvetande, varför den är färgad, varför ljus av samma fysikaliska intensitet kan ses med varierande styrka etc. Ögat tål mycket stora variationer i ljusets intensitet, vilka endast delvis kompenseras av pupillens utvidgning och minskning. Vid alltför stark belysning minskas pupillen ner till 1,5 mm, vilket gör att bilden på grund av böjningen får grövre struktur än retinan. Upplösningssförmågan kan därav obetydligt nedsättas. Över ca 2 mm pupilldiameter bestäms upplösningssförmågan endast av syncellens storlek. I dagbelysning är det stavarna som förmedlar synförmågan till hjärnan. De registrerar inte enbart intensiteten utan även ljusets våglängd, vilket gör att vi kan se färger. Ögat är känsligast för en gulgrön färg av 560 m μ våglängd medan en röd eller blå färg fysikaliskt sett måste vara betydligt intensivare för att ögat skall kunna anse färgen lika ljus som den gulgröna. En varierande ljusstyrka registreras annorlunda än vad t. ex. en fotocell gör. När en belysning förefaller vara dubbelt så ljus som en annan, ger en fysikalisk mätning ett mycket större värde.

Det kromatiska felet är avsevärt. Ögat är ca 1,5 dptr närsynt för ett blått objekt, medan det för ett rött objekt är 0,5 dptr översynt. Vid skymning ökar pupillen till 5—8 mm beroende på ålder, och ögat måste först vänja sig vid mörkret (mörkadaptera). Man kan då inte längre urskilja färger, och ögats största känslighet flyttar i riktning mot den blåa delen av spektrum (510 m μ) (Purkyneeffekt). Upplösningssförmågan sjunker, och röda färger syns mörkare än blå. Objekt uppfattas först när deras bilder faller utanför fovea. Härav

drar man den slutsatsen att tapparna är nattseendets organ, medan stavarna är blinda i mörker, vilket betyder att tapparna är avsevärt känsligare för obetydliga ljusretningar. Mörkadaptionen tar en relativt lång tid i anspråk och är även beroende av ålder, allmän kondition (t. ex. vitaminbrist) och anlag (nattblindhet) samt dessutom av övning (konsten att inte direkt fixera det objekt, som skall observeras). Ögats kromatiska fel tillsammans med den av den stora pupillen betingade sfäriska aberrationen har som följd att avbildande strålknipens smalaste ställe flyttas närmare linsen, dvs. ögat blir 0,25—1 dptr myopiskt. Av denna anledning inställs siktkikare med fasta okularer på $-0,25$ till $-0,75$ dptr.

Ögats upplösningsförmåga

För att kunna särskilja två punkter måste deras bilder på näthinnan ligga så, att minst en syncell mellan dessa inte blir retad. I fall deras avstånd är mindre, uppstår endast *en* synförmimelse (fig. 107). Ur ögats brännvidd, 17 mm, och synelementets diameter, 0,005 mm, blir vinkelavståndet mellan två urskiljbara punkter $= \frac{0,005}{17} \approx 1$ bågminut.

Ögat kan nätt och jämnt särskilja två punkter belägna på 1 m avstånd och med inbördes avståndet $= 0,3$ mm, på läsavstånd, 250 mm, måste

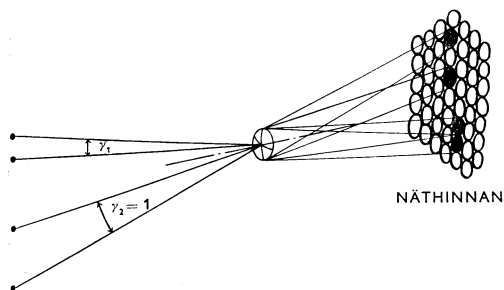


Fig. 107 Ögats upplösningsförmåga. Vinkeln γ_1 är för liten, båda bilderna på näthinnan ger en enda impuls

Fig. 108 Några optotyper:
Landolts ring, Snellens
hake, Siemens' stjärna



inbördes avståndet vara 0,07 mm. Lyktorna på en annalkande bil uppfattas som två först när bilen är närmare än ca 3 km. Upplösningssförmågan av en bågminut kallas för *minimum visibile* och ligger som grund för alla slags *optotyper* (testtavlor). I oftalmologin är den Landoltska ringen och Snellens hake de lämpligaste (fig. 108), men ofta används också bokstäver. Öppningen i dessa figurer, observerade på 5 m avstånd, motsvarar en bågminut, och ett öga som kan urskilja öppningen i ringen resp. i en bokstav av lämplig storlek, har den normala synskärpan eller *visus* = 1. Optotypen innehåller större och mindre figurer, som motsvarar vinkelstorlekarna $\frac{1}{4}'$, $\frac{1}{2}'$, $1'$, $2'$, $3'$ etc. En person med *visus* 0,5 ser på 5 m avstånd en figur med $2'$ vinkelstorlek. Ett normalt öga kan däremot se denna figur på 10 m avstånd. *Visus* 2 motsvarar $30''$ upplösningssförmåga. Man har bestämt provavståndet till 5 m, då ögat på detta avstånd kan anses vara praktiskt taget ackommodationsfritt. Vid observation av skalor, inställning av nonier och vid mätning med avståndsmätare och andra koincidensinstrument kan man uppnå *visus* 2, dvs. $30''$ upplösning, och med övning samt som medelvärde av upprepade mätningar även ner till $10''$.

Emmetropi och ametropi

Man måste vara på det klara med att det levande ögat inte alls är det optiska instrument som här har förutsatts. I verkligheten innehåller det knappast några sfäriska ytor, utan möjligen endast defor-

merade rotationsytor eller toroidala former. I synnerhet cornea är som regel flatare i horisontalsnittet. Ett öga som i enlighet med det Gullstrandska teoretiska ögat i ackommodationslöst tillstånd ger skarpa bilder av avlägsna objekt, kallas för *emmetropiskt*. Men inte heller detta betyder att denna normal exakt håller de dimensioner som genom otaliga mätningar har fastställts endast som statistiskt genomsnitt. Ett emmetropiskt öga uppkommer snarare genom en harmoni mellan alla brytande element och längder. Ett *ametropiskt* öga är ett sådant, där detta tillstånd störs genom krökningarnas eller längdens inverkan (refraktionsametropi och axialametropi). Fjärrpunkten befinner sig vid emmetropi på oändligt avstånd, vid ametropi framför eller bakom ögat. Fjärrpunktsavståndets inverterade värde mätt i dptr kallas för *ögats refraktion*, vilket är ett mått för ögats dioptriska tillstånd.

Närsynthet eller *myopi* är i regel framkallad av en alltför långsträckt ögonbyggnad. Den skarpa bilden av ett avlägset objekt kommer här att ligga någonstans inne i glaskroppen, och på näthinnan uppstår en oskarp figur (fig. 109). Genom att flytta objektet mot ögat, närmar sig också bilden näthinnan tills den blir skarp. Objektet kommer då i det närsynte ögats fjärrpunkt, som alltså inte ligger på

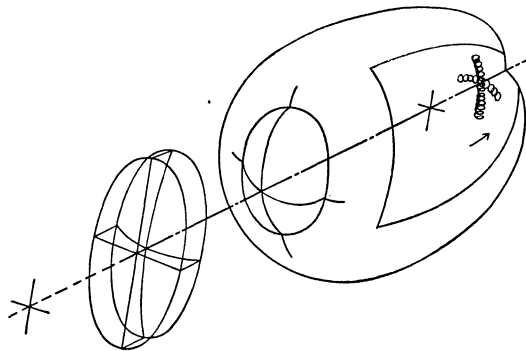


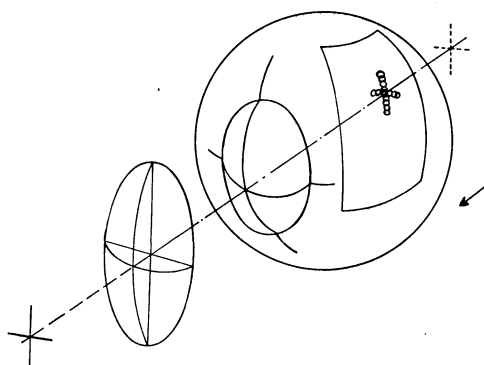
Fig. 109 I ett myopiskt öga ligger den skarpa bilden framför näthinnan. En negativ lins flyttar bilden i pilens riktning

oändligt avstånd som hos emmetropen, utan på ett visst avstånd framför ögat, motsvarande ögats refraktion. Myopen med fjärrpunktsavståndet 20 cm har t. ex. en ögonrefraktion -5 dptr. Närmar sig objektet ytterligare, inträder ackommodationen, och när hela ackommodationsbredden har utnyttjats befinner sig objektet i närpunkten.

För att kunna se ett objekt skarpt bör det förläggas till ögats fjärrpunkt. Optiskt åstadkommer man detta med en negativ lins. Linsens brännvidd blir lika med avståndet till fjärrpunkten, minskat med avståndet mellan glaset och ögat. Strålarna lämnar sedan glaset med samma divergens som om de hade kommit från fjärrpunkten. Glasets brytkraft är följaktligen något större än ögats refraktion. Man kan med andra ord också säga, att i ett myopiskt öga är det optiska systemet alltför kraftigt. Man försvagar då dess brytkraft med en negativ lins.

Hypermetropi, även kallad *hyperopi* (översynthet), kan i många fall anses vara framkallad av en alltför kort ögonglob. Bilden av ett avlägset objekt uppfångas på näthinnan innan strålarna hunnit förena sig till en skarp avbildning. Ögat börjar då ackommodera tills den felande brytkraften ersätts och objektet syns skarpt. Detta är visserligen möjligt om ackommodationsbredden är minst lika stor som hypermetropin. Ackommodationen åtföljs av ögonaxlarnas konvergens-

Fig. 110 I ett hyperopiskt öga — om det ej ackommoderar — uppfångas på näthinnan endast en oskarp bild. En samlande lins kan föra den tydliga bilden till näthinnan (i pilens riktning)



ställning, och eftersom objektet befinner sig på långt avstånd, uppstår en viss motsättning mellan ackommodationen och ögonkonvergensen. Därför kommer hypermetropen snart att föredra att ögonsystemets brytkraft i stället förstärks med en samlande lins. Korrektionsglasets brännpunkt sammanfaller med fjärrpunkten, och då denna ligger bakom ögat och glasets framför kommer glasets brytkraft att vara något mindre än ögats refraktion (fig. 110).

Korrektionsglasets och bilduppfattningen

Den oskarpa bilden i myopens öga är större än i emmetropens, då avståndet till näthinnan är längre. Detta är även fallet vid refraktionsmyopi, men inte i samma mått. Vid korrektionen med ett konkavglas uppstår en situation som liknar strålgången i ett omvänt teleobjektiv. Huvudplanet av systemet glas + öga flyttas närmare den konvexa delen (ögat). Man har egentligen inte blott försvagat ögats brytkraft, utan även flyttat huvudplanet bakåt. Bilden i ett korrigerat myopöga blir mindre än den oskarpa bild som uppstår utan korrektionsglas, och denna minskning kan feltolkas som ett tecken på att glasets brytkraft är för starkt. Även rymden blir djupare och får överdrivet perspektiv. Myopen får samma intryck som ett vanligt öga observerar i en omvänd svag teaterkikare. Ett hypermetropiskt öga kommer att reagera tvärtom; glasets förstorar och gör perspektiven flatare; för att kunna överblicka den förstorade bilden måste det hypermetropiska ögat utföra en större rörelse än myopen. Följaktligen bör konvexa glas väljas större än konkava. Bildstorleken vid korrektion av 5 dptr ametropi förändrar sig med nästan 10 %, men några störningar uppträder för det mesta endast i början. — Hela denna överläggning kan inte till fullo tillämpas vid refraktionsametropi.

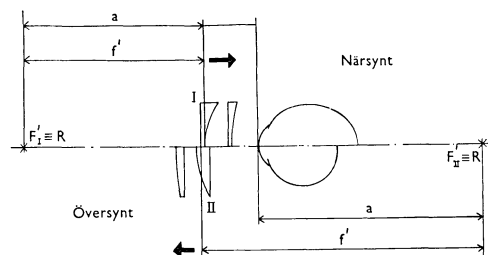


Fig. 111 Ett konvexglas } kan försvagas om det flyttas { ifrån ögat
 Ett konkavglas } närmare ögat

Vid en rätt korrigerad ametropi sammanfaller glasets brännpunkt med fjärrpunkten. Denna ligger hos myopen framför, vid hypermetropen bakom ögat. Det konkava korrektionsglas kan göras svagare om det flyttas närmare ögat, då avståndet till fjärrpunkten därvid förlängs. Det konvexa glasets måste däremot flyttas fram för att uppnå en minskning av brykraften (fig. 111). Förhållandet är av intresse vid höggradig myopi (hypermetropin uppnår sällan ett högt värde) och vid *afakiska* ögon (efter starroperation). Glasets är i dylika fall så pass tungt, att även en liten försvagning välkomnas. Vid utprovning med en provbåge brukar glasen komma ovanligt långt framför ögat. Då är det viktigt att placera det starkaste glasets närmast ögat och att därefter omräkna glasets för det riktiga avståndet. För omräkning av glasavståndet finns det en hel del metoder publicerade. Den enklaste kan göras enligt fig. 112.

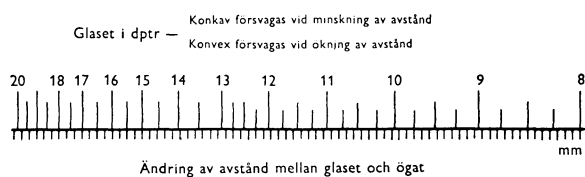


Fig. 112 Skala för omräkning av glasstyrkan vid ändrat avstånd till ögat

Presbyopi

Äldre personer behöver glas som avbildar ett närbeläget objekt i närpunkten och sålunda ersätter den saknade ackommodationsförmågan (se sid. 152). Denna naturliga åldringsprocess kallas *presbyopi*. Mellan 50 och 60 års ålder förändrar sig vanligen ögats byggelement så, att brännvidden förlängs. Även för att se ett avlägset objekt måste då ögat ackommodera, och därigenom minskas ytterligare den kvarvarande ackommodationsbredden (*senil hypermetropi*). Vid omkring 65 års ålder används hela återstoden av ackommodationen för att se på långt håll. På fig. 113 ser man hur ackommodationsbredden minskar och vid ca 42 års ålder underskrider 4 dptr, varför läsglasögon då är nödvändiga. Något senare utvecklar sig den senila hypermetropin som ogynnsamt påverkar närpunktens läge. Korrektionsglasets uppgift är att ersätta den saknade ackommodationen. Dess styrka ökar tills den vid ca 65 års ålder uppnår 4 dptr.

Brist på ackommodationsförmåga uppmärksammas av en hypermetrop vid ett ganska tidigt stadium, eftersom han redan som ung använder en del av ackommodationsbredden för att kunna se på långt håll; men med glasögon för seende på långt håll kommer han även att kunna läsa.

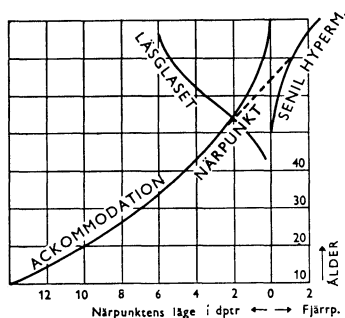


Fig. 113 Ackommodationen minskar med åldern

En hypermetrop vars synfel är korrigerat, ackommoderar mera än ett normalt öga på samma avstånd. Vid en ametropi av 5 dptr utgör skillnaden 0,5 dptr. Detta kan hänföras — liksom bildstorleken — till förskjutningen av huvudpunktens läge i det gemensamma systemet ögat + glaset. Följaktligen kommer en hypermetrop att behöva läs-glasögon tidigare än en myop.

Glasögonglas

Så länge man räknar med ett fast, orörligt öga, så är avbildningsfel i glaset utan betydelse. Ögats egna axiala fel är avsevärda och kan inte märkbart påverkas av ett glas med relativt lång brännvidd och samma fria öppning som ögat. Inte heller spelar utomaxiala fel någon större roll, ty det fasta ögats synfält är obetydligt. Ögat är emellertid rörligt kring en punkt ca 25 mm bakom ett fast anordnat korrektionsglas, och bildkvalitén bör därför vara densamma vilken blickriktning ögat än intar. Vid så pass stora vinklar ($30\text{--}35^\circ$) uppträder en mycket störande astigmatism, men genom att ge glaset en lämplig krökning, kan detta fel nerbringas till ett minimum.

Glasögonglasets punktuella korrektion har klarlagts vid sekelskiftet av Tscherning. (Hos ett glasögonglas användes uttrycket punktuell korrektion i stället för astigmatisk.) I sin lösning ställde han följande hypoteser:

1. Glaset är mycket tunt
2. Blickvinkeln är obetydlig
3. Ögats vridpunkt ligger 25 mm bakom glaset
4. Objektet ligger i oändligheten

Sedermera har flera forskare behandlat problemet (i första linjen den berömde oftalmologen Gullstrand) under olika andra antaganden och

resultatet har alltid blivit en ny kedja av mer eller mindre krökta glas. Dylika förbättringar satte i gång ett våldsamt pennfäktteri, och det är ej alldeles oberättigat att säga att tillverkarna ofta framhävde vissa hypotetiska fördelar, möjligen mot bättre vetande.

Fig. 114 är resultatet av en beräkning, där hänsyn har tagits till alla faktorer:

1. Glastjocklek 1 mm på kanten av konvexa respektive i mitten av konkava glas
2. Blickvinkeln på objektsida 30°
3. Ögats vridpunkt varierar med ametropin

Den heldragna, med noll betecknade kurvan uppger brytkraft D_1 av glasets framsida för varje styrka. Vidare har beräknats ett område, inom vilket astigmatismen inte överskrider 0,2 dptr (heldragna kurvor 0,2 på var sida av nollkurvan).

Vi ser att vanliga i handeln förekommande s. k. meniskglas med 6 dptr brytkraft på flatare yta utan vidare kan betecknas som punktuella, åtminstone för styrkor mellan -7 och $+8$ dptr. (Se fig. 114.)

Att hålla sig strängt till den beräknade nollkurvan är onödigt, man vet ju inte om ögat vrider sig kring den punkt för vilket glaset är beräknat; man vet inte om optikern kan eller har anpassat bågen för 12 mm avstånd mellan glaset och hornhinnan och glaset har kanske med avsikt decentrerats.

I övrigt, om glaset användes för läsning (utan hänsyn till om personen är ametropisk eller presbyop), är teoretiskt inget glas strängt punktuellt avbildande. I fig. 114 har samma beräkning som tidigare utförts för ett objekt på 300 mm avstånd från ögat (streckade kurvor). Vi ser att nollkurvan för läsglasögon inte alls sammanfaller med nollkurvan för glas för långt håll. Felen är kanske utan betydelse, men i alla fall är skillnaden större än mellan ett s. k. punktuellt glas och

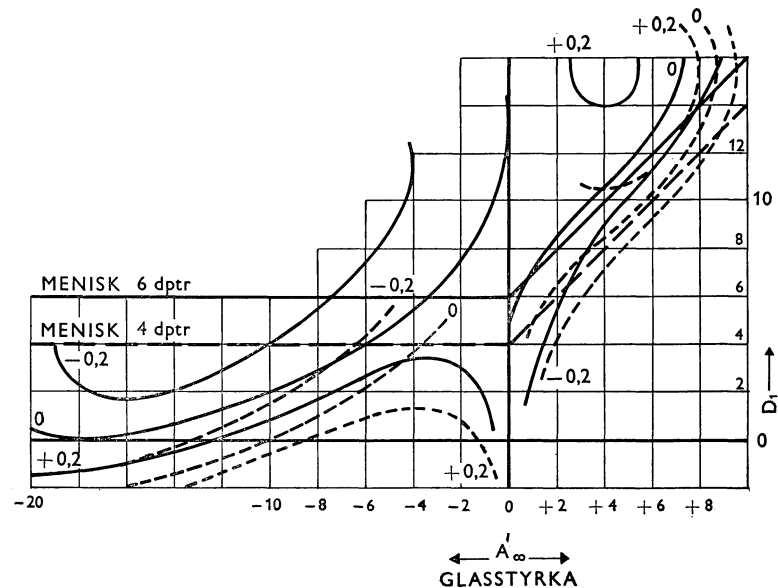


Fig. 114 Brytkraft på glasets framsida (D_1) för punktuella glas av olika styrkor (A'_∞). Tolerans av $\pm 0,2$ dptr astigmatism. Heldragna kurvor för seende på långt håll, streckade för 300 mm objektavstånd

ett s. k. meniskglas. Att införa nya meniskglas med ca 4 dptr brytkraft på den flatare ytan vore här till större nytta.

I handeln finns det även andra glas med standardkrökning: de s. k. periskopiska glasen med 1,25 dptr brytkraft på flatare yta, plankonvexa och plankonkava glas samt biglas med samma radius på båda ytorna.

Denna överläggning betyder naturligtvis inte att märkesglas inte är bättre än vanliga meniskglas, vilka i regel tillverkas av fabriker med mindre resurser. Det är snarare en precisionsfråga hur tillverkaren behandlar materialet, och hur styrkan verkligen hålles, hur ytorna är deformerade, ej utpolerade etc.

Astigmatiskt öga

Som tidigare nämnts är de optiska elementen i ögat ingalunda sfäriska ytor, utan mer eller mindre deformerade kroppar. Varje öga är alltså i viss mån *astigmatiskt*, och man kan fastställa två mot varandra vinkelräta snitt (*huvudsnitt*) med maximal och minimal brytkraft, som kan korrigeras med linser försedda med *toriska* ytor. En torisk yta erhåller man genom att låta en cirkel rotera runt en axel som icke passerar genom cirkelns centrum. Ytan får t. ex. formen av en bilslang eller ett ölfat. Även en cylinderyta kan betraktas som en toroid, där den formande cirkeln har en oändligt lång radie.

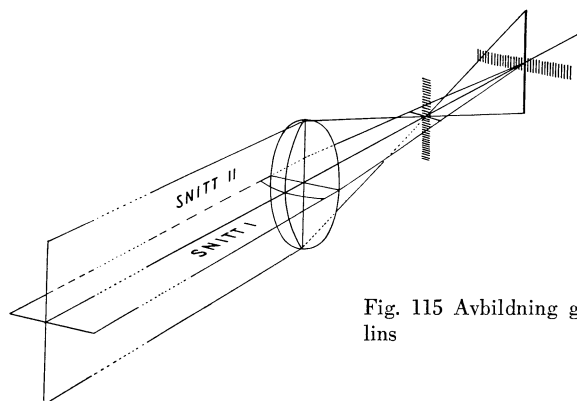


Fig. 115 Avbildning genom en asymmetrisk lins

Armar av ett kors avbildas genom denna *asymmetriska* lins på olika avstånd. Den med det flatare huvudsnittet parallella armen avbildas av det starkare snittet närmare linsen. Den andra med det starkare snittet parallella armen avbildas av den flatare krökningen längre ifrån (fig. 115). Det är viktigt att komma ihåg, att ett huvudsnitt skarpt avbildar linjer som är parallella med det andra snittet. En avlägsen punkt avbildas som ett par brännlinjer, mellan vilka man kan

fastslå ett ställe där strålarna har den minsta utbredningen. Brännlinjernas avstånd från varandra bestäms av differensen mellan de båda huvudsnittens brytkraft = den s. k. *astigmatiska differensen*. Man ser att det råder liknande förhållanden som vid det astigmatiska avbildningsfelet (sid. 11), men här är det inte ett linsfel, utan det gäller ett avsiktligt tillstånd, vilket i övrigt kan influeras av det egentliga astigmatiska avbildningsfelet: ett astigmatiskt glas kan utöver den avsedda astigmatismen drabbas av ett astigmatiskt fel, vilket förändrar den astigmatiska differensen vid olika blickriktningar. (Se punktuella glasönglas, sid. 161.) Därför är det riktigare att *utom* det vedertagna bruket i oftalmologin, kalla avbildningen med asymmetriska system för *anamorfotisk*. Om man av det asymmetriska glaset begär att punktuell avbildning skall råda, måste varje huvudsnitt bestå av krökningar enligt fig. 114. Det så bestämda ideala glaset skulle då på båda sidor vara försett med toriska ytor. I stället för denna mycket dyrbara utformning görs en sida sfärisk och alla radier beräknas så, att felet mot punktuell avbildning håller sig inom en tolerans upp till 0,25 dptr.

Vid billigare glas — vilka motsvarar meniskglas — är ett huvudsnitt genomgående 6 dptr och enklaste cylindriska eller sfäro-cylindriska glas är försedda med en cylindrisk yta.

Sfäro-cylindriska glas bestäms med sfärens och cylinderns brytkraft, och även toriska glas märks på detta sätt — trots att de inte består av en cylindrisk yta. Endast vissa tillverkare betecknar glaset med resp. huvudsnitts brytkraft. Vid utprovning och på preskriptioner uppges asymmetriska glas genom den sfäriska och cylindriska brytkraften. Man måste då omräkna den sfäro-cylindriska uppgiften i huvudsnittens verkan. Ett glas sf 3,5 c cyl. 2,25 har på den sfäriska sidan i både det första snittet (innehållande cylinderns axel) och i det andra snittet samma verkan, nämligen 3,5 dptr, på den andra sidan är första snittet noll, andra 2,25 dptr.

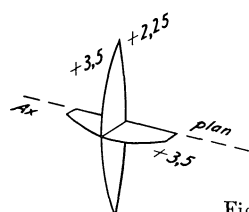


Fig. 116 A

	<i>Snitt 1</i>	<i>Snitt 2</i>
Sf	+3,5 dptr	+3,5 dptr
Cyl	0 „	+2,25 „
	+3,5 dptr	+5,75 dptr

Samma glas kan ersättas med ett annat, med axeln i andra snittet, där sfären har

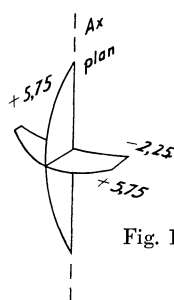


Fig. 116 B

	<i>Snitt 1</i>	<i>Snitt 2</i>
Sf	+5,75 dptr	+5,75 dptr
Cyl	-2,25 „	0 „
	+3,50 dptr	+5,75 dptr

Det toriska sf 3,5 c cyl. 2,25, kommer att t. ex. ha formen

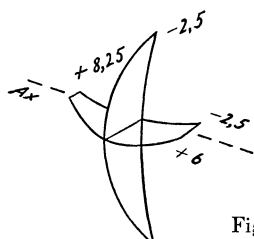


Fig. 116 C

	<i>Snitt 1</i>	<i>Snitt 2</i>
Sf	+6 „	+8,25 „
Tor.	-2,5 dptr	-2,5 dptr
	+3,5 dptr	+5,75 dptr

Den oftast förekommande astigmatismen beror på att ögat i ett snitt uppvisar en större brytkraft. Ögat är följaktligen i detta snitt myopiskt, medan det i det andra snittet är emmetropiskt. Om man tillämpar förklaringen från fig. 115, så avbildas linjer parallella med det starka snittet skarpt på näthinnan och linjer vinkelräta mot dessa inne i glas-

kroppen. För att även få de med det emmetropiska snittet parallella linjerna skarpt avbildade på näthinnan, måste en konkav plancylinder med axeln liggande i det normala emmetropiska snittet införas i strål-gången. Denna ändrar då alltså ingenting på den skarpa delen av bilden, men ifall dess ena brännplan sammanfaller med det myopiska snittets fjärrpunkt, försvagas detta snitt så, att även den hittills i glaskroppen liggande bilden flyttas till näthinnan (fig. 117).

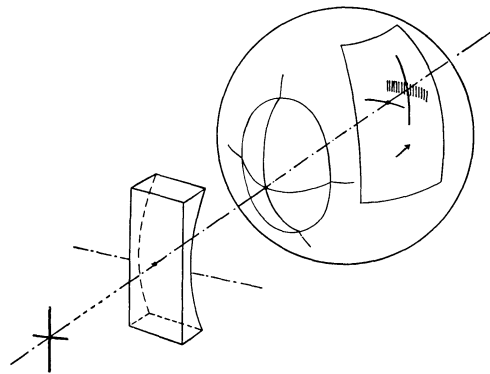


Fig. 117 Astigmatiskt öga, myopiskt i det vertikala snittet. Korrektionen sker med ett plancylindriskt glas, vars axel är horisontal

Likaväl kan ögat i ett snitt vara hypermetropiskt så att — förutsatt att ögat icke ackommoderar — endast linjer vinkelräta med det emmetropiska (normala) snittet avbildas på näthinnan. Korrektionen sker medelst en plankonvex cylinder, vars axel är parallell med det emmetropiska snittet.

Båda dessa enkla asymmetriska fel kan variera, så att båda snitten äro myopiska resp. hypermetropiska, men inte i samma grad (fig. 118). De kan även kombineras med varandra eller med en vanlig symmetrisk ametropi. Ögat blir då kanske närsynt i en riktning och långsynt i en annan. I och för sig är det likgiltigt hur ametropin byggs

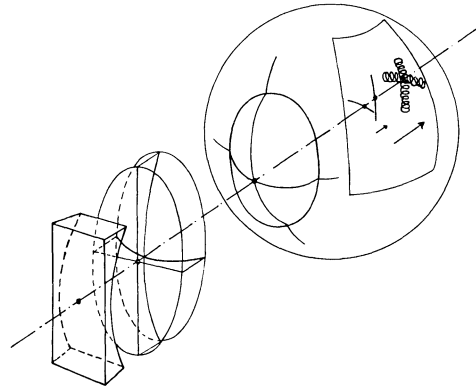


Fig. 118 Astigmatiskt öga, i ett huvudsnitt mera myopiskt. Med en cylinderlins korrigeras astigmatismen (som i fig. 117) och med en negativ lins den återstående myopin (som i fig. 109)

upp av symmetriska fel och de brytande ytornas asymmetri. Man kompenserar alltid den astigmatiska differensen med en cylinder och resten av ametropin med sfäriska ytor.

Man finner att den cylindriska axeln i många fall ligger horisontalt eller symmetriskt i båda ögonen, men för att entydigt bestämma axelläget används det s. k. TABO-schemat (fig. 119).



Fig. 119 TABO-schema

Seendet genom ett asymmetriskt glas följer samma lagar som gäller för symmetrisk ametropi, så att i varje huvudavsnitt en förminskning eller förstoring sker, vars storlek är beroende av resp. refraktionens storlek och art. Objekt kommer då att synas deformerade eller lutande, utan att detta nödvändigtvis skulle betyda en felaktig korrektion.

Avbildningsformler

För elementär optisk avbildning gäller några enkla formler, som här utan bevis skall anföras. För ett objektavstånd a och bildavstånd b gäller:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{a} + \frac{1}{f} \quad 25$$

Om det optiska systemet har en ändlig tjocklek mäts a och b från de s. k. *huvudpunkterna* H , H' , genom vilka man lägger *huvudplanen* h , h' . Man kan tänka sig hela linsens verkan jämnt fördelad till dessa två punkter. Mellan huvudpunkterna resp. huvudplanen förlöper strålarna alltid parallellt, och både deras inbördes avstånd och deras avstånd från systemets toppar beror på konstruktivt utförande, resp. för en enkellins på dess böjning, tjocklek och brytningsindex. En plankonvex lins har h i toppen, avståndet h , h' är ungefär $\frac{1}{3}$ av linstjockleken. Vid en bikonvex lins befinner sig linsens huvudplan ca $\frac{1}{3}$ från dess toppar. En menisklins kan ha en eller båda huvudpunkterna helt utanför linsen. Teleobjektiv är just konstruerade i syfte att flytta huvudplanen ut ur systemet. Vid ett vanligt tripplettobjektiv ligger dess huvudplan nära centrum och kan event. även vara omkastade. Det

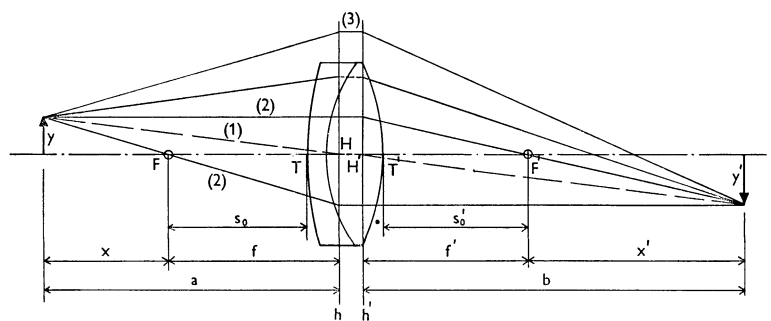


Fig. 120 Strålar och avstånd som används i avbildningsformler

tekniskt mätbara avståndet från brännpunkterna F, F' , till linsens toppar T, T' , kan man beteckna som *snittvidd* (s_0, s_0'). (Fig. 120.)

En annan formel som man bör komma ihåg lyder:

$$x \cdot x' = -f^2 \text{ (Newtons formel)} \quad 26$$

där x resp. x' är objektets och bildens avstånd från resp. brännpunkt.

Bestämning av objekt och bildläge för ett givet system kan beräknas eller konstrueras med hjälp av två strålgropper och några löro-satser:

1. En mot huvudpunkten H riktad stråle lämnar systemet från H' under samma vinkel. (Huvudstråle.)
2. En med axeln parallell stråle bryts mot F' och vice versa.
3. Mellan huvudplanen h och h' förlöper dessa konstruktiva linjer alltid parallellt med axeln, oberoende av strålens lutning.
4. Ljuset förutsätts alltid komma från vänster. Avstånd mätta från H, H' mot ljuset är negativa, andra avstånd är positiva.

Vid beräkning av mer invecklade system avbildar man objektet genom den första ytan (eller linsen), och denna bild betraktas såsom objekt för nästa yta eller lins. Som exempel kan anföras kalkylen i kapitlet som behandlar projektiionsapparater.

Linsens och bildens egenskaper kan lättare och mera logiskt uttryckas med längdmåttens inverterade värde såsom

$$\frac{1}{a} = A; \quad \frac{1}{b} = B; \quad \frac{1}{f} = D; \quad \frac{1}{s_0} = A'_{\infty}$$

Dessa s. k. *vergenser* mäts i *dioptrier* (dptr). 1 dptr är inverterade värdet av 1 m. $\frac{1}{2}$ m är då 2 dptr, 25 cm är 4 dptr. En lins med $f = 30$ cm har således 3,3 dptr. Det är inte bara linsens *styrka* (*brytkraft*) man mäter i dptr, utan även alla bild- och objektlägen. Avbildningslagarna får härigenom en enklare formel

$$B = A + D \quad 27$$

Två tunna, intill varandra belägna linsers sammanlagda brytkraft $D = D_1 + D_2$. Om dessa linser är separerade med ett luftavstånd δ m, blir formeln

$$D = D_1 + D_2 - \delta \cdot D_1 \cdot D_2 \quad 28$$

Mätning av glasögonglas

För att kunna mäta glas med för ett öga lämpliga värden och vara oberoende av glasets böjning och tjocklek, används vergensen $A'_\infty =$ snittviddens inverterade värde (*snittstyrka*). Glasögonglas mäter man alltså inte med brännvidden resp. brytkraften, utan med snittvidden resp. snittstyrkan. Skillnaden är vid tunna glas (konkava och svaga konvexa) utan betydelse. Den gamla metoden att mäta glasögonglas med en handsfärometer ger därför vid starka glas ett icke alldeles rätt resultat. Sfärometern används numera vanligtvis endast för att orientera sig om glasets karaktär eller axelns läge. Snittstyrkan mäter man däremot med *frontofokometer*. Detta instrument arbetar med samma strålgång som förekommer när glaset används framför ögat. Fig. 121 visar ett dylikt instrument schematiskt. Det består av en kikare K , glasanslag O , hjälpsystem S och ett förskjutbart märke M , förenat med en skala. Kikaren kan här betraktas som ett slags dioptriskt filter. Man ser märket M skarpt endast när strålarna som lämnar glaset är parallella. De måste alltså utgå från glasets brännpunkt F'_1 . Man kunde visserligen förskjuta märket M längs en lång bana, men istället avbildar man märket i F'_1 med hjälpsystemet S . Märkets rörelse blir då kortare. I princip spelar det ingen roll var glaset ligger. Man placerar det på ett avstånd e från hjälpsystemet S . Märket M avbildas i glasets brännpunkt F'_1 . Avståndet $\overline{F'_1 F_2} = x' = e - s' - f_2$, där s' är glasets snittvidd och f_2 hjälpsyste-

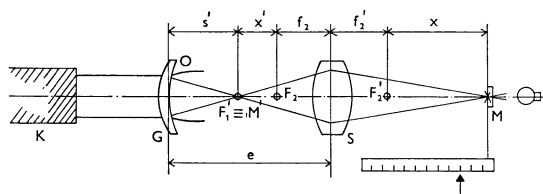


Fig. 121 Fokometer. För att få en jämn skaldelning måste glaset G placeras i hjälpsystemets S brännpunkt F_2

mets brännvidd. För att få märkets bild M' i önskat läge, måste M befinna sig på ett avstånd från F'_2

$$x = -\frac{f_2^2}{x'}$$

$$x = -\frac{f_2^2}{e - s' - f_2}$$

$$\frac{1}{e - s' - f_2} = -\frac{x}{f_2^2}$$

Om man väljer avståndet $e = f_2$, dvs. placerar glaset i hjälpsystemets

$$\text{brännpunkt } F_2, \text{ blir } \frac{1}{s'} = \frac{x'}{f_2^2}$$

$\frac{1}{s'} = A'_\infty$ och för $A'_\infty = 1$ dptr, dvs. för snittstyrkan 1 dptr blir märkets förskjutning $x' = f_2^2$. Om man väljer t. ex. $f_2 = 0,04$ m, blir $x' =$ ett delstreck på skalan motsvarande 1 dptr = 1,6 mm.

O-läget befinner sig i F'_2 och skalan bör sträcka sig åtminstone 20 dptr åt vardera hållet från O-läget räknat. För minusglas flyttas märket från S , för plusglas närmar sig märket hjälpsystemet, vilket på detta sätt begränsar mätområdet. I vårt fall blir det starkaste mätbara glaset $\frac{40}{1,6} = 25$ dptr. Brytkraften av det sammanlagda linssystemet

$S + G$ är alltid detsamma för alla förekommande glas, då glaset placerats i hjälpsystemet S brännpunkt. Det är endast huvudplanet av detta system som förskjuts. Därför förblir storleken av märkets bild M'' i kikaren konstant vid alla glas.

Mätnoggrannheten är först och främst beroende på kikarens förstoring, men denna kan inte överskrida ca $6\times$, då i annat fall synfältet blir för litet. Detta synfält behövs t. ex. vid mätning av prismatiska glas. Yngre oövade personer kan genom ackommodation lätt få ett fel upp till 0,5 dptr. För att förhindra en dylik ackommodation bör märket sakta förflyttas *från minus till plus*. Det första skarpa läget är det rätta, sedan inträder ackommodationen. (Obs! Detta är motsatsen till principen vid inställning av kikarokularet, där man bör skruva från $+$ till $-$.)

Mekaniska utrustningar och märkets samt skalornas utformning varierar vid olika fabrikat. I princip består märket alltid av en cirkel, som vid mätning av asymmetriska glas informerar operatören om huvudsnittets läge (den blir i en eller annan riktning utdragen till ett band). Eventuellt kan märket bestå av ett vridbart kors. Axeln, dvs. det svagaste snittet, är parallell med märkets skarpaste riktning, när dioptriskalan är inställd på det starkaste snittets värde. Fig. 122 visar en fokometer där en projektor i stället för en kikare använts. Fördelen med denna är, att mätnoggrannheten blir oberoende av ackommodationen och mätningen överhuvudtaget lättare att utföra.

Plastiskt seende

Ett par ögon betraktar en tändsticksask. Det vänstra ögat ser då askens frontyta och vänstra plan, det högra ser frontytan och högra planet. Trots att båda synförmåelserna är olika, bearbetas de i hjärnan till ett enda plastiskt synintryck: asken är välorienterad i rummen



Fig. 122 Projektionsfokometer

och man kan lätt placera en tändsticka på dess kant, vilket dock misslyckas om man blundar med ett öga.

Det plastiska eller *stereoskopiska* seendet är begränsat till ca 400 m maximalavstånd och är beroende på ögonens upplösningsförmåga samt förmågan att se plastiskt. Somliga personer med latent eller manifest strabism (skelställning) samt anisometropi (olika ögonrefraktion) har svårt eller kan inte alls uppleva rymdens plastik. Genom forcerad övning kan det stereoskopiska seendet förbättras.

Stereoseendet kan ökas genom att optiskt flytta objektet närmare (kikarförstoring) och genom att öka ögonavståndet med hjälp av speglar. Om man betecknar ögonavståndet b , det optiskt ökade ögonavståndet (basen) B och förstoringen G , blir den totala plastiken

$$S = \frac{B}{b} \cdot G \quad 29$$

En prismakikare $6\times$ ger enligt denna formel ca $12\times$ större plastik

än blotta ögat (objektivavstånd = basen = 120 mm). Man kan t. ex. med stor bas och lång brännvidd fotografera ett objekt och därefter observera det med mindre bas och brännvidd och härigenom öka den totala plastiken. Stereofotografier kan man med viss övning observera direkt, varvid plastiken framträder, men i regel börjar ögonen att konvergera i samband med seende på nära håll och stereoskopin försvinner. Därför använder man sig av *stereoskop* i enklaste form bestående av två lupper med $f = 70 - 100$ mm, vilka avbildar stereobilder på långt avstånd och hindrar på detta sätt ögonaxlarna att konvergera. För stora bildformat använder man spegelstereoskop (fig. 123) eventuellt försett med två försättskikare. Stereoskopet kan kompletteras med en stereomikrometer med vars hjälp man kan utföra mätningar och beräkna djupskillnader.

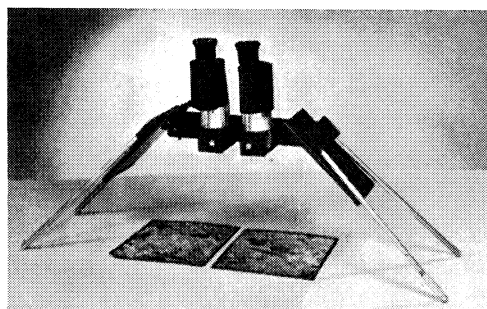


Fig. 123 Spegelstereoskop

Stereoskopet — 1800-talets sällskapslek — utvecklades till imponerande stereofotogrammetriska instrument (se Hallert: Fotogrammetri, 1953) och till stereotelemetrar (sid. 122).

Att använda två bredvid varandra liggande bilder är ofta ovidkommande eller omöjligt. Man lägger därför dessa över varandra och vidtar åtgärder för att varje öga skall se endast en tillhörande bild. Man färgar dessa i komplementfärgerna rött och grönt och ser sedan med glasen i motsvarande färger. Man kan även projicera två bilder över varandra genom två korsade polaroidfolier. Ögonen måste förses med

glasögon med korsade polaroider (alltså ej normala i handeln förekommande polaroidglasögon) för att utsläcka den för varje öga ovidkommande bilden.

Det finns en hel del mekaniska metoder — man projicerar den högra och vänstra bilden hastigt efter varandra och ser genom glasögon med ett bländarpar som arbetar synkront, eller också använder man särskilt konstruerad projektduk.

Vid ett binokulärt instrument måste de optiska axlarnas läge noga beaktas. Ögonen utjämnar vanligen ett mindre parallellitetsfel. — Som den yttersta toleransen kan antas 2° för konvergens, 1° för divergens och ca $\frac{1}{2}^\circ$ för höjdfelet. Kvalitetskikare bör ligga vid endast 25 % av dessa värden, och instrument för stereoskopisk mätning måste vara ännu noggrannare.

Glasögonoptikern kan härav dra den slutsatsen, att för ögonavståndet och glasens centricitet bör största omsorg ägnas åt höjdfelet, medan en större avvikelse kan tillåtas utåt vid konvexa och inåt vid konkava glas. Den tolerabla decentreringens storlek beror dock på glasets styrka.

För att korrigera ögonens skelställning (strabism) decentrerar man avsiktligt ett glas, eller slipar det excentriskt. Decentreras 1 dptr starkt glas 10 mm, flyttas även brännpunkten 10 mm. En sådan avvikelse (10 mm på 1 m avstånd) kallas för 1 prismadioptri (prdptr). Ett 10 dptr starkt glas decentreras endast 1 mm för att få en verkan av 1 dptr; ett 2 dptr glas decentrerat 10 mm ger 2 dptr etc.

Interferens

En lysande punkt är källan till en elektromagnetisk vågrörelse, som man så länge våglängden ligger mellan 0,0004 och 0,0008 mm betecknar som ljus. Vid varje tidpunkt bildar rörelsens front en yta — *vågfront* — som är plan då ljuskällan befinner sig långt borta och sfärisk när den är närbelägen. Optiska system och ytor omformar och deformerar vågfronten. Denna deformation analyseras med hjälp av geometrisk optik och benämns avbildningsfel. För att bättre kunna förstå olika samband, opererar man ofta med en tänkt linje, normal till vågfronten — *ljusstrålen*.

Om man fördröjer en del av den utsända vågfronten genom att låta den gå en längre väg, och sedan återigen för ihop den med samma eller en annan vågfront emanerande från samma källa, så adderas

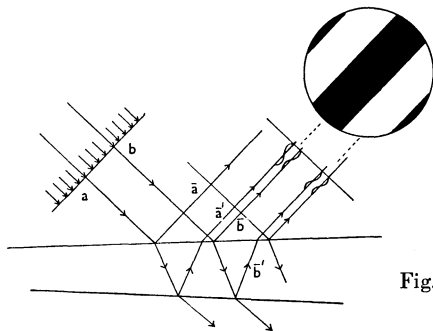


Fig. 124 Interferens

svängningarnas amplitud, och om vägskillnaden (fasförskjutningen) är lämpligt vald, utsläcks eller förstärks ljuset vid punkten ifråga.

Det finns flera sätt att fördröja eller påskynda vågfronten. Man kan t. ex. låta ljuset träffa en såpbubbla eller låta det passera ett tunt luftskikt mellan två glasplattor. En vågfront ab , av monokromatiskt ljus, träffar skiktets övre yta (fig. 124), reflekteras delvis som front $\overline{ab}$ och bryts delvis in och reflekteras på undre ytan som vågfront $\overline{a'b'}$. Om fasen av $\overline{a'}$ och $\overline{b}$ är omvänd, utsläcks svängningarna och denna punkt observeras av ögat som svart. Är emellertid skiktet en kil, blir fasen på andra ställen likformig, varvid ljuset här förstärks. Ögat kommer då att se omväxlande ljusa och svarta s. k. *interferensfransar*, som förbinder alla punkter där skiktets tjocklek är $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$ våglängd. Ifall det använda ljuset är vitt, utsläcks på dessa ställen alltid en färg och av resterande färger bildas färgband. Effekten kan också observeras i genomsikt, men är då svagare.

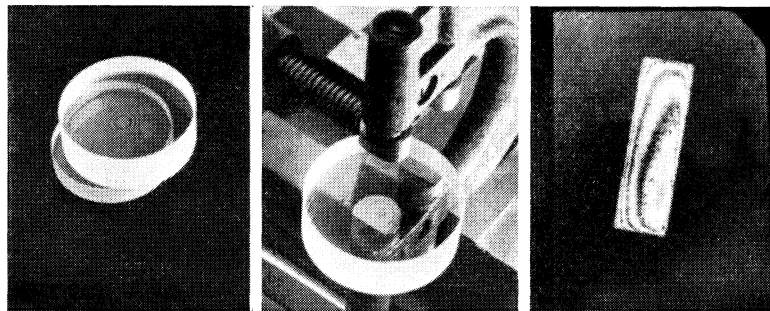


Fig. 125 Kontroll med en plantolk

Interferensen i ett tunt luftskikt är för en optisk polerare ett värdefullt hjälpmedel vid kontroll av optiska detaljer. Han tillverkar en tolk av glas eller kvarts och placerar denna på en polerad yta, varvid interferensfransar uppträder, ofta i form av koncentriska ringar, parallella eller oregelbundna linjer. Den undersökta ytan ligger då utbredd som terrängen på en karta, försedd med noggrant lagda nivålinjer

med höjdskillnad av $0,5 \lambda$ eller ca $0,3 \mu$. Man toleranssätter ytans tillåtna avvikelse i antalet ringar per linsyta eller genom att ange den minsta tillåtna diametern av t. ex. den tredje ringen.

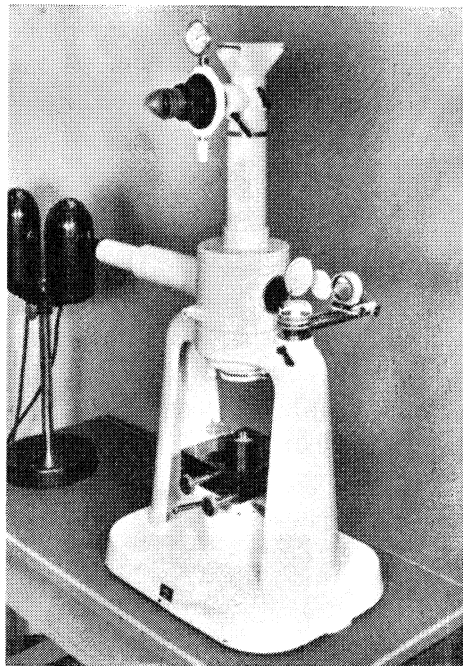


Fig. 126 Interferometer. Kontroll av ett takprisma med Michelsonspegel (Nife)

På liknande sätt används plantolkar av glas eller kvarts för kontroll av passbitar, hakmått och läppade ytor i allmänhet. Fig. 125 visar de interferensbilder som uppstår vid kontroll av en sfärisk yta, en passbit och ett hakmått.

Man kan dela vågfronten genom att låta ett parallellt strålknippe dels reflekteras, dels passera en snedställd planparallell glasplatta och återkasta strålar av två planspeglar. Vid observation genom delningsplattan syns sedan varje deformation av vågfronten och/eller snedställning av speglarna som en interferensbild.

180 INTERFERENS OCH REFLEXSKYDD

Den kända Michelson-interferensmetern är byggd enligt denna princip och har haft stor betydelse för ljusforskningen. Fig. 126 visar en

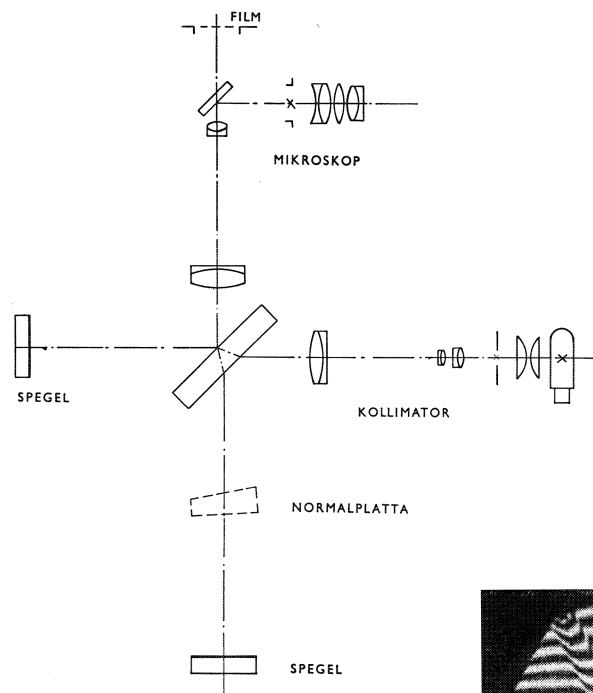


Fig. 127 Interferometer (schematisk)

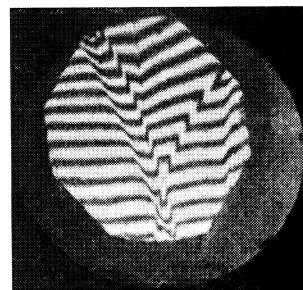


Fig. 128 Ett slirigt prisma i interferometer (enl. fig. 126)

version av denna, avsedd för kontroll av optiska element. Optiken har schematiserats på fig. 127. Man ser delningsplattan, kollimatorobjektivet, vilket avbildar ljuskällans bild på oändligt avstånd, de båda

speglarna samt ett svagt mätmikroskop kombinerat med en spegel-reflexkamera för avläsning och registrering. Objektet placeras framför endera av de båda speglarna. Ofta föredrar man att uppge noggrannheten av ett optiskt element som den totala deformationen av vågfronten i stället för varje ytas fel. Interferensbilden i ovanstående instrument ger just denna totaldeformation (fig. 128). En normalplatta möjliggör dessutom observation av interferens i tunna skikt enligt den först omnämnda metoden.

Interferens i tunna skikt kan göras tydligare och smalare om man transparentförsilvrar de båda reflekterande ytorna. En dylik interferometer (Fabry-Pérot) består av två ytterst plana, transparentförsilvrade parallella glasplattor, mellan vilka ljuset upprepade gånger återkastas, varvid flera strålar interfererar. (Multipelinterferens.)

Enligt samma princip tillverkas s. k. *interferensfilter*, vilka består av en glasplatta försedd med först ett tunt genomskinligt silverskikt, därpå ett magnesiumfluoridskikt av lämplig tjocklek och därefter ännu ett genomskinligt silverskikt. Verkningsgraden med dylika filter är så hög, att dessa ofta kan ersätta monokromatorer. Fig. 129 visar ett mikroskop som med hjälp av multipelinterferensen mäter ytfinheten på mindre än en milliondels millimeter när. Instrumentets schema liknar det på fig. 127, men normalplattan är transparent metalliserad.

Reflexskydd

Vid genomgång till ett annat medium går större delen av ljuset igenom och bryts. En liten del däremot reflekteras, och reflektionen blir starkare ju större differensen är mellan de båda mediernas brytningsindex. Tabellen på fig. 132 anger reflektionen i % för de vanligen förekommande optiska glasen i luft, för en kittyta mellan kronglas och flint samt för diamant. Man ser att på varje glasyta reflekteras mellan

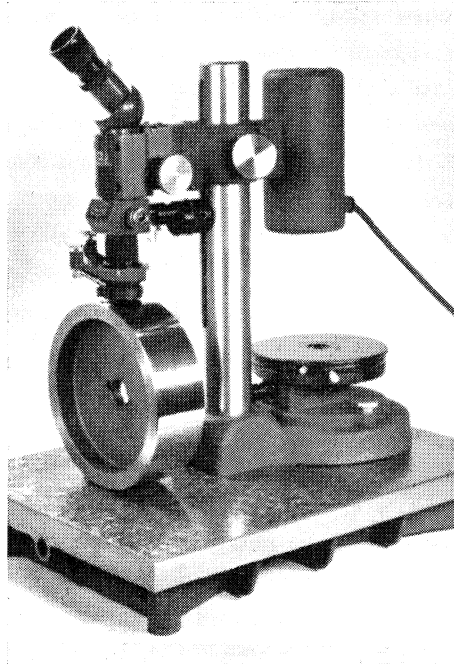


Fig. 129 Multipelinterferensmikroskop (CEJ — Nife)

4—7 %, att även på en kittad yta uppstår en svag reflex och att diamantens lyster beror, förutom på ljusbrytningen, även på dess reflektionsförmåga.

Kronglas, $n = 1,5$	4
Flintglas, $n = 1,6$	5,3
Tungt flintglas, $n = 1,75$	7,4
Kittyta kron/flint	0,1
Titandioxid, $n = 2,5$	18,5
Magnesiumfluorid, $n = 1,39$	2,7
Diamant, $n = 2,4$	17

Fig. 130 Reflektionsförmåga hos olika glas och andra ämnen

Reflektionsfaktorn ökar med infallsvinkeln, men kan inom praktiska gränser betraktas som konstant. Ett så pass vanligt instrument som en prismakikare har tio mot luft angränsande glasytor, och ljusförlusten ligger då mellan 40—50 %. Enkla 3-linsiga fotoobjektiv har gentemot invecklade ljusstarka system förhållandevis små reflektionsförluster. Komplicerade periskop med reversionsprismor absorberar och reflekterar mer ljus än de släpper igenom.

Det reflekterade ljuset återkastas av nästföljande glasyta samt av instrumentets väggar, vilket åstadkommer att en kontrastminskande grå hinna uppstår över bilden eller ger upphov till en eller flera mer eller mindre tydliga reflexbilder i synfältet. I mycket ogynnsamma fall kan dessa omöjliggöra att en i övrigt lyckad lösning kan komma till användning eller tvinga konstruktören till drastiska åtgärder för dessa reflexers eliminering. System med till bildpunkten koncentriska ytor, symmetriska system och högbrytande glas är särskilt farliga.

År 1892 fann Taylor, konstruktören av den första tripletten, att gamla objektiv med anlöpta ytor ger tydligare och ljusstarkare bilder

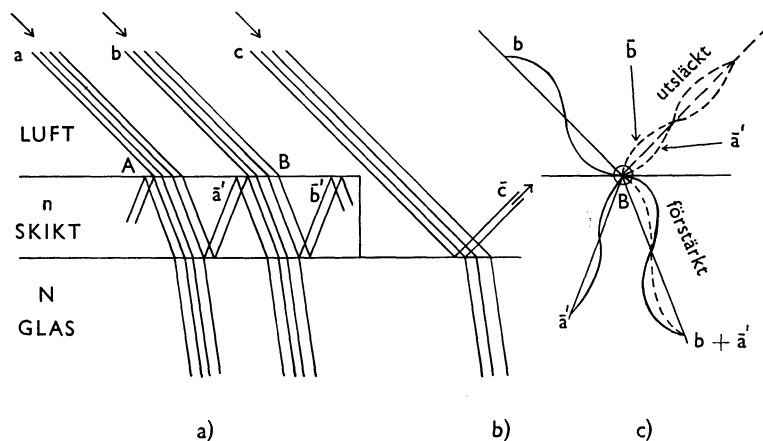


Fig. 131 a. En reflexskyddad yta släpper igenom allt ljus. b. På en obehandlad yta reflekteras 4—7 %. c. Faslåge i punkten B

än nypolerade linser. Effekten har ingående undersökts 1934—40 och olika metoder har använts för framställning av sådana beläggningar. Numera finns det knappast något instrument som inte förses med reflexskydd. Detta går under benämningarna antireflexbehandling, blooming, coating, couche antiréfléchissante, Vergütung och Entspiegelung. Det är dock inte alltid som reflexskyddet har något berättigande.

Man belägger en glasyta med ett mycket tunt skikt, vars brytningsindex är lägre än glasets (fig. 131). Skiftet träffas av två till samma monokromatiska knippe hörande strålar a och b . Båda bryts och båda reflekteras delvis på gränsytan luft-skikt och gränsytan skikt-glas. Den på nedre gränsytan reflekterade delen $\bar{a}'$ av strålen a kan, när den träffar punkten B, med lämplig amplitud och fas släcka ut den reflekterade strålen $\bar{b}$ genom interferens (se även fig. 124).

Reflektionen mot skiktytan kommer alltså inte alls till stånd och strålen $\bar{a}'$ reflekteras vid B tillbaka och förstärker $\bar{b}$, vilken utan förlust passerar det tunna skiktet. Allt ljus går igenom och ingen reflex uppstår. En stråle c , som träffar en obelagd glasyta, lider däremot en förlust $\bar{c}$. (Vid B sker två olika slags reflektioner: strålen b reflekteras mot tätare medium, strålen $\bar{a}'$ mot tunnare. I det första fallet förskjuts vågens fas om $\frac{\lambda}{2}$, men däremot inte i det andra.)

Man kan tänka sig det tunna skiktet utformat som en svag kil (fig. 132). Reflexen kommer då att visa en rad svarta och ljusa interferensfransar. I genomsikt observerar man en liknande effekt men med omvänt intensitetsförlopp. Ett ställe B , som är svart vid reflexen, ses vitt i genomsikt. Gör man nu ett tankeexperiment och vrider skiktets övre yta kring B , så blir det mörka bandet i reflektionsriktningen allt bredare och bredare tills det täcker hela synfältet. Samtidigt brer det ljusa bandet i genomsikt ut sig tills hela ytan lyser starkare än vad den obelagda delen c gör.

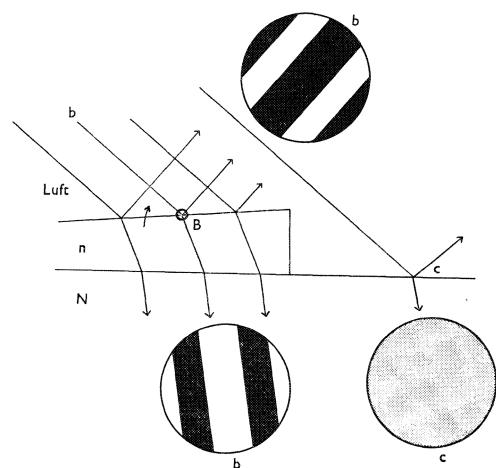


Fig. 132 Tankeexperiment med antireflexbehandling: vid vridning av skiktets övre yta kring B utbreddes det mörka interferensbandet $\bar{b}$ (i reflex) och samtidigt det ljusa bandet b (i genomsikt). Ingenting går förlorat som vid c

Liknande klassiska experiment har utförts och förklarats av bl. a. Newton, Fresnel och Young, dock utan att man dragit slutsatser i denna riktning.

Man kan alltså genom att belägga en glasyta med ett tunt skikt av lägre brytningsindex minska reflektionen och öka den genomsläppta ljusmängden, dvs. tillgodogöra sig den energi som genom reflektionen skulle gått förlorad. Det bästa resultatet uppnås med en viss bestämd tjocklek och visst brytningsindex på skiktet.

För att ge $\bar{a}'$ den lämpliga fasförskjutningen, måste skiktets tjocklek vara $\lambda/4$ och för att strålarna $\bar{a}'$:s och $\bar{b}$:s intensitet (amplitud) skall bli lika (i annat fall kan de inte utsläckas fullständigt), måste brytningsindiciernas förhållande på första och andra gränssytan vara lika. Dvs. $1:n = n:N$, varav $n = \sqrt{N}$.

Följaktligen bör beläggningen ha en tjocklek av ca 0,00014 mm samt ett brytningsindex av 1,2—1,3. Framställning av dylika tunna skikt är inte omöjlig, däremot existerar det knappast något fast, genomskinligt ämne med så lågt brytningsindex med vilket ett skikt med lämplig hårdhet skall kunna framställas. Med mikroporösa hinner på kiselbasis

kan man verkligen nå en hög verkningsgrad, men beläggningsen blir så lös att den lätt kan torkas bort, varför endast skyddade (inbyggda) linsytor kan behandlas. I regel använder man magnesiumfluorid eller natriumfluorid med brytningsindex 1,39 resp. 1,33, vilka ger ett tämligen hårt skikt.

Skiktets tjocklek bestäms av den våglängd som man önskar utsläcka, vanligen den gula. Reflektionen av röda och blåviolettera strålar minskar också, men inte i samma grad, med påföljd att linsytan vid påseende får den typiska blåroda färgen. Vid ett instrument med många linsytor, försedda med precis samma skikt tjocklek, får bilden en gulaktig ton. En ojämnhet i skikt tjocklekarna i ett dylikt instrument är en fördel.

Framställning av dessa beläggningar sker enligt olika metoder, och man kan säkert anta att utvecklingen inte är ett avslutat kapitel. Ett sätt är att doppa linsen i en lämplig vätska eller att låta vätska droppa ner på en hastigt roterande lins. Denna metod ger god verkningsgrad, men beläggningsen är mjuk. En annan metod är att genom en noggrant exponerad etsning framkalla ett kiselnät av lämplig tjocklek på glasytan, men det är förknippat med vissa svårigheter att avpassa doseringen för olika glassorter.

I industriell drift behandlas linserna för närvarande i särskilda högvacuumanläggningar, där ämnet ifråga, t. ex. magnesiumfluorid, upphettas genom ett motstånd och kondenseras på linsytorna. Man strävar efter högeffektiva och samtidigt hårda skikt. Ett sätt är att belägga glaset med flera skikt på varandra, först med högt och sedan med sjunkande index.

Vacuumtekniken anlitas numera även för att förse glasytor med skikt med motsatt verkan, dvs. hög reflektionsförmåga, samt för metallisering av speglar.

Litteraturförteckning

AVBILDNINGSFEL, OPTISKA BERÄKNINGAR:

1. *D. Argentieri*: *Ottica industriale. Milano 1942*
2. *M. Berek*: *Grundlagen der praktischen Optik. Berlin 1930*
3. *A. E. Conrady*: *Applied Optics. Oxford 1929*
4. *B. K. Johnson*: *Optical Design. London 1948*

FOTOOBJEKTIV:

5. *H. Bäckström*: *Fotografisk handbok. Stockholm 1942*
6. *R. Kingslake*: *Lenses in Photography. Rochester 1951*
(Se även 8, 10, 12, 13, 15, 16)

MIKROSKOP:

7. *Bennett-Osterberg-Jupnik-Richards*: *Phase Microscopy. New York 1951*
8. *K. Michel*: *Theorie des Mikroskops. Stuttgart 1950*
9. *Muñoz-Chariper*: *The Microscope and Its Use. Brooklyn 1943*
(Se även 12, 13, 14, 15, 16, 21)

KIKARE, AVSTÅNDSINSTRUMENT:

10. *A. König*: *Die Fernrohre und Entfernungsmesser. Berlin 1937*
11. *P. Mazuir*: *Traité de télémétrie. Paris*
(Se även 12, 13, 15, 16)

ALLMÄN INSTRUMENTALOPTIK:

12. *Habell-Cox*: *Engineering Optics. London 1948*
13. *L. C. Martin*: *Technical Optics. London 1950*
14. *K. Röntsch*: *Die Optik in der Feinmesstechnik. München 1949*
15. *Vogl-Hajda-Kral*: *Praktická optika. Prag 1938*

SPEGELOPTIK:

16. *A. Bowers*: *Achievements in Optics. Amsterdam 1946*

ÖGONOPTIK:

17. *Henker-Pistor*: *Die Brille als optische Instrument. Weimar 1927*
18. *Yves Le Grand*: *Optique Physiologique. Paris 1946*
(Se även 8, 10, 13, 15)

188 LITTERATURFÖRTECKNING

BINOKULÄRT SEENDE OCH BINOKULÄRA INSTRUMENT:

- 19. *B. Hallert*: Fotogrammetri. *Stockholm 1953*
- 20. *K. N. Ogle*: Binocular vision. *Philadelphia 1950*
- 21. *M. von Rohr*: Die binokularen Instrumente

(Se även 10, 11, 13, 15, 17)

INTERFERENS:

- 22. *C. Candler*: Modern Interferometers. *London 1951*
- 23. *Tolansky*: Multiple-beam Interferometry. *Oxford 1948*

(Se även 13, 14)

FÖR FORTSATT STUDIUM HÄNVISAS TILL FÖLJANDE TIDSKRIFTER:

Zeitschrift für Instrumentenkunde
Revue d'Optique
Journal of Optical Society
Optik
Optica
Optiknämndens Handlingar

Instrumentaloptik

De optiska instrumenten har nått ut till nya förbrukare inom industri, teknik och forskning och fått vidsträckt användning i vardagslivet. Men länge har en omfattande, saklig redogörel-

Instrumentens konstruktion beskrivs lättförståeligt och klart, nya tekniska landvinningar presenteras, deras möjligheter och begränsningar klarläggs. Utan tvekan kommer Vogls bok att skapa ny insikt om och bättre förståelse för de värdefulla och dyrbara instrument som vi har i de optiska apparaterna och ytterligare öka deras användbarhet.

Prof. Manne Siegbahn i förordet.

Pris 23:50, inb. 27:-

5437