

Inhoudstafel

Inhoudstafel	pagina 1
Bibliografie	pagina 2
Refractie van het licht	pagina 3
Breking op een vlakke glasplaat	pagina 3
Breking door een prisma	pagina 4
Lichtpunt, golffront en lichtstraal	pagina 5
Breking door lenzen	pagina 7
Beeldkonstruktie bij bolle en holle lenzen.	pagina 8
Het ontstaan van beeld bij bolle lenzen	pagina 9
a) Voorwerpsafstand groter dan dubbele brandpuntsafstand	pagina 9
b) Voorwerpsafstand gelijk aan dubbele brandpuntsafstand	pagina 10
c) Voorwerpsafstand iets kleiner dan dubbele brandpuntsafstand	pagina 10
d) Voorwerp precies op brandpuntsafstand	pagina 10
e) Voorwerp binnen de enkelvoudige brandpuntsafstand	pagina 11
Gevolgtrekkingen	pagina 11
Afbeeldingsomstandigheden	pagina 11
Tekens en begrippen	pagina 12
Lenzen	pagina 12
1. Sferische lenzen	pagina 12
2. Asferische lenzen	pagina 13
Van ruw glasblok tot lens	
1. Vervaardiging van sferische lenzen	pagina 14
2. Vervaardiging van asferische lenzen	pagina 15
De beeldpositie	pagina 16
Hoofdpunten	pagina 17
Krommingsstralen, toppunten, topbrandpuntsafstand	pagina 18
De Beeldkonstruktie	pagina 18
De brekingskracht of het brekend vermogen	pagina 19
Scherptediepte	pagina 21
a/ Scherpte	pagina 21
b/ Verstrooiingscirkel (onscherptecirkel)	pagina 21
c/ Scherptediepte en diafragma-opening	pagina 23
d/ Grondregels voor scherptediepte	pagina 24
d/ Hyperfocale afstand b	pagina 25
e/ Berekening van scherptediepte	pagina 28
Afbeeldingsfouten en Correctie	pagina 30
1. Diffractie of buiging	pagina 30
2. Interferentie en (interne) reflecties	pagina 31
3. Chromatische aberratie	pagina 35
4. Sferische aberratie	pagina 36
5. Astigmatisme en beeldveldwielving	pagina 38
6. Coma	pagina 40
7. Distorsie of vertekening	pagina 40
8. Vignettering of lichtafval	pagina 41
Voorstelling van de korrektietoestand	pagina 44
1. Grafiek van Von Rohr	pagina 44
2. Funktionale grafiek	panina 45
3. Scheidend vermogen	pagina 46
4. Modulatieoverdrachtsfunctie MTF	pagina 47
Perspectief	pagina 53

Bibliografie

Meeste tekst en illustraties komen uit volgende boeken:

Fototechniek

Peter Charpentier

Prismaboeken 1974

Optique et prises de vues

Alain Monclin

© FEMIS 1994

= het meest complete werk over cinematografische optika

Principes van de Fototechniek

Jost. J. Marchesi

Een FOTO Special uitgave

= zowel Optika, Sensitometrie als inleiding in de Fotografische Scheikunde

Time Life Boeken over Fotografie

Andere Lektuur:

puur technisch:

Engels:

American Cinematographer

Maandelijks Tijdschrift

The Five C's of Cinematography

Machelli

Lighting for Television & Motion Pictures

Gerald Millerson

Focal Press

The Focal Encyclopedia of Film & Television Techniques

Focal Press

The Technique of Film Editing

Carl Reisz

Focal Press

American Cinematographer Manual

The ASC-Press

Frans:

Lumière et Son

Jean Brismée

Editions MPC

Traité de Photographie

Jean Charpié

Editions VM-Paris

Photographie de la théorie à la pratique

Jean Florine

Vaillant Carmanne Liège

technisch & artistiek:

Frans:

Lumière Actrice

Charlie Van Damme

FEMIS(Paris)

Des Lumières & des Ombres

Henri Alekan

Le Sycomore (Paris)

Engels:

Film Lighting

Kris Malkiewicz

Prentice Hall Press (N.Y.)

Refractie of breking van het licht.

De snelheid van het licht was aan de hand van astronomische waarnemingen door Römer in 1675 al bepaald, de door hem gevonden waarde van 300.000 km per seconde verschilt verbazingwekkend weinig met de in onze tijd door nauwkeurige experimenten (o.a. met behulp van radar) vastgestelde snelheid (± 299.792 km per seconde). Deze waarde geldt voor het luchtledig, de snelheid van het licht in een andere tussenstof of medium (dat is een stof waarin het licht zich kan voortplanten, m.a.w. een doorzichtige stof) is altijd kleiner, in lucht maar heel weinig kleiner, in glas echter is de snelheid gemiddeld niet meer dan $2/3$ van die in het luchtledig. Het gevolg is dat het licht bij overgang van het ene medium in het andere, bijvoorbeeld van lucht in glas of omgekeerd, een vertraging of versnelling ondervindt. De scheiding tussen de twee media, in dit geval dus de oppervlakte van het glas, noemt men het grensvlak. Ontmoet nu een aankomende lichtgolf zo'n grensvlak onder een bepaalde hoek (de lichtstraal dus niet loodrecht op het grensvlak) dan zal hij van

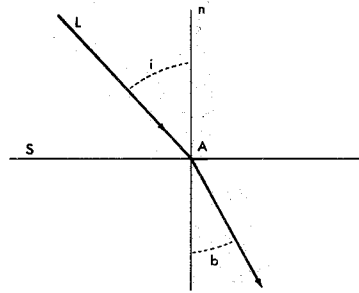
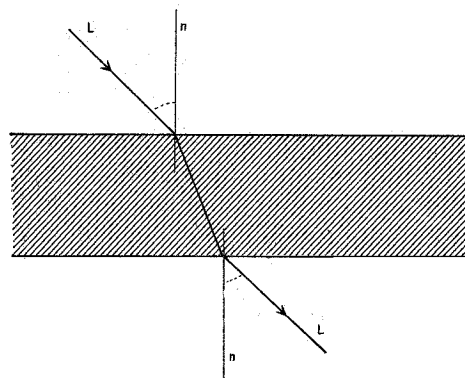


fig: Breking of refractie. L is de lichtstraal, S het scheidingsvlak, n de normaal in het punt van inval A, i de invalshoek, b de brekingshoek.

richting veranderen. We zouden dit op eenvoudige wijze kunnen verklaren door ons voor te stellen dat een gedeelte van de golven eerder afgeremd wordt dan het andere deel. Dit veranderen van richting noemt men de breking of refractie van een lichtstraal. In de figuur zien we hoe een lichtstraal bij de overgang van lucht in glas gebroken wordt. Een lijn door het punt van inval A, loodrecht op het scheidingsvlak noemt men **de normaal**. Bij overgang van lucht naar glas wordt de lichtstraal in het scheidingsvlak gebroken naar de normaal toe, bij overgang van glas naar lucht van de normaal af.



De hoek tussen de invallende straal en de normaal (i) heet invalshoek, die tussen de gebroken straal en de normaal (b) heet brekingshoek. Valt het licht door een vlakke glazen plaat (figuur 4) waarvan de scheidingsvlakken dus evenwijdig zijn, dan vindt het na twee maal breking zijn oorspronkelijke richting terug, maar is iets verschoven ten opzichte van

het verlengde der invallende straal. Die verschuiving zal groter zijn naarmate de glasplaat dikker is.

(herhaling) Het prisma en het spectrum

Maken de scheidingsvlakken van het glaslichaam een zekere hoek met elkaar dan verandert de uittrekkende straal van richting ten opzichte van de invallende straal (figuur 5). Deze afwijking van de oorspronkelijke richting noemt men deviatie, de hoek die de beide scheidingsvlakken van het glas maken heet brekende hoek. Zo'n glaslichaam waarvan de scheidingsvlakken bepaalde hoeken met elkaar vormen noemt men een prisma. In de figuur

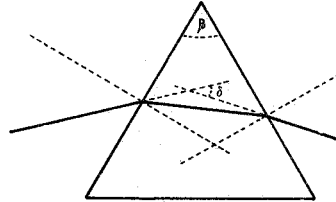


fig..Deviatie van een lichtstraal door een prisma. A is de brekende hoek, b is de deviatiehoek.

zien we de gang van een lichtstraal in een prisma, in dit geval een driekante glazen staaf. De straal wordt tweemaal gebroken en er is een uitgesproken deviatie van de straal na passage door het glaslichaam. Neemt men de proef met verschillende kleuren (golflengten) licht dan blijkt de deviatie groter voor licht van kortere golflengte. Laten we een smalle bundel wit licht door een prisma vallen dan worden de samenstellende kleuren licht in volgorde van rood naar violet sterker gebroken, het witte licht wordt in kleuren ontleed (dit verschijnsel heet kleurschifting of dispersie) en kan als een gekleurde band op een scherm opgevangen worden. Zo'n gekleurde band licht heet spectrum. Het op dit principe berustende instrument, de spectroscop, wordt in de wetenschap (astronomie, natuurkunde en scheikunde) veelvuldig gebruikt daar men uit de samenstelling van het licht voor de

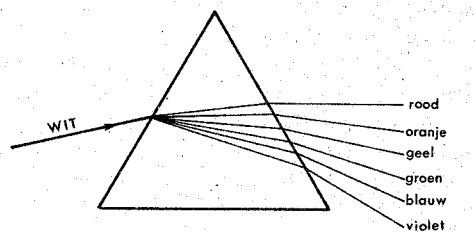


fig. Kleurschifting of dispersie van wit licht door een prisma.

verschillende wetenschappen belangrijke conclusies kan trekken. Zo kan de sterrenkundige aan de hand van het spectrum van het licht van een ster (bijvoorbeeld de zon) bepalen uit welke elementen de materie van die ster is opgebouwd. Brengt men een kleine hoeveelheid van een of andere stof in een kleurloze gasvlam dan gaat, al naar de elementen waaruit die stof bestaat, de gloeiende damp van bepaalde elementen licht van bepaalde golflengte uitstralen.' De spectroscop onthult de scheikundige dan met welk element hij te maken heeft. Bekend is bijvoorbeeld het spectrum van gloeiende natriumdamp: één smalle gele lijn. Men spreekt in dit geval van een lijnenspectrum. Het spectrum van gloeiende gassen en dampen is altijd een lijnenspectrum. Dit in tegenstelling met het licht dat door een in gloeiende toestand verkerend vast lichaam, bijvoorbeeld een metaal, uitgezonden wordt. Dat levert een zogenaamd continu spectrum, dat wil zeggen dat alle kleuren van het zichtbare licht in het spectrum vloeïend, zonder onderbreking, in elkaar overgaan. Bij

voldoend hoge temperatuur reikt dit spectrum tot in het gebied van de kortste golflengten (violet), bij lagere temperaturen ontbreken het eerst de lichtstralen van kortere golflengten.

Valt licht met een continu spectrum door een stof of een oplossing daarvan, of door een gas of damp, dan blijken bepaalde golflengten licht te verdwijnen, zij worden blijkbaar geabsorbeerd door de betreffende stof. Men noemt het overblijvende spectrum, waarin dus donkere lijnen voorkomen, een absorptiespectrum. Het licht van de zon bijvoorbeeld levert op het eerste gezicht een continu spectrum. Bij nauwkeurige waarneming blijken er evenwel een groot aantal zeer smalle donkere lijnen in voor te komen, naar de ontdekker de lijnen van Fraunhofer genoemd. Zij worden veroorzaakt doordat van het licht uit het inwendige van de zon bepaalde lichtsoorten in de buitenste gaslaag (de chromosfeer) geabsorbeerd worden. Volgens Kirchhoff en Bunsen worden door een gas of damp die gedeelten uit het spectrum geabsorbeerd die dat gas of die damp in gloeiende toestand zelf zou uitstralen. Het spectrum van wit licht (dat uit alle golflengten licht bestaat) dat door de damp van natrium valt levert een spectrum op met één enkele donkere lijn juist op de plaats van de gele lijn die het licht van gloeiende natriumdamp zou opleveren. Dit laatste noemt men ook wel emissiespectrum (emissie = uitzending). Het absorptiespectrum en het emissiespectrum zijn karakteristiek voor de stof die absorbeert, respectievelijk emitteert. Uit het absorptiespectrum van de zon kan men afleiden welke elementen voorkomen in de chromosfeer. De betekenis van het continu spectrum of het lijnenspectrum van verschillende lichtbronnen voor fotografie hebben we reeds behandeld.

(herhaling) Lichtpunt, golffront en lichtstraal

Het licht moet zijn reis door de ruimte ergens beginnen. Deze oorsprong van het licht noemen we een lichtpunt. Dit kan bijvoorbeeld een punt zijn in ons onderwerp, dat verlicht wordt en daardoor licht reflecteert. Vanuit zo'n punt straalt licht naar alle kanten uit, mits het daarin niet verhinderd wordt door een of ander obstakel. Nemen we nu eens aan dat zo'n lichtpunt volkomen vrij in de ruimte hangt. We moeten daarbij de fictie invoeren dat dat punt oneindig klein is, dit terwille van de voorstelling die wij ons willen gaan maken. Zo'n oneindig klein lichtpunt zal inderdaad slechts fictief (niet werkelijk, doch slechts in de verbeelding bestaand) kunnen zijn: een oneindig klein lichtpunt kan nooit een werkelijk bestaande, meetbare (dus eindige) hoeveelheid licht of energie uitstralen.

Ons denkbeeldige lichtpunt P begint op een bepaald moment licht uit te stralen en wel naar alle kanten. We kunnen ons nu voorstellen dat dat licht na een zekere tijd een bepaalde afstand tot dat punt afgelegd heeft. Daar de lichtgolven zich in alle richtingen met dezelfde snelheid voortplanten zal op dat tijdstip alle licht op dezelfde afstand van het lichtpunt zijn. De punten die het op dat tijdstip bereikt heeft, liggen dus op het oppervlak van een bol met het oorspronkelijke lichtpunt als middelpunt. Van licht dat op hetzelfde tijdstip ontstaan is (m.a.w. dat op hetzelfde tijdstip zijn reis door de ruimte begonnen is) spreken

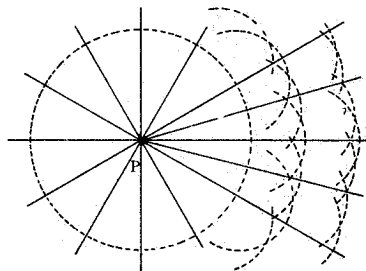
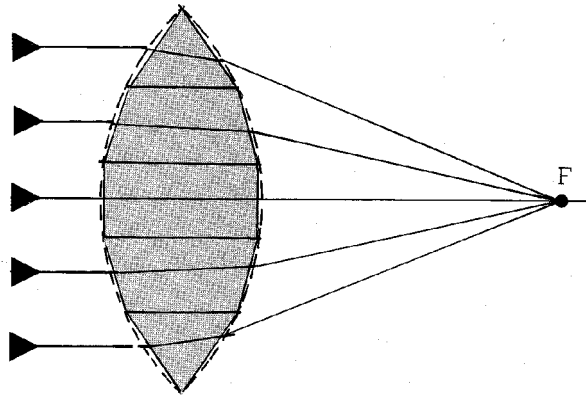


fig. Lichtpunt, lichtstralen, golffront en secundaire golffronten.

we als van licht van dezelfde leeftijd. Het zojuist genoemde boloppervlak is als het ware een zich naar alle richtingen uitbreidend front van lichtgolven van licht van dezelfde leeftijd. Men noemt het een golffront. Lijnen getrokken vanuit het lichtpunt naar het boloppervlak of golffront geven de richting aan waarin het licht zich voortplant. Men noemt die lijnen de golfnormalen. Als straal van de bol staan zij altijd loodrecht op dit golffront. Zo'n lijn geeft dus in feite een lichtstraal weer. Komend vanuit een ,oneindig' klein punt zal die lichtstraal oneindig dun zijn. Natuurlijk is de oneindig dunne lichtstraal ook weer een fictie. Stellen we ons voor dat de lichtstraal een meetbare dikte (diameter) heeft, dan kunnen we niet meer van een lichtstraal spreken, maar wordt dit een bundel van lichtstralen: een lichtbundel. Wat we zien als de zon door een kleine opening in een vertrek vol tabaksrook of op een mistige morgen door het gebladerte in een bos valt zouden we dus eigenlijk geen zonnestrallen maar zonlichtbundels moeten noemen, de reflectie op de rook- of waterdeeltjes maakt in dit geval die bundels zichtbaar. Volgens een door Huygens uitgewerkt en naar hem genoemd beginsel zal ieder punt op een golffront weer het middelpunt worden van een nieuw, zich ook weer in alle richtingen uitbreidend golffront van de zogenaamde secundaire golven. Men zou door deze gedachtengang zich een warboel van lichtgolven voorstellen. Wiskundige berekeningen hebben echter aangetoond dat de samenvallende golven elkaar overal uitdoven, behalve in de punten op de golfnormalen van het oorspronkelijke of primaire golffront. Men zou kunnen zeggen dat uit alle secundaire golffronten weer een nieuw golffront resulteert dat de uitbreiding van het primaire golffront voorstelt. Er blijft dus de rechtlijnige voortplanting van de lichtgolf over, die wij uit ervaring kennen. Naar aardse begrippen is immers de lichtstraal het meest rechtlijnige dat wij kennen. Het is goed ons steeds voor ogen te houden dat wanneer men in de optiek over lichtstralen spreekt men hiermee bedoelt de richting waarin het licht zich voortplant.

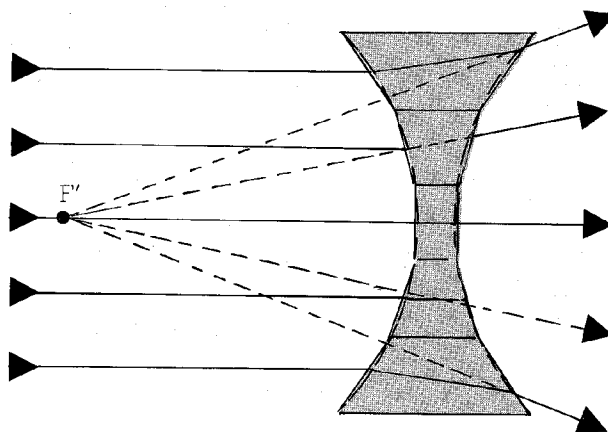
Breking door lenzen

We nemen aan dat het glazen prisma weer uit een gemiddelde glassoort bestaat met **brekingsindex** $n = 1,5$. Op het punt waar de straal vanuit het **medium** lucht in het glas valt, hebben we wederom twee cirkelbogen getekend met stralen die zich net als de brekingsgetallen verhouden als 1 : 1,5. Bij de konstruktie moet er alleen maar op worden gelet dat de loodlijn ook hier de loodlijn op het grensvlak is. Precies zo zijn de omstandigheden bij het uittreden van de lichtstraal. De loodlijn is hier echter de loodlijn boven het uittredingsgrensvlak.



afbeelding 1.

In de afbeelding 1. zijn verscheidene glazen prisma's boven elkaar geplaatst tot een soort lensvorm is verkregen. Een op dit samenstel vallende parallelbundel wordt door de onderling verschillende hoeken van de afzonderlijke prisma's evenredig verschillend gebroken. Elke afzonderlijke straal gedraagt zich echter volstrekt wetmatig. Zijn de vormen van de afzonderlijke prisma's voldoende op elkaar afgestemd, dan komen alle stralen van een parallelbundel in één punt, het punt F, samen. Als we ons verder voorstellen dat we de *rechte vlakken* van de prisma's bijslijpen tot we een vloeiende overgang hebben verkregen, dan beschikken we over een geheel dat overeenkomstig vloeiend de invallende lichtstralen breekt : een verzamellens. Zo'n lens, ook wel *konvexe of bolle lens* genoemd, kunnen we ons voorstellen als een samenstel van oneindig veel prisma's. Zoals uit de afbeelding blijkt heeft zo'n bolle lens afbeeldende eigenschappen. De op de lens vallende parallelbundel is zoals we weten niets anders dan de voortzetting van een divergerende bundel van een zich op oneindig grote afstand bevindend voorwerpspunt. De lens beeldt in punt F, het *brandpunt*, dit oneindig ver verwijderde voorwerpspunt als beeldpunt af.



afbeelding 2

Voegen we de afzonderlijke prisma's omgekeerd samen, zoals in de volgende afbeelding 2, dan ontstaat een aan de rand dikkere lens die een invallende parallelbundel verstrooit. Ook bij zo'n *divergerende, konkave* of holle lens kunnen we ons een brandpunt voorstellen. We vinden dit brandpunt door achterwaartse verlenging van de afzonderlijke divergerende stralen. Het is daardoor slechts een *schijnbaar* of virtueel brandpunt.

Afbeeldingen 1 & 2 zijn schematisch. Als brekingsindex is $n = 1,3$ aangenomen. Konstrueren we bij verschillende hoeken van de prismabenen de brekingsomstandigheden nauwkeurig, dan ontstaat geen volledig overeenstemmend brandpunt van alle stralen. Gaan we de gedragingen na van een lens ten aanzien van invallende evenwijdige stralen, dan stellen we vast dat ver van de optische as invallende stralen wat sterker worden gebroken dan dicht bij de optische as invallende stralen. Deze aan de bolvorm van de lens toe te schrijven afwijking noemt men sferisch aberratie. Op het ogenblik willen we dit effect nog buiten beschouwing laten.

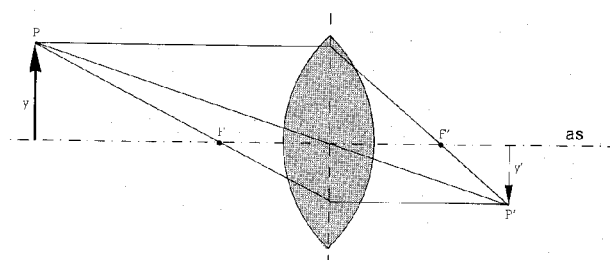
Bolle en holle lenzen met verschillende brandpuntsafstanden en van doorschijnende *materialen* met de meest verschillende brekingsgetallen vormen de bouwstenen voor ingewikkelde afbeeldende systemen.

Beeldkonstruktie bij bolle en holle lenzen.

Om de afbeeldingswetten bij zulke refraktie-systemen te bestuderen bestaan vereenvoudigde konstruktievoorschriften. Net als bij holle spiegels kunnen bij lenzen door konstruktie *willekeurige* voorwerpspunten als beeldpunten naar de beeldruimte worden overgebracht. De som van alle beeldpunten vormt het beeld.

Om ons het werk niet onnodig moeilijk te maken, nemen we voorlopig aan dat al onze lenzen oneindig dunne systemen zijn. We verwaarlozen daarmee weliswaar de brekingsindex van het materiaal en de specifieke brekingsomstandigheden bij inval en uittreden van de stralen, maar krijgen daardoor inzicht in afbeeldingsplaats en afbeeldingsmaatstaf zonder ons met ingewikkelde konstrukties te belasten.

Net als bij de gekromde spiegels gaan we het verloop van bekende stralen na. Laten we daartoe afb. 3 bekijken. Weergegeven is een verzamelende bolle lens die een bepaalde brandpuntsafstand heeft.



afbeelding 3

Het brandpunt als verzamelpunt van evenwijdig invallende stralen is zowel voor als achter de lens weergegeven. Dat is zonder meer mogelijk, want de lens is volstrekt symmetrisch gebouwd en zou dus te allen tijde zonder verandering van omstandigheden kunnen worden omgekeerd. We noemen de ruimte links van de lens **de voorwerpsruimte** en die rechts **de beeldruimte**. Dienovereenkomstig spreken we ook van een voorwerpszijdig **brandpunt F** resp. beeldzijdig brandpunt F' . Op de as staat in de voorwerpsruimte een voorwerp (de

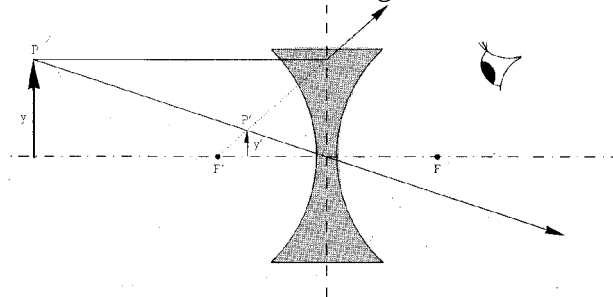
rechtopstaande pijl) met de voorwerpsgrootte y en het voorwerpspunt P .

Om de stand en de grootte van de afbeelding weer te geven, tekenen we vanuit het voorwerpspunt P een aan de optische as evenwijdige lichtstraal tot het hoofdvlak van de lens. Een aan de optische as evenwijdige straal wordt gebroken en gaat beeldzijdig door het brandpunt F' . Een van P door F vallende straal wordt door de lens in een aan de as evenwijdige straal gebroken. Een hoofdstraal die door het middelpunt van de lens gaat, blijft ongebroken. Het snijpunt van alle drie stralen vormt in de beeldruimte het beeldpunt P' dat - aangezien het voorwerp op de as staat - grootte en plaats van het beeld duidelijk bepaalt.

Zoals al is opgemerkt, hebben we gemakshalve de brekingen die zich voordoen als de stralen het glas resp. de lucht in- of uittreden teruggebracht tot de gemiddelde breking op het hoofdvlak van de lens. We onthouden:

Aan de as evenwijdige stralen worden gebroken tot brandstralen, en brandstralen worden gebroken tot aan de as evenwijdige stralen. Hoofdstralen worden niet gebroken.

Bij een holle lens (afb. 4) zijn de afbeeldingsomstandigheden slechts schijnbaar ingewikkelder. Een parallelstraal wordt door de lens zodanig gebroken dat de achterwaartse verlenging van de gebroken straal door het brandpunt F gaat. Een hoofdstraal blijft ook hier ongebroken. Een snijpunt vormt zich aan de linkerkant van de lens. Het beeld dat ontstaat is een rechtopstaand en verkleind beeld. Het effect kennen we wel: kijken we door zo'n divergerende lens naar een voorwerp, dan ontwaren we in de voorwerpsruimte een verkleind virtueel beeld. De lens werkt als verkleinglas.



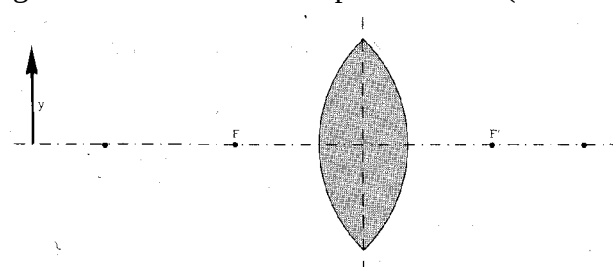
afbeelding 4

Het ontstaan van beeld bij bolle lenzen

Al onze objectieven zijn verzamelende systemen. In beginsel kunnen we ze ons voorstellen als verzamellenzen die een bepaalde brandpuntsafstand hebben. Om ons een voorstelling van de omstandigheden van grootte en plaats van het beeld te maken, is het dus voldoende indien we de belangrijkste voorwerpssituaties ten opzichte van eenvoudige verzamelende lenzen onderzoeken.

In de afbeeldingen 5 t/m 9 zijn vijf kenmerkende voorwerpssituaties getekend en zijn de betrokken lenzen met hun brandpunten weergegeven. Het is nu aan u, met behulp van twee karakteristieke stralen de beelden te konstrueren en de situatie van het beeld te omschrijven.

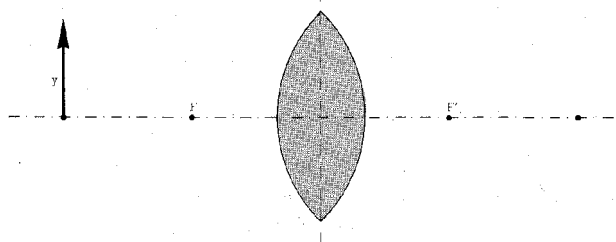
a) Voorwerpsafstand groter dan dubbele brandpuntsafstand (Konstruktie in afb. 5).



afbeelding 5

Gebruik voor de konstruktie een parallel- en een brandstraal. Het beeld dat daarbij ontstaat ligt tussen de enkelvoudige en de dubbele brandpuntsafstand in de beeldruimte. Het beeld is reëel, verkleind en staat op zijn kop.

b) Voorwerpsafstand gelijk aan dubbele brandpuntsafstand (Konstruktie in afb. 6).

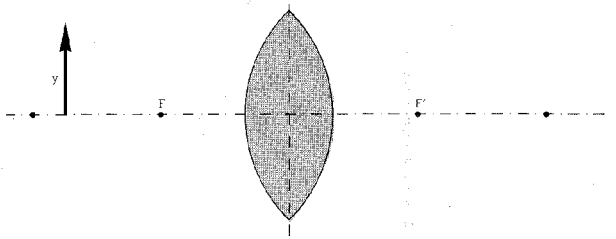


afbeelding 6

U gebruikt voor de konstruktie wederom een parallel- en een brandstraal.

In dit bijzondere geval ligt het beeld in de beeldruimte eveneens precies op de dubbele brandpuntsafstand; het is reëel, even groot als het voorwerp zelf en staat op zijn kop. Het is dus duidelijk een afbeelding 1 : 1. Fotografisch gezien zijn de opname-afstand en de kamera-uittrek even groot, beide tweemaal zo groot als de brandpuntsafstand van het objektief.

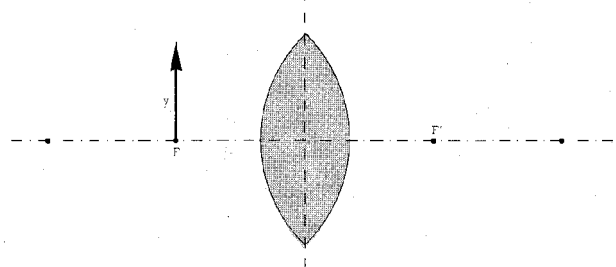
c) Voorwerpsafstand iets kleiner dan dubbele brandpuntsafstand (Konstruktie in afb.7).



afbeelding 7

U gebruikt voor de konstruktie een parallel- en een brandstraal. Het beeld dat daardoor ontstaat ligt buiten de dubbele brandpuntsafstand in de beeldruimte. Het beeld is reëel, vergroot en staat op zijn kop.

d) Voorwerp precies op brandpuntsafstand (Konstruktie in afb.8).



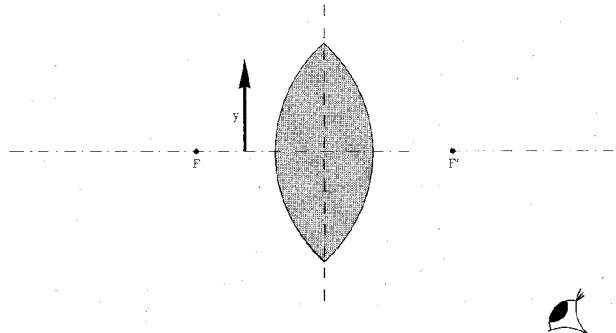
afbeelding 9

U gebruikt weer een parallel- en een hoofdstraal. De beide gebroken stralen lopen in de beeldruimte parallel en snijden elkaar - althans theoretisch - pas in het oneindige. Ook achterwaartse verlengingen van de gebroken stralen lopen parallel. in de praktijk ontstaat geen beeld, Theoretisch zijn twee beelden denkbaar: het ene zou reëel zijn, oneindig vergroot en zou zich in de beeldruimte bevinden. Het andere beeld, eveneens oneindig

vergroot, zou virtueel zijn en zou zich in de voorwerpsruimte bevinden, oneindig ver verwijderd bij het punt van samenkomst van de achterwaarts verlengde evenwijdige lijnen.

Bepaald vermetel klinkt de hypothese dat het eerstgenoemde beeld op zijn kop staat en het als tweede genoemde beeld rechtop...

e) Voorwerp binnen de enkelvoudige brandpuntsafstand (Konstruktie in afb.9)



afbeelding 9

U gebruikt voor de konstruktie een parallel- en een hoofdstraal. De gebroken stralen lopen in de beeldruimte divergerend, komen daardoor niet samen. Hun achterwaartse verlengingen echter vormen in de voorwerpsruimte een konvergentiepunt. Er wordt daardoor een virtueel beeld gevormd dat rechtop en vergroot in de voorwerpsruimte staat. In deze situatie werkt de lens als loep. Als we ons rechts van de lens een waarnemer voorstellen, dan ziet deze het voorwerp vergroot afgebeeld. Daar het echter om een niet rechtstreeks op een matglas op te vangen beeld gaat, spreekt men van een schijnbaar of virtueel beeld.

Gevolgtrekkingen

Is een voorwerp oneindig ver van een lens verwijderd, dan wordt het voorwerp precies in het brandpunt oneindig klein afgebeeld. Komt het voorwerp naderbij en bevindt het zich ergens buiten de dubbele brandpuntsafstand, dan ligt de afbeelding tussen enkelvoudige en dubbele brandpuntsafstand in de beeldruimte.

Staat het voorwerp precies op de dubbele brandpuntsafstand in de voorwerpsruimte, dan is de afbeelding even groot en ligt het beeld op de dubbele brandpuntsafstand in de beeldruimte.

Komt het voorwerp nog dichterbij en bevindt het zich tussen dubbele en enkelvoudige brandpuntsafstand, dan ligt het beeld buiten de dubbele brandpuntsafstand in de beeldruimte en is het vergroot. Een afbeelding is niet meer mogelijk wanneer het voorwerp zich precies op de enkelvoudige brandpuntsafstand of nog dichterbij in de voorwerpsruimte bevindt.

Afbeeldingsomstandigheden

Om de afbeeldingsomstandigheden ook door berekening te kunnen vastleggen is een algemeen begrepen vaststaande terminologie noodzakelijk. Helaas ontbreekt in de oudere literatuur ten aanzien hiervan de uniformiteit- De meest gebruikte uitdrukking vermelden wij hieronder.

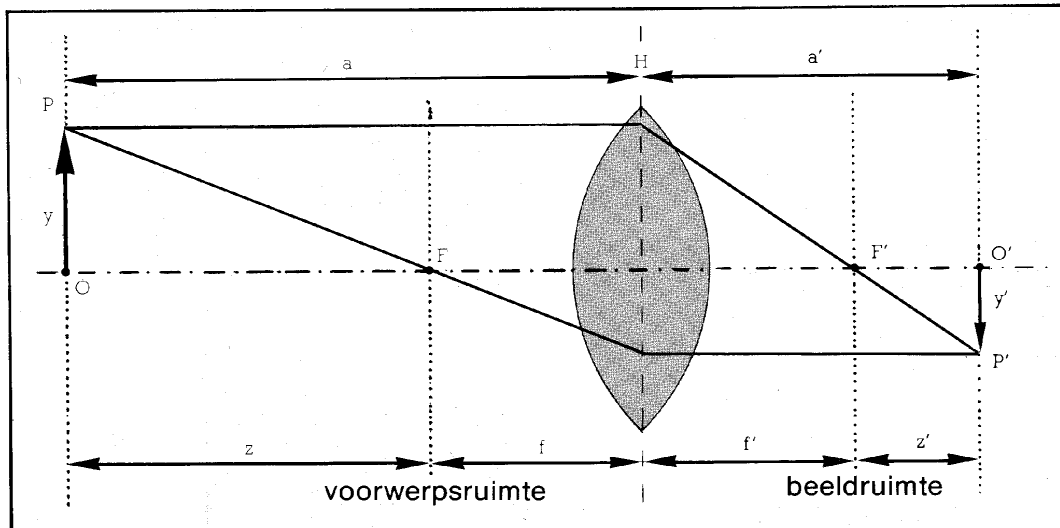
Tekens

In beginsel worden punten met hoofdletters, afstanden met kleine letters aangegeven. Tekens die op de beeldruimte betrekking hebben, zijn van een apostrof (') voorzien. Tekens die de voorwerpsruimte betreffen hebben geen apostrof. H = hoofdvlak, het vlak waarin de hoofdpunten liggen. Voorlopig houden we het hoofdvlak vereenvoudigd. Later zullen we een onderscheid maken tussen de hoofdpunten H en H'.

afbeelding 10:

F	=	voorwerpsbrandpunt, voorwerpszijdig brandpunt	y	=	voorwerpsgrootte
F'	=	beeldbrandpunt, beeldzijdig brandpunt	y'	=	beeldgrootte
f	=	voorwerpszijdige brandpuntsafstand*	P	=	voorwerpspunt
f'	=	beeldzijdige brandpuntsafstand*	P'	=	beeldpunt
a	=	voorwerpsafstand, opname-afstand	O	=	voorwerpspunt op de as
a'	=	beeldafstand, kamera-uitrek	O'	=	beeldpunt op de as
z	=	voorwerpsafstand t.o.v. het brandpunt (a-f)			
z'	=	beeldafstand t.o.v. het brandpunt (a'-f')			

* bij symmetrische lenzen zijn f en f' even groot



Lenzen

Optisch glas alleen vormt natuurlijk nog geen objectief er moeten op het doel afgestemde onderdelen, zogenaamde lenzen, van worden vervaardigd.

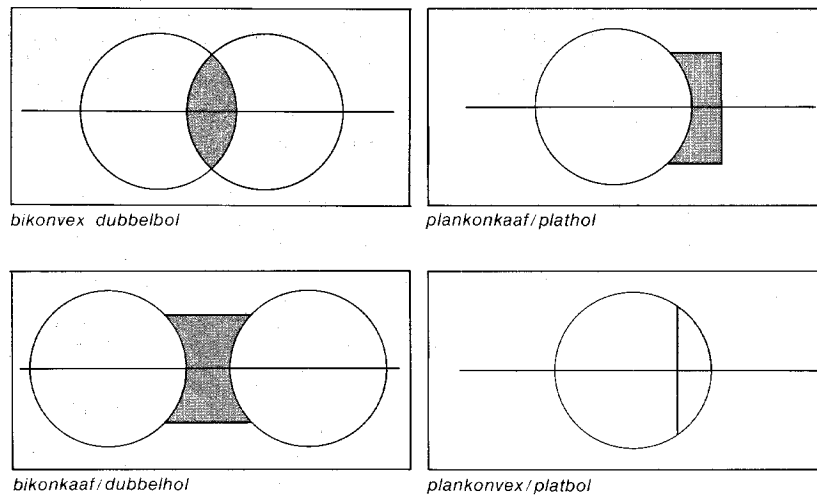
Lensvormen:

1. Sferische lenzen

Het overgrote deel van alle gebruikte optische lenzen is sferisch: het zijn lichamen die door twee bolle oppervlakken of door een bol en een plat oppervlak zijn begrensd. De onderlinge verbinding van de middelpunten van deze oppervlakken noemt men de optische as. Een lensoppervlak dat naar buiten gekromd is, noemt men konvex of bol, een lensvlak dat naar binnen gekromd is, konkav of hol. Lenzen met een verzamelende werking zijn aan de rand dunner dan in het midden. Ze worden verzamellenzen, positieve lenzen of konvexe lenzen genoemd. Afhankelijk van de vorm spreekt men van dubbelbolle (bikonvexe), platbolle (plankonvexe) of holbolle (konkav-konvexe) lenzen. De Nederlandse naam voor de holbolle lens is positieve meniscus.

Lenzen die aan de rand dikker zijn dan in het midden, werken verspreidend. Men noemt ze verspreidende lenzen, negatieve lenzen of holle lenzen. Ook hier maakt men een onderscheid tussen dubbelholle (bikonkave), platholle (plankonkave) en bolholle (konvexkonkave) vormen. Bolholle lenzen noemt men ook negatieve meniscuslenzen. cfr.

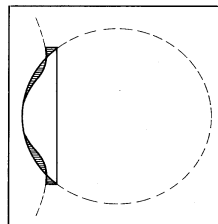
Afbeelding 11:



afbeelding 11

2. Asferische lenzen

Om de objectiefkonstruktoren nog meer parameters te verschaffen streeft de industrie ernaar, ook niet-sferische lensvormen te vervaardigen. Met paraboolvormige lensprofielen kunnen vooral sferische afbeeldingsfouten beter worden verholpen en objectieven met grotere lichtsterkten worden vervaardigd. De produktiemethoden voor asferische lenzen zijn de laatste jaren sterk vereenvoudigd, zodat ze ook in veel eenvoudige (zoom-) objectieven voorkomen.



afbeelding 12

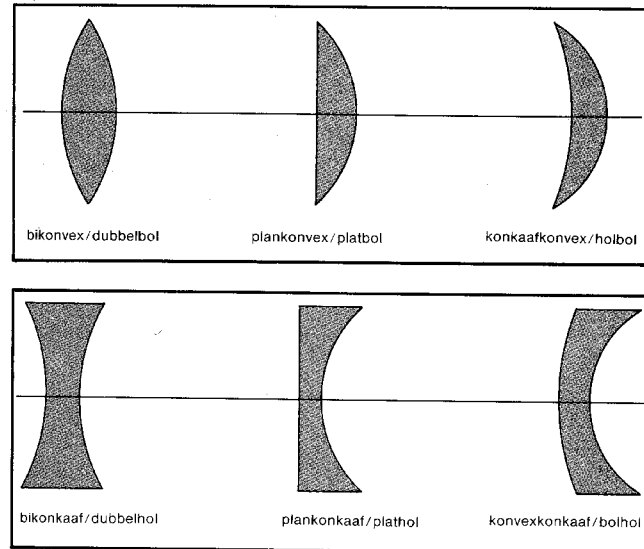
Glassoorten :

Optische kristallen Kristalsoort	doorlaatbaarheid nm	toepassingsgebied nm	eigenschappen
natriumchloride NaCl	200-16 500	5 500-15 000	hoge dispersie, in water oplosbaar
kaliumbromide KBr	210-27 000	18 000-26 000	hoge dispersie, zeer oplosbaar in water
lithiumfluoride LiF	160- 6 500	160- 5 500	lage dispersie, weinig oplosbaar in water
calciumfluoride CaF ₂	130- 9 500	130- 9 500	ongeveer als LiF
thalliumjodide (KRS ₃)	560-40 000	560-38 000	hoge dispersie, niet oplosbaar in water
caesiumjodide CsJ	300-56 000	35 000-55 000	hoge doorlaat- baarheid voor infrarood, zeer oplosbaar in water
<i>Ter vergelijking</i>			
Optische glassoorten	350- 2 500	350- 2 500	
Kwartsglas (SiO ₂ rijk)	200- 3 500	200- 3 500	

Van ruw glasblok tot lens

1. Vervaardiging van sferische lenzen

Sferische lenzen hebben een bolradius. De vervaardiging van zulke lenzen is daardoor betrekkelijk eenvoudig en in grote aantallen tegelijk mogelijk. In grote lijnen verloopt de vervaardiging als volgt:



Plakken

Het gekontroleerde ruwe glasblok wordt met snijlijpmachines in plakken verdeeld. De dikte van de plakken is iets groter dan de latere lensdikte. De plakken worden verdeeld in vierkanten die wederom iets groter zijn dan de latere lensdiameter.

De lens in zijn ruwe vorm

De zo verkregen vierkante glasdelen brengt men door afbrokkelen met de glastang in een achthoekige vorm en kit men met zegellak tot een stang aan elkaar. In de rondblijpmachine wordt deze lenzenstang cirkelrond gefreesd. De afzonderlijke glasschijfjes kit men daarna om voorgeslepen te worden op een halfbolvormige drager. In de schrobmachine krijgen ze dan hun ruwe vorm.

Persstukken

Een andere methode om de ruwe lenzen te vervaardigen biedt de persmethode. Daarbij worden de ronde glazen schijven in verhitte ovens tot vervormbaarheid verhit en tot ruwe lenzen geperst. Het is dan echter noodzakelijk dat deze ruwe lenzen langzaam en zorgvuldig worden afgekoeld om spanningen in het glas te vermijden.

Fijnslijpen

Nadat de ruwe lenzen op halfbolvormige dragers zijn gemonteerd (aan één kant reeds geslepen lenzen worden vastgekit) volgens het fijnslijpen met gebonden diamantkorrel in slijpschalen. Stap voor stap wordt de diamantkorrel steeds fijner gekozen.

Polijsen

Na dit fijnslijpen is de lens nog ondoorzichtig; de doorzichtige vlakken ontstaan pas bij het polijsten. Dit gebeurt in een schaal die met een zacht materiaal (polijstpek) bekleed is. De lenzen zijn daarbij weer op de drager gekit of op andere wijze bevestigd. Als polijstmiddel dient met water vermengd polijstrood (ijzeroxyde) of ceriumoxyde.

Kontrolle

De kromming van het lensoppervlak controleert men in een pasglas of met behulp van een laser-aftaster. Het pasglas is een nauwkeurig uitgevoerd vergelijkingsglas van kwarts met tegengestelde kromming. Door het pasglas op het werkstuk te leggen, kunnen met behulp van de interferenties die daarbij eventueel ontstaan, zeer kleine afwijkingen met het blote oog worden gekonstateerd.

Centrering

Een lens is voor de bouw van kwalitatief hoogstaande objectieven alleen bruikbaar indien de optische as precies door het krommingsmiddelpunt gaat. De noodzakelijke centrering van elke lens vindt plaats in met lasers gestuurde freesmachines, waarbij de lens tegelijkertijd zijn definitieve diameter krijgt.

Reiniging.

De gepolijste en gecentreerde lenzen worden vervolgens in speciale baden onder ultrasonore invloed van de laatste glas- en slijpresten ontdaan.

Coating

Door het in hoogvacuum opbrengen van een of meer zeer dunne laagjes van bepaalde metaalzoutverbindingen brengt men de gedeeltelijke reflectie van het licht op de grensvlakken van de lenzen tot minder dan 0,1 % terug.

2. Vervaardiging van asferische lenzen

Dank zij het contact van de oppervlakken van het werkstuk en het werktuig kunnen sferische glasoppervlakken zonder grote technische voorzieningen met enorme nauwkeurigheid worden vervaardigd. De maximale afwijking bedraagt slechts 0,075 μm , wat met ongeveer het duizendste deel van de dikte van een haar overeenkomt. Anders ligt dit bij asferische oppervlakken. Daar is de bewerking van oppervlak tegen oppervlak niet mogelijk en is voor precisiewerk ingewikkelde technische apparatuur vereist.

In de praktijk hebben zich twee fabricagemethoden uitgekristalliseerd:

Het zwenkarmslijpprincipe

Daarbij wordt kostbare apparatuur gebruikt die zowel bewerkings- als meetmachine is. Een zwenkarm draagt behalve het slijpgereedschap uit diamant een meettaster. De meelopende meetinrichting geeft de gevonden resultaten voortdurend aan een computer door, die ze interpreteert en het slijpgereedschap op basis hiervan stuurt.

Bij een andere fabrikant worden speciale slijpmachines voor asferische lenzen synchroon gestuurd doordat op een centrale plaats een nauwkeurige stalen vorm wordt afgetast. Van daaruit worden veel slijpmachines als een robot gelijktijdig gestuurd.

In beide gevallen kunnen de asferische lenzen per slijpmachine slechts één voor één worden vervaardigd, hetgeen de hoge prijs van kwalitatief hoogwaardige asferische lenzen verklaart.

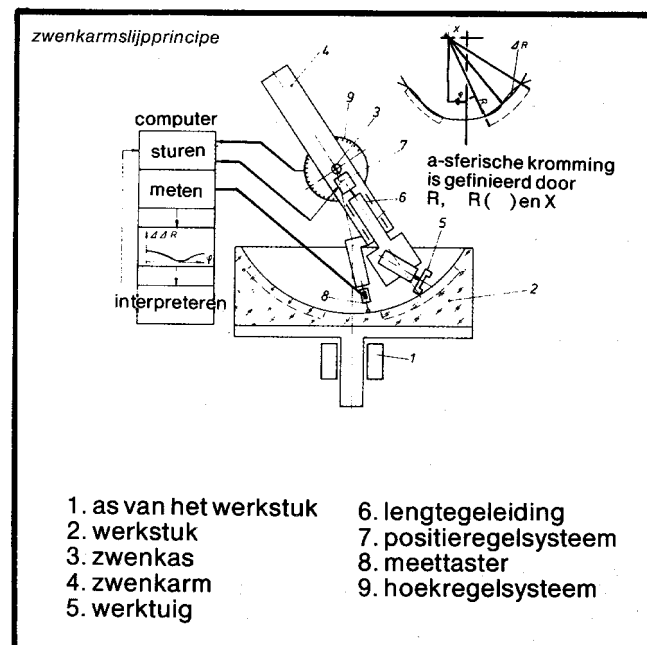
Gietkopiemethode

Zeiss heeft voor de produktie van asferische lenzen een bijzonder interessante techniek ontwikkeld. Bij dit zogenaamde gietkopieprocédé wordt de lens eerst sferisch geslepen. Daarna wordt op de sferische lens een lamel van epoxyhars gegoten die met behulp van een matrijs in asferische vorm tot uitharding wordt gebracht. Door deze betrekkelijk eenvoudige methode kan men een aanzienlijk grotere produktie bereiken.

Epoxyhars is echter kwetsbaarder dan glas en kan wat water opnemen (0,27 %). Met de gietkopiemethode vervaardigde asferische lenzen kunnen daardoor slechts als inwendige

delen van het objectief dienen, niet als frontlens.

Aangezien de optische eigenschappen van het epoxyhars iets anders zijn dan die van het gebruikte optische glas, kunnen als plezierige bijkomstigheid extra parameters worden gecreëerd die de objectiefkonstrukteur hoogst welkom zijn.



Andere vervaardigingstechnieken

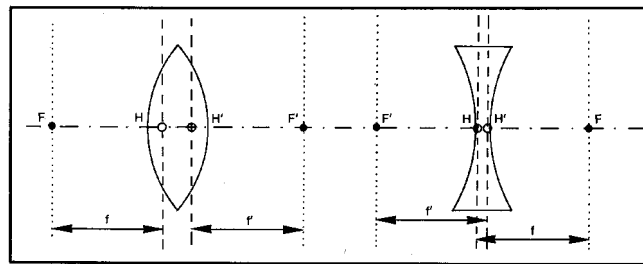
Op zoek naar nieuwe technologieën om asferische lenzen tegen lagere kosten te vervaardigen zijn bij voorbeeld in het onderzoekslaboratorium van Philips proefnemingen aan de gang om asferische lenzen uit verhitte glasstaven op draaibanken te draaien.

Een geheel andere weg wordt op het ogenblik in de Verenigde Staten met steun van Kodak gezocht. Daar heeft men proeven genomen met een glasvezel waarvan het brekend vermogen van binnen naar buiten afneemt. Gelukt het, uit zo'n gradiëntvezel een vlakke schijf te snijden, dan zou deze al zonder kromming de werking van een sferische lens vertonen. Lukt het verder, zo'n schijf sferisch te slijpen, dan zou deze lens - als gevolg van de naar buiten verlopende brekingsindex - de eigenschappen van een asferisch geslepen lens hebben.

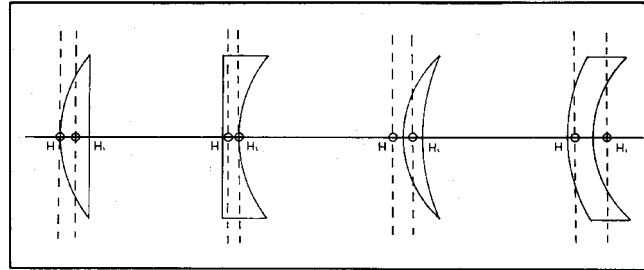
De beeldpositie

Tot nu toe zijn we bij onze beschouwingen, vooral die aangaande konstruktie van de beeldpositie, uitgegaan van de vereenvoudigde veronderstelling van de oneindig dunne lens. In werkelijkheid bestaan zulke lenzen natuurlijk niet. Elke beeldvormende lens en meer nog, elk objectief, bezit een bepaalde diktemaat. Voor globale berekeningen is de toegepaste vereenvoudiging toereikend.

Voor meer gekompliceerde optische situaties en zeker voor het berekenen van gehele optische systemen moet de theorie natuurlijk worden verbeterd. We zullen wel nauwelijks eigen objectieven willen berekenen. Toch is een meer gedetailleerde kennis noodzakelijk om optische konstrukties beter te kunnen begrijpen. We beperken ons daarbij wel tot de beslist noodzakelijke grondbeginselen.



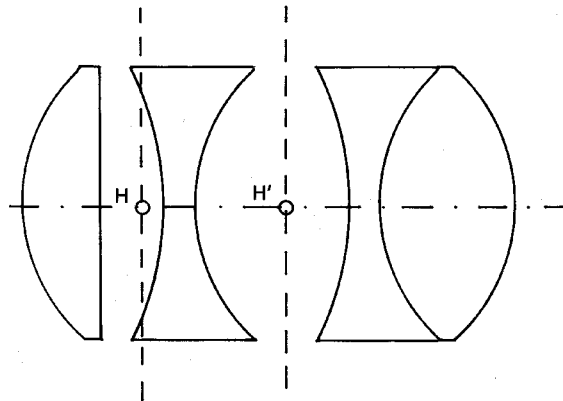
Hoofd- en brandpunten bij bolle en holle lenzen



Plaats van de hoofpunten bij verschillende lensvormen

Hoofdpunten

Zenden we een evenwijdige bundel licht naar een lens, dan is het voorwerpszijdige en het beeldzijdige brandpunt gemakkelijk te bepalen. Zetten we nu, bij een lens van willekeurige dikte, op de as de brandpuntsafstand f van het voorwerpszijdige brandpunt F in de richting van de lens uit, dan komen we in de regel niet in het midden van de lens terecht, maar bij een punt H , het voorwerpszijdige hoofdpunt.



Hetzelfde gebeurt in de beeldruimte. Zetten we van het beeldzijdige brandpunt F' de brandpuntsafstand f' in de richting van de lens uit, dan ontstaat het hoofdpunt H' . De ligging van beide hoofdpunten is afhankelijk van de krommingsradius, van de dikte en van de brekingsindex van de lens en van de brekingsindex van het aangrenzende medium.

De vlakken die door de hoofdpunten vertikaal naar de as lopen worden toepasselijk hoofdvlakken genoemd. In deze vlakken worden (theoretisch) zich daar bevindende voorwerpen onderling even groot en rechtopstaand afgebeeld. Bij bolle (konvexe) en bij holle (konkave) lenzen verschilt de ligging van de hoofden brandpunten, zoals in afb. 382 duidelijk is te zien. De volgorde van deze optische kardinale punten is - van de voorwerpsruimte naar de beeldruimte gezien - steeds:

voor verzamelende lenzen: $F H H' F'$

voor verspreidende lenzen: $F' H H' F$

Bevinden beide lensvlakken zich in hetzelfde medium (bijv. in lucht), dan is de vereenvoudiging waarvan we tot nu toe zijn uitgegaan van toepassing: $FH = H'F'$ of $f = f'$.

De ligging van de hoofdpunten hangt vanzelfsprekend ook van de vorm van de lens af: de afbeelding laat dat voor enkele belangrijke lensvormen zien:

Hoofdpunten kunnen echter niet alleen maar voor afzonderlijke lenzen worden bepaald. Ook bij optische stelsels rekent men met hoofdvakken die geldig zijn voor het totale stelsel. Bij bepaalde optische systemen - bij voorbeeld bij verspreidende lenzen - kan H' links van H en soms zelfs buiten het optische stelsel liggen.

Een kenmerkend voorbeeld daarvan is het principe van het teleobjectief, welks konstruktie daardoor een gedrongen bouw van het uittrekmechanisme mogelijk maakt.

Krommingsstralen, toppunten, topbrandpuntsafstand:

Om de brandpuntsafstand te kunnen berekenen moeten we nog enkele andere gegevens weten: Toppunten noemt men de punten waar de lensvlakken en de optische as elkaar snijden.

De afstand tussen een toppunt en het bijbehorende voorwerpsvlak resp. beeldvlak noemt men de topbrandpuntsafstand (Schnittweite) (voorwerpszijdige) topbrandpuntsafstand s , beeldzijdige topbrandpuntsafstand s'). Uit krommingsstralen van beide lensvlakken, afstand van de toppen en brekingsindex kunnen we de brandpuntsafstand van een enkelvoudige lens in het medium lucht met de volgende formule berekenen:

$$f' = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n-1)d + n(r_2 - r_1)}$$

Voor „dunne lenzen” met de dikte $d \ll |r_2 - r_1|$ kan de volgende benaderende formule dienen:

$$f' = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}$$

Op soortgelijke wijze kunnen we ook de afstanden van de hoofdpunten tot de toppunten en de afstand van de hoofdpunten onderling uitrekenen.

De Beeldkonstruktie:

Voordien hebben we al met drie karakteristieke stralen een beeld gekonstrueerd. De daar toegepaste vereenvoudiging door uit te gaan van een oneindig dunne lens vraagt nu eveneens om een korrektie. Een lens wordt door de hoofdpunten H en H' als mede de brandpunten F en F' gedefinieerd. De kennis van de plaats van deze kardinale punten op de optische as is voldoende voor de geometrische konstruktie van de ligging van het beeld:

Parallelstraal:

Iedere evenwijdig aan de as invallende straal zet zijn weg tot het vlak H' zonder richtingsverandering voort. Daarna gaat hij door F'

Brandstraal:

Iedere door F invallende straal verloopt nadat hij op vlak H is gevallen evenwijdig met de as.

Hoofdstraal:

Iedere door het hoofdpunt H invallende straal verlaat H' evenwijdig met de invalrichting.

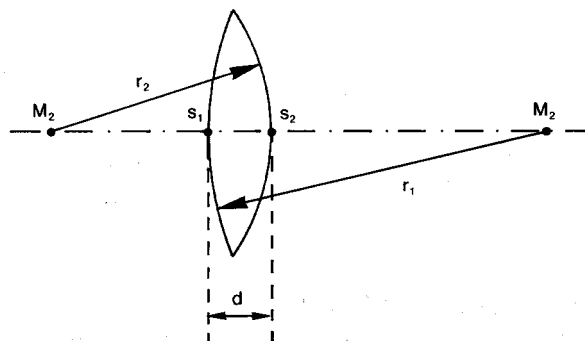
De brekingskracht of het brekend vermogen

Zoals we hebben gezien, kunnen we de brandpuntsafstand van een enkelvoudige lens in het medium lucht uit de krommingsstraal, de afstand van de toppen en de brekingsindex gemakkelijk berekenen. Zodra echter een optisch stelsel uit meer dan één lens bestaat, is een vrij omvangrijk berekenen van alle op elkaar volgende lenzen vereist.

In veel gevallen wordt in de praktijk de brandpuntsafstand van een bestaand optisch stelsel door het voor dit stelsel plaatsen van een losse lens gewijzigd (voorzetlenzen, brillen).

De berekening en vaststelling van de nieuwe totale brandpuntsafstand van een aldus gewijzigd stelsel wordt eenvoudiger indien in plaats van de brandpuntsafstand een aanduiding van de brekingskracht wordt gegeven. Onder brekingskracht van een optisch stelsel of van een afzonderlijke lens verstaat men de reciproke (omgekeerde) waarde van de brandpuntsafstand (in meters). Die maateenheid is de dioptrie.

$$\text{dioptrie} = \frac{1}{f_{(m)}}$$
$$f_{(m)} = \frac{1}{\text{dioptrie}}$$

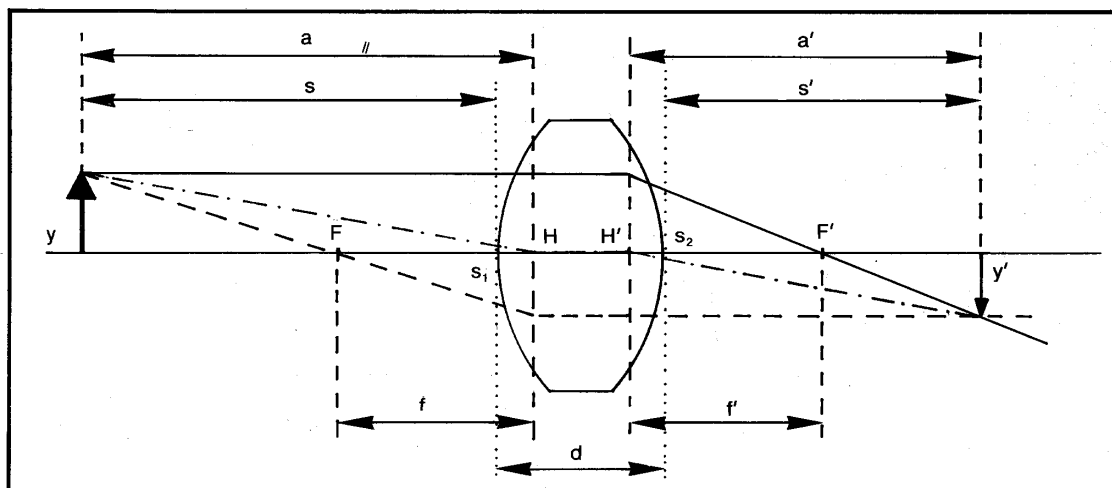


M1 krommingsmiddelpunt van lensvlak 1
M2 krommingsmiddelpunt van lensvlak 2
r1 radius van lensvlak 1

r2 radius van lensvlak 2
S1 eerste lenstop
S2 tweede lenstop
d afstand van de lenstoppen

Door een positief of negatief teken vóór het dioptriegetal te plaatsen geeft men aan, of het om een verzamelende (+) of om een verspreidende lens (-) gaat. Aangezien het de omgekeerde waarde van de brandpuntsafstand geldt, is de brekingskracht groter naarmate de brandpuntsafstand korter is.

Voorbeelden		Soort lens
$f = 100 \text{ cm}$	$\text{dpt} = \frac{1}{f} = \frac{1}{1} = + 1 \text{ dpt}$	verzamelende lens
$f = 50 \text{ cm}$	$\text{dpt} = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.5} = + 2 \text{ dpt}$	verzamelende lens
$f = 25 \text{ cm}$	$\text{dpt} = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.25} = + 4 \text{ dpt}$	verzamelende lens
$f = 5 \text{ cm}$	$\text{dpt} = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.05} = + 20 \text{ dpt}$	verzamelende lens
$f = - 25 \text{ cm}$	$\text{dpt} = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0.25} = - 4 \text{ dpt}$	verspreidende lens
+ 3 dioptrie	$f = \frac{1}{\text{dpt}} = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ m}$	verzamelende lens
- 2 dioptrie	$f = \frac{1}{\text{dpt}} = \frac{1}{-2} = - 0,5 \text{ m}$	verspreidende lens



Scherptediepte

a/ Scherppte

Het begrip absolute scherppte zou theoretisch betekenen dat een punt met een diameter van b.v. 0,001 mm inderdaad door een punt met eveneens een diameter van 0,001 mm wordt weergegeven.

De opbouw van het netvlies van het menselijk oog brengt echter met zich mee dat er als gevolg van het gebrek aan scheidend vermogen een zeer aanzienlijke scherptetolerantie bestaat. Onder normale omstandigheden bedraagt deze tolerantie voor een gemiddelde kijkafstand van 30 cm ongeveer 1 /10 mm. Het oog ziet bijgevolg elk "vlak" dat, niet groter is dan 1 /10 mm als een absoluut scherp punt. Met andere woorden: een nagenoeg oneindig klein voorwerpspunt wordt als scherp beeldpunt weergegeven wanneer hij op het beeld de grootte van 1 /10 mm niet te boven gaat.

Het oog werkt net als een kamera: de ooglenzen komt met het objectief overeen, en het netvlies met het matglas of filmvlak. Om voorwerpen op verschillende afstanden scherp te zien, verandert echter het oog niet de uittrek, zoals dit bij een kamera het geval is, maar wijzigt het door spierwerking de krommingsradius van de lens. Dat gebeurt zo snel dat in de hersenen de indruk ontstaat dat het oog op elke willekeurige afstand gelijktijdig scherp ziet. Dat dit niet zo is, kan het volgende experiment verduidelijken:

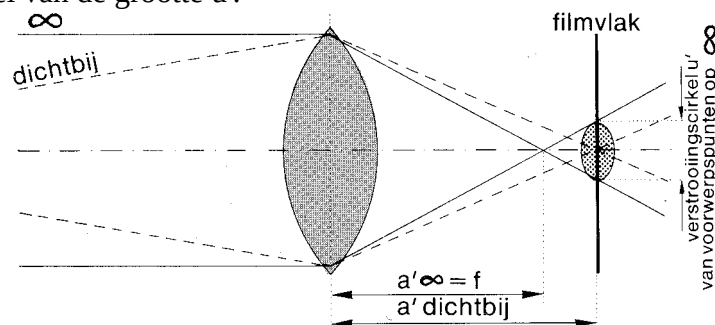
U strekt uw arm horizontaal en houdt de wijsvinger loodrecht omhoog. U kijkt nu eens naar de top van uw vinger en dan weer naar het huis van de overburen op de achtergrond van de vinger. U kunt vingertop en huis niet gelijktijdig scherp zien!

b/ Verstrooiingscirkel (onscherptecirkel)

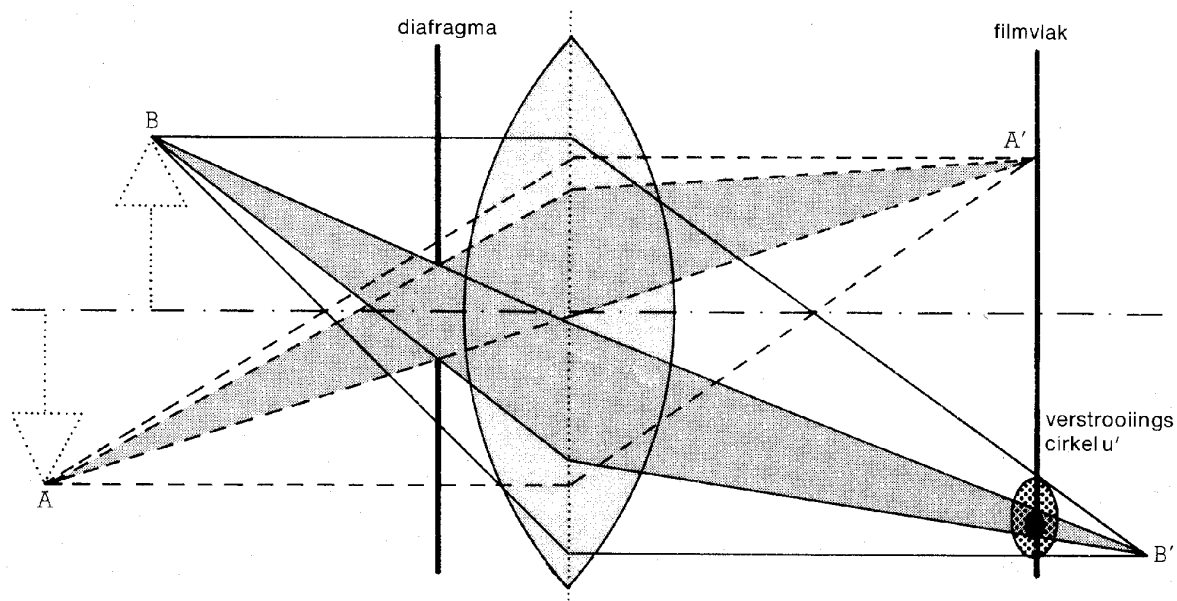
In de fotografie kan strikt gesproken een volkomen scherp beeld op het filmvlak slechts door één enkel voorwerpsvlak worden bewerkstelligd. Alleen van dit ene voorwerpsvlak worden alle punten als absolute, even grote beeldpunten weergegeven. Alle andere punten die zich op dichtbij of verder weg liggende vlakken bevinden, worden niet meer als punten weergegeven, maar als schijfjes, zogeheten verstrooiingscirkels. Het teken voor de diameter van een verstrooiingscirkel is u' .

We kijken nu naar de afbeelding. Weergegeven is in de voorwerpsruimte een parallelbundel die, van een oneindig ver verwijderd voorwerp afkomstig, een beeldpunt precies in het brandpunt van de beeldruimte vormt. Een dichtbij liggend voorwerp zendt een min of meer sterk divergerende bundel uit die, zoals we weten, verder naar achteren een beeldpunt vormt.

Stellen we ons filmvlak op dit punt af, dan wordt dit punt absoluut scherp afgebeeld. Het voorwerpspunt dat uit oneindig komt en daardoor dicht bij de lens convergeert, wordt bij deze instelling als betrekkelijk grote cirkel afgebeeld, als verstrooiingscirkel van de grootte u' .



Zolang zulke verstrooiingscirkels niet groter zijn dan $1/10$ mm, houdt ons oog ze als gevolg van de scherptetolerantie nog voor scherp. Daardoor ontstaat de indruk dat het beeld niet alleen een scherptevlak, maar ook een scherptezone, een scherptediepte, heeft. De grenzen van deze scherptediepte naar achteren en naar voren bevinden zich daar, waar de verstrooiingscirkels de afmeting $1/10$ mm overschrijden. Aangezien de scherptetolerantie zich wijzigt met de afstand waarop men een foto bekijkt, laat men deze tolerantie van het beeldformaat af hangen.



De toelaatbare grootte van verstrooiingscirkels heeft men op $1/500$ van de normale brandpuntsafstand gesteld:

voor 24 x 36 mm	$1/30$ mm
voor 6 x 6 cm	$1/20$ mm
voor 6 x 9 cm	$1/15$ mm
voor 4 x 5 inch	$1/10$ mm
voor 13 x 18 cm	$1/7$ mm
voor 8 x 10 inch	$1/5$ mm

Op deze waarden berusten scherptedieptetabellen en de scherptedieptescalen op instelvattingen van kamera's. Het zijn evenwel niet meer dan benaderde waarden die bovendien bij sterke deelvergrotingen niet meer opgaan. U kunt zich dit ongetwijfeld voorstellen. Vergroten we een kleinbeeldnegatief driemaal lineair, dan wordt het beeld ongeveer 7×10 cm groot. Een verstrooiingscirkel die op het negatief een grootte van $1/30$ mm had, heeft nu een diameter van $1/10$ mm. Daarmee is de grens van de scherptetolerantie bereikt. Vergroot u het beeld tot 50×60 cm, dan wordt daardoor het individuele beeldpunt weliswaar aanzienlijk groter, maar de scherptedieptewerking verandert niet omdat het grotere beeld van een aanzienlijk grotere afstand wordt bekeken. Vergroten we echter een fragment van het negatief tot het formaat 9×12 cm, zodanig dat vergroting van het gehele negatief tot een beeldformaat van bijv. 50×60 cm zou leiden, dan kloppen de verhoudingen niet meer.

Het scherptegebied lijkt aanzienlijk kleiner te zijn geworden doordat het kleine beeld vanaf een voor de eigenlijke vergrotingsmaatstaf veel te korte afstand wordt bekeken. In beginsel kunnen we niettemin stellen: Is de scherpte van een negatief voldoende om tot het formaat 18×24 cm te vergroten, dan is de scherpte ook voldoende voor elke andere vergrotingsmaatstaf, zolang men geen extreem kleine fragmenten van het negatief uitvergroot.



c/ Scherptediepte en diafragma-opening

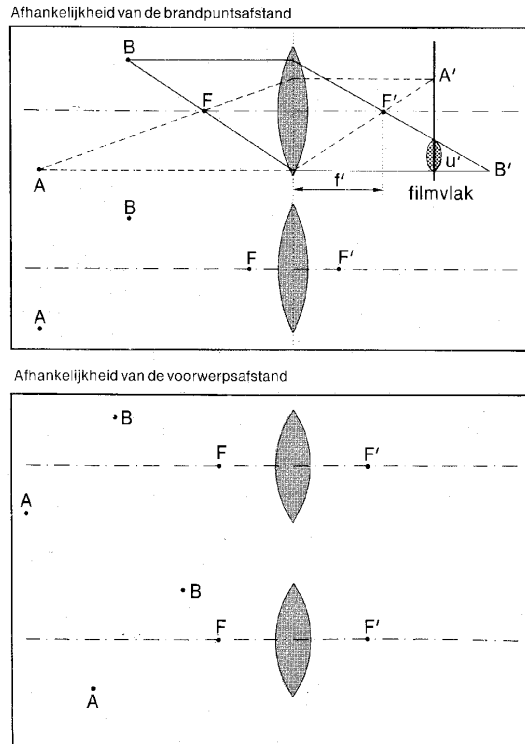
We herhalen nu het vorige kleine experiment. U strekt uw arm met opgeheven wijsvinger weer horizontaal en kijkt afwisselend naar het topje van uw vinger en naar het erachter liggende huis. Vervolgens houdt u voor uw oog een vel papier waarvan u de rand met een perforator van een cirkelvormig gaatje hebt voorzien. Door dit kleine "diafragma" kijkt u nog eens naar vingertop en huis. Wat valt u op? Als het gaatje (het diafragma) maar klein genoeg is, ziet u zowel vinger als huis - ondanks het onderling grote afstandsverschil - gelijktijdig scherp. Hetzelfde gebeurt in de fotografie. Het zal u wel bekend zijn dat de scherptediepte met toenemende diafragmering groter wordt. Waarom dat zo is vindt u in de voorgaande grote afbeelding verklaard. Gekonstrueerd zijn van twee verschillend ver verwijderde voorwerpspunten A en B de overeenkomstige beeldpunten A' en B'. Er is scherpgesteld op punt A. Van punt B vormt zich op het filmvlak een relatief grote verstrooiingscirkel. Diafragmeren we nu, dan wordt de hoek van de beide stralenbundels kleiner. Onder overigens gelijke omstandigheden wordt op het filmvlak het voorwerpspunt B als aanmerkelijk kleinere verstrooiingscirkel afgebeeld. Is deze niet groter dan de toelaatbare tolerantie ($1/10$ mm op het eindresultaat), dan ligt voorwerp B binnen de scherptediepte.

Het is gemakkelijk te begrijpen dat bij een kleine diafragma-opening de verstrooiingscirkel kleiner is dan bij een grote diafragma-opening en dat de scherptediepte daardoor toeneemt.

Invloed van brandpuntsafstand f en voorwerpsafstand a

Uit ervaring weet u: Een objectief van korte brandpuntsafstand heeft bij dezelfde opname-afstand een grotere scherptediepte dan een objectief van lange brandpuntsafstand.

De volgende afbeelding verduidelijkt dit:



Getekend zijn twee objektieven met "lange" en met "korte" brandpuntsafstand. In beide gevallen bevinden zich in de voorwerpsruimte twee even ver verwijderde voorwerpspunten A en B. In de bovenste tekening zijn de bijbehorende beeldpunten met behulp van een evenwijdig aan de as lopende straal en een brandstraal al gekonstrueerd. Het filmvlak is bij het beeldpunt A', d.w.z. op het verder verwijderde voorwerp, gesitueerd. Het voorwerpspunt B vormt op het filmvlak een verstrooiingscirkel van aanzienlijke grootte. Nu konstrueert u zelf in het tweede gedeelte van de tekening de beeldpunten A' en B' bij een objektief van "korte" brandpuntsafstand en stelt u het filmvlak op het verder verwijderde punt A af (filmvlak loopt dus door A'). Ook in dit geval ontstaat geen beeldpunt B', maar een verstrooiingscirkel van kleine omvang, die dus een aanzienlijk scherpere indruk maakt.

Brengt u nu de konstruktie ook in de daarop volgende afbeelding tot stand. Daar zijn twee objektieven van dezelfde brandpuntsafstand weergegeven, maar bevindt het puntenpaar A en B zich op verschillende afstanden van het objektief. Situeer ook nu het filmvlak bij beeldpunt A' en bepaal het grootteverschil van de zich voor B' vormende verstrooiingscirkels u' . U ziet dat bij gelijke brandpuntsafstand en gelijke diafragma-opening, de scherptediepte toeneemt naarmate de opname-afstand a groter is.

Grondregels voor scherptediepte
Relatieve opening (diafragma -getal)

Bij gelijke brandpuntsafstand en gelijke onderwerpsafstand (opname-afstand) is de scherptediepte bij kleine relatieve opening (hoog diafragmagetal) groter dan bij grote

relatieve opening (laag diafragmagetal).

Brandpuntsafstand

Bij gelijke relatieve opening en gelijke opname-afstand is de scherptediepte bij korte brandpuntsafstand groter dan bij lange brandpuntsafstand.

Voorwerpsafstand (opname-afstand)

Bij gelijke relatieve opening en bij gelijke brandpuntsafstand is de scherptediepte bij grote opname-afstand groter dan bij kleine opname-afstand.

Verder is de scherptediepte natuurlijk afhankelijk van de grootte van de toelaatbare scherptetolerantie, d.w.z. van de grootte van de verstrooiingscirkel u' .

Praktische Opdracht

U probeert deze verhoudingen door enkele eenvoudige opnamen aan te tonen. Het beste legt u een grote krant op de vloer en tracht u, door zes opnamen de drie grondregels die in 14.5.5. zijn gegeven, fotografisch uit te voeren. Om de zichtbaarheid te verbeteren legt u op de krant op gelijke afstanden lege filmdoosjes neer. Wanneer u de kamera in een hoek (van de vloer gemeten) van ongeveer 15° op dit onderwerp richt, verkrijgt u de beste resultaten.

d/ Hyperfocale afstand b

Als we scherpstellen op oneindig, komt de balguitrek van de kamera met de brandpuntsafstand f' overeen. Het is zeker aan te nemen dat daarbij niet alleen een voorwerpsvlak scherp is dat zich werkelijk oneindig ver weg bevindt. Door de scherptetolerantie strekt bij scherpstelling op oneindig het scherptegebied zich naar achteren in een oneindige zone uit en naar voren tot het zogenoemde hyperfocale punt P_b . Dit is het voorwerpspunt dat in de beeldruimte op het door het brandpunt F' verlopende instelvlak een verstrooiingscirkel u' in de grootte van de toelaatbare scherptetolerantie (bijv. $1/10$ mm bij het filmformaat 4×5 inch / 9×12 cm) vormt. De afstand van het objektief tot dit eerste, reeds scherp afgebeeld wordende, punt noemt men de hyperfocale afstand b . Deze afstand is afhankelijk van de brandpuntsafstand van het objektief f , van de toelaatbare grootte van de verstrooiingscirkel u' en van het diafragmagetal k :

$$b = \frac{f^2}{u' \cdot k}$$

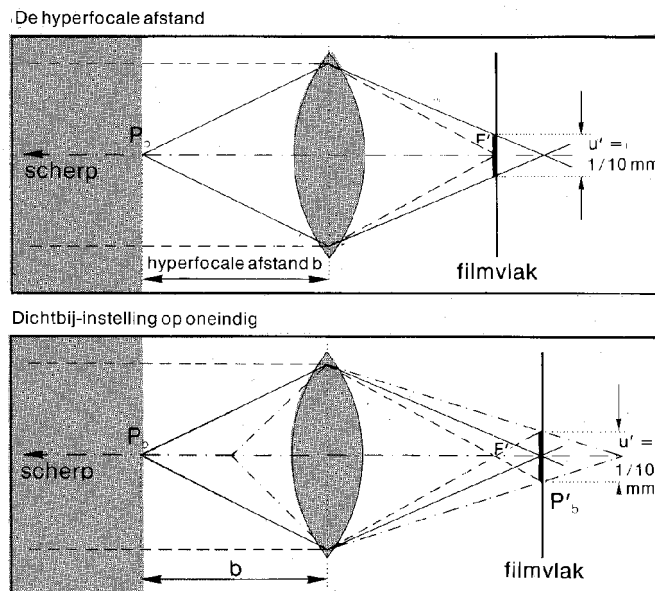
Opgave

Hoe groot is de hyperfocale afstand b bij een 50 mm-objektief (voor een kleinbeeld-kamera, $u' = 1/30$ mm) en diafragma 11?

Dichtbij-instelling op ∞ (oneindig)

Werken we met een balguitrek die met de brandpuntsafstand overeenkomt, d.w.z. stellen we op ∞ scherp, dan verspen we daarmee bij gelijke diafragma-opening een aanzienlijk scherptegebied. Een blik op afb. 329 verduidelijkt dit. Vanzelfsprekend zouden we op een dichtbij gelegen punt zodanig kunnen scherpstellen dat we voor een voorwerpspunt op oneindige afstand een verstrooiingscirkel van de tolerantiegrootte

zouden verkrijgen en ook een aanmerkelijk dicht bij het objektief liggend voorwerpspunt nog met aanvaardbare verstrooiingscirkel zou worden afgebeeld.



Stellen we op het hyperfocale afstandspunt P_b scherp, dan reikt de scherpte van de halve hyperfocale afstand tot oneindig. Op het instelvlak P_b' worden de voorwerpspunten uit oneindig en die op de halve hyperfocale afstand als even grote - aanvaardbare - verstrooiingscirkels afgebeeld!

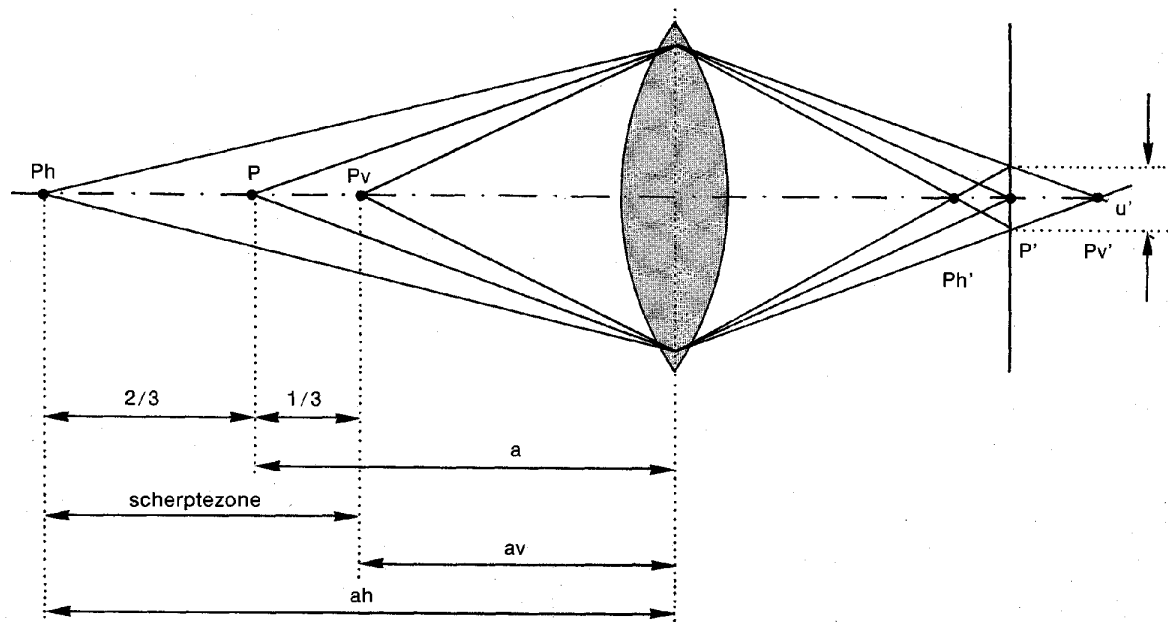
Eenvoudige fix-focus-kamera's waarop we de afstand niet kunnen instellen, zijn op dit principe gebaseerd. Bij zulke kamera's is de balguittrek zodanig gefixeerd dat de kamera bij vaststaande diafragma-opening het hyperfocale punt op het filmvlak scherp afbeeldt. Afhankelijk van brandpuntsafstand en vaste diafragma-opening strekt deze scherptediepte zich van een minimaal opnamepunt tot oneindig uit.

Oplossing van de opgave:

De hyperfocale afstand b bij een 50 mm objektief en diafragma 11 bedraagt voor een kleinbeeldcamera ($u' = 1130 \text{ mm}$) 6,81 meter. Dat wil zeggen dat bij scherpstelling op ∞ de scherpte van 6,81 meter tot in een oneindige zone reikt. Stellen we op de hyperfocale afstand $b = 6,81 \text{ meter}$ in, dan strekt de scherpte zich uit van de halve hyperfocale afstand 3,40 meter tot ∞ .

Gunstigste instelafstand

We kijken nog eens naar de afgewerkte foto's die u als scherptediepte-oefening hebt gemaakt. We zien dat vanaf het scherp ingestelde punt de scherptezone zich naar achteren over een groter gebied uitstrekt dan naar voren. Bij instelling op een bepaalde afstand valt 2/3 van de scherptezone achter en 1/3 van de scherptezone vóór het instelpunt. De oorzaak van dit verschijnsel wordt ons duidelijk in de volgende afbeelding:



De beste instelling voor een bepaald scherptegebied bevindt zich daar, waar in de beeldruimte de verstrooiingscirkels u' van het meest nabije punt P_v dat scherp wordt afgebeeld en van het achterste punt P_h dat scherp wordt afgebeeld elkaar bedekken. Voor de balguitrek a' is dit op een paar tienden micrometer na precies in het midden tussen de puntscherpe afbeeldingen P_v' en P_h' . Konstrueren we voor dit punt P' . Konstrueren we voor dit punt P' het bijbehorende punt P in de voorwerpsruimte, dan zien we dat de afstanden van dit punt ten opzichte van P_v en P_h zich verhouden als $1/3:2/3$.

Willen we nu in de praktijk een bepaald scherptegebied afbeelden, dan moeten we op ongeveer het eerste $1/3$ deel van het gewenste scherptegebied instellen en vervolgens diafragmeren tot het meest nabije en het verst verwijderde punt scherp worden weergegeven. Deze $1/3:2/3$ -instelling garandeert dat bij het diafragmeren de beide punten P_v en P_h gelijktijdig en bij hetzelfde diafragmagetal scherp worden afgebeeld.

Stel dat we een plantsoen moeten fotograferen waarvan het eerste scherp af te beelden punt 6 meter van de kamera verwijderd is (av) en waarvan het achterste scherp weer te geven punt op 18 meter afstand van de kamera ligt (ah). Op welke afstand moeten we nu scherpstellen?

De zojuist verklaarde vuistregel $1/3 : 2/3$ levert het volgende antwoord op: Het eerste $1/3$ deel tussen 6 en 18 meter is 10 meter. Bij scherpstellen op 10 meter zouden de punten P_h en P_v bij diafragmeren tot een bepaalde waarde gelijktijdig scherp worden.

Nu moeten we wel voor ogen houden dat het bij deze regel slechts om een vuistregel gaat die voor de praktijk weliswaar voldoende is, maar rekenkundig beschouwd niet zeer nauwkeurig. Daarom bestaat er voor de rekenkundige bepaling van de beste instelafstand een formule:

$$\text{gunstigste instelafstand} \quad a = \frac{2 \cdot av \cdot ah}{av + ah}$$

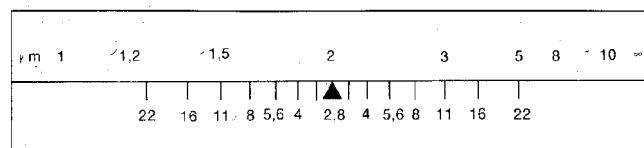
Wanneer we het bovenstaande voorbeeld aan de hand van deze formule narekenen, krijgen we als resultaat 9 meter. U ziet dat de genoemde vuistregel op zichzelf aardig nauwkeurig is.

Benodigd diafragma

Zodra de juiste instelafstand is gevonden, kunnen we langzaam diafragmeren en op het matglas hetzij het dichtstbijzijnde, hetzij het verst verwijderde punt observeren. Het juiste werkdiafragma is bereikt wanneer het betrokken punt scherp wordt weergegeven. Mathematici zullen deze methode te onnauwkeurig vinden. Voor hen geven we de berekeningsformule:

$$\text{benodigd diafragma } K = \frac{f' (ah - av)}{2 \cdot u' \cdot ah \cdot av} \quad (\text{benaderende formule})$$

Wanneer we het voorgaande voorbeeld nemen en voor de opname een middenformaat objectief met een brandpuntsafstand van 120 mm gebruiken ($u' = 1/20$ mm), dan krijgen we als resultaat 16. Bij diafragmeren tot 16 en scherpstellen op 9 meter moet het vereiste scherptegebied dus te overbruggen zijn. Zulke berekeningen zijn natuurlijk alleen noodzakelijk wanneer geen hulpmiddelen zoals scherptediepteschaal op het opname-objectief aanwezig zijn. Zelfs moderne technische kamera's (Sinar P en F) bezitten zo'n instelhulpmiddel.



De scherptediepteschaal die we op vrijwel alle objectieven vinden, geeft tegenover de afstandsschaal de scherptezone voor de verschillende diafragmawaarden aan. We lezen daartoe eenvoudig op de afstandsschaal de waarden af die tussen dezelfde diafragmawaarden links en rechts van het instelmerkteken liggen. De getallen hebben steeds betrekking op de verstrooiingscirkelgrootte u' die van het negatiefformaat van de kamera afhankelijk is

e/ Berekening van scherptediepte

In zeer zeldzame gevallen kan de kennis van de grootte van de scherptediepte in de praktijk belangrijk zijn, maar in de regel is het voldoende dat we de beste instelafstand en de noodzakelijke diafragmering weten. Een heel enkele keer, vooral in het dichtbijgebied, kan het van belang zijn dat we weten, hoe groot de totale scherpteruimte bij een bepaalde instelafstand en bij de gegeven brandpuntsafstand en het gegeven diafragmagetal is. Terwille van de volledigheid geven we de daarvoor bestaande formules. Voor middelgrote opnameafstanden bedienen we ons het beste van de formule:

$$\text{scherptediepte } a_1 = \frac{2 \cdot a \cdot (a - f) \cdot b}{b^2 - (a - f)^2}$$

In deze formule is de hyperfocale afstand b opgenomen die we vooraf moeten uitrekenen. Bij opnameschalen van 1:20 tot 1:10 verdient het gebruik van de volgende formule, die op de afbeeldingsmaatstaf betrekking heeft, aanbeveling:

$$a_i = \frac{2 \cdot u' \cdot k \cdot (1 + \beta')}{\beta^2}$$

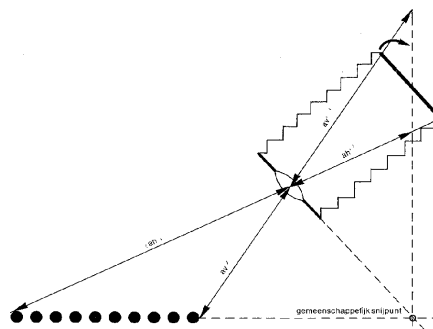
De afbeeldingsmaatstaf wordt bij bekende opname-afstand en bekende brandpuntsafstand als volgt uitgerekend:

$$\beta' = \frac{f}{a-f}$$

Scherpteverdeling volgens Scheimpflug

Voor een grote opname-afstand hebben we een kleinere balguittrek nodig dan voor een kleine opname-afstand.

Om een voorgrond dichtbij en een verre achtergrond gelijktijdig scherp af te beelden, zouden we voor de voorgrond met een grotere en voor de achtergrond met een kleinere balguittrek moeten werken. Deze op het eerste gezicht onverenigbare eisen kan een beweegbare technische kamera vervullen. Echte technische kamera's zijn zo gebouwd dat op een optische bank de objectieflouder en de filmhouder ten opzichte van elkaar verschuifbaar zijn. De houders zijn door een balg met elkaar verbonden. De houders zelf zijn door een vernuftig mechanisme zwenkbaar uitgevoerd; aan de gestelde eisen kan daardoor op eenvoudige wijze worden voldaan. De scherpste is al bij open diafragma over een voorwerpsvlak verdeeld wanneer de drie bij de opname betrokken vlakken, t.w. voorwerpsvlak, objectieflouder en filmvlak, in een gemeenschappelijk snijpunt samenkomen. Deze naar zijn ontdekker genoemde ***Wet van Scheimpflug*** maakt het mogelijk, in de technische fotografie ook kleine voorwerpen in hun geheel scherp af te beelden, iets wat met "starre" kamera's niet mogelijk is.

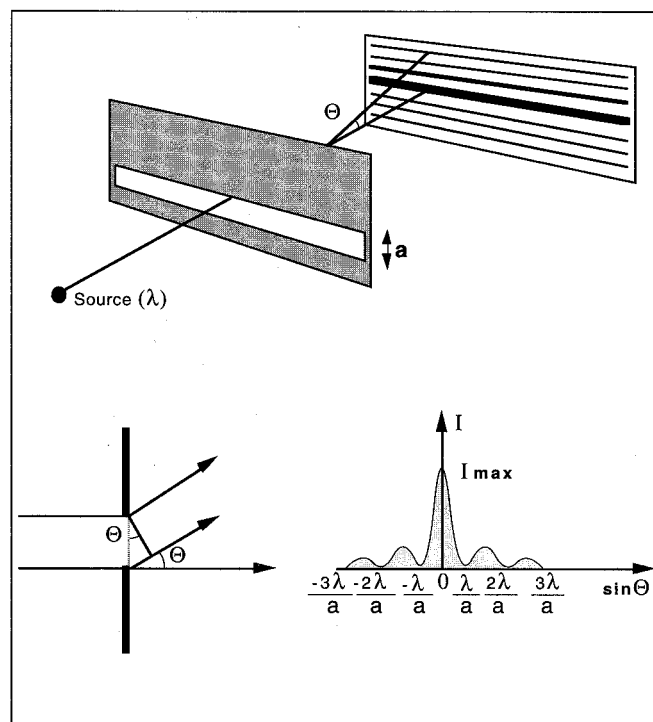


Bij driedimensionale voorwerpen of opstellingen legt men het scherpvlak overigens niet horizontaal, maar, naar gelang van het voorwerp, van achter boven tot naar voren onder. Zeer opzienbarende resultaten zijn te behalen wanneer men een scheefliggend vlak als instelvlak kan gebruiken. De scherpsteverdeling vindt dan plaats door dubbel zwenken om de verticale en de horizontale as. Zulk "dubbel" verdelen van de scherpste is met zogenaamde "wankelvrije" kamera's zoals de Sinar P en F op eenvoudige wijze mogelijk. Vindt de scherpsteverdeling uitsluitend plaats door zwenken van het filmvlak, dan verandert de perspektief als gevolg van de gewijzigde beeldprojectie. Scherpsteverdeling alleen door zwenken van het objectieflouder doet geen perspektivische verandering ontstaan.

Afbeeldingsfouten bij de enkelvoudige lens

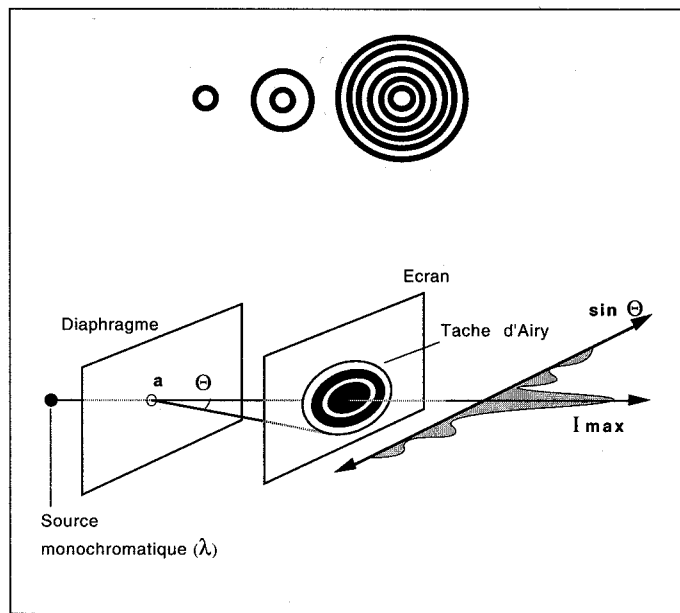
Bij het bespreken van de beeldvorming door lenzen gingen we steeds uit van de veronderstelling dat stralen vanuit een voorwerpspunt ook weer exact in één beeldpunt verenigd werden: de voorwaarde voor het verkrijgen van een optimaal scherp beeld. Verder zagen we dat van een werkelijk 'oneindig klein' beeldpunt geen sprake was, maar dat we van een beeldpunt mogen spreken als de diameter van de zogenaamde verstrooiingscirkels beneden een toelaatbare grootte blijft. Zoals duidelijk bleek bij de behandeling van de scherptediepte kunnen we soms de diameter van de verstrooiingscirkel kleiner maken door de diafragma-opening te verkleinen. Het blijkt nu dat tengevolge van een aantal factoren, samenhangende met de door optische wetten bepaalde gang der lichtstralen, een enkelvoudige lens niet in staat is alle evenwijdig op de lens vallende, of alle uit één voorwerpspunt komende stralen te verenigen in één beeldpunt, met het bekende gevolg van onscherpte van het gevormde beeld. We zullen achtereenvolgens deze factoren bespreken en zien wat er gedaan kan worden om de lichtstralen toch zo veel mogelijk in dat ene verlangde beeldpunt te concentreren.

1. Diffractie of buiging



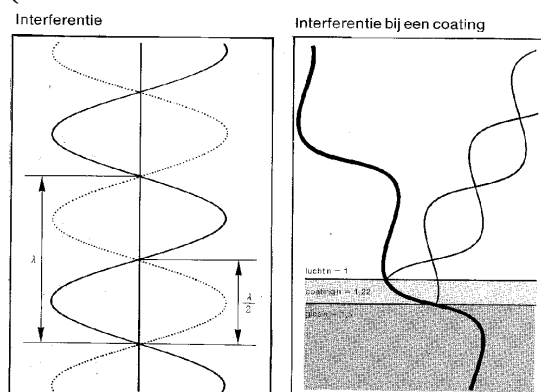
Plaatsen wij op de weg van een aankomend golfvront een scherm met een kleine opening, dan kan alleen het secundaire golfvront, behorende bij het punt juist voor die opening, zich in de ruimte achter het scherm uitbreiden. Alle andere secundaire golven in de richting van het scherm worden daardoor tegengehouden. Het in het punt in de opening ontstane golfvront kan zich ongestoord uitbreiden zonder dat golven, in punten anders dan op de normaal van het primaire golfvront liggend, uitgedoofd worden. Er is dan geen sprake meer van rechte lijnige voortplanting, er treedt het verschijnsel op dat men buiging of diffractie noemt. Het sterkst merkbaar wordt dit verschijnsel als de diameter van de opening vergelijkbaar wordt met de golflengte van de betreffende golven, in geval van het licht dus bij zeer kleine openingen. De buiging is een zeer sterk bewijs voor het golfkarakter van het

licht. In de fotografie ondervindt men het gevolg van buigingsverschijnselen als onscherpte bij het fotograferen met de zogenaamde gaatjescamera en bij het gebruik van zeer kleine diafragmaopeningen.



2. Interferentie en reflectie

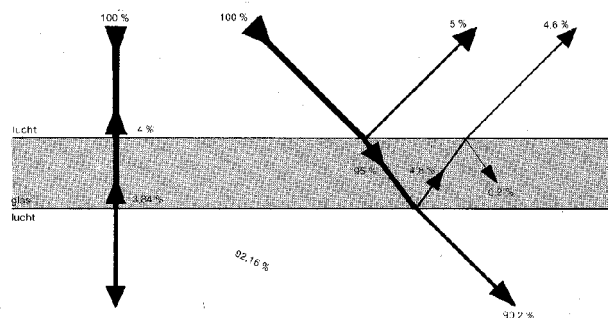
In de figuur zien we dat de lijn die de golfbeweging voor moet stellen hoogtepunten en dieptepunten heeft, gelegen respectievelijk boven en onder de rechte lijn die de voortplantingsrichting van het licht aangeeft. Gemakshalve spreken we van een golftop en een golfdal. Het kan zijn dat twee golfbewegingen (bijvoorbeeld twee 'lichtstralen') samengaan zodanig dat de golftoppen van de ene golf of trilling samenvallen, met de golftoppen van de andere. Zij versterken dan elkaars amplitude (bij licht zegt men elkanders intensiteit). Zijn de golfbewegingen een halve golflengte ten opzichte van elkaar verschoven dan vallen golftoppen van de ene samen met golfdalen van de andere, zij heffen dan elkaars amplitude (intensiteit) geheel of gedeeltelijk op (al naar hun amplitudes gelijk zijn of verschillen). Dit verschijnsel van onderlinge beïnvloeding van twee golfbewegingen noemt men interferentie (van het oud-Franse s'entreférir dat 'elkaar slaan' betekent).



De kans dat van twee verschillende lichtbronnen de lichtstralen zullen interfereren is zo minimaal dat wij die rustig kunnen verwaarlozen. Wel kunnen we van een en dezelfde lichtstraal een gedeelte ten opzichte van de rest 'verschuiven'. Laten we een lichtstraal reflecteren, bijvoorbeeld op een glasoppervlak, en is op dit oppervlak een dun laagje doorzichtige stof aangebracht dan zijn er in feite twee reflecterende oppervlakken, die van het glas zelf en die van dat laagje. Een klein gedeelte van het licht wordt op het oppervlak

van het laagje gereflecteerd, van het gedeelte dat er doorheen valt wordt een ander klein gedeelte op het oppervlak van het glas zelf gereflecteerd, verreweg het grootste gedeelte passeert door het glas. De beide gereflecteerde lichtstralen vallen samen. Stel nu, dat het bewuste laagje een dikte heeft die overeenkomt met een vierde gedeelte van de golflengte van het licht. Dan zal de op het glasoppervlak gereflecteerde straal een weg afleggen die $\frac{2}{4}$ of een halve golflengte langer is dan de op het bovenste oppervlak gereflecteerde straal. Golf-top en golfdal vallen dan samen. Men zegt ook wel dat de golven van beide lichtstralen een fase verschillen. Het gevolg is dat de straal gedoofd wordt, het aldus behandelde glasoppervlak reflecteert de door ons bedoelde lichtstraal niet. Daar er volgens een algemeen geldende natuurwet geen energie verloren kan gaan of vernietigd worden, moet de energie van die lichtstraal ergens blijven: zij passeert door het glas. Er gaat dus meer licht door het glas dan anders het geval zou zijn. Bovendien wordt in sterke mate voorkomen dat door inwendige reflectie in het objectief lichtstralen op andere dan voor de beeldvorming noodzakelijke plaatsen op het beeldscherm terechtkomen. Deze 'verdwaalde' lichtstralen benadelen de brillance (contrast) van het beeld en kunnen, vooral bij tegenlichtopnamen of opnamen waarbij een of andere lichtbron in het onderwerp afgebeeld wordt, onregelmatige en onvoorziene lichtvlekken in het beeld veroorzaken.

Wanneer licht op een grensvlak valt, kan niet de totale hoeveelheid in het aangrenzende medium overgaan, want een klein gedeelte van het op het grensvlak vallende licht wordt wetmatig gereflecteerd. Het lichtverlies is afhankelijk van de invalshoek, van het verschil in brekingsindexen van beide media (de brekingsverhouding) en natuurlijk ook van de lengte van de weg die het licht in het medium aflegt. Omdat deze soort reflectie slechts een bepaalde hoeveelheid van het licht betreft, is er dus sprake van gedeeltelijke reflectie.



Bij loodrechte inval van het licht kunnen we deze reflectie met de reflectieformule van Fresnel berekenen:

$$R = \left(\frac{n_A - n_B}{n_A + n_B} \right)^2$$

n_A is daarbij de gemiddelde brekingsindex van het lager brekende medium, n_B de gemiddelde brekingsindex van het hoger brekende medium.

Voor glas met de brekingsindex 1,5 bedraagt bijgevolg de reflectie van licht uit het medium lucht bij loodrechte inval van de stralen:

$$R = \left(\frac{1 - 1,5}{1 + 1,5} \right)^2 = 0,04 = 4 \%$$

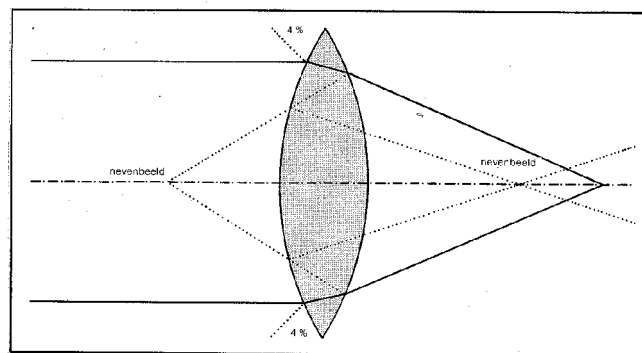
Is de invalshoek groter dan 0° , dan is ook de spiegeling iets groter. De Afbeelding toont de verhoudingen van de reflectie zowel bij invallen in als bij verlaten van een glazen plaat. Verwaarlozen we het verlies als gevolg van de dikte van de glasplaat, dan is bij uittreden ten

gevolg van de gedeeltelijke reflectie van het licht de lichtintensiteit nog maar weinig meer dan 90°.

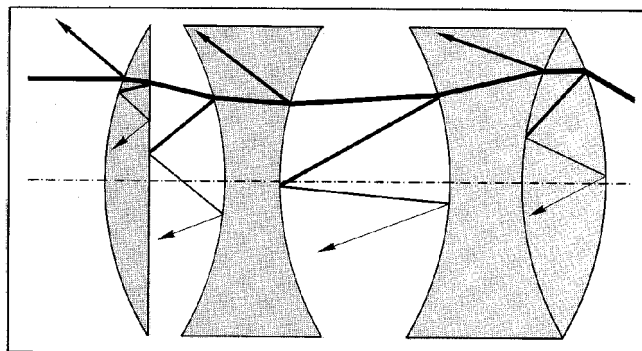
Reflektie bij objectieven

Gedeeltelijke reflectie treedt natuurlijk ook op wanneer lichtstralen in het complexe lenzenstelsel van een objectief vallen. Behalve een verlies aan licht treden daarbij ook nog andere nadelige verschijnselen op.

Zoals de volgende afbeelding verduidelijkt, doet de reflectie nevenbeelden ontstaan die over het eigenlijke beeld vallen. Reeds bij een enkelvoudige lens resulteert dit in een puntafbeelding voor het eigenlijke beeldvlak. Het nevenbeeld is weliswaar procentueel zwak, maar valt onscherp over het eigenlijke beeldpunt en leidt zo tot een verlies aan brillance. Bij objectieven die uit meer lenzen bestaan wordt het effect steeds groter.



Ontstaan van nevenbeelden



Reflektie in een triplet

Bij een triplet zonder coating met zes glas-lucht-vlakken en één glasglas-vlak bedraagt het lichtverlies al 27 %, d.w.z. ruim een halve diafragmastop! De kumulatie van nevenbeelden die gelijktijdig ontstaan, is zo groot, dat vooral in het gebied van de hoge lichten duidelijke voorbeelden van slechte afbeelding te vinden zijn. U kent het effect dat zich overwegend bij tegenlichtopnamen doet gelden: weinig echte scherppte, gebrek aan brillance, diafragmavlekken, overstralingen...

Vermindering van reflectie door coating

Volgens de reflectieformule van Fresnel is de reflectie groter naarmate de brekingsverhouding van twee media hoger is. Stel dat we op beide zijden van een glazen plaat die door reflectie een transparantieverlies van ongeveer 8 % heeft, een doorzichtige laag aanbrengen waarvan de brekingsindex ongeveer het midden houdt tussen die van glas en die van lucht. Er treden dan twee reflecties op, één bij inval van het licht in de aangebrachte

laag en één bij het grensvlak van de aangebrachte laag en het glas. We behoeven alleen maar beide reflecties uit te rekenen en de resultaten op te tellen om het totaal van de beide reflecties te vinden. In een voorbeeld van deze berekening is de brekingsindex van deze laag op 1,22 gesteld en die van het glas op

$$R_1 = \left(\frac{1 - 1,22}{1 + 1,22} \right)^2 = 0,00982$$

Reflektie tussen aangebrachte laag en glas

$$R_2 = \left(\frac{1,22 - 1,5}{1,22 + 1,5} \right)^2 = 0,01059$$

$$R_{\text{totaal}} = 0,02041 \cong 2 \%$$

Als de lichtstraal de glasplaat verlaat, gebeurt nog eens hetzelfde- het totale verlies door gedeeltelijke reflectie van het licht is dus nog maar 4%. Brengt men in plaats van één zo'n coating verscheidene coatings met trapsgewijs oplopende brekingsindexen aan, dan wordt de reflectie nog sterker verminderd.

Vier over elkaar aangebrachte lagen met de trapsgewijs oplopende brekingsindexen 1,1, 1,2, 1,3 en 1,4 verkleinen de totale reflectie in ons voorbeeld tot 1,6 %!

De interferentietruc

Zoals we weten kan licht met licht worden "gedoofd" wanneer het om twee golven, gaat die van dezelfde lichtbron afkomstig zijn. Gelukt het, een golf door een tweede golf van dezelfde golflengte zodanig te overlappen dat van beide golftreinen de golftoppen met de golfdalen samenvallen, dan elimineren ze elkaar. Dit is dus het geval wanneer de ene golf ten opzichte van de andere een halve golflengte is verschoven

Heeft nu een coating een laagdikte die precies met een kwart van een bepaalde golflengte van het zichtbare licht overeenkomt, dan wordt de reflectie voor deze golflengte volledig en die voor de naburige golflengten in ruime mate door interferentie opgeheven.

Maakt men de coating ongeveer 125 nm dik, dan bewerkstelligt deze bij de eerste en de tweede grenslaag reflecties die onderling een verschuiving van 250 nm hebben. Voor licht met een golflengte van 500 nm is daarmee gewaarborgd dat de reflecties elkaar doven. Licht van deze golflengte wordt dus niet gereflekteerd.



De coatings bestaan meestal uit lichtmetaalfluoriden die in een hoogvacuumkamer op de individuele lenzen worden opgedampt. Bij een zogenaamde meerlaags-coating kunnen de over elkaar aangebrachte afzonderlijke lagen met onderling verschillende brekingsindexen bovendien in verschillende dikten worden vervaardigd. Daardoor is de reflectie voor praktisch alle golflengten nagenoeg volledig opgeheven. Objectieven met meervoudige coating zogenaamde multi-coated objectieven, hebben in vergelijking met enkelvoudig of helemaal niet gecoate objectieven een aanzienlijk betere beeldbrilliance en kleurverzadiging.

Nevenbeelden behoren daarmee tot het verleden. Het is overigens nauwelijks nodig, het glasoppervlak van elke lens van een objectief van precies evenveel lagen te voorzien. De objectieffabrikant doet dit dan ook alleen maar daar, waar het werkelijk noodzakelijk is. Hij heeft bovendien de moeilijkheid, door het gebruik van bepaalde lichtmetaalverbindingen alle objectieven uit zijn assortiment wat kleurweergave betreft met elkaar in overeenstemming te brengen, zodat alle typen, of het nu om objectieven met korte of met lange brandpuntsafstand gaat, dezelfde eigen kleurdichtheid hebben.

3. Chromatische aberratie

Bij het prisma zagen we reeds dat licht van kortere golflengte sterker gebroken wordt dan dat van langere. Het gevolg is dat de brandpuntsafstand van een lens korter is voor violet en blauw licht dan bijvoorbeeld voor geel, oranje en rood licht. Bij de verklaring van de beeldvorming door een lens zijn we eigenlijk van de veronderstelling uitgegaan dat we met monochromatisch, dus éénkleurig licht, te maken hadden. We waken echter in de fotografie met een mengsel van verschillende kleuren licht, tezamen meer of minder wit licht vormend. Het fotografisch materiaal is voor nagenoeg al deze kleuren gevoelig. Inde hierop volgende figuur zien we dat tengevolge van de verschillen in breking en de daarmee samenhangende verschillen in brandpuntsafstand voor verschillende kleuren uit dat lichtmengsel, er eigenlijk nergens een punt aan te wijzen is waar alle lichtstralen samenkomen. Bewegen we het beeldvlak (matglas) dichterbij de lens dan komen we in het brandpunt voor violet, verder van de lens in dat voor rood. In welk van de brandpunten ons beeldscherm zich ook bevindt, altijd vormen de lichtbundels van de overige kleuren

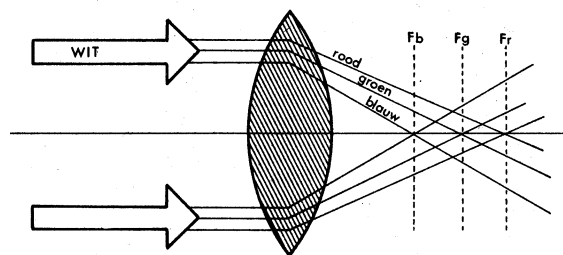


fig. 28. Chromatische aberratie.

geen punten op het scherm, maar cirkeltjes die onscherpte veroorzaken. Een scherp beeld zouden we wel verkrijgen als we fotomateriaal gebruikten dat maar voor één bepaalde kleur gevoelig was en we konden scherpstellen met juist die kleur licht. Vroeger was het materiaal uitsluitend gevoelig voor violet en blauw. Stelde men een beeld scherp op het matglas dan was dat uiteraard het geelgroene beeld, ons oog is immers het gevoeligst voor geelgroen. Op de matglascamera uit die tijd stond dan wel een merkteken dat aangaf hoever men het matglas terug moest schuiven om op de plaats van het violet-blauwe beeld terecht te komen. Nu het materiaal voor alle kleuren gevoelig is gaat deze methode natuurlijk niet meer op. Men noemde het blauw-violette brandpunt wel het chemische, het geelgroene het optische brandpunt. Het verschijnsel van brandpuntsverschil voor de verschillende kleuren noemt men chromatische aberratie (chromos = kleur, aberrare = afdwalen). Als we twee lenzen van precies dezelfde vorm (kromtestralen) vervaardigen, maar van verschillende glas-, soorten, dan zullen, wanneer de brekingsindex van die glassoorten voor een bepaalde kleur licht gelijk is, ook de brandpuntsafstanden voor die kleur gelijk zijn. Het is nu echter heel goed mogelijk dat de verschillen met de brandpuntsafstanden voor de andere kleuren niet gelijk zijn, maar afhankelijk van de glassoort, voor het ene glas aanmerkelijk groter dan voor het andere. We zeggen dan dat de kleurschifting of dispersie voor de ene glassoort groter is dan voor de andere. Door het feit dat brekingsindex en dispersie van verschillende glassoorten niet evenredig oplopen, bestaat de mogelijkheid het euvel van de chromatische

aberratie binnen zekere grenzen te verhelpen.

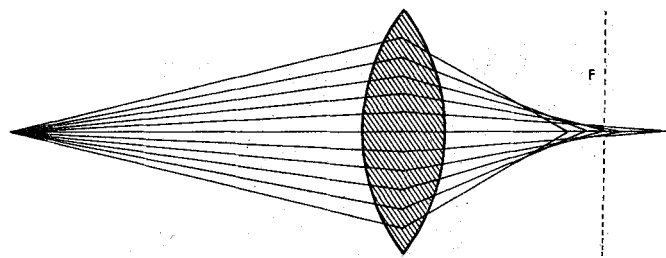
We zagen dat een positieve lens blauw en violet sterker breekt, dus sterker naar elkaar toe haalt, dan rood. Een negatieve lens spreidt echter die blauwe en violette stralen sterker. We kunnen daarom dispersie opheffen door een positieve en een negatieve lens te combineren. De combinatie moet natuurlijk een zekere brekende werking overhouden. Men neemt daarom een positieve lens van grote breking en kleine dispersie en een negatieve lens van relatief kleine breking en grote dispersie. Dit is mogelijk door juiste keuze van glassoort en lensvorm. Men neemt bijvoorbeeld een positieve lens van kroonglas in combinatie met een veel zwakkere negatieve lens van flintglas, waarvan de brekingsindex weliswaar iets groter, maar de dispersie veel groter is dan van kroonglas.



Op die wijze kan men de chromatische aberratie voor twee kleuren nagenoeg geheel opheffen en men kiest daarvoor twee belangrijke kleuren als violet en geel. Zo'n objectief, afgebeeld in figuur 29 noemt men een achromaat (a = niet). Door het gebruik van nog meer lenzen is het mogelijk de chromatische aberratie op te heffen voor drie kleuren, inclusief rood waarvoor het moderne panchromatische materiaal ook gevoelig is. Men spreekt van een op die wijze gecorrigeerd objectief als van een apochromaat (apo = weg, afwezig). Voor normale fotografie voldoet over het algemeen een achromatisch objectief, voor de bijzondere eisen in de reproductiefotografie gebruikt men de veel duurdere apochromaten.

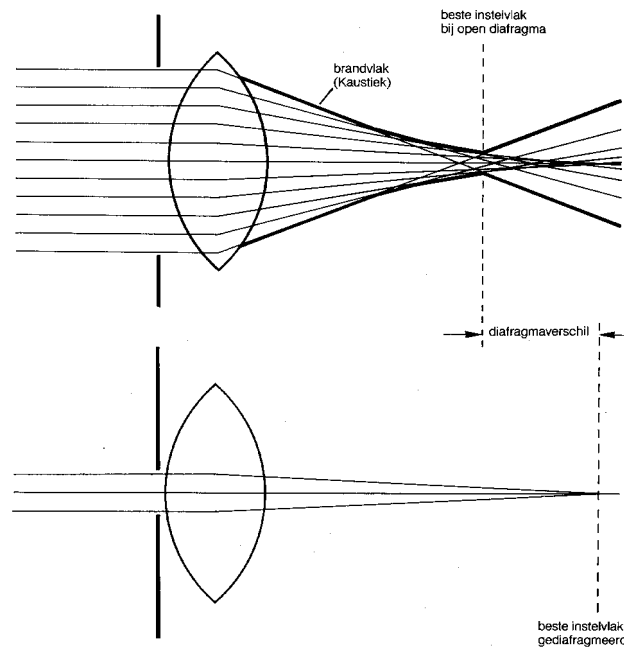
4. Sferische aberratie

Ook al gebruiken we monochromatisch licht, zodat we geen last hebben van chromatische aberratie, dan nog blijken de lichtstralen door de enkelvoudige lens niet in één brandpunt gebroken te worden. Van een evenwijdig aan de hoofdas op de lens invallende lichtbundel worden de buitenste stralen, de randstralen, het sterkst gebroken en ligt het brandpunt daarvan dus dichterbij de lens. Dit is een gevolg van de bolvorm van de lensoppervlakken, die op elk gedeelte van het oppervlak dezelfde kromming vertonen. In feite zou die kromming in het midden sterker moeten zijn en zou de lens niet-bolvormige, zogenaamd asferische (het Griekse a = niet, sphaira = bol) oppervlakken moeten hebben.

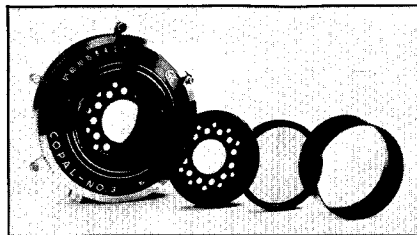


Men maakt dan ook wel voor speciale doelen asferische lenzen. Men kan ze echter niet door machinaal slijpen in dezelfde grote series maken als sferische lenzen, wanneer grote nauwkeurigheid vereist wordt. Nauwkeurig geslepen asferische lenzen zijn daarom zeer kostbaar en bovendien niet geschikt voor normale fotografie, maar slechts daar wanneer één bepaald punt weer als punt afgebeeld moet worden, bijvoorbeeld in de astrofotografie. Wanneer geen hoge eisen gesteld worden, zodat men eenvoudig met gieten en eventueel polijsten van het glas kan volstaan, behoeft de prijs niet bijzonder hoog te zijn en men gebruikt bijvoorbeeld asferische lenzen als condensor in projectoren. Met behulp van een juiste, bijvoorbeeld parabolische, vorm kan de sferische aberratie, zoals de betreffende

afbeeldingsfout heet, ook in één enkele lens geheel gecorrigeerd worden.



De Nederlandse hoogleraar in de optica, prof. dr. van Heel voerde in onze taal het woord askring voor sferische aberratie in, aangezien een lichtend punt op de optische as in de voorwerpsruimte weergegeven wordt door een cirkeltje of kringetje. Wanneer we verschillende vormen van normale, sferische lenzen onderzoeken dan blijkt de grootte van de sferische aberratie afhankelijk van de vorm, en het minst te zij zijn bij een dubbelbolle lens waarvan de kromtestralen zich verhouden als 6: 1, met het sterkst gekromde vlak naar de voorwerpsruimte gekeerd. Evenals bij de chromatische aberratie het geval was, is de sferische aberratie bij negatieve lenzen tegenovergesteld aan die bij positieve lenzen. Ook bij de negatieve lens zal de ene vorm een grotere sferische aberratie vertonen dan de andere van overigens gelijke sterkte. Sferische aberratie kan men daardoor voor een groot deel opheffen door een sterk brekende positieve lens van zo gunstig mogelijke vorm, dus met zo gering mogelijke sferische aberratie, te combineren met een zwakke negatieve lens van een vorm die een zo sterk mogelijke sferische aberratie vertoont.



Afb. 408 Rodenstock-Imagon met zeefdiafragma en grijsfilter



5. Astigmatisme en beeldveldwelving

In het voorgaande bekeken we de aberratie van lichtstralen die uit een punt op of vlak bij de hoofdas kwamen. Daar onze onderwerpen over het algemeen een grotere omvang hebben, krijgen we ook te doen met lichtbundels die veel schuiner op het objectief invallen. Daarbij treedt dan een eigenaardig verschijnsel op, dat men astigmatisme noemt (van het Griekse α = niet en stigma=punt). In plaats dat de uit één voorwerpspunt komende bundel in één beeldpunt samengetrokken wordt, verenigen de stralen zich in twee lijntjes die op verschillende afstand van het objectief liggen. Denkt men zich de lichtbundel verdeeld in twee loodrecht op elkaar staande vlakken dan vormen de stralen die in het horizontale vlak invallen een beeldlijntje dat verder van de lens aflight dan het beeldlijntje dat door de stralen gevormd wordt die in het verticale vlak invallen. Dit laatstgenoemde beeldlijntje, het zogenaamde tangentielle beeldlijntje, ligt verticaal, tegenover het andere, het sagittale lijntje, dat horizontaal ligt. Hoe schuiner de bundel op de lens invalt, hoe langer de lijntjes worden en tevens hoe dichter zij bij het objectief gevormd worden. De afstand tussen beide lijntjes wordt evenwel steeds groter. Het astigmatisme wordt kleiner naarmate het voorwerpspunt dichterbij de hoofdas ligt en verdwijnt tenslotte voor punten op de hoofdas. De lijntjes zijn dan weer beeldpunten en vallen samen. De lijntjes voor alle voorwerpspunten uit de voorwerpsruimte vormen een beeld, dat met het groter worden der lijntjes naar de rand van het beeld steeds onscherper wordt. In feite ontstaan twee dergelijke beelden, het sagittale en tangentielle beeld, die niet in een plat maar schaalvormig vlak liggen en waarvan het tangentielle beeldvlak het sterkst gewelfd is. Beide schalen vallen op de hoofdas samen. Het is bijzonder moeilijk het astigmatisme onder woorden te brengen en evenzeer het in een tekening op een plat vlak te illustreren. In de figuur dienen we ons het verticaal gearceerde vlak als verticaal, het horizontaal gearceerde vlak als horizontaal, dus loodrecht op het papieroppervlak van de tekening, voor te stellen. De figuur 2 geeft een overdreven voorstelling van de welving van het tangentielle en het sagittale beeld. Figuur 1 geldt eigenlijk voor een 'oneindig dunne' stralenbundel, die uiteraard niet te tekenen is en waarin zeker geen stralenverloop aangegeven kan worden. Het astigmatisme is een aberratie van scheef invallende 'oneindig smalle' bundels, diafragmeren om de bundel smaller te maken vermindert de fout niet. Het is duidelijk dat wij nergens het beeldscherm zo kunnen plaatsen dat een scherp beeld ontstaat.

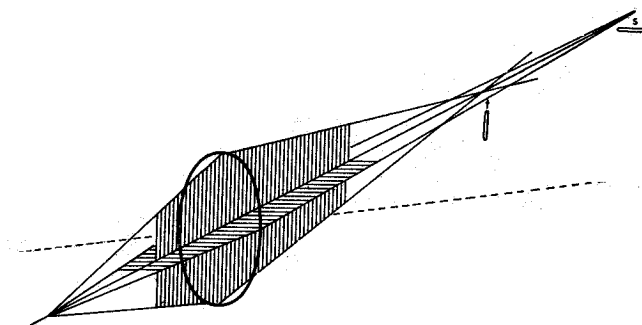


fig 1.:Astigmatisme. Bij t vormen de lichtstralen in het verticale vlak het tangentielle beeldlijntje, bij s vormen de lichtstralen in het horizontale vlak het sagittale beeldlijntje.

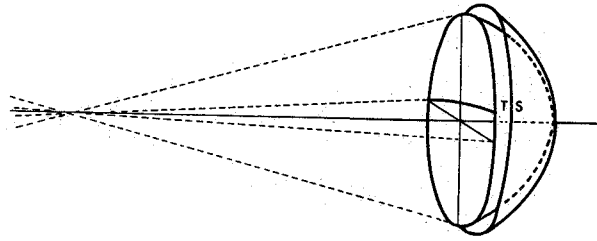
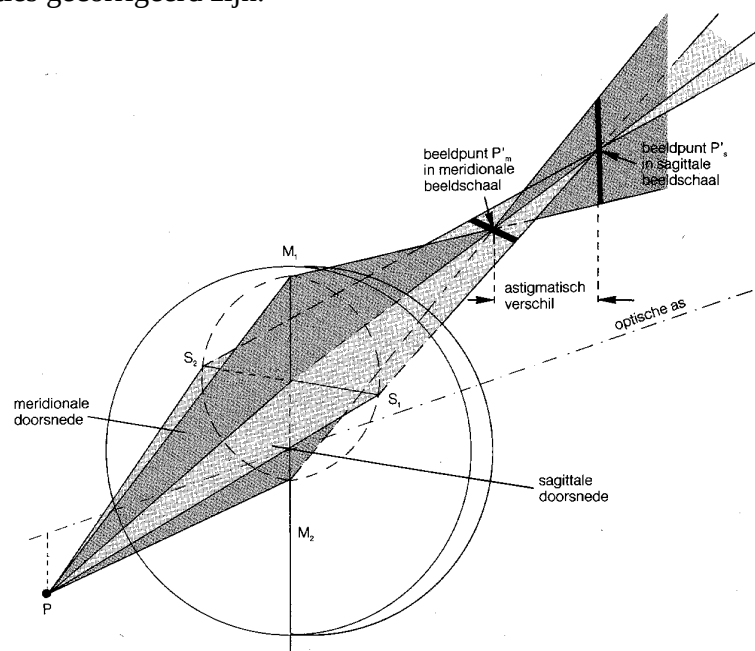


fig. 2. Beeldvlakwieling. Het tangentiale beeld T is sterker gewelfd dan het sagittale beeld S.

De minste onscherpte zou liggen op een schaalvormig vlak dat juist tussen beide beeldvlakken in lag, dit zou dus altijd nog een gewelfd beeldvlak zijn en de scherpte zou in het midden goed zijn, maar naar de randen toe snel afnemen. Het astigmatisme is duidelijk te demonstreren door het beeld, gevormd door een eenvoudige lens, op een matglas in te stellen. Als object dient dan een figuur van verticale en horizontale lijnen, waarvan het beeld tot aan de randen van het beeldvlak valt. Stelt men scherp op de horizontale lijnen dan ziet men het tangentiale beeld, dat de verticale lijnen onscherp weergeeft, schuift men het matglas verder van de lens dan worden de verticale lijnen scherp en de horizontale onscherp: het sagittale beeld. De beeldlijntjes geven namelijk een scherp beeld van een lijn als zij in elkaars verlengde liggen en niet als zij loodrecht op die lijn staan. De reeds genoemde gunstigste lensvorm ten opzichte van de sferische aberratie (kromtestralen 6 : 1) blijkt juist een zeer sterk astigmatisme te veroorzaken. De gunstigste vorm in dit geval is een meniscus met de holle kant naar het diafragma gekeerd. Men kan de kromtestralen daarvan zodanig kiezen dat het astigmatisme nagenoeg geheel verdwijnt, de beeldvlakken vallen dan samen maar blijven gewelfd. Het zou trouwens in strijd met de optische wetten zijn als voor scheef invallende bundels een langere brandpuntsafstand gold, hetgeen het geval zou zijn met een plat beeldvlak. Maar een punt wordt nu weer als punt afgebeeld en we hebben een scherp beeld dat in een schaalvormig vlak ligt. Vlak wordt dit beeldveld indien de kromtestralen van de beide vlakken van de meniscus gelijk zijn. Zo'n lens vertoont uiteraard een sterke chromatische en sferische aberratie, die dus nog gecorrigeerd dienen te worden. Een voor astigmatisme gecorrigeerd objectief heet anastigmaat. Wat men tegenwoordig anastigmaten noemt zijn uiteraard objectieven die ook zo veel mogelijk voor andere aberraties gecorrigeerd zijn.



6. Coma

Bij het astigmatisme spraken we over een 'oneindig smalle' lichtbundel. Heeft evenwel de scheef invallende bundel een zekere doorsnede, bepaald door het diafragma, dan treedt voor deze bundel sferische aberratie op (2.5.3), ook al is de lens goed gecorrigeerd voor astigmatisme. Door het asymmetrische verloop van de lichtstralen ontstaan in plaats van beeldpunten onregelmatig gevormde en verlichte, soms min of meer komeetvormige, lichtvlekjes. Naar deze vorm heet deze aberratie coma.

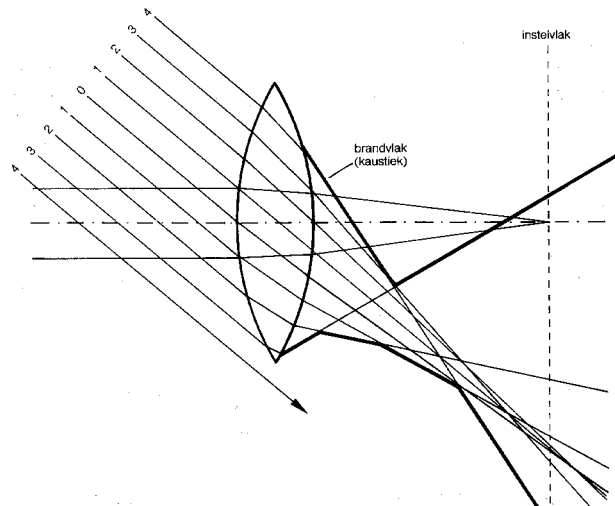
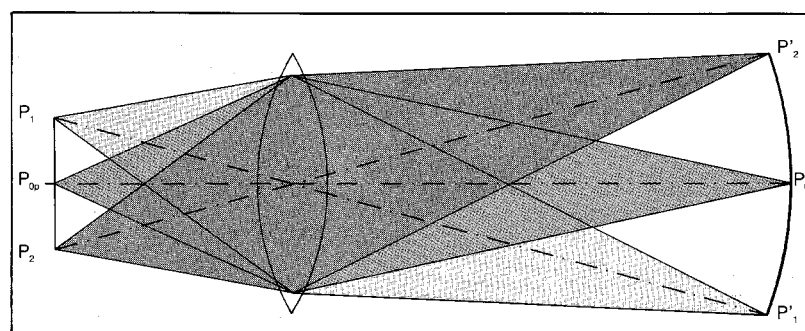


fig: Ontstaan van coma.

Hoewel ingewikkelder door het schuine verloop der stralen wordt de coma op in principe dezelfde wijze gecorrigeerd als de sferische aberratie of askring. Coma veroorzaakt een eigenaardige onscherpte en verlies van brillance, sterker wordend naar de randen van het beeld. Diafragmeren vermindert de gevolgen van deze aberratie, evenals dat bij sferische aberratie het geval is.

7. Distorsie of vertekening

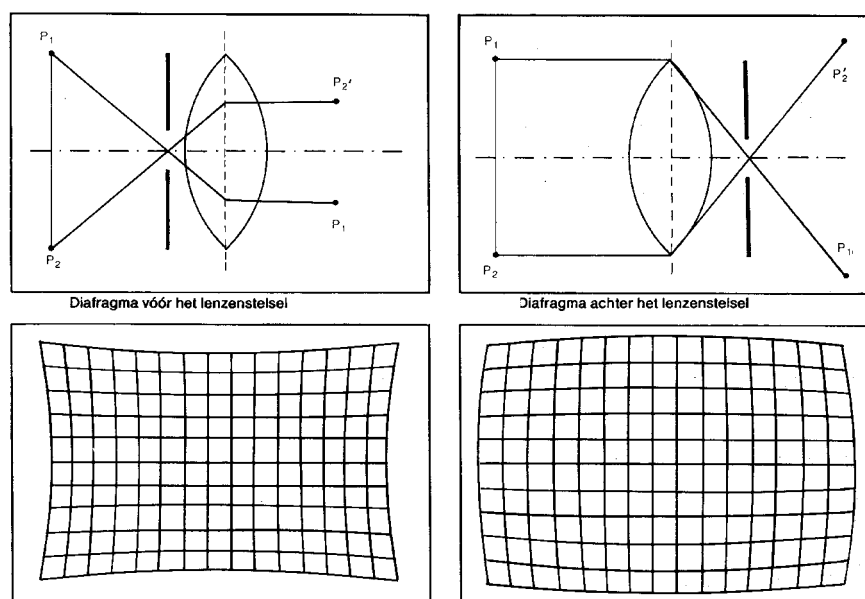


De tot nu toe genoemde aberraties veroorzaakten onscherpte van het beeld. Het kan echter ook zijn dat afwijkingen optreden in de afmetingen van het beeld. De afbeeldingsmaatstaf zou in alle delen van het beeldvlak even groot moeten zijn. Dit blijkt nu bij een enkelvoudige lens niet het geval te zijn, en wel wordt de afbeeldingsmaatstaf geleidelijk groter of kleiner naar de rand van het beeld. Dit blijkt afhankelijk van de plaats van het diafragma: staat dit achter de lens dan wordt de afbeeldingsmaatstaf naar de randen toe groter, staat het voor de lens dan wordt de afbeeldingsmaatstaf naar de randen toe kleiner. Het gevolg is dat in het

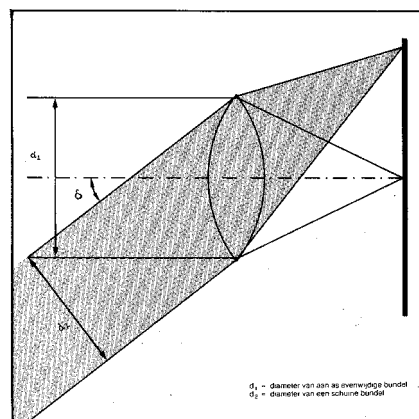
eerste geval een vierkant afgebeeld wordt als een figuur met holle zijanten, naar deze vorm spreekt men van kussenvormige vertekening. In het tweede geval vertoont de afbeelding van een vierkant bolle zijanten, men noemt dit tonvormige vertekening.

Vooraf voor technische en architectuurfotografie en voor reproductiefotografie is deze vertekening, ook wel distorsie genoemd, zeer ongewenst. Voor portretfotografie en bij andere onderwerpen waar strenge rechte lijnigheid in het beeld van geen belang is, is een matige distorsie niet storend en zelfs nauwelijks merkbaar.

Men kan de ton- of kussenvormige vertekening opheffen door bij een volkomen symmetrisch objectief het diafragma precies in het midden tussen de objectiefdelen te plaatsen. Bij geheel symmetrische stralengang van de lichtstralen en bij afbeeldingsmaatstaf 1 : 1, is de vertekening dan geheel verdwenen. Echter blijkt bij een dergelijk objectief ook de vertekening voor onderwerpen op grote afstand gering en kan door kleine wijzigingen in de symmetrie van het objectief nagenoeg geheel gecorrigeerd worden. Bij asymmetrische objectieven kan men de vertekening door een juiste keuze van de plaats van het diafragma tot in voor de praktijk van de 'normale' fotografie voldoende mate opheffen.



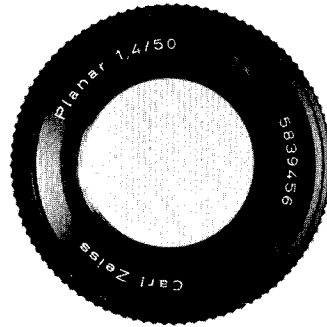
8. Vignettering of lichtafval



De lens is gevat in een ronde opening. Bij een uit meerdere lenzen bestaand objectief zal deze vatting een zekere lengte moeten hebben om de rij lenzen te kunnen bevatten. Het wordt dan een soort bus of tubus die men, vooral bij groothoekobjectieven, zo kort mogelijk tracht te houden. Er bestaat anders het gevaar dat schuin invallende stralen de tubus niet kunnen passeren maar tegen de tubuswand terecht komen. Hierdoor ontstaat

lichtafval naar de hoeken, in zeer erge gevallen ook binnen de randen van het beeld. Men noemt deze lichtafval vignettering (ook wel 'schoorsteeneffect'). We zien, als we de achterkant van een objectief bekijken en dit in schuine stand ten opzichte van de blikrichting draaien, dat de achterste vatingrand op een gegeven ogenblik de diafragmaopening begint te bedekken.

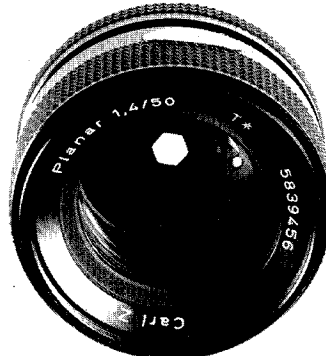
Aan optische as evenwijdige bundel bij open diafragma



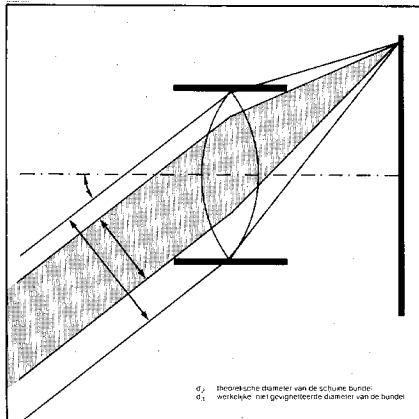
Schuine bundel bij open diafragma



Schuine bundel bij gesloten diafragma



Kunstmatige vignettering

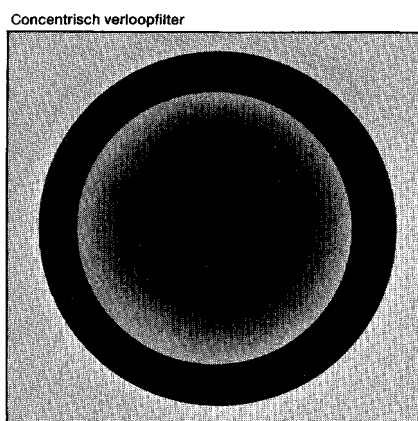


De vignettering bepaalt dus mede hoe groot de bruikbare beeldhoek van een objectief zal zijn. De vignettering zal minder snel optreden bij objectieven van korte, gedrongen bouw. Deze vorm is dus vooral bij groothoekobjectieven noodzakelijk en vignettering wordt dan vaak nog verder voorkomen door de voorste en achterste lens aanmerkelijk groter te maken dan de rest, zodat de doorsnede van zo'n objectief (bijvoorbeeld Super-Angulon) door zijn in het midden sterk 'ingesnoerde' vorm aan een diabolo (een uit de tijd rakend speelgoed) doet denken. Vertoont het objectief voor het gebruikte formaat geen vignettering dan kan men die zelf nog veroorzaken door gebruik van een te lange of te nauwe lenskap (zonnekap). De lenskap die voor een objectief met normale beeldhoek voldoet, kan vignettering veroorzaken indien gebruikt op een groothoekobjectief. Bijzondere 'aandacht verdient dit wanneer men aan de technische camera verschuivingen of zwenkingen toe gaat passen: een lenskap die voldoet bij normale stand van voor- en achterwand kan vignettering opleveren bij verschuiving of zwenking van voor- of achterwand. Men maakt dan de

opname zonder lenskap of neemt in plaats hiervan een zogenaamd compendium. Dit is een soort grote, uit een balg bestaande lenskap waarvan de voorkant verschuifbaar en zwenkbaar is en die men zodanig kan verstellen dat de stralengang van object naar objectief niet verhinderd wordt.

Vignettering zou in zekere zin nog veroorzaakt kunnen worden door een centraalsluis in het objectief, wanneer die op een ongunstige plaats ingebouwd is. Zo'n sluis begint vanuit het midden open te gaan tot zijn grootste opening en sluit dan weer van af de rand met steeds kleiner wordende opening naar het midden toe. Gedurende de tijd dat de sluis niet geheel openstaat (tijdens het openen en sluiten) zou vignettering kunnen optreden, tenzij de sluis op de plaats van, of vlak bij, het diafragma staat. De sluis werkt dan zelf als een diafragma en het beeld wordt tijdens het openen en sluiten over de gehele oppervlakte gelijkmatig lichter, respectievelijk donkerder. Vignettering door onjuiste plaats van de centraalsluis (bijvoorbeeld achter het verwisselbare objectief) zal het sterkst optreden bij zeer korte belichtingstijd, daar dan de sluis maar korte tijd geheel open staat in verhouding tot de voor openen en sluiten benodigde tijd. In de praktijk vinden we wel kleinbeeldcamera's met achter het verwisselbare objectief aangebrachte centraalsluis, die op kleurenomkeermateriaal bij krappe belichting met de kortste sluitertijd duidelijk vignettering in de blauwe hemel veroorzaken. Als men met kleiner diafragma en overeenkomstig langere tijd dezelfde opname maakt blijkt het euvel vaak geheel verdwenen.

Afgezien van de boven beschreven vignettering door 'afschaduwing', zal ieder door een objectief op een scherm ontworpen beeld vanuit het beeldcentrum (op de optische as) naar de randen toe in lichtsterkte afnemen. Vanuit dit beeldcentrum ziet men de diafragma-opening als een zuivere cirkel, hoe verder men van het centrum afgaat hoe meer de diafragma-opening een ellipsvorm vertoont. Het oppervlak van de opening wordt dus (schijnbaar) kleiner en daarmee de doorgelaten hoeveelheid licht. De lichtsterkte aan de rand van het door een goed objectief van normale beeldhoek gevormde beeld blijkt vaak 50% van de lichtsterkte in het midden te zijn, bij groothoekobjectieven kan dit nog minder zijn. Bij zwart-witfotografie is de speling in de belichting groot genoeg en zal dit verschil nauwelijks merkbaar zijn. Voor kleurenfotografie dient men kritischer te zijn.



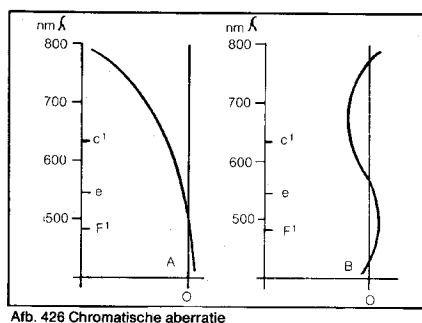
Voorstelling van de korrektietoestand

Het zal de objektiefkonstrukteur niet gelukken objectieven te berekenen die onder alle omstandigheden en voor elk gebruiksdoel dezelfde optimale prestaties leveren. Hij moet voor elk geval compromissen aangaan en de korrektietoestand van zijn objectieven op zeer bepaalde toepassingsgevallen afstemmen. In verhandelingen en in goede catalogi van objectieffabrikanten wordt daarom de korrektietoestand van een objektief door een grafiek weergegeven. Drie van zulke onderling verschillende wijzen van afbeelden willen we wat nauwkeuriger bekijken.

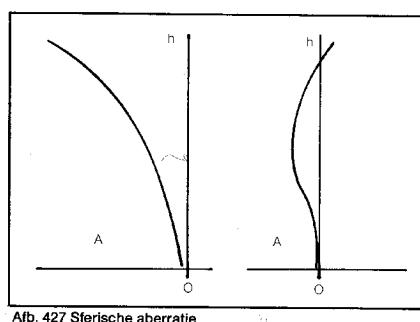
1. Grafiek van Von Rohr

Voornamelijk in oudere publikaties vinden we de korrektietoestand volgens Von Rohr voorgesteld. Het gaat om een grafiek die aangeeft, in welke mate het objektief van het theoretische ideaalbeeld afwijkt. Als regel hebben de voorstellingen rechtstreeks betrekking op zeer bepaalde optische afbeeldingsfouten.

De afbeelding laat een Von Rohr-grafiek voor de chromatische aberratie zien. Kurve A heeft betrekking op een ongecorrigeerde enkelvoudige lens, kurve B op een apochromaat. In de grafiek wordt de afwijking in procenten van de brandpuntsafstand voor elke golflengte van het opnamelicht aangegeven.



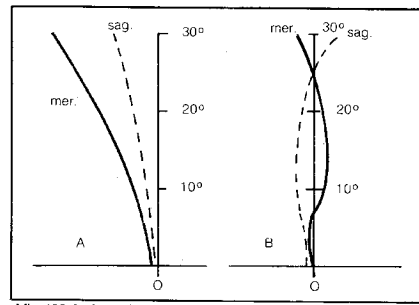
In de volgende afbeelding wordt de optredende sferische aberratie getoond: A voor een ongecorrigeerde losse lens, B voor een gebruikelijk kamera-objektief. De weergave geldt voor een bepaalde afbeeldingsmaatstaf. De ordinaat (vertikale as) geldt de hoogte van het beeld (van het midden van het beeld af gerekend) en de abscis (de horizontale as) toont de afwijking in procenten van de brandpuntsafstand.



Vinden we in zo'n grafiek ook nog een gestippelde lijn, dan heeft deze betrekking op de zogenoemde sinusvoorwaarde. De sinusvoorwaarde van Abbe eist voor alle beeldhoogten dezelfde afbeeldingsmaatstaf. Bij een goed gecorrigeerd objektief dient daarom de kurve van de sinusvoorwaarde zoveel mogelijk gelijk te lopen aan de korrektiekurve en belde dienen dicht bij de nullijn te liggen.

De grafiek in de derde afbeelding ten slotte geeft uitsluitsel over het astigmatisme en de

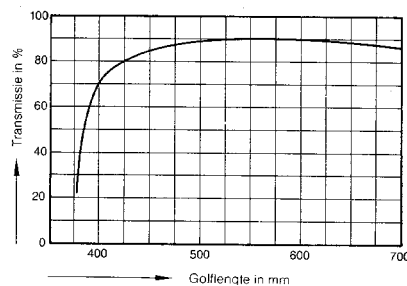
beeldveldwieling. Kurve A geeft een ongekorrigeerde enkelvoudige lens weer, kurve B een objektief waarvan zowel het astigmatisme als beeldveldwieling redelijk goed zijn gekorrigeerd. In de grafiek vormt de ordinaatwaarde de invalshoek van de onderzochte lichtstraal. De abscis geeft de afwijking in procenten van de brandpuntsafstand aan. De ene kurve geldt voor de meridionale, de andere voor de sagittale stralen.



Afb. 428 Astigmatisme

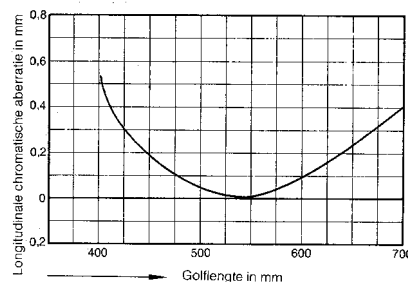
2. Funktionale grafiek

Nu volgen enige modernere grafieken van de verschillende eigenschappen van een objektief. Het gaat daarbij eveneens om de grafiek van een functie, ditmaal echter binnen een afzonderlijke kwadrant getekend. De transmissiegrafiek toont de algemene lichtdoorlatendheid van het gehele glazen stelsel voor de verschillende golflengten:



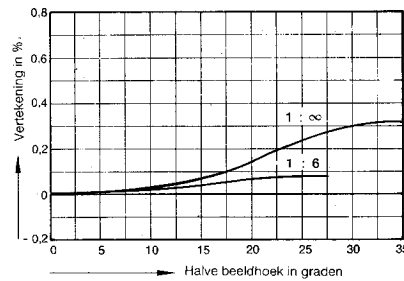
Afb. 429 Transmissie

De longitudinale chromatische aberratie laat bij scherpstelling op oneindig voor de verschillende golflengten **het uittrekverschil** in millimeters zien:



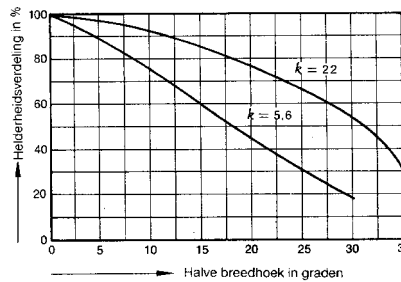
Afb. 430 Longitudinale chromatische aberratie

De optredende vertekening wordt voor twee verschillende afbeeldingsmaatstaven aangegeven. De kurve geeft de functie tussen de beeldhoogte (aangegeven als halve beeldhoek) en het beeldgrootte-verschil in procenten weer:



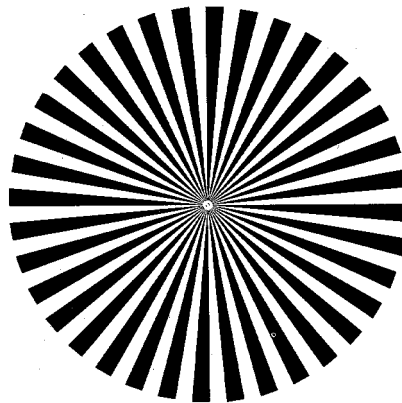
Afb. 431 Vertekening

De vignettering tenslotte is voor twee diafragmawaarden aangegeven en sluit daardoor ook de mate van kunstmatige vignettering in. De functie trekt vergelijkingen tussen beeldhoogte (als halve beeldhoek aangegeven) en de algemene helderheidsverdeling in procenten:



Afb. 432 Vignettering

3. Scheidend vermogen



Afb. 433 Siemens-ster, zoals geleverd door Fotowand Technic.

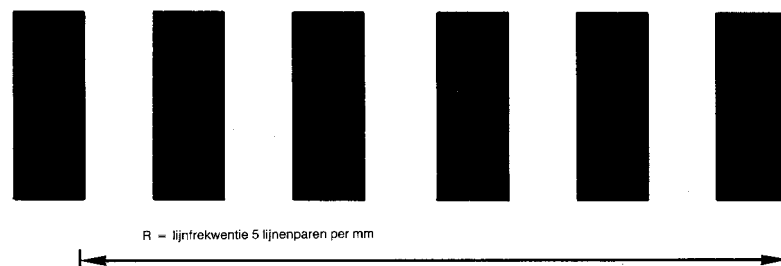
Het is de taak van een objectief, de grijswaardeverschillen van een origineel optimaal naar het beeld over te brengen. We kunnen een objectief in dit opzicht met een hi-fi-installatie vergelijken. De hi-fi-installatie heeft tot taak, een muziekstuk met zo weinig mogelijk verliezen te versterken en naar het oor van de luisteraar over te brengen. Een objectief kan dit zoals we weten niet voor honderd procent doordat het met een reeks afbeeldingsfouten behept is. Bij moderne objectieven is het nauwelijks nog mogelijk en ook niet erg zinvol om de verschillende optische overbrengingsfouten vast te leggen of een bepaald afbeeldingsfenomeen onder een bepaalde optische fout te rangschikken. Omdat het begrip "scherpte" voor de meeste gebruikers van een objectief volstrekte prioriteit heeft, heeft men gedurende een lange reeks van jaren over het zogenoemde scheidende vermogen of oplossende vermogen gesproken. Dit vermogen geeft aan, hoeveel zwarte lijnen per millimeter van een origineel nog worden afgebeeld. Testfiguren voor het bepalen van dit scheidend vermogen in lijnenparen per millimeter zijn onder andere **de Siemens-ster**, **de zeshoek van Schumann**, **de Foucault-tralies**, enz.

Zulke tests beantwoorden echter niet aan de praktijk van de picturale fotografie, waar zelden zulke hoge contrasten worden gefotografeerd. De meeste kijkers vinden een

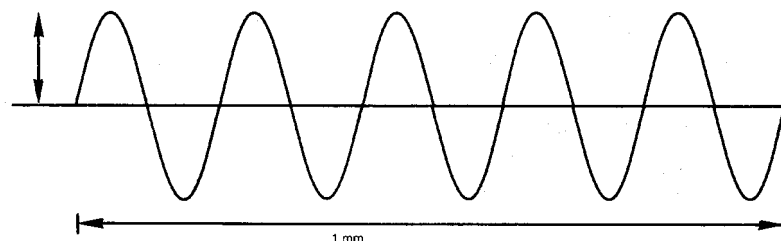
fotografisch beeld dat vele lijnen contrastarm weergeeft slechter dan een fotografisch beeld dat weliswaar minder lijnenparen scheidt, maar dit zonder contrastverlies doet.

4. Modulatieoverdrachtsfunctie MTF

Als tegenwoordig algemeen gangbare maatstaf voor de scherpte van een objectief hanteert men de aan elkaar gekoppelde begrippen lijnenparen per millimeter en contrastoverdracht. Als testobjecten gebruikt men daarbij fijne, nauwkeurig geëtste lijnrasters. Per millimeter zijn daarop een aantal zwarte lijnen met daarnaast even brede, volkomen doorzichtige banen aangebracht. Zo'n testobject wordt van achteren met diffuus licht beschenen, zodat bij de donkere lijnen geen licht en bij de doorzichtige lijnen al het licht kan doorvallen. In het afbeeldingsgebied meet men vervolgens met behulp van een microdensitometer de helderheidsverschillen. Deze verschillen ten slotte geeft men in de vorm van een curve weer.



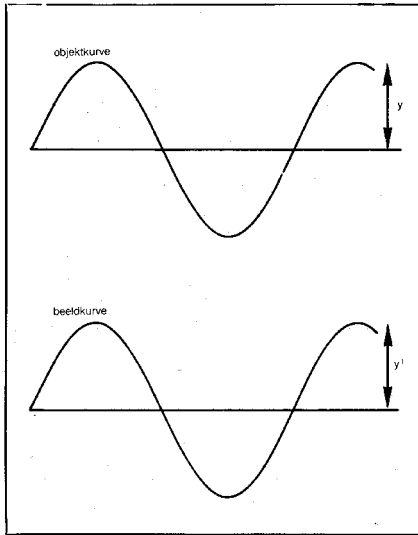
Men zou een zuivere rechthoekcurve (blokgolf) verwachten, maar er ontstaat een sinuskurve, hetgeen wil zeggen dat in de doorzichtige gedeelten de lichtintensiteit continu tot een maximum oploopt en naar de donkere streep toe afneemt tot in het midden van de streep het minimum is bereikt. Verklaarbaar is deze sinusvormige helderheidsverdeling, die ook vlak achter het raster kan worden gemeten, uit de *lichtbuiging* die als gevolg van het golfkarakter van het licht aan een rand ontstaat.



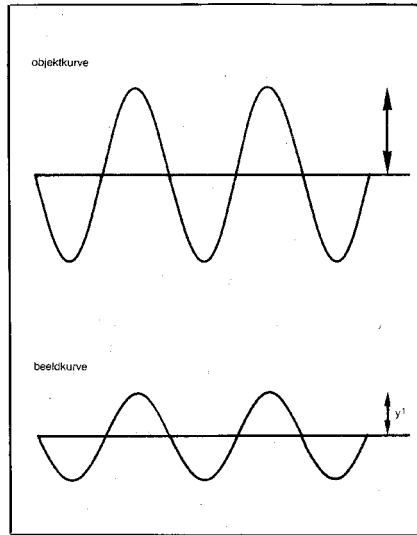
Voorgaande afbeeldingen tonen sterk vergroot de sinusvormige helderheidsverdeling vlak achter een lijnraster dat per millimeter 5 lijnenparen bevat. Het aantal lijnenparen per millimeter noemt men ook wel de lijnfrequentie R .

De algemene afbeeldingskwaliteit van een medium dat een optisch beeld vormt kan nu als volgt worden vastgesteld: men meet de helderheidsverdeling eerst vlak achter het testraster en vervolgens in het afbeeldingsgebied van het te onderzoeken objectief. Beide keren krijgt men een sinuskurve van de helderheidsverdeling. Is de afbeeldingscapaciteit voortreffelijk, dan lijken de beide curves sterk op elkaar, hetgeen wil zeggen dat hun amplituden (maximale uitslag) even groot zijn. De vergelijking van de amplitudehoogte van de beide curves noemt men de **modulatie-overdrachtsfactor**. Hij vloeit voort uit deling van de amplitudehoogte y' van de beeldcurve door de amplitudehoogte y van de objectcurve. De afbeelding toont schematisch beide curves bij de zeer geringe frequentie van 5 lijnenparen per millimeter. In het aangenomen geval zijn beide, amplituden even groot. De modulatieoverdrachtsfactor $y': y$ is 1 of 100%. Hoe kleiner de lijnfrequentie, hoe groter de kans dat beide sinuskurven gelijksoortige amplituden hebben.

Afb. 435 Modulatieveverdracht 100%



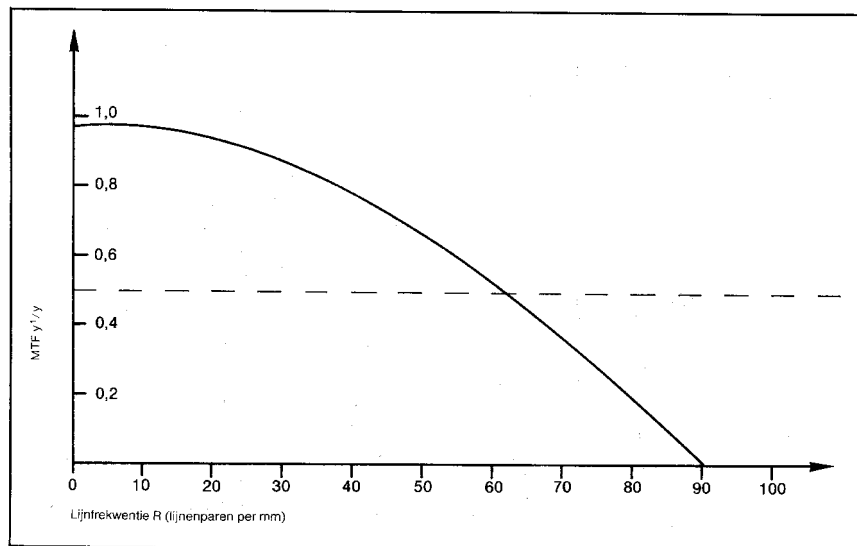
Afb. 436 Modulatieveverdracht 50%



Hoe meer lijnenparen per millimeter een testfiguur heeft, hoe kleiner de amplitude van de beeldkurve wordt. In het voorbeeld van de afbeelding ernaast (bij 50 lijnenparen per millimeter) is de amplitudehoogte y' van de beeldkurve nog maar half zo groot als die van de objektkurve. De modulatieoverdrachtsfactor bedraagt nog slechts 0,5 of 50%.

Een funktiekurve, getekend in een assenkruis als modulatieoverdrachtsfactor en lijnfrekwentie noemt men modulatieoverdrachtsfunctie. Deze geeft voor een objektief de modulatie-overdracht voor een hele reeks lijnfrekwenties aan. In de regel herhaalt men de meting voor verscheidene standen van het testobject. Is het testobject zo opgesteld dat de strepen evenwijdig met de radius van de objektief-as lopen, dan spreekt men van een sagittale opstelling. Liggen de strepen vertikaal op de radius, dan noemt men de opstelling tangentiaal.

Natuurlijk is de overdrachtscapaciteit van een objektief niet over het gehele beeldveld even goed. Gewoonlijk neemt het vermogen naar de beeldrand toe aanzienlijk af. Om praktische redenen ziet daarom de funktionele afbeelding van de modulatieoverdrachtsfunctie er in publikaties meestal iets anders uit dan in deze afbeelding is weergegeven:

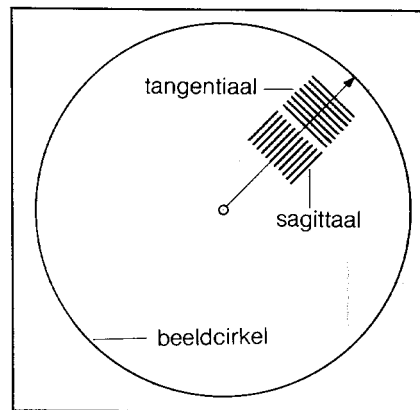


Afb. 437 Modulatieoverdrachtsfunctie (MTF)

Men kiest alleen de lijnfrekwenties uit die ook in de praktijk iets over de zichtbare kwaliteit zeggen. Gewoonlijk zijn dit de frekwenties 10, 20 en 40 lijnenparen per millimeter. Hogere lijnfrekwenties hebben nauwelijks zin, omdat we nu eenmaal met onze ogen moeten kijken en deze bij een normale kijfstand een scheidend vermogen van niet meer dan 5 lijnenparen per millimeter bezitten. Een lijnfrequentie van 40 stelt dus al een achtvoudige lineaire vergroting voorop. Bij nog sterkere vergrotingen is zoals we weten ook

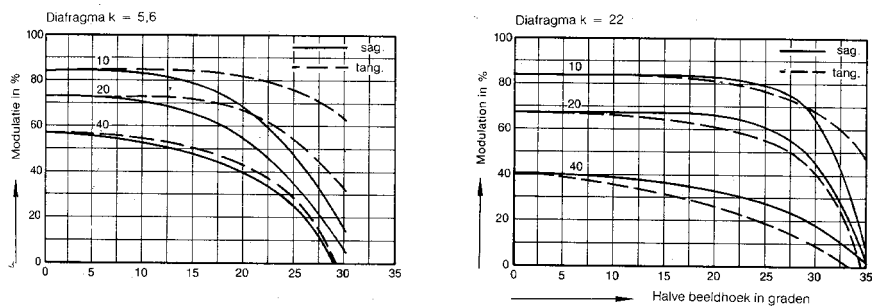
de noodzakelijke kijkafstand groter, waardoor het scheidend vermogen van het oog nog lager is.

In publikaties beperkt men zich tot het weergeven van de beide genoemde kurven: een voor de tangentiale en een voor de sagittale opstelling van het objekt:

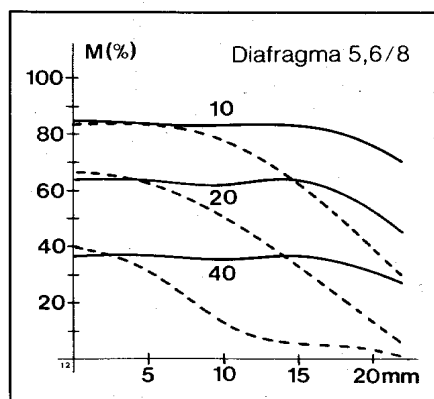


Afb. 438 Tangentiale en sagittale opstelling van het raster

De abscis van de grafiek blijft daardoor vrij voor de zogenoemde beeldhoogte, die aangeeft, in welk deel van de beeldcirkel de meting werd verricht. Een beeldhoogte van 0 komt overeen met het midden van het beeld, een beeldhoogte van 20 mm (bij kleinbeeld) met de hoek van het beeld. Bij objectieven voor technische kamera's geeft men de beeldhoogte als halve beeldhoek in graden op.



Vanzelfsprekend is de modulatieoverdracht ook nog afhankelijk van 'de lichtsterkte resp. de diafragma-opening. Daarom is de vermelding van de diafragma-opening noodzakelijk. Van een topklasse-objectief mag men verwachten dat hij bij een frekwentie van 40 lijnenparen in het midden van het beeld een **contrastoverdrachtsfactor van ten minste 0,5 = 50%** haalt.



Afb. 439 MTF-kurve voor een kleinbeeldobjectief

Our MTF test machines give us precise readout numbers on each individual new lens we buy. This means that every lens you rent is *measurably* as good as new

Every time a lens goes out on a job, we check its MTF numbers against our records for that individual lens. Every time.

“The first MTF test machine we acquired was originally designed by Zeiss for their own use,” says Denny Clairmont. “They use machines exactly like it to test every prime lens before it leaves their factory in Germany.”

Pass or fail

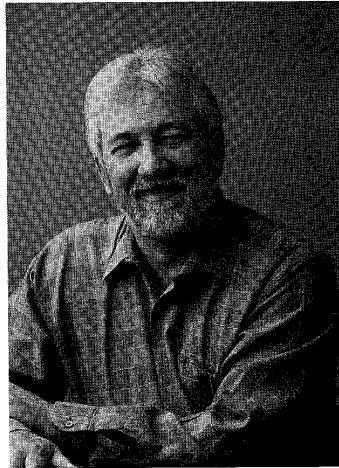
“The factory checks *every* lens, not just random samples, so Zeiss needs a test system that’s fast but definite. The MTF machine gives them readout numbers for each lens tested. Either that lens meets the design specification numbers, or it doesn’t. Pass or fail.”

Factory numbers

“In the mid-Eighties, when we got our first machine, the idea was that we could now talk to ARRI and Zeiss about servicing the lenses and we could all speak the same language. For every type of prime lens they made, Zeiss gave us (and ARRI) a set of their factory MTF test numbers.”

Certainty

“For us, the beauty of those numbers was the certainty. We had hundreds of Zeiss primes. (Now we have thousands.) We could put any of them on the machine and be



Denny Clairmont talks about MTF:

The Modulation Transfer Function is an expression of how well a lens holds contrast on progressively finer detail. MTF tests measure the contrast rendition of a lens at one selected number of lines per millimeter. That can be done at every T stop.

absolutely sure it met the factory specs — that it was *as good as new*. If the numbers weren’t right, we could fine-tune that lens until they *were* right — or we could send it back to Zeiss.”

Our numbers

“Our lenses from the other makers could be MTF tested, too. Many didn’t come with factory numbers, so we’d buy several new sets at once and test them all together. We kept records of all those new-lens MTF numbers and we used them to arrive at a standard for that type of lens. From then on, every lens of that type had to meet (or exceed) that standard when we put it on the MTF machine at each routine servicing after every shoot.”

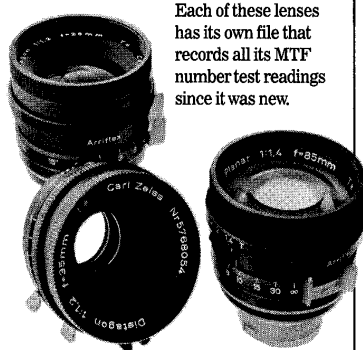
“Every lens in our inventory has its own file. If a prime lens doesn’t meet the MTF standard, we look at the file for that lens, to see what its MTF numbers were when it was new and to look at its repair records. Before we take it apart to work on it, its current numbers at various T stops are entered on our Test Report form, with the date and serial number. After working

More details in Part Two:

In another article in this series, we go into greater detail on what MTF tests tell us and how they tie in with the other ways we test lenses. And how that helps *your* work to look its best.

on the lens, we check its MTF numbers again and we write *those* numbers in the Test Report."

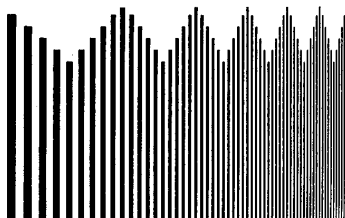
"Our MTF number records are open to the public — no secrets here. You're welcome to look through them and pick out your lenses. You can put them on the machine yourself, if you like. We'll show you how to work it. You can see which is the optimum T stop, either from our records or on the machine."



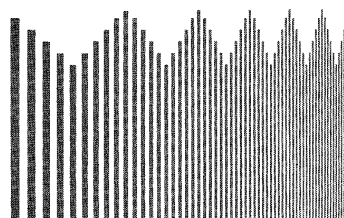
Each of these lenses has its own file that records all its MTF number test readings since it was new.

Zooms next

"Zeiss designed the machine for spherical, fixed lenses up to 350mm. But by working with two numbers (one for horizontal, one for vertical), we've learned to test our anamorphic lenses, too. Some of the ARRI anamorphics are physically too big for this machine. However, we're hoping they'll fit onto the new MTF machine we're now working on — for zoom lenses."



Printed here, these pictures can't really show a gray image. They represent images made by two lenses with equal resolution. Lens at left:



high contrast. Lens at right: lower contrast. It modulates black/white edges less well. As they get closer together, its image becomes gray.

How the MTF machine works:

Like an autocollimator, this test machine provides an artificial Infinity-distant subject. But here the image formed by the lens is analysed electronically.

The Infinity subject is a scanning slit. Beyond it are two sets of bar patterns, one .034mm further away than the other, both moving sideways past the slit — black, white, black, white. Using a servo motor, the machine moves these patterns along the axis of the lens being tested — automatically going through the focus.

After the bar-pattern images from the slit pass through the lens, they're read by a microdensitometer — light, dark, light, dark. They're then converted into voltage signals. Contrast is always higher with an in-focus image, of course. Here, higher contrast gives us a stronger voltage signal. The machine goes through the focus until it gets an identical voltage reading from the two patterns because the point of focus is between them.

If you draw it as a graph, the point of best focus (and highest contrast)

looks like a mountain peak with symmetrical slopes on either side. The higher the contrast, the steeper the slopes. The graph of a lens modulating 100% would look like a skyscraper — very tall, with vertical sides.

Many lenses can transfer (transmit) close to 100% of the black/white modulation if the black/white bars are big enough. The hard part is transferring the modulations (transmitting high contrast) when the bars get narrower and closer together as they move past the slit.

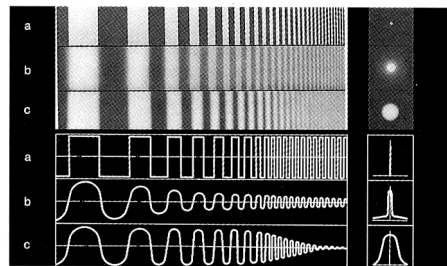
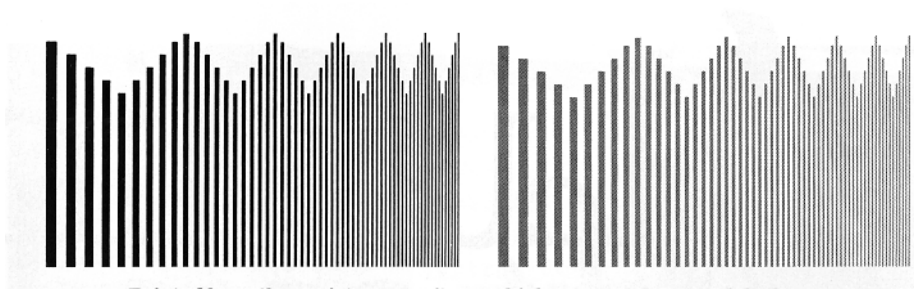
Our Zeiss MTF test machines measure how contrast and resolution affect each other at 50 lines (bar edges) per millimeter. The higher the contrast, the stronger the voltage signal. The stronger the signal, the higher the machine's readout number.

The machine answers the question: "How high a number will this particular lens give us at 50 lines, wide open? At T2.8? At T4? At T5.6? And so on. Those are the MTF numbers we record and keep on file for each individual lens.

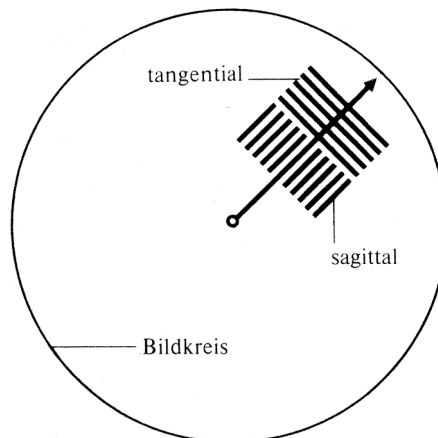
CLAIRMONT CAMERA

Hollywood, Toronto and Vancouver • (818) 761-4440

Annex MTF: bijkomende grafische voorstellingen:



Abbildungsbeispiele der Übertragungsfunktion (MTF) eines Rechteckgitters:
a) ideale, theoretische Abbildung;
b) hohes Auflösungsvermögen;
c) hoher Kontrast (Abb. Zeiss)



Tangentiale und sagittale Anordnung des Testrasters bei MTF-Messungen
(Abb. Rodenstock)

HET PERSPECTIEF

Het woord perspectief is afgeleid van het middeleeuws Latijnse '*ars perspectiva*' dat *doorzichtleer* betekent. Behalve bij het bekijken of reproduceren van vlakke onderwerpen (afbeeldingen, tekst etc.) is het onderwerp dat wij zien of fotograferen ruimtelijk of driedimensionaal, het heeft niet alleen hoogte en breedte, maar ook diepte. Verschillende voorwerpen in de voorwerpsruimte die op verschillende afstand van oog of cameraobjectief staan, zullen met verschillende afbeeldingsmaatstaf afgebeeld worden: verder verwijderde voorwerpen worden kleiner afgebeeld. Het gevolg is dat wij, wanneer we een afbeelding van zo'n onderwerp op een plat vlak (bijvoorbeeld een foto) bekijken, door het verschil in grootte van de erop afgebeelde voorwerpen een indruk krijgen van de diepte der voorwerpsruimte, we kennen uit ervaring ongeveer de onderlinge verhouding in ware grootte en calculeren onbewust uit de afwijkingen in deze verhoudingen de verschillen in afstand. Ook andere factoren spelen een rol bij het ontstaan van deze ruimtelijke indruk. Bijvoorbeeld het horizontale vlak van de bodem of de vloer in ons onderwerp wordt natuurlijk in hetzelfde vlak afgebeeld als het verticale vlak van de gevel van een gebouw. Wij herkennen die bodem echter als een horizontaal vlak en zien die dan ook subjectief als zodanig. De plaats van voorwerpen op deze bodem veroorzaakt ook weer de ruimtelijke indruk, voorwerpen die verder in de voorwerpsruimte staan worden op een hogere plaats afgebeeld, tenzij we het camerastandpunt zo kiezen dat van vloer of bodem niets te zien is, bijvoorbeeld een zeer laag standpunt. We zien ook een weg naar de horizon toe smaller worden en de rails van een spoorweg naar elkaar toe lopen.

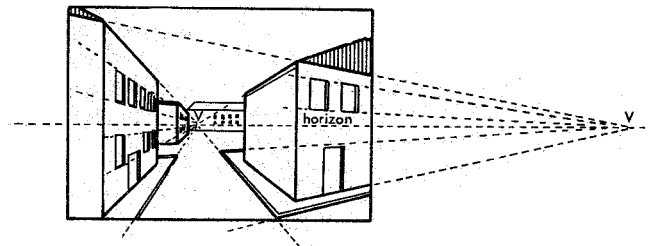


fig. De afbeeldingen van horizontale en verticale vlakken worden begrensd door convergerende lijnen waarvan de verlengden elkaar snijden in punten op de horizon, de zgn. verdwijnpunten (V).

Deze 'vluchtlijnen' geven evenwijdige lijnen in het onderwerp weer door convergerende (naar elkaar toelopende) lijnen, wanneer die lijnen of de vlakken waarvan zij de contouren zijn, niet evenwijdig lopen met het beeldvlak. Staan die lijnen of vlakken in het onderwerp loodrecht op het beeldvlak dan worden zij weergegeven door lijnen waarvan de verlengden elkaar in één punt snijden. Dit punt ligt op de horizon en die horizon ligt altijd ter hoogte van ons oog.

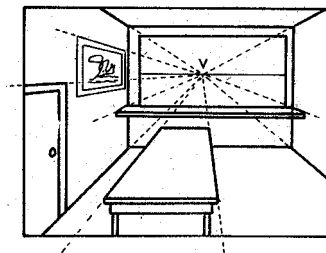
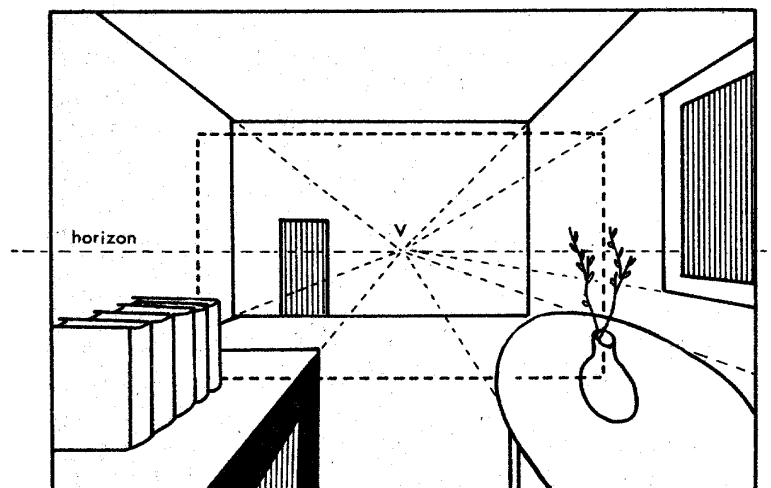


fig. Horizontale vlakken in het interieur (vloer, tafelblad) lopen in de afbeelding schijnbaar omhoog, doch maken niettemin de indruk horizontaal te liggen.

Van horizontale of verticale vlakken die schuin staan ten opzichte van het beeldvlak worden de evenwijdige lijnen weergegeven door lijnen die elkaar in andere punten op de horizon snijden. Bij vlakken die niet horizontaal of verticaal liggen zullen deze punten, *vluchtpunten* of *verdwijnpunten* genoemd, boven of beneden de horizon liggen. De convergentie van lijnen in een afbeelding, die in het onderwerp evenwijdig lopen, bepaalt in sterke mate de perspectivische indruk. We weten dat in werkelijkheid die zo even genoemde weg even breed blijft en dat de rails evenwijdig lopen. Wat we dus doen bij het bekijken van een *perspectivische afbeelding*, zoals in feite een foto van een ruimtelijk onderwerp is, is het 'vertalen' van de perspectivische gegevens in de afbeelding tot een ruimtelijke indruk. We laten hier het stereoscopisch (met twee ogen) zien en de stereofotografie (met twee objectieven) buiten beschouwing.

Perspectief en bekijkafstand van foto's

Ons oog stelt ons in staat scherp te zien onder een hoek van ongeveer 30°: de beeldhoek van ons oog. Maken we een opname met een beeldhoek van 30° dan zal de foto, mits op zodanige afstand van het oog gehouden dat de gezichtshoek (in dit geval de hoek tussen twee lijnen vanuit de uiteinden van een diagonaal van de foto naar het oog getrokken) ook weer 30° is, de foto een volkomen natuurlijke perspectivische indruk maken. Dit zou dus het geval zijn als we de foto bekeken op een afstand gelijk aan de brandpuntsafstand van het objectief. De minimale afstand waarop we zonder inspanning scherp kunnen zien bedraagt ongeveer 25 cm. Maken we de opname met een 5 cm objectief dan zouden we die onmogelijk onder de juiste hoek kunnen bekijken. We zouden de foto 5 x verder van het oog moeten houden. Om dan dezelfde gezichtshoek te behouden dient de foto 5 x lineair vergroot te worden. Gaan we sterker vergroten dan kunnen we de juiste gezichtshoek aanhouden door bij het bekijken een overeenkomstig grotere afstand tot het oog te nemen. Voor een juiste perspectivische indruk dienen we een foto dus te bekijken op een afstand gelijk aan die van de brandpuntsafstand, eventueel vermenigvuldigd met het aantal malen dat het negatief vergroot werd. Een vergroting van 50 x 60 cm van een met een 5 cm objectief opgenomen kleinbeeld negatief zou dus op een afstand van $\pm 5 \times 20 = 100$ cm bekeken moeten worden.



Bij interieuroptnamen met groothoekobjectieven blijken vooral ronde voorwerpen naar de hoeken van het beeld sterk vertekend. Brengt men het oog dicht genoeg voor het beeldmiddenpunt dan ziet men die voorwerpen weer in hun juiste proporties, de ronde tafel en de vaas zijn dan weer rond. De stippellijn geeft de beeldbegrenzing aan bij gebruik van een normale beeldhoek bij dezelfde opname-afstand.

Het fotografisch perspectief is een zogenaamd centraal geprojecteerd perspectief, dat wil zeggen het onderwerp gezien vanuit één punt (het objectief). In feite zou dus ook de foto vanuit één punt bekeken moeten worden en wel, bij opnamen met de gebruikelijke camera's, vanuit een punt recht tegenover het snijpunt der diagonalen. Bij opnamen met de technische camera zal, wanneer aanmerkelijke horizontale of verticale verschuivingen aan de voor- of achterwand van de camera geschied zijn, dit centrale beekijkpunt overeenkomstig verschoven zijn. Maken we een opname met een aanmerkelijk grotere beeldhoek dan zal het perspectief onnatuurlijk lijken en dit zal naar de randen van het beeld sterker opvallen. In het middengedeelte, overeenkomende met een beeldhoek van 50', is het perspectief volkomen natuurlijk: snijden we dit gedeelte uit de foto dan is daaraan niet meer te constateren dat de opname met een groothoekobjectief gemaakt is. Houden we ons echter aan boven voorgeschreven bekijkafstand en centrale beekijkpunt dan doet het perspectief volkomen natuurlijk aan. Weliswaar moeten we ons oog dan heen en weer draaien tijdens het bekijken: de gezichtshoek is niet groot genoeg om het gehele beeld te bestrijken. Opvallend is dit vooral bij groothoekopnamen van groepen personen, waarbij hoofden die zich aan de randen en vooral aan de hoeken van het beeld bevinden, naar de beeldrand toe uitgerekt schijnen. Bij juiste bekijkafstand zal, van het juiste beekijkpunt uit, deze vertekening niet zichtbaar zijn. Hetzelfde verschijnsel zien we natuurlijk ook duidelijk bij groothoekopnamen met ronde tafeltjes e.d. aan de beeldrand.

De vertekening van bolvormige lichamen, sterker wordend naar de rand van het beeld en daarom storend bij groothoekopnamen, hangt samen met de centrale projectie van het beeld op een plat beeldvlak en wordt veroorzaakt doordat de ronde lichtbundel van een bolvormig voorwerp in de beeldruimte aan de randen van het beeld onder een kleinere hoek door het beeldvlak gesneden wordt dan in het midden. Die doorsnede is dan niet cirkelvormig, maar ovaal, zodat ronde voorwerpen aan de beeldrand ovaal uitgerekt worden weergegeven. Het verschijnsel is vooral storend bij groothoekopnamen.

Perspectief, opname-afstand en brandpuntsafstand

De afbeeldingsmaatstaf en daarmee ook het perspectief wordt door vaste optische wetten bepaald. Bij niet te korte voorwerpsafstand is de afbeeldingsmaatstaf omgekeerd evenredig met de voorwerpsafstand: een voorwerp op 10 meter afstand wordt 2 x groter afgebeeld dan een op 20 meter afstand. In deze verhouding speelt de brandpuntsafstand geen rol. Weliswaar zullen bij langere brandpuntsafstand alle voorwerpen groter afgebeeld worden, maar de onderlinge verhouding tussen de afbeeldingsmaatstaven voor verschillende voorwerpsafstanden blijft gelijk. Maken wij met camera's voor verschillend formaat met objectieven van verschillende brandpuntsafstand maar met voor het betreffende formaat gelijke beeldhoek van hetzelfde onderwerp op de zelfde afstand opnamen, dan zal, wanneer de opnamen tot hetzelfde formaat vergroot worden, er geen verschil in perspectief geconstateerd worden. Het is dus niet zo dat, zoals vaak gedacht wordt, een kortere brandpuntsafstand automatisch een sterkere perspectivische vertekening veroorzaakt, het is de kortere opname-afstand die hiervoor verantwoordelijk is. Wanneer we bij het bekijken van foto's aan de in 2.4.1. genoemde voorwaarden voldoen zal de perspectivische indruk de juiste zijn. Werken we met verschillende brandpuntsafstanden op hetzelfde formaat negatief, dus met een camera met verwisselbare optiek, dan zullen we, wanneer we hetzelfde onderwerp met die verschillende objectieven even groot afbeelden bij gebruik van kortere brandpuntsafstanden (groothoekobjectieven) dichter bij het onderwerp moeten komen dan bij gebruik van langere brandpuntsafstanden, en daarmee verandert het perspectief in het beeld. Hoe groter de opname-afstand hoe kleiner het verschil in

afbeeldingsmaatstaf voor voorwerpen op verschillende afstand van de camera in het onderwerp gelegen. Deze verandering in het perspectief heeft tot gevolg dat die voorwerpen dichter bij elkaar schijnen te staan; er is minder 'diepte' in het beeld, het is vlakker. Opnamen met tele-objectieven vertonen dit verschijnsel in sterke mate en het is vooral tegenwoordig vaak een geliefde manier om opnamen zo vlak, zo 'perspectiefloos' mogelijk te maken en daardoor een zekere versobering van het beeld te verkrijgen. Men gebruikt het, tezamen met andere verschijnselen (o.a. versobering van de toonschaal tot desnoods alleen- zwart en wit) om een zogenaamd grafisch effect te verkrijgen. Gebruikt men daarentegen een groothoekobjectief (korte brandpuntsafstand) dan kan men veel dichter bij het onderwerp gaan, de genoemde verschillen in afbeeldingsmaatstaf worden dan veel groter. Het perspectief wordt, zoals men zegt, veel 'steiler', er komt veel meer diepte in het 'beeld. We zien dit vaak bij interieurs, waarbij men, gebonden als men is aan een korte opname-afstand, groothoekobjectieven gebruikt om zoveel mogelijk van het interieur op te nemen. De aldus gefotografeerde ruimte lijkt veel dieper dan in werkelijkheid het geval is en als een vakfotograaf bijvoorbeeld een fabriekshal zo fotografeert dan is de opdrachtgever daar meestal zeer content mee: zijn fabriek toont er groter door. Allerlei onderwerpen kunnen op deze wijze groter afgebeeld worden ten opzichte van de achtergrond, namelijk door kortere opname-afstand (zie fig. 22). Het bergmassief achter een berghut lijkt klein



en weinig betekend als we de hut met normaal of groothoekobjectief van betrekkelijk kleine afstand fotograferen. Maken we van grote afstand de opname met een tele-objectief dan rijst het bergmassief indrukwekkend boven de nu nietige berghut uit en dat is vaak het verschil tussen de herinneringsfoto's van de bergwandelaar en de foto's die hij in de betreffende berghut kan kopen

Heel vaak is de 'perspectivische overdrijving' die door korte opname-afstand en daardoor vaak bij het gebruik van groothoekobjectieven veroorzaakt wordt, ongewenst. Een portret van te korte afstand opgenomen, wordt 'vertekend', delen van het onderwerp die ver naar voren steken worden zoveel groter in verhouding tot de rest afgebeeld (bijvoorbeeld benen en voeten van een zittend model) dat de foto een beslist onaangename indruk maakt. Soms echter kan ook de perspectivische overdrijving bijdragen tot een verlangde beeldwerking. Een voorwerp op de voorgrond dicht bij de camera geeft ons bij het bekijken van de opname de indruk dat we langs dit voorwerp in de ruimte kijken en versterkt de indruk van diepte van die ruimte.

3. Perspectivische vertekening door schuine stand der camera

Fotograferen we een onderwerp met loodrechte, verticale contourlijnen, bijvoorbeeld een flatgebouw, en staat de camera niet zuiver waterpas (achterwand of filmvlak niet zuiver loodrecht) dan zullen genoemde lijnen niet evenwijdig meer lopen. Om een hoog gebouw in zijn geheel op het beeld te krijgen moet vaak de camera schuin omhoog gericht worden en we krijgen dan weer convergentie van de lijnen (zijanten van het gebouw) evenals dat het geval is voor horizontale, evenwijdige lijnen in een vlak dat niet evenwijdig met het beeldvlak loopt. De zijanten van het gebouw lopen naar boven schuin naar elkaar toe, het gebouw is van boven smaller. Dit accepteren we blijkbaar niet, we weten dat de lijnen van het gebouw evenwijdig lopen en we krijgen nu de indruk dat het gebouw achterover valt. Wat dus bij horizontale lijnen op natuurlijk aandoende wijze de ruimtelijke werking in het beeld veroorzaakt, aanvaarden we niet bij verticale lijnen: 'loodlijnen zijn loodlijnen en behoren dus altijd en overal evenwijdig aan elkaar te lopen!' Het beeld op ons netvlies vertoont natuurlijk ook de genoemde convergentie van de loodlijnen uit ons onderwerp maar blijkbaar ervaren we door de werking van evenwichtsorgaan en oogspieren dat we schuin omhoog kijken en calculeren we dit in bij de subjectieve beoordeling van het netvliesbeeld. Met andere woorden: we willen de afbeelding zien zoals we het onderwerp zouden zien als we recht voor ons uit keken. In werkelijkheid zien we, als we schuin omhoog naar het gebouw kijken, de verticale lijnen ook convergerend, in de afbeelding die we gemakkelijk met één blik kunnen overzien, doet dit onnatuurlijk aan. Bij voldoende afstand kunnen we zo'n gebouw in zijn geheel fotograferen terwijl de camera waterpas staat, we krijgen dan wel veel voorgrond maar kunnen die door naderhand uitvergrooten laten vervallen. Nemen we alleen het bovenste gedeelte van het gebouw en tamelijk dichtbij zonder dat dus de basis te zien is, dan accepteren we de nu sterk scheef lopende lijnen veel eerder, we krijgen nu in het beeld werkelijk de indruk omhoog te kijken; de afbeelding van het gehele gebouw willen we echter steeds zien alsof onze blikrichting horizontaal was. Bekijken we trouwens een foto van zo'n achterovervallend gebouw niet recht van voren maar van schuin beneden dan zien we weer een 'normaal' perspectief. Natuurlijk zal dit soort perspectivische vertekening bij alle onderwerpen optreden wanneer we schuin omhoog of omlaag fotograferen, maar duidelijk merkbaar wordt dit pas wanneer er uitgesproken verticale en dus evenwijdige lijnen in het onderwerp zijn. Een bergtop schuin omhoog gefotografeerd 'om hem er helemaal op te krijgen' valt naderhand tegen en lijkt minder hoog en steil, zonder dat we die indruk van 'achterover vallen' hebben zoals bij gebouwen het geval is. Wie op die manier de Eiffeltoren van niet te korte afstand fotografeert zal vinden dat die toren minder slank en hoog op de afbeelding lijkt dan hij verwacht had. Onaangenaam doet deze vertekening ook aan bij het fotograferen van meubels. Fotografeert men een tafel zodanig dat de bovenkant van het blad voldoende zichtbaar is, dus vanuit een standpunt hoger dan de tafel dan zullen, wanneer men de camera schuin omlaag richt, de tafelpoten op de afbeelding naar onderen schuin naar elkaar toelopen. Ook bij kastjes e.d. is dit beslist een euvel.