

# Inleiding in de optica (III)

H.G.J. Rutten

In de vorige twee afleveringen werd de beeldvorming aan spiegel- en lenssystemen behandeld. Bij de behandeling werd uitgegaan van het paraxiale gebied, daar zijn de sinus en tangens van een hoek gelijk aan elkaar en pijlhoogten van en invalshoogten aan een oppervlak kunnen verwaarloosd worden. In werkelijkheid is dat natuurlijk niet het geval. Dan zijn de hoeken zo groot dat er wel verschillen zijn en mogen pijlhoogten en invalshoogten niet verwaarloosd worden. In deze aflevering wordt behandeld wat de effecten zijn die er optreden als met deze verschijnselen wel rekening wordt gehouden.

## Inleiding

Maar al te graag wordt ervan uitgegaan dat elke willekeurige lens of lenscombinatie in staat moet zijn om een mooie afbeelding te kunnen maken. Vooral door hen die zich van de middelbare school nog de formule herinneren.

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Deze komt overeen met de formule uit de vorige twee afleveringen:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Hierbij is:

$v, s$  : de afstand van de lens tot het object

$b, s'$  : de afstand van de lens tot het beeld

$f$  : de brandpuntsafstand van de lens.

Deze formules zeggen wel iets over de ligging van het object of van de afbeelding en van de vergroting, maar zeggen niets over de afbeelding zelf. Veelal is een goede afbeelding gewenst. Als er dan een opstelling wordt gebouwd met een of ander enkelvoudig lens(je) en de afbeelding wordt bekeken, blijkt deze net niet scherp te zijn. Hoe er dan ook geschoven of gedraaid wordt, de afbeelding blijft onscherp. Vol verbazing krijgt men dan van iemand te horen die er meer verstand van heeft dat "dit zo niet kan". Er moet een echt objectief gebruikt worden.

De reden hiervan is dat een enkelvoudige lens niet in staat is een scherpe afbeelding te maken. De lens heeft last van zogenaamde afbeeldingsfouten. Er zijn verschillende soorten afbeeldingsfouten. Deze kunnen zowel chromatisch alsook monochromatisch van aard zijn.

Chromatisch wil zeggen dat deze fouten betrekking hebben op kleur. Daardoor treden deze fouten altijd op als er brekende elementen in het optisch systeem zitten. Door de verschillen in brekingsindex voor de verschillende kleuren (= golflengte van het licht) zal een optisch systeem zich voor die verschillende kleuren ook anders gedragen. Chromatische fouten ontstaan dus niet als licht wordt gereflecteerd. Hieruit blijkt dus dat chromatische fouten niet kunnen optreden bij optische systemen welke zijn opgebouwd uit spiegels. Monochromatische fouten wil zeggen dat deze onafhankelijk van de golflengte optreden. Deze fouten treden dan ook op bij optische systemen met brekende elementen die zijn opgebouwd zowel uit spiegels als uit lenzen. Omdat echter de optische sterkte van een systeem voor de verschillende kleuren anders is, zal de mate waarin monochromatische fouten optreden afhankelijk zijn van de golflengte.

In deze aflevering wordt de manier besproken hoe afbeeldingsfouten worden gepresenteerd en hoe deze afbeeldingsfouten eruitzien. Een andere naam voor afbeeldingsfouten is aberraties.

## Afbeeldingsfouten

Al zou een optisch systeem vrij zijn van fabricage- en/of montage-afwijkingen, dan nog wordt de afbeeldingskwaliteit ervan bepaald door de mate waarin afbeeldingsfouten voorkomen. Fabricage- en/of montageafwijkingen maken het alleen nog maar slechter. Natuurlijk is de edele wens van iedereen dat het optische systeem dat men wil gebruiken vrij is van afbeeldingsfouten. Dus dat de scherpte zo groot mogelijk is over een zo groot mogelijk veld. Het liefst zou men willen dat elke punt weer als een puntje wordt afgebeeld en dat de con-

trastweergave liefst 100% is. Helaas, niets is moeilijker dan dat.

Het reduceren van afbeeldingsfouten wordt corrigeren genoemd. Zou een optisch systeem – dus een lens-, spiegel- of lens/spiegel-combinatie met al zijn variabelen zoals kromtestralen, dikten, componentafstanden, brekingsindices, dispersies en asfericiteiten – zover gecorrigeerd worden dat de afbeeldingskwaliteit perfect zou kunnen worden genoemd, dan is zo'n systeem onbetaalbaar. Bovendien zou zo'n systeem uiterst gevoelig zijn voor fabricage- en montage-afwijkingen. Naast het feit dat deze enge toleranties een extra duit in het zakje vragen, is het niet onwaarschijnlijk dat er exotische optische glazen of zelfs mineralen gebruikt moeten worden. Dit werkt alweer kosten verhogend. Het blijkt dus dat het verstandig is criteria te stellen waaraan een systeem moet voldoen.

De optisch ontwerper wil het maximum aan afbeeldingsfouten weten dat voor mag komen. Helaas is het niet zo dat elke fout even gemakkelijk corrigeerbaar is. Vaak worden nieuwe fouten geïntroduceerd als er andere worden gecorrigeerd.

Fabrikanten van optische systemen geven over het algemeen op aanvraag de graad waarin optische systemen zijn gecorrigeerd. Dit kan op verschillende manieren worden gepresenteerd. Helaas zijn de meeste fabrikanten er zich niet van bewust dat hun afnemer, de klant dus, de gegeven informatie ook werkelijk op zijn juiste waarde moet kunnen interpreteren.

In principe zou dus gestreefd moeten worden naar een maximum aan overzichtelijkheid. De methodes die voorkomen kunnen onderverdeeld worden in de volgende categorieën:

- getallenreeksen; voor elke afbeeldingsfout een getalwaarde,
- grafieken,
- diagrammen.

Zondermeer moet gestreefd worden naar een presentatie bestaande uit grafieken en/of diagrammen. Deze zijn veel overzichtelijker en duidelijker dan getallenreeksen. Alvorens in te gaan op de presentatiemogelijkheden wordt eerst behandeld hoe afbeeldingsfouten berekend kunnen worden.

## Bepaling van afbeeldingsfouten

Zoals in de kop van dit artikel is gezegd handelen de vorige twee afleveringen over de beeldvorming in het paraxiale gebied. Daarbij wordt aangenomen dat de sinus en de tangens van een hoek aanekaar gelijk zijn en gelijk aan de hoek zelf uitgedrukt in radialen. Ook wordt verondersteld dat de pijlhoogte voor de verwaarloosbare invalshoogte gelijk is aan nul. In werkelijkheid zijn deze hoeken veel groter en zijn de sinus en de tangens niet aan elkaar gelijk. De onderstaande voorbeelden geven hiervan een illustratie.

Uitgaande van een nauwkeurigheid van veertien decimalen treedt het genoemde verschil al op bij een hoek van slechts 0,0001 radiaal ofwel slechts 20 boogseconden. Daarbij moeten we beseffen dat de zon of de maan reeds een hoek aan de hemel vormt van ongeveer een halve graad.

Als een pijlhoogte wordt uitgedrukt in de golflengte van het licht, dan is van een lensje met een pijlhoogte van één golflengte voor de kleur groen (550 nm) en een kromtestraal van 100 mm, de diameter nog geen halve millimeter. Hieruit blijkt wel dat het paraxiale gebied wel erg klein is en dat er dus al heel snel afbeeldingsfouten op zullen treden.

Nu zijn er twee karakteristieke methodes om de mate waarin afbeeldingsfouten voorkomen te bepalen. De ene is een benadering, de andere absoluut. In het midden van de vorige eeuw analyseerde de Duitse mathematicus Seidel een methode die afgeleid is van de paraxiale berekeningen. In die tijd was rekenen nog een zeer tijdrovende bezigheid. Daarom zocht hij naar een methode die met zo min mogelijk rekenwerk toch een zo goed mogelijke indruk kon geven over de mate waarin afbeeldingsfouten op zouden treden. Tot dan toe was het nog algemeen gebruikelijk dat door middel van trial and error een combinatie werd gezocht die een goede afbeelding maakte. Dit werd naarmate de systemen aan meer eisen moesten voldoen steeds moeilijker.

Seidel ontwikkelde daarom een methode die afgeleid is van de sinusreeks. De reeksontwikkeling van de sinus is:

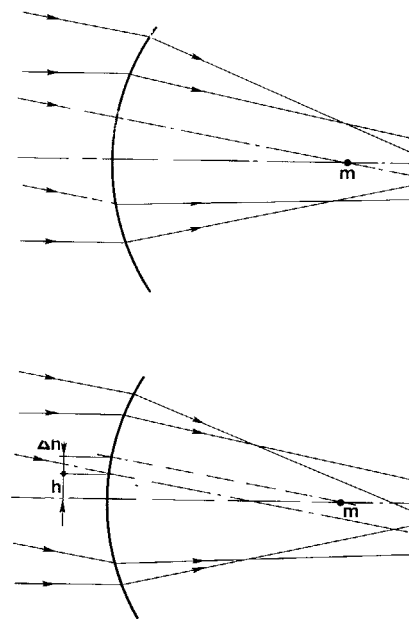
$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

In het paraxiale gebied is  $\sin x$  gelijk aan  $x$  gesteld, de eerste term van de reeks. Seidel ontwikkelde zijn rekenmethode uitgaande van de tweede term, de zogenaamde derde orde theorie.

Voordat de rekenmachine werd uitgevonden zijn er ook mathematici geweest die afleidingen hebben gepleegd voor de derde en vierde term, respectievelijk de vijfde en zevende orde theorie. Deze laatste zijn echter na de ontwikkeling van de computer sterk in onbruik geraakt. De afleidingen van Seidel worden echter nog steeds gebruikt bij het ontwerpen van een optisch systeem. Zij zijn zeer goed bruikbaar om een startpositie te hebben voor verdere optimalisaties.

De andere methode is de strenge doorrekening. Maar daarover meer verderop in dit artikel.

De afbeeldingsfouten worden nog steeds genoemd zoals Seidel deze heeft aangegeven. De onderstaande afleiding geeft een min of meer vrije (met de toestemming van drs. Klaas Compaan) afleiding van het benoemen en de afhankelijkheid van de derde orde afbeeldingsfouten. In werkelijkheid is het veel complexer. De wijze van benadering is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 De voorstelling van het principe voor de benadering van de derde orde theorie.

Voor het gemak wordt eerst uitgegaan van één enkelvoudig sferisch vlak. Wordt een stralenbundel evenwijdig aan de optische as getekend dan is dit de bundel waarvan wordt uitgegaan. De bundel is opgebouwd uit stralen welke invallen op een hoogte  $h$  vanaf de optische as.

Vervolgens wordt een bundel onder een hoek op het oppervlak getekend. Als het midden van deze bundel door het kromtemiddelpunt van het oppervlak wordt getekend, dan is er in principi-

pegeen verschil met de eerstgenoemde situatie. Deze schuin invallende as is weer een optische as welke loodrecht staat op het lensoppervlak.

Gaat deze as echter *niet* door het kromtemiddelpunt, maar snijdt op een andere plaats de optische as, dan zal de schuin invallende as niet loodrecht op het lensoppervlak staan. Wordt door het kromtemiddelpunt een lijn evenwijdig aan deze schuin invallende as getekend, dan is er een verschil in invalshoogte tussen de plaats waar de invallende bundel binnentreedt en de middelpuntlijn. Er is nu dus een  $\Delta h$ . Omdat  $h + \Delta h$  met de kromtestraal de "sinuswaarde" geeft t.o.v. het kromtemiddelpunt kan gezegd worden dat de waarde  $h + \Delta h$  een maat is voor de hoek die een straal maakt met het lensoppervlak. Wordt dit in relatie gezien met de tweede term van de sinusreeks dan zien we.

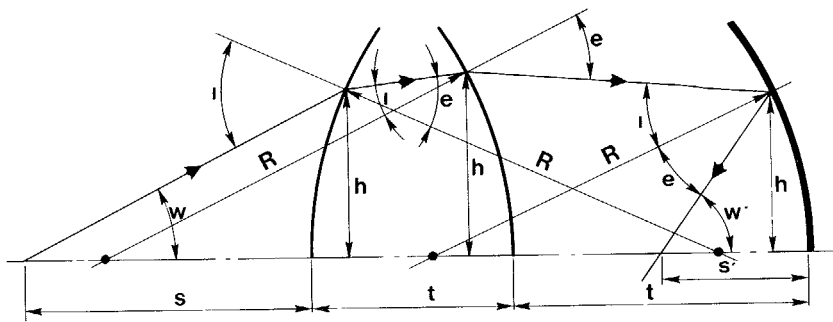
$$(h + \Delta h)^3 = h^3 + 3h^2\Delta h + 3h\Delta h^2 + \Delta h^3$$

Seidel noemde de eerste term van de uitkomst sferische aberratie, de tweede term noemde hij coma, de derde astigmatisme en de laatste distorsie.

Omdat  $h$  de term is die te maken heeft met de oorspronkelijke grootte van de opening en  $\Delta h$  met de hoek waaronder de bundel invalt, kunnen we dus concluderen dat de sferische aberratie met de derde macht toeneemt naarmate de opening toeneemt. Voor coma is dat het kwadraat van de opening en lineair met de hoek, astigmatisme lineair met de opening en het kwadraat van de hoeken, distorsie met de derde macht van de hoek. Dus treedt sferische aberratie alleen op voor bundels evenwijdig aan de optische as en alle andere alleen voor bundels die er een hoek mee maken. De hier sterk gesimplificeerde voorstelling gaat uit van één werkzaam optisch vlak. In de praktijk zijn doorgaans meer optische vlakken werkzaam. Hierdoor wordt de voorstelling complexer waarvan verdere behandeling de context van dit artikel te buiten gaat.

Helaas is de benadering van Seidel slechts relatief nauwkeurig. Naarmate het systeem een grotere opening heeft en naarmate de invalshoek groter is, wordt deze benadering steeds onnauwkeuriger. Dit effect wordt nog versterkt als het optisch systeem sterk gekromde vlakken bezit. Dan zijn de hoeken van inval ten gevolge van de bundeldiameter aanzienlijk groter.

Omdat deze benadering alleen de derde orde term meeneemt, worden de vijfde, zevende en nog hogere orden niet meegenomen. Dit betekent, dat als een optisch systeem alleen op de derde orde wordt gecorrigeerd er nog altijd rest-



Figuur 2 De strenge doorrekening aan een lens-spiegel combinatie

fouten van hogere orde in kunnen blijven zitten. Wordt een systeem exact geanalyseerd, dat volgens de derde orde is geoptimaliseerd zodat alle aberraties nul zijn, dan kunnen de hogere orde fouten toch nog aanzienlijke waarden bereiken.

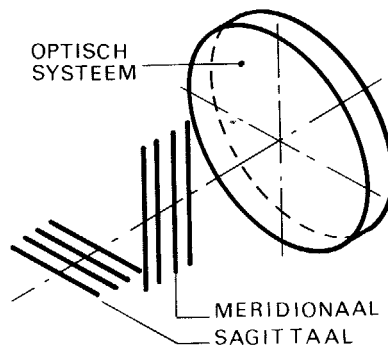
De enige werkelijk juiste manier die mogelijk is om vrij van benaderingen een optisch systeem te beoordelen op zijn kwaliteit is de zogenaamde strenge, ook wel genoemd exacte, doorrekening. Figuur 2 toont dit voor een lens-spiegel combinatie. Hierbij wordt een straal exact door een optisch systeem getraceerd en wordt met alle optische wetten rekening gehouden. Dit zijn de wetten van Snellius en de reflectiewet. Zodoende wordt dus ook rekening gehouden met asfericiteiten, decentreringsen, etc Uiteindelijk wordt bepaald waar een straal terecht komt: in het brandpunt of het brandvlak. Door een aantal stralen door te rekenen is het mogelijk een grafische weergave te maken.

Wordt geen rekening gehouden met buigingsverschijnselen dan wordt deze methode een geometrische doorrekening genoemd.

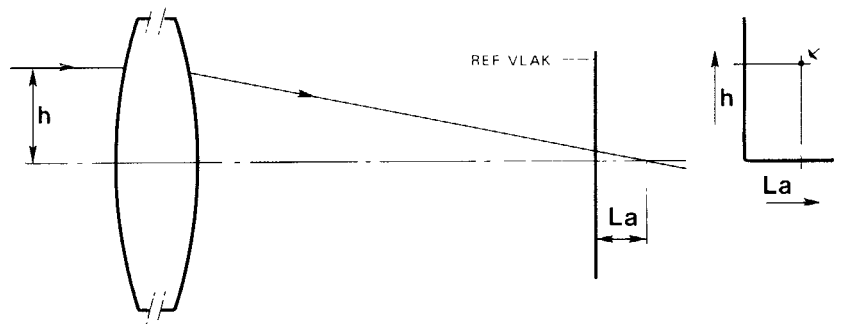
### Presentatie van de afbeeldingsfouten

Bij de presentatie van afbeeldingsfouten moet ervan worden uitgegaan dat ookeen leek op het gebied van de optica in staat moet zijn de afbeeldingseigenschappen van een optisch systeem te interpreteren. Helaas wordt dit door veel fabrikanten vergeten. Om beiden tegemoet te komen wordt de presentatie van afbeeldingsfouten behandeld. Bij de strenge doorrekening wordt een bundel bestaande uit een min of meer willekeurig aantal stralen doorgerekend. Daarbij kan deze bundel in één vlak liggen, maar ook ruimtelijk zijn. Eén bundel kan dan weer in twee richtingen staan, (doorgaans) het vlak van tekening of het vlak loodrecht daarop

Deze vlakken worden resp, merediaal en sagittaal genoemd; zie figuur 3. Er wordt onderscheid gemaakt tussen het merediale en sagittale vlak omdat de optische sterkte van een systeem in merediale richting anders kan zijn dan in de sagittale richting. Als de optische sterkte in beide richtingen even groot moet zijn wordt daar speciaal op gecorrigeerd. Bovendien zijn er afbeeldingsfouten waarbij een zeer goede indruk van de eigenschappen wordt verkregen als aberraties voor zowel het merediale alsook het sagittale vlak worden gegeven



Figuur 3 Het merediale en het sagittale vlak van een optisch systeem.



Figuur 4 Het principe van de langsaberratie

- De mogelijkheden om afbeeldingsfouten te presenteren zijn o.a.:
1. langsaberratiecurve } (alleen merediaal)
  2. dwarsaberratiecurve } (dionaal)
  3. focusvlakcurven (merediaal + sagittaal)
  4. doorstootdiagrammen
  5. energiedichtheidscurven } (ruimtelijk)
  - 6 MTF-curven
- Er zijn nog meer mogelijkheden. Deze worden echter minder gebruikt zodat het niet zo zinvol is deze hier te behandelen.

### Langsaberratiecurve

Zoals de naam al zegt worden in deze grafiek langsfouten aangegeven. Voor de term langsfout wordt ook longitudinale aberratie gebruikt. In deze grafiek wordt als functie van de invalshoogte het longitudinale verschil  $La$  tussen de ligging van het "brandpunt" van de betreffende zone en het paraxiale brandpunt gegeven. Het principe van deze manier is weergegeven in figuur 4

### Dwarsaberratiecurve

Wordt in of in de buurt van het paraxiale brandpunt een referentievlaak geplaatst, dan zullen de stralen dat referentievlaak op een bepaalde afstand vanaf de optische as doorkruisen. Deze afstand wordt dwarsfout of ook wel transversale aberratie genoemd. Bij het tekenen van de curve wordt dit verschil als functie van de invalshoogte getekend. Voor niet evenwijdig aan de optische as invallende bundels wordt niet het verschil aangegeven met de optische as, maar het verschil met de schuin invallende centrumstraal, ook wel hoofdstraal genoemd. In tegenstelling tot de langsaberratiecurve, die altijd symmetrisch is voor een centratisch systeem, kunnen door verschillen in optische werking boven en onder de optische as, de transversale aberraties verschillend zijn. Hierdoor is deze grafiek niet bij voorbaat symmetrisch en wordt daarom de curve getekend voor de hele intredende

## Bepaling van afbeeldingsfouten

Zoals in de kop van dit artikel is gezegd handelen de vorige twee afleveringen over de beeldvorming in het paraxiale gebied. Daarbij wordt aangenomen dat de sinus en de tangens van een hoek aaneelkaar gelijk zijn en gelijk aan de hoek zelf uitgedrukt in radialen. Ook wordt verondersteld dat de pijlhoogte voor de verwaarloosbare invalshoogte gelijk is aan nul. In werkelijkheid zijn deze hoeken veel groter en zijn de sinus en de tangens niet aan elkaar gelijk. De onderstaande voorbeelden geven hiervan een illustratie.

Uitgaande van een nauwkeurigheid van veertien decimalen treedt het genoemde verschil al op bij een hoek van slechts 0,0001 radiaal ofwel slechts 20 boogseconden. Daarbij moeten we beseffen dat de zon of de maan reeds een hoek aan de hemel vormt van ongeveer een halve graad.

Als een pijlhoogte wordt uitgedrukt in de golflengte van het licht, dan is van een lensje met een pijlhoogte van één golflengte voor de kleur groen (550 nm) en een kromtestraal van 100 mm, de diameter nog geen halve millimeter. Hieruit blijkt wel dat het paraxiale gebied wel erg klein is en dat er dus al heel snel afbeeldingsfouten op zullen treden.

Nu zijn er twee karakteristieke methodes om de mate waarin afbeeldingsfouten voorkomen te bepalen. De ene is een benadering, de andere absoluut.

In het midden van de vorige eeuw analyseerde de Duitse mathematicus Seidel een methode die afgeleid is van de paraxiale berekeningen. In die tijd was rekenen nog een zeer tijdrovende bezigheid. Daarom zocht hij naar een methode die met zo min mogelijk rekenwerk toch een zo goed mogelijke indruk kon geven over de mate waarin afbeeldingsfouten op zouden treden. Tot dan toe was het nog algemeen gebruikelijk dat door middel van trial and error een combinatie werd gezocht die een goede afbeelding maakte. Dit werd naarmate de systemen aan meer eisen moesten voldoen steeds moeilijker.

Seidel ontwikkelde daarom een methode die afgeleid is van de sinusreeks. De reeksontwikkeling van de sinus is:

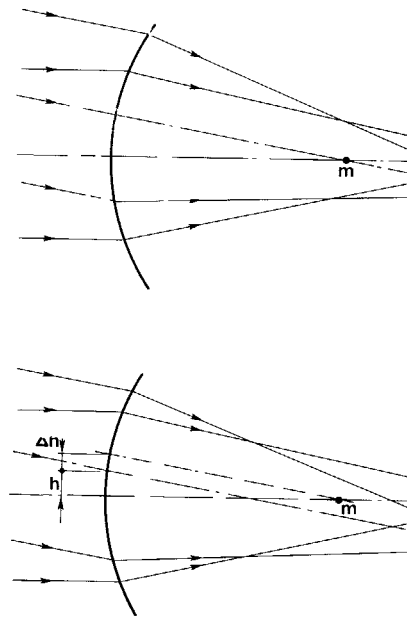
$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

In het paraxiale gebied is  $\sin x$  gelijk aan  $x$  gesteld, de eerste term van de reeks. Seidel ontwikkelde zijn rekenmethode uitgaande van de tweede term, de zogenaamde derde orde theorie

Voordat de rekenmachine werd uitgevonden zijn er ook mathematici geweest die afleidingen hebben gepleegd voor de derde en vierde term, respectievelijk de vijfde en zevende orde theorie. Deze laatste zijn echter na de ontwikkeling van de computer sterk in onbruik geraakt. De afleidingen van Seidel worden echter nog steeds gebruikt bij het ontwerpen van een optisch systeem. Zij zijn zeer goed bruikbaar om een startpositie te hebben voor verdere optimalisaties.

De andere methode is de strenge doorrekening. Maar daarover meer verderop in dit artikel.

De afbeeldingsfouten worden nog steeds genoemd zoals Seidel deze heeft aangegeven. De onderstaande afleiding geeft een min of meer vrije (met de toestemming van drs. Klaas Compaan) afleiding van het benoemen en de afhankelijkheid van de derde orde afbeeldingsfouten. In werkelijkheid is het veel complexer. De wijze van benadering is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 De voorstelling van het principe voor de benadering van de derde orde theorie

Voor het gemak wordt eerst uitgegaan van één enkelvoudig sferisch vlak. Wordt een stralenbundel evenwijdig aan de optische as getekend dan is dit de bundel waarvan wordt uitgegaan. De bundel is opgebouwd uit stralen welke invallen op een hoogte  $h$  vanaf de optische as.

Vervolgens wordt een bundel onder een hoek op het oppervlak getekend. Als het midden van deze bundel door het kromtemiddelpunt van het oppervlak wordt getekend, dan is er in principi-

pegeen verschil met de eerstgenoemde situatie. Deze schuin invallende as is weer een optische as welke loodrecht staat op het lensoppervlak.

Gaat deze as echter *niet* door het kromtemiddelpunt, maar snijdt op een andere plaats de optische as, dan zal de schuin invallende as niet loodrecht op het lensoppervlak staan. Wordt door het kromtemiddelpunt een lijn evenwijdig aan deze schuin invallende as getekend, dan is er een verschil in invalshoogte tussen de plaats waar de invallende bundel binnentreedt en de middelpuntlijn. Er is nu dus een  $\Delta h$ . Omdat  $h + \Delta h$  met de kromtestraal de "sinuswaarde" geeft t.o.v. het kromtemiddelpunt kan gezegd worden dat de waarde  $h + \Delta h$  een maat is voor de hoek die een straal maakt met het lensoppervlak. Wordt dit in relatie gezien met de tweede term van de sinusreeks dan zien we:

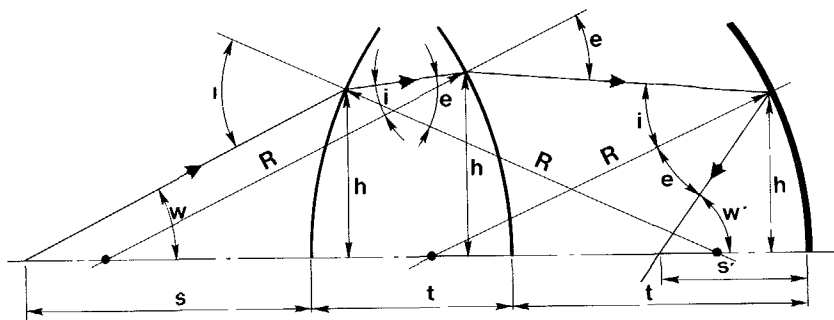
$$(h + \Delta h)^3 = h^3 + 3h^2\Delta h + 3h\Delta h^2 + \Delta h^3$$

Seidel noemde de eerste term van de uitkomst sferische aberratie, de tweede term noemde hij coma, de derde astigmatisme en de laatste distorsie.

Omdat  $h$  de term is die te maken heeft met de oorspronkelijke grootte van de opening en  $\Delta h$  met de hoek waaronder de bundel invalt, kunnen we dus concluderen dat de sferische aberratie met de derde macht toeneemt naarmate de opening toeneemt. Voor coma is dat het kwadraat van de opening en lineair met de hoek, astigmatisme lineair met de opening en het kwadraat van de hoek en distorsie met de derde macht van de hoek. Dus treedt sferische aberratie alleen op voor bundels evenwijdig aan de optische as en alle andere alleen voor bundels die er een hoek mee maken. De hier sterk gesimplificeerde voorstelling gaat uit van één werkzaam optisch vlak. In de praktijk zijn doorgaans meer optische vlakken werkzaam. Hierdoor wordt de voorstelling complexer waarvan verdere behandeling de context van dit artikel te buiten gaat.

Helaas is de benadering van Seidel slechts relatief nauwkeurig. Naarmate het systeem een grotere opening heeft en naarmate de invalshoek groter is, wordt deze benadering steeds onnauwkeuriger. Dit effect wordt nog versterkt als het optisch systeem sterk gekromde vlakken bezit. Dan zijn de hoeken van inval ten gevolge van de bundeldiameter aanzienlijk groter.

Omdat deze benadering alleen de derde orde term meeneemt, worden de vijfde, zevende en nog hogere orden niet meegenomen. Dit betekent, dat als een optisch systeem alleen op de derde orde wordt gecorrigeerd er nog altijd rest-



Figuur 2 De strenge doorrekening aan een lens-spiegel combinatie

fouten van hogere orde in kunnen blijven zitten. Wordt een systeem exact geanalyseerd, dat volgens de derde orde is geoptimaliseerd zodat alle aberraties nul zijn, dan kunnen de hogere orde fouten toch nog aanzienlijke waarden bereiken.

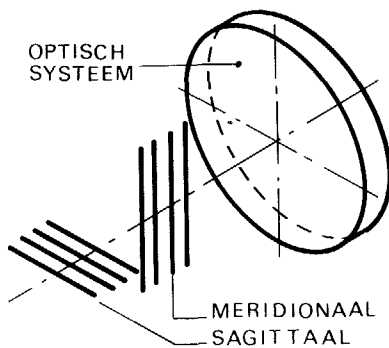
De enige werkelijk juiste manier die mogelijk is om vrij van benaderingen een optisch systeem te beoordelen op zijn kwaliteit is de zogenaamde strenge, ook wel genoemd exacte, doorrekening. Figuur 2 toont dit voor een lens-spiegel combinatie. Hierbij wordt een straal exact door een optisch systeem getraceerd en wordt met alle optische wetten rekening gehouden. Dit zijn de wetten van Snellius en de reflectiewet. Zodoende wordt dus ook rekening gehouden met asfericiteiten, decentreringsen, etc. Uiteindelijk wordt bepaald waar een straal terecht komt, in het brandpunt of het brandvlak. Door een aantal stralen door te rekenen is het mogelijk een grafische weergave te maken.

Wordt geen rekening gehouden met buigingsverschijnselen dan wordt deze methode een geometrische doorrekening genoemd.

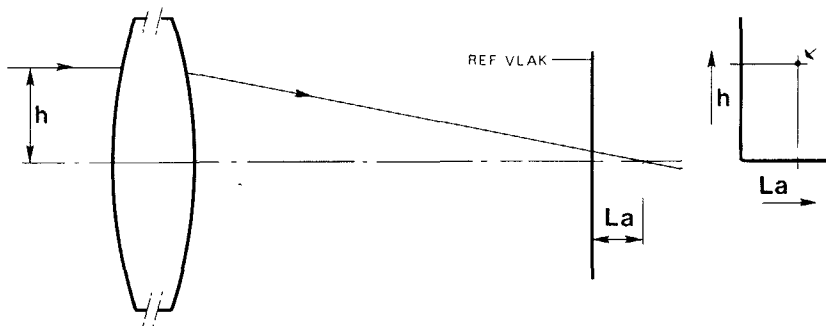
### Presentatie van de afbeeldingsfouten

Bij de presentatie van afbeeldingsfouten moet ervan worden uitgegaan dat ook een leek op het gebied van de optica in staat moet zijn de afbeeldingseigenschappen van een optisch systeem te interpreteren. Helaas wordt dit door veel fabrikanten vergeten. Om beiden tegemoet te komen wordt de presentatie van afbeeldingsfouten behandeld. Bij de strenge doorrekening wordt een bundel bestaande uit een min of meer willekeurig aantal stralen doorgerekend. Daarbij kan deze bundel in één vlak liggen, maar ook ruimtelijk zijn. Eén bundel kan dan weer in twee richtingen staan, (doorgaans) het vlak van tekening of het vlak loodrecht daarop.

Deze vlakken worden resp, merediaaal en sagittaal genoemd; zie figuur 3. Er wordt onderscheid gemaakt tussen het merediaale en sagittale vlak omdat de optische sterkte van een systeem in merediaale richting anders kan zijn dan in de sagittale richting. Als de optische sterkte in beide richtingen even groot moet zijn wordt daar speciaal op gecorrigeerd. Bovendien zijn er afbeeldingsfouten waarbij een zeer goede indruk van de eigenschappen wordt verkregen als aberraties voor zowel het merediaale alsook het sagittale vlak worden gegeven.



Figuur 3 Het merediaale en het sagittale vlak van een optisch systeem



Figuur 4 Het principe van de langsaberratie.

De mogelijkheden om afbeeldingsfouten te presenteren zijn o.a..

- 1 langsaberratiecurve } (alleen merediaaal)
- 2 dwarsaberratiecurve } (dioniaal)
- 3 focusvlakcurven (merediaaal + sagittaal)
- 4 doorstootdiagrammen
- 5 energiedichtheidscurven } (ruimtelijk)
- 6 MTF-curven

Er zijn nog meer mogelijkheden. Deze worden echter minder gebruikt zodat het niet zo zinvol is deze hier te behandelen

### Langsaberratiecurve

Zoals de naam al zegt worden in deze grafiek langsfouten aangegeven. Voor de term langsfout wordt ook longitudinale aberratie gebruikt. In deze grafiek wordt als functie van de invalshoogte het longitudinale verschil  $L_a$  tussen de ligging van het "brandpunt" van de betreffende zone en het paraxiale brandpunt gegeven. Het principe van deze manier is weergegeven in figuur 4

### Dwarsaberratiecurve

Wordt in of in de buurt van het paraxiale brandpunt een referentievlak geplaatst, dan zullen de stralen dat referentievlak op een bepaalde afstand vanaf de optische as doorkruisen. Deze afstand wordt dwarsfout of ook wel transversale aberratie genoemd. Bij het tekenen van de curve wordt dit verschil als functie van de invalshoogte getekend. Voor niet evenwijdig aan de optische as invallende bundels wordt niet het verschil aangegeven met de optische as, maar het verschil met de schuin invallende centrumstraal, ook wel hoofdstraal genoemd. In tegenstelling tot de langsaberratiecurve, die altijd symmetrisch is voor een centrisch systeem, kunnen door verschillen in optische werking boven en onder de optische as, de transversale aberraties verschillend zijn.

Hierdoor is deze grafiek niet bij voorbaat symmetrisch en wordt daarom de curve getekend voor de hele intredende

bundel Ook is het mogelijk dat de curve niet getekend wordt voor een referentievlak dat staat in het paraxiale brandpunt maar op een iets andere plaats Dit omdat het mogelijk is dat op een andere plaats een betere afbeeldingscherpte bereikt kan worden. De optimale plaats van het referentievlak is daar waar over het gehele veld de verstrooiingsfiguren minimaal zijn, of aan de gestelde eisen wordt voldaan. Op deze plaats zal dan ook later het opnamevlak worden gepositioneerd. Figuur 5 geeft het principe weer. Hierbij is voor de duidelijkheid het referentievlak extra ver naar achteren geschoven. De plaats waar de hoofdstraal het referentievlak snijdt heeft een afstand  $T_o$  tot de optische as. De dwarsaberratie  $T_a$  is de afstand van het snijpunt van de overige invallende tot het snijpunt van de hoofdstraal.

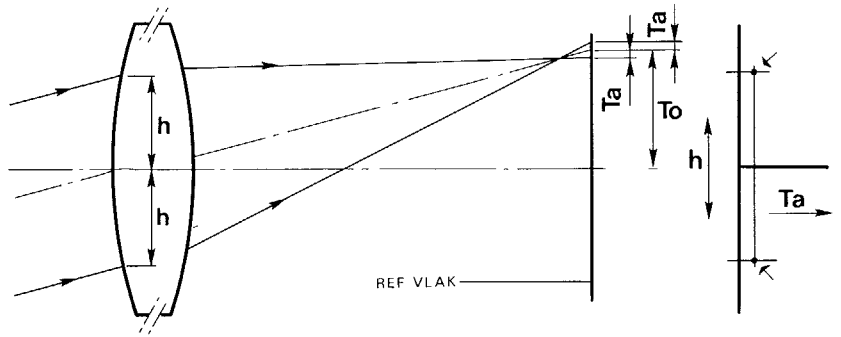
**Focusvlakcurven**

Voor een buitenstaander lijkt het logisch dat het vlak van de afbeelding, het focusvlak, een plat vlak is. Deze veronderstelling wordt gewekt omdat nagenoeg alle afbeeldingen die iemand onder ogen krijgt ook werkelijk vlak zijn. Als voorbeeld kunnen een foto, dia, film of kopie genoemd worden. Een uitzondering hierop zijn bijvoorbeeld de beeldbuis van een televisie-apparaat of de monitor van een computer, waarbij het afbeeldingsvlak gekromd is. Dit verschijnsel wordt ook in de optica geconstateerd; hierbij kan de optische werking van een optisch systeem in het meredionale vlak afwijken van die in het sagittale vlak. Dientengevolge ontstaan er twee brandvlakken, die in een grafiek zijn weer te geven. Uit de vorm van deze grafieklijnen kan worden afgeleid hoe vlak de afbeelding is. Meer hierover bij de behandeling van de soorten afbeeldingsfouten

**Doorstootdiagram**

In de eerste twee gevallen werd alleen het meredionale vlak en in het laatste ook nog het sagittale vlak doorgerekend. De daaruit ontstane grafieken geven aan wat de correctiegraad van een optisch systeem is. Met enige ervaring kunnen deze grafieken goed geïnterpreteerd worden. Helaas zeggen deze grafieken in principe niets over het gebied dat niet in het meredionale en het sagittale vlak valt.

Wordt dit "buitengebied" ook meegenomen, dan wordt dus een hele bundel doorgerekend. Deze heeft dezelfde grootte als de bundel die in werkelijkheid door het optisch systeem gaat. In zo'n geval wordt er gesproken van een ruimtelijke doorrekening. Daarbij wordt de hele bundel onderverdeeld

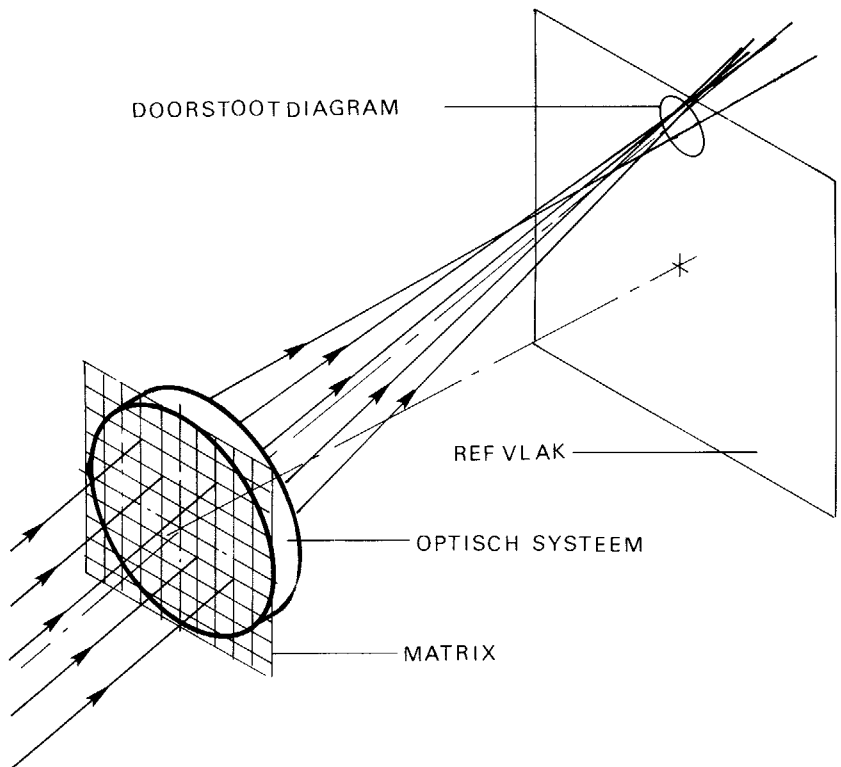


Figuur 5 Het principe van de dwarsaberratie.

door middel van een matrix. In elk punt van deze matrix wordt een straal exact door het optische systeem getraceerd. Bij het bepalen van het doorstootdiagram wordt – net zoals dat het geval is bij de dwarsaberratiecurve – het doorstootpunt bepaald van een straal in een referentievlak dat geplaatst is in de buurt van het paraxiale brandpunt. De verzameling van deze doorstootpunten wordt het doorstootdiagram genoemd

De matrix kan op verschillende manieren worden ingedeeld. Afhankelijk van vervolgberekeningen wordt voor een kwadratische, concentrisch regelmatige, driehoekige of willekeurige matrix gekozen.

De vervolgberekeningen na een doorstootdiagram kunnen o.a. de berekening van de energiedichtheden of de M.T.F.-curven zijn (deze worden hierna behandeld). De keuze van de matrix, waarbij ook een persoonlijke voorkeur een rol kan spelen, is van belang om een zo goed mogelijk beeld te verkrijgen van het vlekje dat het optisch systeem produceert. Men kan zich voorstellen dat, naarmate er meer stralen doorgerekend worden, het doorstootdiagram steeds meer op de werkelijkheid gaat lijken. En omdat dit het geval is kan dus ook een leek zien hoe de afbeelding er uit zal zien. Let wel: zo'n doorstootdiagram geeft voor een puntvormig object het verstrooiingsfiguur-



Figuur 6 Het principe van het ontstaan van het doorstootdiagram

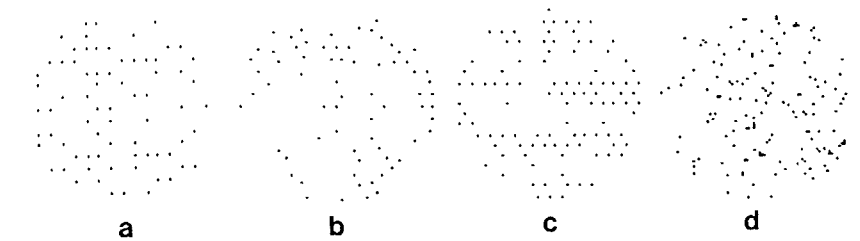
tje weer. Puntvormige objecten komen in de praktijk bijna niet voor. Een uitzondering daarop vormen de optische instrumenten voor waarneming van sterren; sterren zijn immers puntbronnen. Zo'n doorstootdiagram kan echter ook worden gezien als de afbeelding van een zwart-wit overgang op bijvoorbeeld een kopie.

In figuur 6 is weergegeven hoe een doorstoot-diagram ontstaat. Figuur 7 geeft aan welke mogelijkheden er zijn om de bundelmatrix uit te voeren. Om een doorstootdiagram goed te kunnen interpreteren is het nuttig te weten hoe de bundelmatrix er uit ziet en uit hoeveel stralen deze bestaat. Wat dit laatste betreft zijn er grote verschillen. Om een redelijke indruk te krijgen zijn toch wel ongeveer 200 stralen nodig. Er zijn echter onderzoekers en fabrikanten die al tevreden zijn met 75 stralen en er zijn er ook die nog niet met 1000 stralen tevreden zijn. De voorkeur genieten de kwadratische en concentrische regelmatige verdeling. De willekeurige verdeling is alleen zinvol als er vele duizenden stralen worden doorgerekend. Ook is er nog een ander punt van belang. Bij de presentatie van de afbeeldingseigenschappen van een optisch systeem d.m.v. doorstootdiagrammen zijn er vaak een relatief groot aantal nodig (vier tot wel dertig). Een fout die dan vaak gemaakt wordt is dat deze diagrammen onderling een verschillende schaal hebben. U kunt zich voorstellen dat dit de interpreteerbaarheid enorm bemoeilijkt.

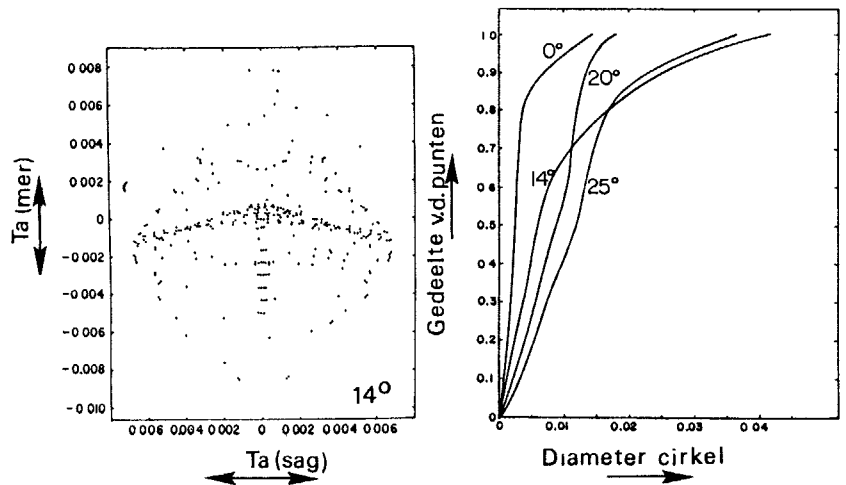
**Energiedichtheidscurven**

Een van de toepassingen van de doorstootdiagrammen is de berekening van de energiedichtheid. Hiermee wordt bedoeld wat de kleinste diameter is in het doorstootdiagram die een bepaald percentage van alle doorstootpunten bevat. Dit is met name van belang als de intensiteit belangrijk is. Voorbeelden hiervan zijn o.a. de zwarting van een fotochemische laag, de responsie van een videochip. Op deze wijze kan de fictieve gevoeligheid van optische systemen objectief worden bepaald. Wel zit hierbij een addertje onder het gras. Het kan natuurlijk mogelijk zijn dat in de vergelijking van het ene met het andere optische systeem er sprake is van een andere optische opbouw en gebruik van andere materialen. In dat geval is het zeer wel mogelijk dat de transmissie van deze systemen onderling verschillend is. Hiermee moet dus bij de vergelijking rekening worden gehouden.

Bij optische systemen die opgebouwd zijn uit lenzen kan deze transmissiegraad, of ook wel het transmissieren-

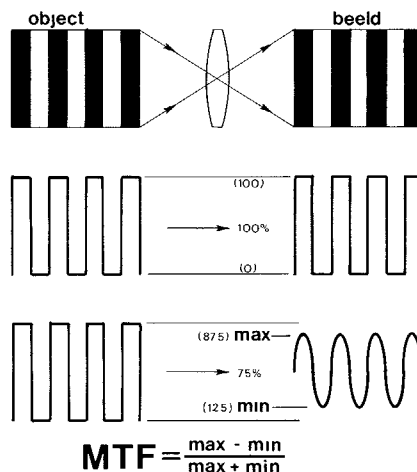


Figuur 7 Verschillende principiële mogelijkheden van de matrices die gebruikt worden bij het berekenen van een doorstootdiagram  
 a. kwadratische verdeling, b. concentrische regelmatige verdeling, c. triangulaire verdeling, d. willekeurige verdeling.



Figuur 8 De energiedichtheidscurve getekend voor verschillende invalshoeken. De linker figuur toont het doorstootdiagram voor de curve bij een invalshoek van 14° (Uit Lens design fundamentals, R. Kingslake).

dement, afhankelijk zijn van de golflengte. Dit maakt de vergelijking bij polychromatische ontvangstmiddelen (film, chip) alleen maar moeilijker. In figuur 8 is aan de hand van een doorstootdiagram de energiedichtheidscurve getekend.



Figuur 9 Het principe van de transferfunctie

**M.T.F.-curven**

De afkorting M.T.F staat voor Modular Transfer Function. Vaak wordt ook de afkorting O.T.F. gebruikt, die Optical Transfer Function betekent. Met beide functies wordt weergegeven in hoeverre een optisch systeem in staat is een object bestaande uit een lijnraster weer af te beelden als een lijnraster. Zou een optisch systeem in staat zijn elk willekeurig lijnraster weer ragscherp af te beelden, dan wordt gesproken van een M.T.F. van 100%. Helaas is dit niet het geval. Dit wordt op de eerste plaats veroorzaakt door de buigingsverschijnselen. Er is dus een maximum. De andere beperkende factor is de grootte van het doorstootdiagram. Men kan zich voorstellen dat, als het doorstootdiagram aanzienlijk kleiner is dan de afstand tussen de lijnen van het lijnraster, een dergelijk raster toch nog volledig wordt afgebeeld. In dat geval is de M.T.F. 100%. Naarmate het lijnraster fijner wordt, wordt de invloed van de afbeelding van de rand van de lijn steeds groter, zodat op een gegeven moment niet meer de volledige over-

gang wordt gehaald maar de donkere lijn "verlicht" wordt en de heldere lijn "verdonkerd" wordt. De breedte van het overgangsgebied is dan groter dan de halve lijnbreedte. In dat geval wordt de M.F.T. minder dan 100%. Dit gaat net zolang door tot de hele afbeelding van het lijnraster als een niet definieerbare wazige vlek wordt afgebeeld. Nu hoeft zo'n doorstootdiagram in de meridionale en sagittale richting niet even groot te zijn. Dit heeft dan vanzelfsprekend invloed op de M.T.F. voor een lijnraster in de meridionale en de sagittale richting. Vandaar dat M.T.F.-curven beide richtingen weergeven. In figuur 9 is het principe van de transferfunctie weergegeven. In figuur 10 is aangegeven hoe een M.T.F.-curve er uit kan zien.

**De aberraties**

Intussen is wel duidelijk geworden dat er chromatische en monochromatische aberraties zijn. Kort herhaald: chromatische komen voor als een optisch systeem brekende elementen bevat, monochromatische komen bij alle systemen voor.

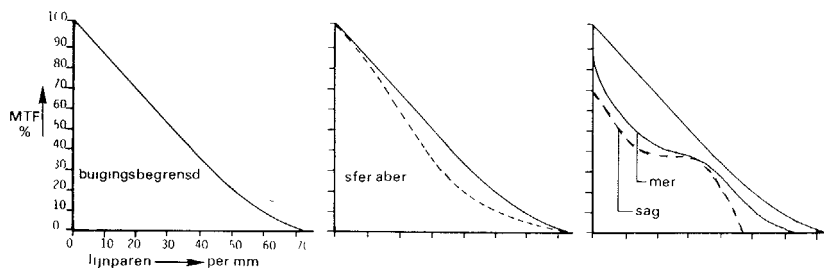
Optische systemen met brekende elementen worden doorgaans voor één bepaalde kleur geoptimaliseerd. Dat wil zeggen dat de chromatische aberraties zover zijn teruggebracht dat het spectrale werkgebied groot genoeg is en dat de monochromatische fouten voor de ontwerpkleur zijn geminimaliseerd (afhankelijk van de eis).

Zo zal bijvoorbeeld een waterpasinstrument geoptimaliseerd zijn voor een golflengte van 550 nm, en wel omdat de maximale gevoeligheid van het oog overdag ligt bij deze golflengte. Daarentegen zal een astrofotografische camera voor het fotograferen van waterstofemissieën aan de hemel geoptimaliseerd zijn voor het licht met de golflengte 656,28 nm (de C-lijn), omdat deze nevels in hoofdzaak in deze golflengte licht uitstralen. Zo kunnen er nog talloze voorbeelden gegeven worden.

De aberraties die nu behandeld worden, worden ieder voor zich, dus afzonderlijk besproken. Ondanks het feit dat aberraties over het algemeen in combinaties voorkomen is deze manier voor het begrip te prefereren.

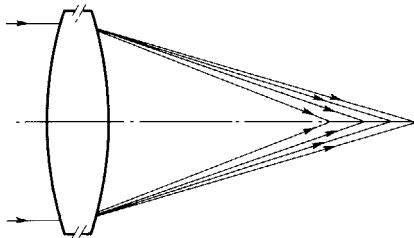
**Longitudinale chromatische aberratie**

De longitudinale chromatische aberratie wordt ook wel de chromatische aberratie van de eerste soort genoemd. Omdat de brekingsindex van optisch glas afhankelijk is van de golflengte en deze naarmate de golflengte korter is steeds groter wordt, zal dientengevolg



Figuur 10 De M.T.F.-curve voor een buigingsbegrensd systeem, voor een systeem met afbeeldingfouten op de optische as en voor een systeem dat sterk verschillend is in het meridionale en sagittale vlak buiten de optische as.

ge bij een enkelvoudige lens een kleurshift optreden. Hierbij ligt het blauwe brandpunt dicht bij de lens dan het rode brandpunt; dit is weergegeven in figuur 11. Om deze fout te minimaliseren bij een enkelvoudige lens is een bepaalde verhouding tussen de beide kromtestralen nodig. Deze heeft echter zulke sterke krommingen en tegelijkertijd het optreden van andere afbeeldingsfouten tot gevolg, zodat het nagenoeg nooit gedaan wordt.



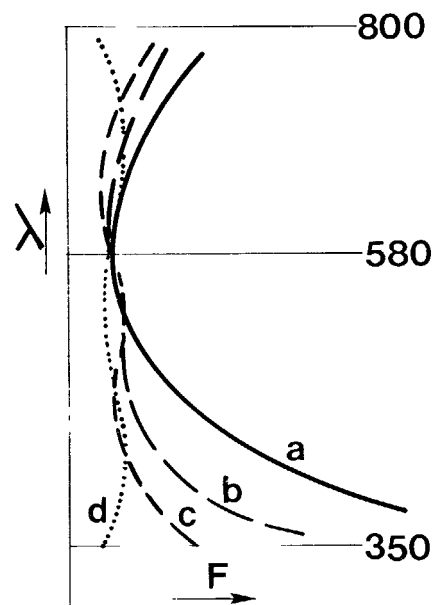
Figuur 11 Het principe van de longitudinale chromatische aberratie

Wil men de longitudinale chromatische aberratie corrigeren dan is men erop aangewezen meer lenzen te gebruiken. Hierbij heeft men de mogelijkheid te kiezen voor lenzen met dezelfde brekingsindex op onderling een grote afstand, en de mogelijkheid om de lenzen dicht bij elkaar te zetten, maar dan glazen met verschillende brekingsindex te gebruiken. De brekingsindices en Abbe-getallen verhouden zich volgens bepaalde wetmatigheden met de sterktes van de lenzen. Het zou te ver voeren daar hierop in te gaan. Wel is het zinvol te vermelden dat als gewone optische glazen gebruikt worden er per te corrigeren kleur één lens nodig is. Bij gebruik van speciale, over het algemeen dure, glazen is het mogelijk af en toe meer kleuren tegelijkertijd te corrigeren.

Zo wordt een lenzenstelsel dat uit twee lenzen bestaat en voor twee kleuren is gecorrigeerd een achromaat genoemd. Worden met twee lenzen drie kleuren bijna gecorrigeerd, dan wordt gesproken van een halfapochromaat. Een lenzenstelsel bestaande uit drie lenzen en drie gecorrigeerde kleuren wordt apochromaat genoemd, terwijl een

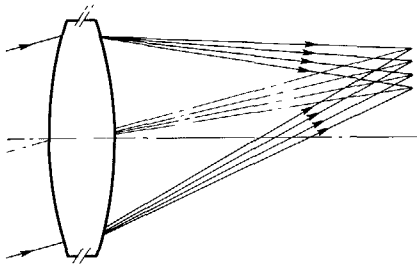
drie lenzen gecorrigeerd voor zelfs vier kleuren een super-apochromaat wordt genoemd. Naarmate meer kleuren samenvallen is de kleurreinheid beter. Bij een visueel systeem, dat is een systeem waarmee met het oog wordt waargenomen, worden over het algemeen de kleuren rood en blauw samengebracht. Er is dan een klein verschil met de ligging van het groene brandpunt. Dit kleine verschil wordt het secundaire spectrum genoemd. Bij een apochromaat zijn deze drie kleuren geheel samengebracht, bij superapochromaten komt daar diepblauw of nabijviolet nog bij.

Het secundaire spectrum kan grafisch weergegeven worden door het verschil in ligging van het brandpunt aan te geven als functie van de golflengte. Voor een aantal lenzenstelsels is dit weergegeven in figuur 12.



Figuur 12 Enige voorbeelden van secundaire spectra van lens-objectieven  
a. achromaat,  
b. half-apochromaat,  
c. apochromaat,  
d. super-apochromaat.





Figuur 13 Het principe van de chromatische vergrotingsfout.

**Chromatische vergrotingsfout**

De chromatische vergrotingsfout wordt ook wel chromatische fout van de tweede soort genoemd. Handelt de longitudinale chromatische aberratie over het verschil in ligging van de brandpunten op de optische as, zo zegt de chromatische vergrotingsfout iets over het gebied daarbuiten.

De chromatische vergrotingsfout wil zeggen dat de afbeeldingsmaatstaf voor de verschillende kleuren niet hetzelfde is, dit is weergegeven in figuur 13.

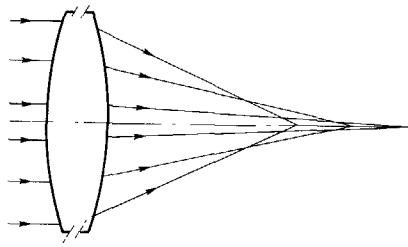
Omdat de lenswerking voor de blauwe kleur sterker is dan voor de rode kleur is bij een enkelvoudige lens de rode afbeelding groter dan de blauwe afbeelding. Anders gezegd, de brandpuntsafstand voor de rode kleur is groter dan die voor de blauwe kleur. Dit kan ook optreden als door middel van lenscombinaties de liggingen van de brandpunten wel met elkaar overeen komen. In dat geval is, analoog aan wat in de vorige aflevering werd behandeld, de ligging van het hoofdvlak voor de rode kleur afwijkend van die van de blauwe kleur.

De chromatische vergrotingsfout kan gecorrigeerd worden door o.a. een bepaalde keuze van de onderlinge posities van lenzen en de plaats waar een bundel begrensd wordt.

Ook van de chromatische vergrotingsfout is het mogelijk een grafische voorstelling te maken. Hierbij wordt als functie van de beeldhoek het verschil in brandpuntsafstand (= afbeeldingsmaatstaf) gegeven voor bijvoorbeeld de C-lijn en de F-lijn, resp. de rode en de blauwe kleur.

**Sferische aberratie**

Bij het optreden van sferische aberratie hebben evenwijdig aan de optische as invallende stralen niet hetzelfde brandpunt. Bij een ongecorrigeerde lens of spiegel zal naarmate de invalshoogte groter is het brandpunt van die zone steeds dichterbij de lens of spiegel liggen. Het verschil in ligging van het brandpunt t.o.v. het paraxiale brandpunt is evenredig met de derde macht van de invalshoogte.

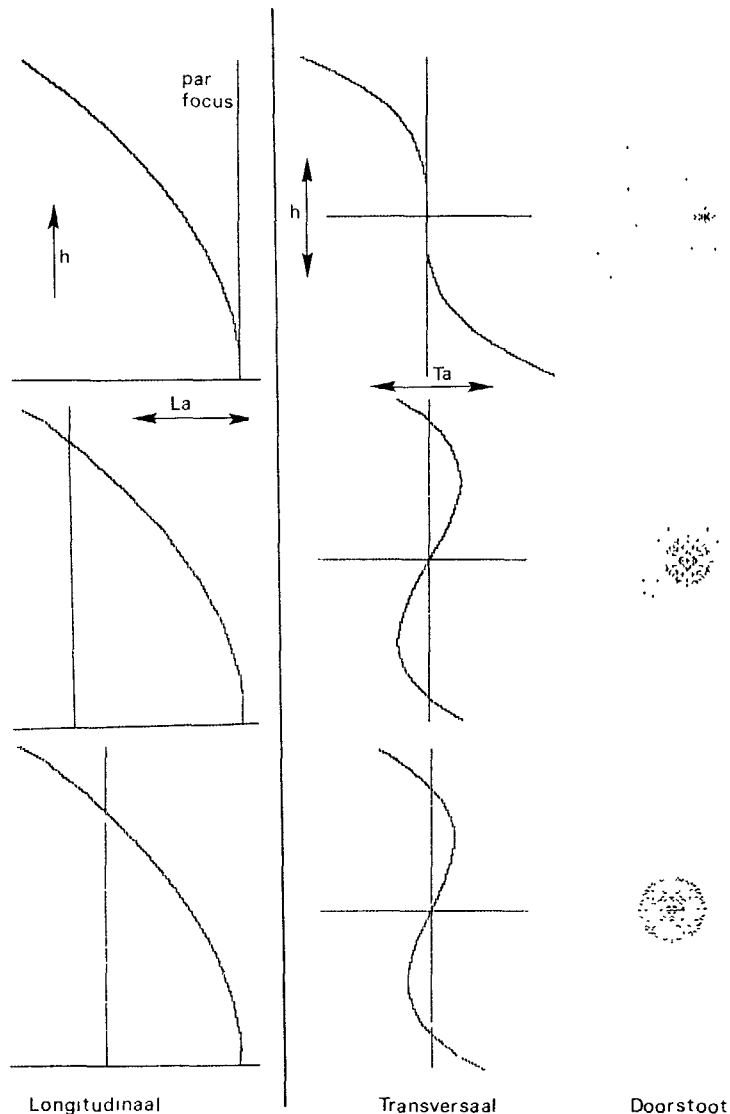


Figuur 14 Het principe van de sferische aberratie.

Doordat de stralenvereniging nergens volledig is, zal de minimale diameter van de onscherpte verkregen worden door het referentievlak t.o.v. het paraxiale brandpunt te verschuiven. In verband met de afhankelijkheid van de derde macht van de invalshoogte ligt de

plaats van de kleinste verstrooiingsfiguur niet op dezelfde plaats waar de maximale energiedichtheid bereikt wordt. In hoeverre deze twee posities van elkaar afwijken hangt af van de vorm van de correctie.

De sferische aberratie van een enkelvoudige lens kan worden gereduceerd door een bepaalde verhouding van de beide kromtestralen aan te brengen. Deze verhouding is afhankelijk van de brekingsindex. Bij het glas met een brekingsindex van ongeveer 1,5 is deze verhouding ca. 1 staat tot 6. Bij zeer hoogbrekende materialen, die bijvoorbeeld gebruikt worden bij lasers, kan deze verhouding zelfs zodanig worden dat de lens meniscusvormig is. De sferische aberratie kan bij een enkelvoudige lens voorts verminderd worden



Figuur 15 De presentatie van de sferische aberratie voor een lens van  $\infty$  50 mm en een brandpuntsafstand van 300 mm  
 a. in het paraxiale focus,  
 b. op de plaats van maximale energiedichtheid,  
 c. op de plaats van minimale grootte van de verstrooiingsfiguur

door de lens kleiner te maken. Door de lens ongeveer 20% kleiner te maken kan de sferische aberratie al gehalveerd worden

Wil men de sferische aberratie bij een enkelvoudige lens geheel opheffen dan moet een van de vlakken asferisch worden gemaakt. De grootte van de asfericiteit is afhankelijk van de brekingsindex en of deze aangebracht wordt op het eerste of het tweede lensvlak. Het maken van asferische lenzen is echter een kostbare zaak en bovendien zijn er nog steeds de chromatische aberraties die ons parten spelen

Om de sferische aberratie zeer sterk te reduceren, zodat toch een bruikbare lensdiameter gebruikt kan worden, moeten meer lenzen gebruikt worden. Wordt bij een lenscombinatie een correctiegraad gevonden waarbij de brandpunten voor toenemende invalshoogten steeds dichterbij de lens of spiegel komen te liggen, dan wordt deze lens ondergecorrigeerd genoemd. Liggen deze brandpunten steeds verder weg, dus het omgekeerde, dan wordt gesproken van een overgecorrigeerde lens. De beste correctie wordt bereikt als er zowel een overcorrectie als ook een ondercorrectie is. In dat geval wordt gesproken van een lenscombinatie met zonefouten. De mate waarin een lenscombinatie gecorrigeerd moet zijn hangt af van de toepassing. De hoogste eisen worden gesteld bij astronomische objectieven.

Figuur 14 toont het principe van de sferische aberratie. Figuur 15 laat drie mogelijkheden zien voor de correctie van een biconvexe lens met een opening van 50 mm, een dikte van 12 mm en een brandpuntsafstand van 300 mm. De lens heeft aan beide zijden dezelfde kromming en is vervaardigd uit BK 7.

**De coma**

Simpelweg zou men kunnen zeggen: wat de sferische aberratie is voor een evenwijdig aan de optische as invallende bundel, dat is de coma voor een schuin invallende bundel.

Bij coma hebben de verschillende bundels verschillende brandpunten vanaf de optische as. Is de sferische aberratie van een lens gecorrigeerd, dan liggen deze brandpunten allemaal in een lijn die loodrecht op de optische as staat. Veelal is de sferische aberratie niet geheel gecorrigeerd waardoor er naast de coma ook buiten de optische as ook sferische aberratie aanwezig is. Doordat de bundels verschillende diameters hebben, zal de verstrooiingsfiguur per zone in grootte verschillen. Hierdoor

lijkt het verstrooiingsfiguurtje dat ontstaat op een komeetje, ofwel in het latijn. coma

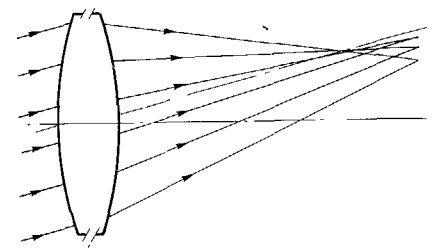
De coma kan op verschillende manieren worden gecorrigeerd. De eenvoudigste manier is door de bundel op de juiste plaats te begrenzen. Bij een enkelvoudig sferische spiegel is deze plaats het kromtemiddelpunt van de spiegel. Bij een enkelvoudige lens kan de coma ook gecorrigeerd worden door een juiste verhouding van de kromtestralen. Net zoals bij de sferische aberratie is deze verhouding afhankelijk van de brekingsindex. Maar ook hier spelen de chromatische aberraties weer een hinderlijke rol. Daarom moeten bij het corrigeren van de coma ook weer tenminste twee lenzen gebruikt worden. Om sferische aberratie tegelijkertijd te corrigeren moeten de Abbe-getallen van de twee lenzen t.o.v. elkaar vrij sterk verschillen. Hoe kleiner het verschil in Abbe-getallen is, des te sterker worden de krommingen van de lenzen. Een optisch systeem dat zowel voor sferische aberratie als ook voor coma is gecorrigeerd wordt een aplanatisch systeem genoemd.

Een andere manier om de coma aan te geven van een optisch systeem is de zogenaamde sinusvoorwaarde. Deze is afgeleid door Abbe.

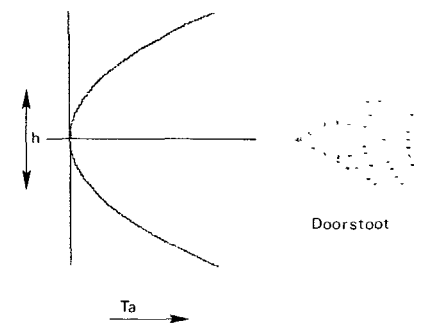
Bij de sinusvoorwaarde kan zonder een schuin invallende bundel door te rekenen toch een indruk verkregen worden of een systeem behept is met coma. Deze sinusvoorwaarde geeft weliswaar geen exacte, maar toch een zeer goede benadering. Bij de sinusvoorwaarde wordt onderzocht in hoeverre de sinus van de uittredehoek met de optische as van de het systeem verlatende straal evenredig is met de invalshoogte en de brandpuntsafstand. Deze verhouding moet zodanig zijn dat de uittrede-stralen een hoofdvlak vormen dat zuiver bolvormig is. Het quotient van de invalshoogte en de radius van dit bolvormig hoofdvlak is de sinus van de uittredehoek; vandaar dat dit de sinusvoorwaarde genoemd wordt.

Het zal duidelijk zijn dat deze voorwaarde alleen maar waar kan zijn als de sferische aberratie geheel is gecorrigeerd. Dit is natuurlijk niet altijd het geval. Vandaar dat de aberratiecurve van de sinusvoorwaarde enigszins "meeloopt" met de sferische aberratiecurve.

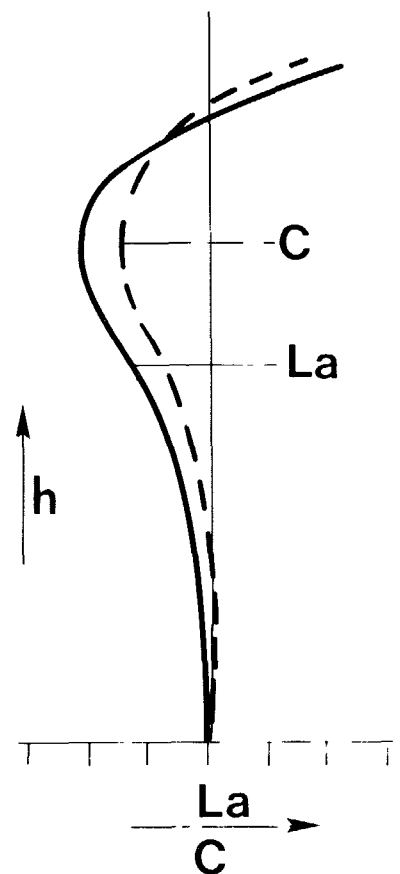
In figuur 16 is het ontstaan van coma weergegeven, terwijl figuur 17 een typische coma-aberratiecurve en doorstootdiagram laat zien. Figuur 18 laat een La-curve zien waar ook de sinusvoorwaarde is ingetekend.



Figuur 16 Het principe van de coma.



Figuur 17 De presentatie van de coma.



Figuur 18 De sinusvoorwaarde in de figuur van de longitudinale sferische aberratie.

**Astigmatisme**

Het woord astigmatisme betekent, niet puntvormig. Hiermee wordt bedoeld dat een afbeelding buiten de optische as niet puntvormig is. We hebben net gezien dat dit ook al het geval is als er coma optreedt. Het verschil met coma is dat de comavlek asymmetrisch is, terwijl de astigmatische vlek symmetrisch is.

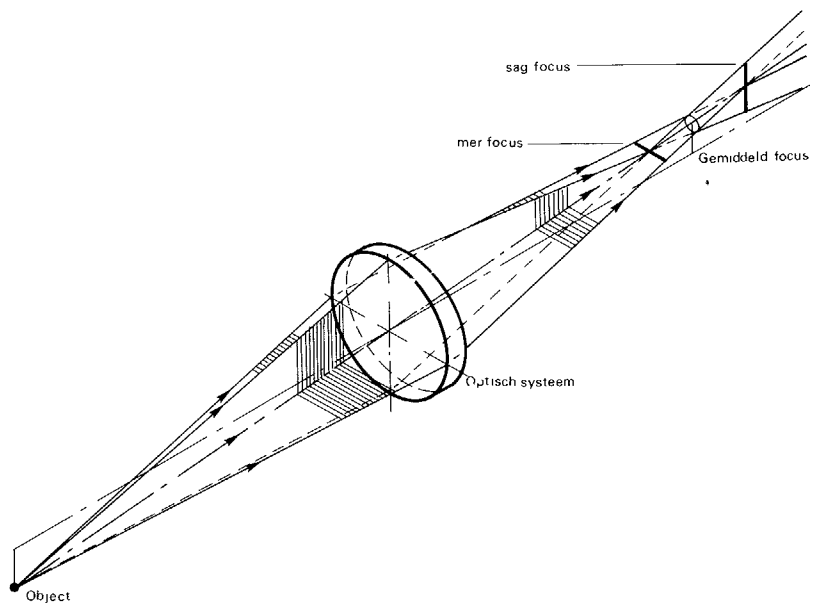
Het is reeds meermalen genoemd dat de optische sterkte van een optisch systeem in het meredionale vlak anders kan zijn dan in het sagittale vlak. Als dit het geval is, dan is de ligging van het meredionale brandpunt van een zone afwijkend van die van het sagittale brandpunt. Wordt figuur 19 bestudeerd dan zien we dan in het meredionale brandpunt de hele intredende bundel wordt afgebeeld als een horizontaal streepje. Dit meredionale brandpunt wordt ook het tangentiële brandpunt genoemd. Daarentegen wordt in het sagittale brandpunt de hele intredende bundel afgebeeld als een vertikaal streepje. Precies tussen deze twee brandpunten in bevindt zich de plaats waar het verstrooiingsfiguurtje cirkelvormig is.

Op alle andere plaatsen zijn dit min of meer zwakke of sterke ellipsen. Een systeem is voor astigmatisme gecorrigeerd als het tangentiële en het sagittale brandpunt samenvallen.

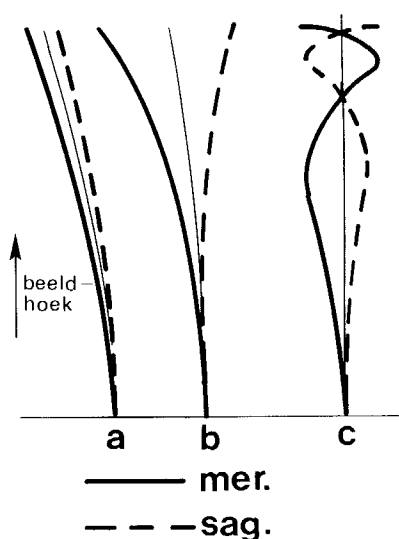
In dat geval wordt er gesproken van een anastigmatisch systeem. Door als functie van de invalshoek van de bundel de ligging van het tangentiële en sagittale brandpunt uit te zetten kan de vorm van het focale vlak bepaald worden. Is ten opzichte van het paraxiale brandpunt de curve van het tangentiële focusvlak spiegelsymmetrisch met het sagittale focusvlak, dan is het gemiddelde focusvlak plan. Natuurlijk hoeft dit niet altijd symmetrisch te zijn om een plan focusvlak te geven. Beide curven kunnen een grillige vorm hebben en zodanig uitelkaar liggen dat het verstrooiingsfiguurtje op een plan opnamemateriaal binnen de gestelde grenzen blijft. Dit is bijvoorbeeld het geval bij foto-objectieven.

Over het algemeen is dit gemiddelde niet plan, maar min of meer gekromd. Er wordt dan gesproken van een gekromd beeldveld. Natuurlijk kunnen het tangentiële en sagittale brandpunt samengebracht worden. Als in dat geval het focusvlak niet plan is wordt gesproken van zuivere beeldveldkromming. Deze wordt ook vaak afzonderlijk vermeld.

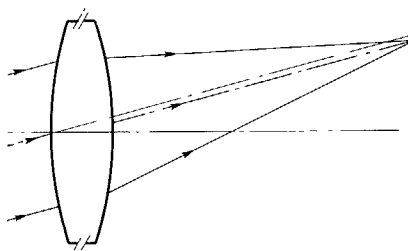
In figuur 19 is het ontstaan van astigmatisme weergegeven. Let daarbij op het verschil tussen de tangentiële en sagittale foci. Figuur 20 geeft een aantal karakteristieke correcties weer van enige veel gebruikt optische systemen.



Figuur 19 Het principe van het astigmatisme



Figuur 20 De liggingen van het meredionale en sagittale focusvlak en de vorm van het optimale focusvlak  
a achromaat,  
b. groothoekoculair,  
c kleinbeeldobjectief.



Figuur 21 Het principe van de distortie.

**Distorsie**

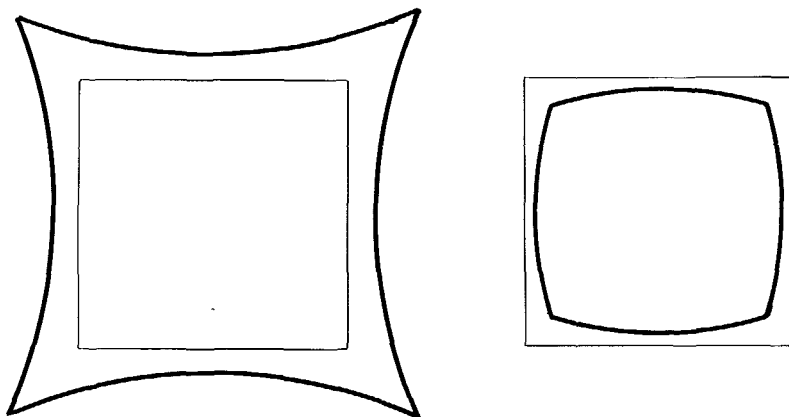
De burgerlijke benaming voor distorsie is vertekening. Deze afbeeldingsfout is eigenlijk geen afbeeldingsfout in de ware zin van het woord. De fout veroorzaakt namelijk geen onscherpte. Bij vertekening is de afbeeldingsmaatstaf niet conform de formule uit de eerste aflevering  $H = f \cdot \tan(a)$  of voor kleine hoeken  $H = f \cdot a$  (a uitgedrukt in radialen). Dit is weergegeven in figuur 21. Is de werkelijke afbeelding groter dan volgens de formule het geval zou zijn, dan wordt er gesproken van kussen-vormige vertekening. Is deze daarentegen kleiner, dan wordt er gesproken van tonvormige vertekening. In een grafiek wordt de vertekening weergegeven van het verschil in afbeeldingsgrootte tussen de werkelijke afbeelding en wat deze theoretisch zou moeten zijn.

Verder moet er verschil worden gemaakt tussen hoekvertekening en rechtlijnigheidsvertekening. Bij een optisch systeem dat vrij is van hoekvertekening is de afbeeldingsmaatstaf gelijk aan  $f \cdot a$  (a in radialen). In dat geval is bij een afbeelding de onderlinge afstand in hoekmaat evenredig. Daardoor lijken bij een visueel instrument, bijvoorbeeld een verrekijker, rechte lijnen in een gezichtsveld krom.

Bij een systeem dat gecorrigeerd is voor rechtlijnigheidsvertekening is de correctie zodanig uitgevoerd dat de afbeeldingsmaatstaf evenredig is met  $f \cdot \tan(\alpha)$ . In dat geval blijven rechte lijnen in het gezichtsveld ook werkelijk recht. In dat geval is de hoekgetrouwheid dus niet aanwezig. Als een instrument dat op deze wijze is gecorrigeerd zodanig wordt verdraaid dat een object door het gezichtsveld beweegt, dan lijkt het alsof objecten naarmate zij de rand van het gezichtsveld naderen steeds meer samengeknepen worden.

Helaas is het niet mogelijk een optisch systeem voor beide fouten tegelijk te corrigeren.

In figuur 22 is de vertekeningfout weer gegeven met de voorstelling voor de kussen- en tonvormige vertekening.



Figuur 22 Kussen- en tonvormige vertekening

#### Literatuur

- [1] Optics, Hecht, Addison Wesley Publishing Compagny  
 [2] Fundamentals of Optics, F.A Jenkins en H.E. Whits, McGrawhill Bookcompany

[3] Technische Optik, G. Schroeder, Vogel Buchverlag

[4] Bauelemente der Optik, H. Naumann en G. Schroeder, Carl Hanser Verlag.

[5] Inleiding in de optica, A.C.S. van Heel, Martinus Nijhoff

[6] Telescope Optics, H.G.J. Rutten en M.A.M. van Venrooij, Willmann-Bellman

[7] Den Fernrohre und Entfernungsmesser, A. König en H. Köhler, Springer Verlag.

[8] Lens Design Fundamentals, R. Kingslake, Academic Press

## Regionale stichtingen voeren GOA's procesindustrie uit

### Nieuw beleidsplan in het kader van Bijdrageregeling Vakopleiding Jeugdigen 1986/87

Het Opleidingsfonds Vakopleiding Procesindustrie OVP heeft samen met de Stichting Vakopleiding Procesindustrie VaPro en op verzoek van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid een vierde beleidsplan opgesteld. Dit beleidsplan voor het cursusjaar 1986/87 richt zich ook nu weer op de vakopleiding van jeugdigen in de procesindustrie in het kader van de Bijdrageregeling Vakopleiding Jeugdigen BVJ.

In het beleidsplan 1986/87 zijn de volgende prioriteiten gesteld:

- 1 Volle aandacht voor beter opleiden van werknemers
- 2 Meer aansluiten bij de wensen van het bedrijfsleven met betrekking tot de opleidingen tot operator
- 3 Het bijhouden van het vakmanschap in het kader van de snelle technologie-ontwikkelingen

4. Meer mogelijkheden voor kleine en middelgrote ondernemingen om deel te kunnen nemen aan praktijkopleidingen in de procesindustrie

### GOA

Belangrijk middel in dit beleidsplan blijft de uitvoering van Gemeenschappelijke Opleidings Activiteiten GOA. De GOA-vorm zoals het OVP die toepast, richt zich met name tot alle facetten van de beroepsvaardigheden in de procesindustrie. Mede daarom is de realisatie opgedragen aan plaatselijke en regionale stichtingen met toezicht van de VaPro. In deze stichtingen werken verschillende ondernemingen samen om tot een uitgebalanceerd leerpakket te komen.

Bij de opzet van de GOA in de procesindustrie is er sprake van minimaal 40 gemeenschappelijke opleidingsdagen gedurende de primaire opleiding.

Op dit moment functioneren er twee stichtingen als samenwerkingsverband procesindustrie:

- Stichting BONO in Noordoost-Overijssel
- Stichting Jeugd en Industrie Veluwe

### Uitkeringsstructuur van het OVP-fonds

Vanuit het opleidingsfonds krijgen de bedrijven een bedrag van f 3.658,- per leerling. Voorwaarde voor de uitkeringen is dat de leerling subsidiabel is voor de BVJ. Dat wil zeggen dat het een

leerling betreft die bij aanvang van de opleiding jonger is dan 23 jaar en voor het eerst een opleiding volgt in de procesindustrie in het kader van de VaPro. Voor de extra uitkeringen (o.a. GOA's) geldt dat het OVP hiervoor een subsidietoezegging moet hebben verkregen van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid.

### Procesindustrie

De procesindustrie beperkt zich niet tot één bedrijfstak, maar strekt zich uit over een veelheid van sectoren waarin in de meeste gevallen ondernemingsgewijs CAO's worden afgesloten. Het werkingsgebied van de procesindustrie en daarmee ook van het OVP-fonds omvat o.m. de volgende sectoren.

- de aardolie-industrie,
- de chemische industrie,
- de papier- en papierwarenindustrie,
- de rubber- en kunststofverwerkende industrie,
- de aardewerk- en glasindustrie,
- de metallurgische industrie,
- de voedings- en genotmiddelenindustrie.

De procesindustrie kent een landelijk vakopleidingsorgaan, de Stichting Vakopleiding Procesindustrie (VaPro). Dit opleidingsorgaan verzorgt in het kader van de Wet op het Leerlingwezen opleidingen tot mechanisch operator A en B, tot procesoperator A, B en CT en laborant/analist