



**TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
ÅBO YRKESHÖGSKOLA**

Opinnäytetyö

Valo ja linssi

Jari Uusitalo

Viestinnän koulutusohjelma

2009

| | |
|--|--------------------------|
| Viestinnän koulutusohjelma | |
| Tekijä: Jari Uusitalo | |
| Työn nimi: Valo ja linssi | |
| Elokuvan suuntautumisvaihtoehto | Ohjaaja: Vesa Kankaanpää |
| Opinnäytetyön valmistumisajankohta 16.11.2009 | Sivumäärä |
| <p>Tutkin opinnäytetyössäni valoon liittyviä ilmiöitä sekä valon ja linssien yhteiselämää. Käyn työssäni läpi ongelmat, joita valon siirtäminen linssien avulla synnyttää, sekä ongelmien ratkaisut.</p> <p>Rakenteeltaan opinnäytetyöni seuraa valon matkaa kohti kuvapintaa. Ensin käyn läpi valon liittyvät ominaisuudet ja ilmiöt, sitten valon ja linssin kohtaamisesta aiheutuvat ongelmat ja ratkaisut.</p> <p>Valoa koskeva materiaali on suurelta osin kerätty wikipediasta ja optiikkaa koskevan tieto Robert F. Fisherin kirjasta Optical System Design (2nd edition). Olen käyttänyt myös linssi ja objektiivivalmistajilta saatavaa materiaalia. Zeiss, joka valmistaa optiikkaa omalla nimellään sekä ainakin Arrille, Hasselbladille ja Sonylle on ollut tiedon lähteenä. Myös Canon, joka valmistaa runsaasti videokameroiden optiikkaa, on toiminut lähteenä.</p> | |
| Hakusanat: elokuvaus, objektiivit, valokuvaus, optiikka, valo | |
| Säilytyspaikka: Turun ammattikorkeakoulun kirjasto, Linnankatu 54 20100 TURKU | |

| | |
|--|-----------------------------|
| Degree Programme: Media Arts | |
| Author: Jari Uusitalo | |
| Title: Light and lens | |
| Specialization line: Film Art | Instructor: Vesa Kankaanpää |
| Date 16.11.2009 | Total number of pages |
| <p>In my thesis I am studying phenomena of light and interaction with light and lenses. I am explaining distortions and aberrations which occur when light is travelling through lenses. My work gives solutions how those unwanted effects are solved.</p> <p>Structure of my thesis follows the path of light. First I am telling about light and phenomena related to light. Secondly I shortly explain what a lens is and what lenses properties are. Then I am focusing to problems which follow when light encounters lens surface. I explain different aberrations and their solutions.</p> <p>Most of material related to light is from wikipedia. I found wikipedias light related articles very well edited and reliable. Many of them were done by professionals working in different branches of physics and light related technology. Knowledge concerning lenses comes from a great deal from Robert F. Fishers book Optical System Design (2nd edition) which is written to professionals working with optics. Fisher's book is easy to understand in spite of its heavy information. Fisher's book doesn't demand a lot of mathematical and physical studies in order to understand its content.</p> <p>I also got a lot of valuable information from different lens and objective manufactures like Zeiss and Canon. Zeiss is making objectives under its own brand but also they make optical systems for companies like Arri, Hasselblad and Sony. Canon is well known provider of still- and video camera optics.</p> | |
| Keywords: cinematography, objective, photography, optics, light | |
| Deposit at: Turku University of Applied Sciences | |
| Arts Academy Library, Linnankatu 54, 20100 TURKU | |

SISÄLTÖ

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 6 |
| 2 | Valo | 8 |
| 2.1 | Mitä valo on? | 8 |
| 2.1.1 | Amplitudi | 10 |
| 2.1.2 | Aallonpituus | 11 |
| 2.1.3 | Polarisaatio eli värähtelykulma | 11 |
| 2.1.4 | Valon vaiheisuus | 12 |
| 2.2 | Valoon liittyviä ilmiöitä | 13 |
| 2.2.1 | Valon taittuminen | 13 |
| 2.2.2 | Interferenssi | 14 |
| 2.2.3 | Diffraktio | 16 |
| 3 | Linssillä lisää valoa ja ongelmia | 20 |
| 3.1 | Linssiin liittyviä ominaisuuksia | 20 |
| 3.1.1 | Polttoväli | 20 |
| 3.1.2 | Halkaisija | 20 |
| 3.1.3 | Valoteho | 20 |
| 3.2 | Aberraatiot ja heijastuminen tuo ongelmia kuvanmuodostuksen kannalta. | 21 |
| 3.2.1 | Väripoikkeama I. kromaattinen poikkeama (Chromatic aberration) | 21 |
| 3.2.2 | Pallopoikkeama (Spherical aberration) | 24 |
| 3.2.3 | Koma (Coma) | 26 |
| 3.2.4 | Astigmaattisuus (Astigmatism) | 28 |
| 3.2.5 | Kuvatason kaareutuminen (Curvature of field) | 31 |
| 3.2.6 | Linjavääristymä (Distortion) | 33 |
| 3.2.7 | Heijastuminen (Reflection) | 36 |
| 4 | Yhteenveto | 38 |

LIITTEET

Liite 1. Lähdeluettelo

Liite 2. Kuvaluettelo

1 Johdanto

Yhtenä kauniina päivänä kameran läpi maailmaa katsellessani, ajatukseni teki harha-
askeleen fysiikan puolelle. Tajusin, että kaikki mitä kamerallani kuvaan, on valoa.
Kaiken mitä kuvaan, täytyy joko heijastaa tai lähettää valoa. En kuvaa hymyilevää
ihmistä, vaan valoa joka heijastuu tämän ihmisen eri kohdista ja ympäröivästä
maisemasta. Valoa kerätään ja fokusoidaan objektiivilla kameran tallentavalle
pinnalle. Minusta alkoi tuntua käsittämättömältä, miten objektiivivi voi kerätä kaikkialta
säteilevän valon järkeväksi kuvaksi kamerani kennolle. Aloin tutkia asiaa ja törmäsin
maailmaan, jossa valoa käännellään ja väännellään, jotta se saadaan taipumaan
kuvaksi. Valo itse tuntuu sisältävän paljon tahtoa tämän prosessin vastustamiseen.

Aloin etsiä tietoa internetistä, joka osoittautui hyväksi tietolähteeksi, ja nälkä vain
kasvoi syödessä. Tein jossain vaiheessa koulutustani asiasta esitelmän englannin
puhe-esiintymisen kurssille. Kun lopputyön tekeminen tuli ajankohtaiseksi, niin päätin
laajentaa tuntemustani valon ja optiikan yhteispeleistä ja tehdä kirjallisen
opinnäytetyöni tästä aiheesta.

Yritin lukea valo-oppia teknillisen korkeakoulun oppikirjoista ja muista vastaaviin
tarkoituksiin tehdyistä teoksista. Huomasin kuitenkin näiden olevan kovin
matemaattispohjaisia, enkä päässyt niihin sisään ilman fysiikan aiempia opintoja.
Lopulta päädyin hakemaan suuren osan valoon kohdistuvasta tiedostani wikipediasta.
Wikipedia paljastui yllättävän hyväksi ja selkeäksi tietolähteeksi. Wikipediassa pystyy
tarkistamaan, ketkä ovat artikkeliin kirjoittaneet. Jotkut artikkelien muokkaajat antavat
varsin paljon tietoa itsestään. Valon osalta kirjoittajista iso osa oli eri fysiikan ja
tähtitieteen alalla työskenteleviä ihmisiä ja osa harrastajia. Iso ryhmä kuitenkin seuraa
jokaisen artikkelin kehittymistä ja niin pieniinkin virheisiin ja epäselvyyksiin
puututaan aika nopeasti. Minusta wikipediassa on ylivoimaista se, että artikkelien
muokkaushistoriaa voi seurata. Järjestelmä on varsin läpinäkyvä. Tietenkin täytyy
muistaa myös internetin ja wikipedian huonot puolet. Tässä tapauksessa se on mielestä

se sama kuin vahvuuskin, kuka tahansa voi muokata ja laittaa tietoa esille. Joillakin on enemmän intoa kuin tietoa. Kirjan julkaisemisen kynnyks on suurempi.

Onneksi myös kirjat ovat siirtyneet internetiin. Käytettävissä on runsaasti eri tietokantoja, joihin on siirretty kirjallisuutta. Itselleni pelastukseksi tuli ebrary tietokanta, josta löysin Robert F. Fisherin kirjan optical system design (2nd edition). Linssiin ja optikkaan perustuvat tietoni ovat paljolti kerätty tuosta kirjasta. Fisherin kirja on selkeä ja perusteellinen teos, joka on tarkoitettu lähinnä optisia systeemejä suunnitteleville ihmisille. Kirjan ymmärtäminen ei kuitenkaan edellytä suuria matemaattisia ponnistuksia, mikä on mielestäni suuri poikkeus kotimaisista kirjastoista löytyviin alan teoksiin.

Objektiivien valmistajilta löytyy myös paljon hyvää materiaalia siirrettynä internetiin. Itse käytin Zeissin (How to read MTF curves) ja Canonin (EF Lens Work Book) julkaisemia opuksia, jotka löytyvät valmistajien sivuilta. Näissä täytyy muistaa, että valmistajilla on pelissä myös omat intressinsä, eli teokset sisältävät runsaan tiedon lisäksi myös mainontaa ja, jos ei nyt ihan lukijan linssiin viilausta, niin ehkäpä oman linssin kiillotusta kuitenkin.

Rakenteellisesti olen päätenyt opiskelemaan asiaa siinä järjestyksessä, missä valo etenee kohti valmista kuvaa. Ensin pitää ymmärtää valoa ja sen aaltoluonteeseen liittyviä ilmiöitä, seuraavaksi valo kohtaa linssin ja matkaa objektiivin läpi kohti kennoa tai filmiä. Tämä rakenne päättyi myös opinnäytetyöhöni ja koen sen olevan myös luontainen ja helposti edettävä tie. Olisin halunnut kirjoittaa paljon pidemmälle valon matkasta kohti kuvaa. Siitä, miten kuva muodostuu jne. mutta tästä olisi tullut liian pitkä kokonaisuus opinnäytetyöksi. Luulen kuitenkin tämän tiedon lukemisen auttavan kuvaajia ymmärtämään kuvanmuodostukseen liittyviä asioita paremmin.

Uskon myös, että kuvaajana voi aivan hyvin menestyä tietämättä sen suuremmin valon fysiikasta tai valon ja linssien yhteiselämästä. Luulen kuitenkin tiedon näistä avaavan silmiä näkemään tarkemmin objektiivien erityispiirteitä, niiden sormenjälkiä. Ajattelen myös ymmärryksen valosta ja optiikasta antavan kuvaustilanteessa ymmärrystä ratkaista mahdollisia ongelmia, kun törmäillään valon tai optiikan luonteesta aiheutuviin ilmiöihin.

2 Valo

2.1 Mitä valo on?

Näkökykymme perustuu valoon. Jotta näkisimme kohteen, sen täytyy heijastaa tai lähettää valoa.

Valo on fotoneista koostuvaa sähkömagneettista säteilyä, jolla on sekä hiukkas- että aaltoluonne. Valon ominaisuuksia ovat mm. amplitudi eli kirkkaus (kuva 6) ja väri, joka on riippuvainen valon aallonpituudesta. Ihminen näkee valosäteilyn, joka on aallonpituudeltaan n. 400–700 nm (Kuvat 4,5 ja 6). Näkyvän valon lyhyemmässä päässä on violetti valo ja pidemmässä päässä punainen valo. Violettia valoa lyhyempää säteilyä kutsutaan ultravioletiksi ja punaista valoa pidempiaaltoista säteilyä infrapunaiseksi. (Wikipedia 2009 [viitattu 23.6.2009])

Kameroiden ”näkökyky” ei rajoitu tarkalleen samoin kuin ihmisen näön. Ultraviolettisäteily ruskettaa ihmisen ihon ja infrapunasäteily tuntuu lämpönä. Vuoristoissa otetut kuvat taipuvat violetiksi ultraviolettisäteilyn takia, eli kamera ”näkee” violettia lyhyemmiltä aallonpituuksilta, kuin ihmissilmä. Infrapuna- ja ultraviolettisäteilyä on hyödynnetty kuvauksessa monin tavoin. Lämpökamerat, joilla voidaan etsiä eksyneitä patikoitsijoita tai rikollisia, perustuvat infrapuna- eli lämpösäteilyyn. Infrapuna- ja ultraviolettikuvausta käytetään hyödyksi vanhojen kirjoitusten ja taideteosten tutkimisessa sekä rikosten selvittämisessä. Valaisemalla kohteita infrapuna- tai ultraviolettisäteilyllä saadaan esille muutoin näkymätöntä kirjoitusta, Infrapuna- ja ultraviolettikuvauksesta on tullut oma kuvauksen alalaji. Infrapunakuvia voidaan ottaa tavallisella kameralla, asettamalla objektiivin eteen suodatin, joka estää muiden aallonpituuksien kuin infrapunan pääsyn objektiiviin. Ultraviolettikuvia saadaan vastaavasti suodattamalla kuvasta pois muut aallonpituudet kuin ultravioletti.



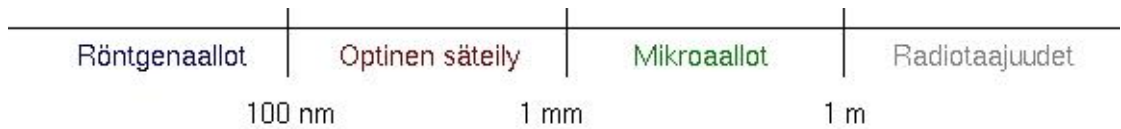
Kuva 1. Valokuva puusta.

Kuva 2. Sama puu kuvattuna siten, että vain infrapunasäteily pääsee kameraan.

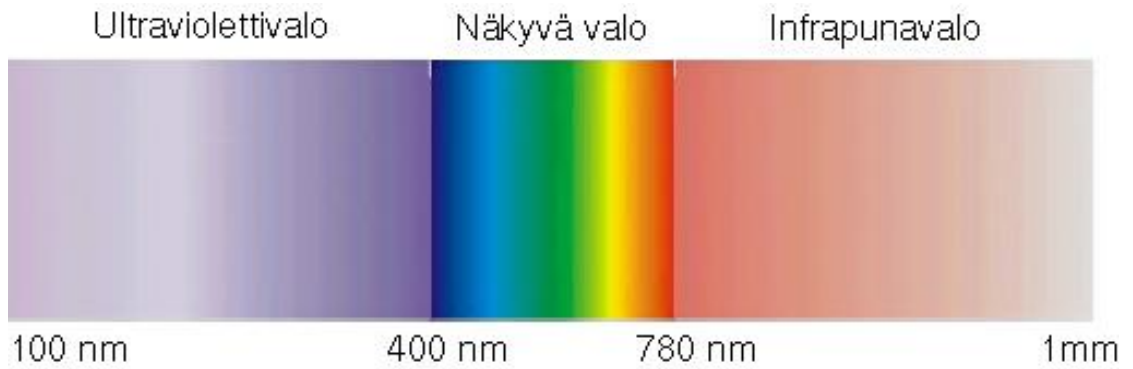


Kuva 3. Ultraviolettivalaisulla aikaansaatu kuva silmälle näkymättömästä, lasille jääneestä sormenjäljestä.

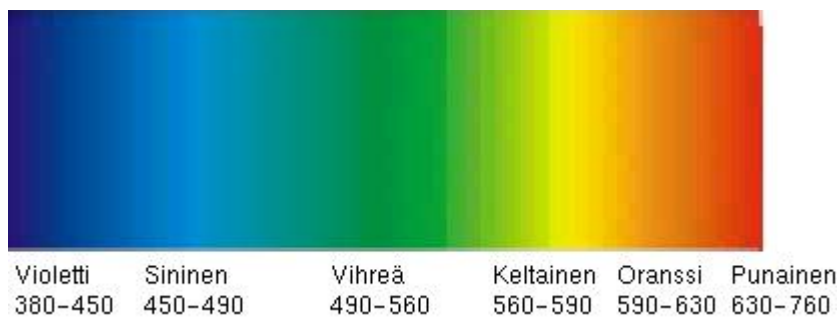
Valo voi sisältää useita eri aallonpituuksia. Auringosta tuleva valkoinen valo sisältää kaikkia aallonpituuksia. Tämän kaltaista valoa kutsutaan polykromaattiseksi valoksi. Valoa, joka koostuu vain kapeasta aaltoalueesta, kutsutaan monokromaattiseksi. Monokromaattista valoa saadaan aikaan mm. laserilla. (Tampereen teknillinen yliopisto 2005 [viitattu 23.6.2009])



Kuva 4. Sähkömagneettisen säteilyn eri lajit ja niiden pituudet.



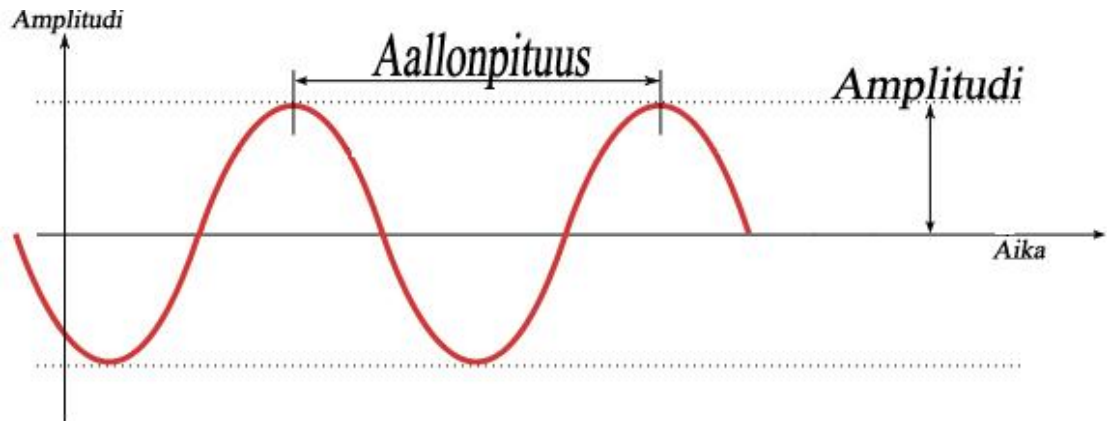
Kuva 5. Valosäteily ja sen aallonpituudet.



Kuva 6. Ihmissilmälle näkyvän valon aallonpituudet nanometreinä.

2.1.1 Amplitudi

Amplitudi eli värähdyslaajuus vaikuttaa valon kirkkauteen. Mitä suurempi värähdyslaajuus, sitä kirkkaampi valo (kuva 7). (Wikipedia 2009 [viitattu 23.6.2009]).



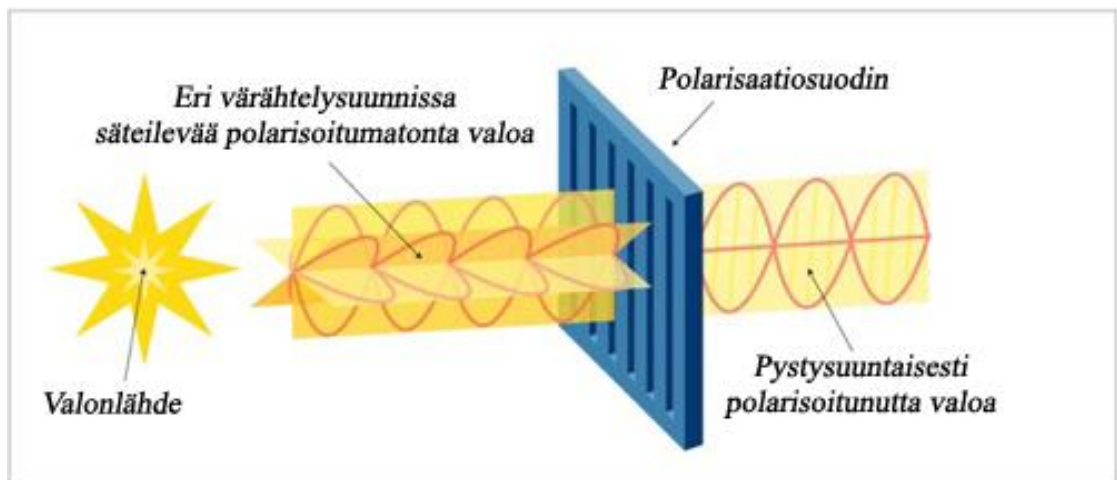
Kuva 7. Amplitudi on aallon korkeus keskitasosta huipulle (peak amplitude).

2.1.2 Aallonpituus

Valon aallonpituus on etäisyys aallon harjalta seuraavalle (kuva 7). Valon aallonpituus määrittää valon värin kuvan 6 esittämällä tavalla.

2.1.3 Polarisaatio eli värähtelykulma

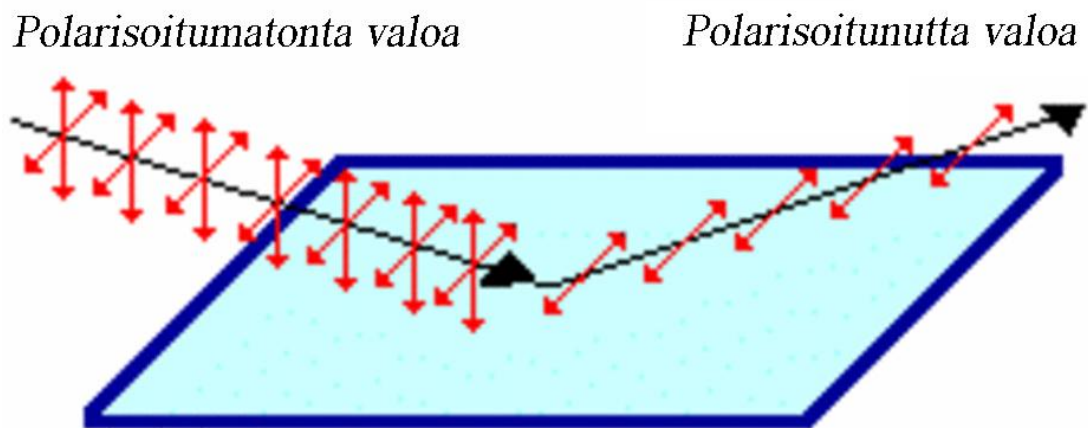
Valo voi värähdellä mihin suuntaan tahansa etenemisakseliinsa nähden, tällainen valo on epäpolarisoitunutta. Jos valoa polarisoidaan esim. polarisoivilla aurinkolaseilla tai lineaaripolarisaatio-suotimella, jää jäljelle vain yhdensuuntaisia aaltoja, tällainen valo on polarisoitunutta. (Wikipedia 2009 [viitattu 23.6.2009])



Kuva 8. Vain yhdensuuntaiset valoaallot pääsevät läpi polarisaatio-suotimesta.

Kuvauksessa polarisoinnista on hyötyä esimerkiksi heijastusten poistamisessa. Lumi, asfaltti, lasi ja moni muu materiaali heijastaa tietynsuuntaiset valo-aallot. Syntyneet heijastukset saadaan poistettua asettamalla kameran eteen lineaaripolarisaatio-suodin ja asettamalla se asentoon, jossa suodin estää pinnasta heijastuneiden valo-aaltojen pääsyn kameraan. (Rihloma 1997, 27)

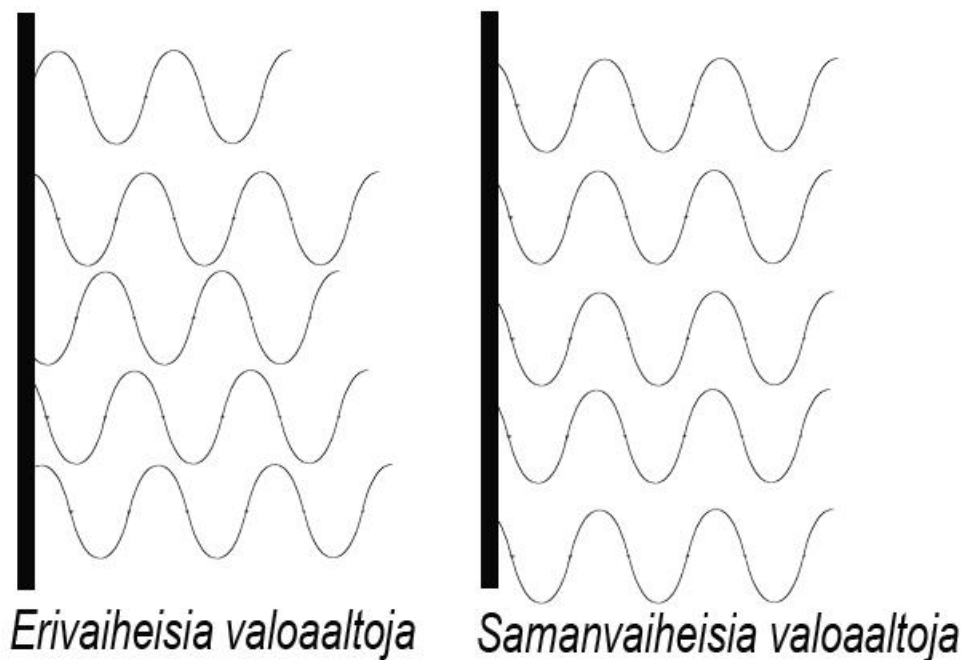
Metallipinnat polarisoivat valoa huonosti, joten niistä tuleviin heijastuksiin polarisaatio-suodinkin tehoaa huonosti. (Wikipedia 2009 [viitattu 24.6.2009])



Kuva 9. Valo polarisoituu heijastuessaan muista kuin metallipinnoista. Polarisoiutunut valo värähtelee samansuuntaisesti heijastavan pinnan kanssa. esim. tyynen järven pintaan syntyvä heijastus jää pois, kun kameran eteen asennetaan pystysuuntainen lineaaripolarisaatio-suodin

2.1.4 Valon vaiheisuus

Normaalisti valonlähteestä lähtevän valon aaltojen pohjat ja huiput osuvat eri kohtiin, ja valoa kutsutaan erivaiheiseksi. Valo on samanvaiheista, kun valo-aaltojen pohjat ja huiput osuvat samalle kohdalle. Laserista saatava valo on samanvaiheista ja monokromaattista. Tällaista valoa kutsutaan koherentiksi valoksi. (Wikipedia 2009 [viitattu 23.6.2009]).



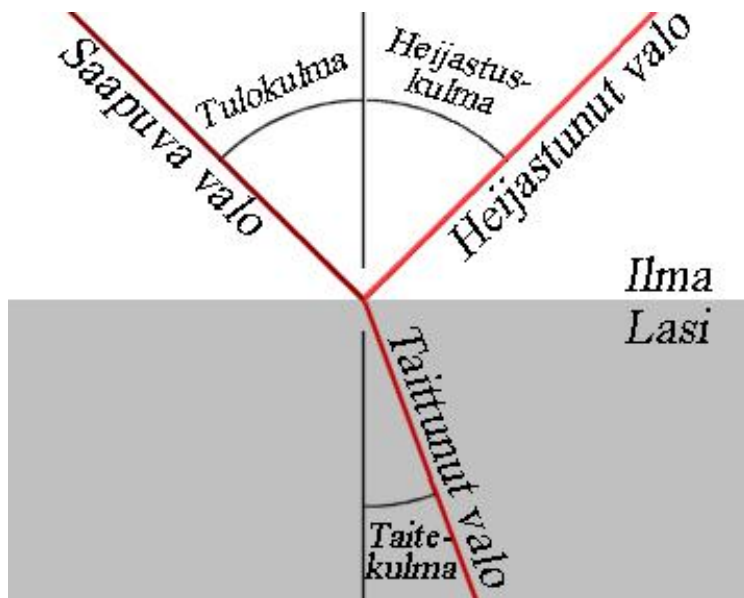
Kuva 10. Eri vaiheessa olevien valo-aaltojen huiput ovat eri kohdissa, kun samanvaiheisessa valossa ne ovat samassa kohtaa

2.2 Valoon liittyviä ilmiöitä

2.2.1 Valon taittuminen

Valo taittuu, kun se kulkee väliaineesta toiseen. Kaikilla aineilla on oma taitekertoimensa (index of refraction), joka kasvaa aineen ns. optisen tiheyden mukaan. Optinen tiheys on suoraan verrannollinen siihen, kuinka nopeasti valo etenee aineessa. Tyhjiössä valon nopeus on 300 000 km/s. Tyhjiön taitekerroin on aina 1, ilman taitekerroin on normaaliolosuhteissa 1,00029, lasin 1,5 ja timantin 2,417. Näin ollen esimerkiksi lasissa valon nopeus on $300\,000\text{ km/s} / 1,5 = 200\,000\text{ km/s}$. Kun valo kulkee eri optisen tiheyden omaavasta aineesta toiseen, sen nopeus muuttuu aineiden rajapinnassa ja valo taittuu suhteessa nopeuden muutokseen. Suurempi nopeuden muutos aiheuttaa suuremman taittumisen. Eli mitä suurempi taitekerroin, sitä enemmän valo taipuu. Taitekerroin vaikuttaa myös heijastumiseen. Kun valo kulkee esimerkiksi ilmasta lasiin, niin suurin osa valosta jatkaa matkaansa lasin läpi

mutta osa valosta heijastuu rajapinnasta. Mitä suurempi on aineiden taitekertoimien ero, sitä suurempi osa valosta heijastuu. (Wikipedia 2009 [viitattu 25.6.2009]), (Fu-Kwun Hwang 2004 [viitattu 25.6.2009]).

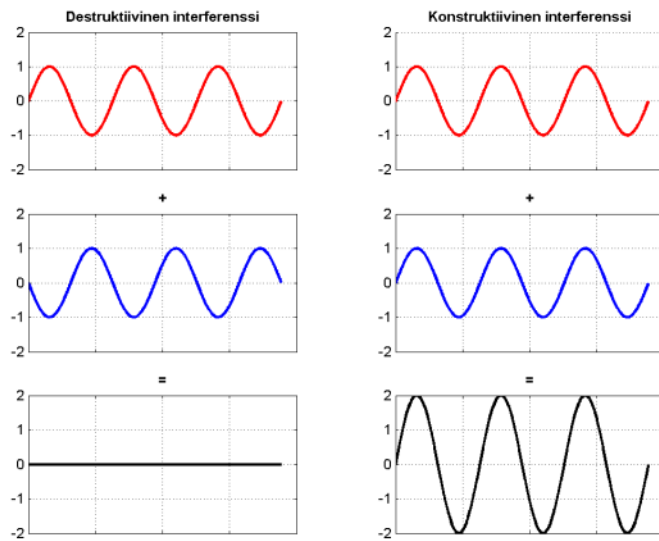


Kuva 11. Kun valo kohtaa ilman ja lasin rajapinnan, niin osa valosta jatkaa matkaansa taittuneena lasin läpi ja osa heijastuu takaisin.

Eri aallonpituudet taittuvat myös eri lailla. Näkyvästä valosta taittuu vähiten punainen valo, jolla on pisin aallonpituus, ja eniten lyhyimmän aallonpituuden omaava violetti valo (Wikipedia 2009 [viitattu 23.6.2009]). Tämän ilmiön johdosta voimme nähdä myös taivaalle piirtyvän sateenkaaren. Vesipisarot taittavat auringonvalon eri aaltoalueet eri tavoin muodostaen taivaalle spektrin punaisesta violettiin.

2.2.2 Interferenssi

Interferenssi-ilmiössä saman aallonpituuden omaavat valo-aallot voivat vaikuttaa toisiinsa vaimentaen (destruktiivinen interferenssi) tai vahvistaen (konstruktiivinen interferenssi) vaiheisuudestaan riippuen. Valoaallot summautuvat. Destruktiivinen interferenssi on maksimissaan, kun aallot ovat vastavaiheisia ja konstruktiivinen interferenssi, kun aallot ovat samanvaiheisia.



Kuva 12. destruktiivisessa interferenssissä vastavaiheiset valo-aallot eliminoivat toisensa ja konstruktivisessa interferenssissä samanvaiheiset valo-aallot summautuvat.

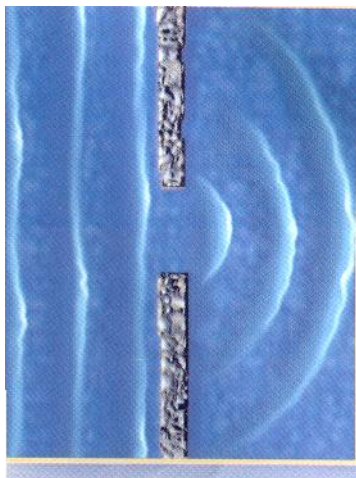
Ilmiönä interferenssin voi nähdä esimerkiksi öljyläikässä, saippuakuplassa tai hämähäkin verkossa. Kaikki nämä aineet ovat värittömiä tai yksivärisiä. Eri aallonpituuksia sisältävän valon osuessa niihin voi niissä kuitenkin nähdä mitä erilaisimpia värejä. Ilmiö johtuu siitä, että osa valosta heijastuu takaisin kalvon etu- ja osa takapinnalta. Takapinnasta heijastuneet säteet kulkevat pidemmän matkan ja siksi niiden ja etupinnasta heijastuneiden välillä tapahtuu vaihesiirto. Kalvon paksuudesta ja valon tulokulmasta riippuen eri aallonpituudet vahvistavat tai heikentävät toisiaan, joten eri värit näkyvät eri kohdissa ja värit vaihtuvat kun kuviota katselee eri kulmista. (Wikipedia 2009 [viitattu 17.7.2009] Linkoaho, Matti, Valjakka, Jukka 1982).



Kuva 13. Interferenssi aiheuttaa öljyläikän värit.

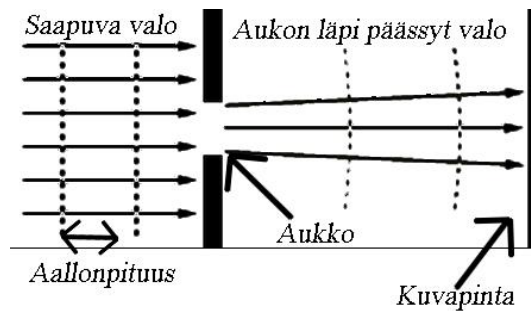
2.2.3 Diffraktio

Meren rannalla voi nähdä ilmiön, jossa suoraan kulkeva aaltorintama kohtaa esimerkiksi aallonmurtajien välissä olevan reiän. Aaltorintama ei jatkakaan kulkuaan suorassa rintamassa kohti rantaa, vaan reiästä kuljettuaan aaltorintama kaareutuu. Tätä ilmiötä kutsutaan diffraktioksi. Ilmiö on yhteinen kaikelle aaltoliikkeelle, niin meren aalloille, äänelle kuin valollekin. (Fischer 2008, 41)

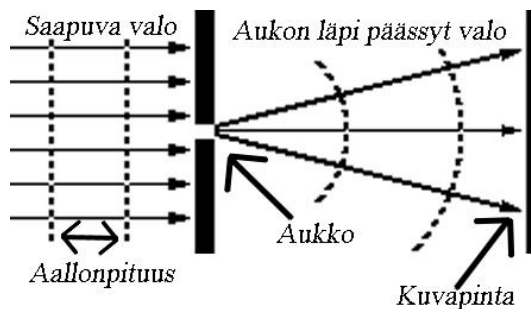


Kuva 14. Meren aallot kaartuvat kulkiessaan aallonmurtajassa olevan aukon läpi. Aaltojen harjat piirtyvät vaaleampina viivoina, joten aallonpituuden pystyy näkemään.

Kuvassa 14 aallonmurtajassa oleva rako on kutakuinkin yhtä suuri, kuin aallonpituus. Kun reiän koko on pienempi kuin aallonpituus, taipuvat aallot kaariksi. Reiän ollessa suurempi kuin aallonpituus, vähenee diffraktio mutta aaltorintama taipuu kuitenkin reunoilta.

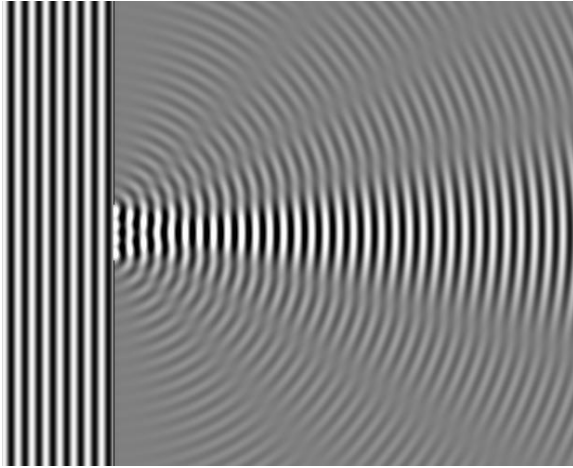


Kuva 15. Kulkiessaan suhteellisen suuresta aukosta, valo taittuu vain vähän.

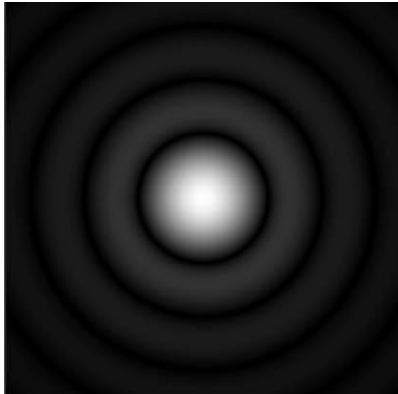


Kuva 16. Reiän pienentyessä diffraktio suurenee ja valo taittuu voimakkaammin.

Diffraktiosta johtuen ei mikään valopiste voi muodostaa täydellistä pistettä, kuljettuaan aukon läpi. Tuloksena on ns. Airyn kiekko, keskustastaan kirkkaampi, reunoja kohti himmenevä ja sitten yhä himmeämmistä kehistä muodostunut kuvio. Kuvista 15 ja 16 huomaamme, että Airyn kiekon koko on riippuvainen valon läpäisemän reiän koosta. Kamerassa siis pienempi aukko suurentaa Airyn kiekon kokoa. Airyn kiekon muoto on kuva aukosta, jonka läpi valo on kulkenut. Kulkiessaan kameran pyöreän suljimen läpi Airyn kiekko on ympyrä. (Fischer 2008, 42)



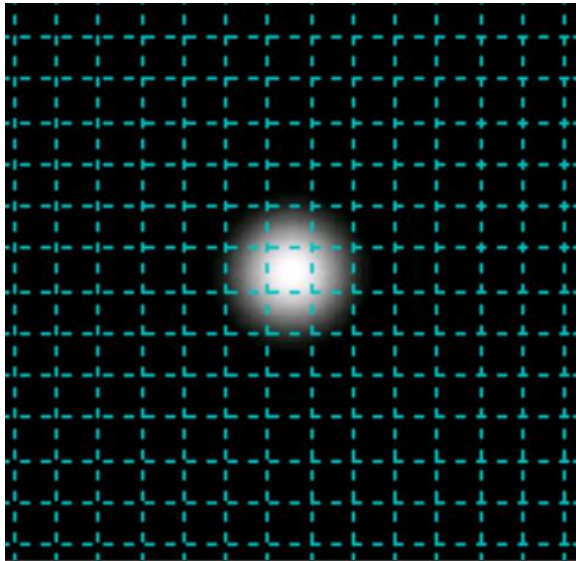
Kuva 17. Havainnekuva siitä, miten valo käyttäytyy kulkiessaan neljä kertaa aallon pituuden levyisestä raosta.



Kuva 18. Airyn kiekko. Tietokoneella laskennallisesti tuotettu malli.

Airy'n kiekon kehät johtuvat interferenssistä. Koska taittuneet valonsäteet matkaavat kuvapinnalle pidemmän matkan kuin suoraan kulkevat, alkavat valoallot vuoroin vahvistamaan ja vuoroin heikentämään toisiaan ja syntyy vaaleiden ja tummien renkaiden kehä. Airyn kiekon keskusympyrään kohdistuu n. 84 %:a pisteen valosta, joten kehät lähinnä vain huonontavat kontrastia. Jos esim. musta ja valkoinen piste ovat vierekkäin kuvassa, niin valkoisen pisteen leviäminen mustan päälle muuttaa mustaa harmaaksi, jolloin kontrasti huononee. (Wikipedia, 2009. Viitattu 7.1.2009. diglloyd Inc, 2009. Viitattu 7.11.2009)

Diffrakatio asettaa rajan optiselle järjestelmälle sillä mikään objektiivi ei voi piirtää Airyn kiekkoa pienempää pistettä. Useat nykyiset kamerat rakennetaan siten, että Airyn kiekon koko ylittää pikselien koon jo keskiaukoilla, jolloin kuvan terävyys alkaa kärsiä. Kameran todellinen erotuskyky ei siis vastaa lähellekään luvattua pikselimäärään perustuvaa erotuskykyä. (diglloyd Inc, 2009. Viitattu 7.11.2009. cambridgeincolour 2009. Viitattu 7.11.2009)



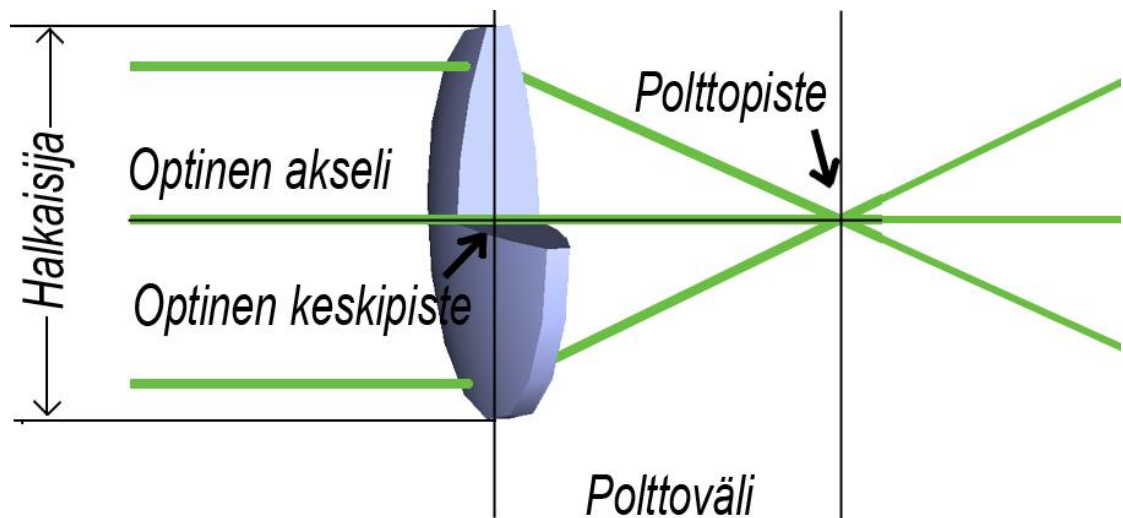
Kuva 19. Havainnekuva Canonin Powershot g6 kameran kennosta ja airyn kiekon koosta aukolla f 8, joka on kyseisen kameran pienin aukko. Yksi ruutu vastaa kennon yhtä pikseliä. Pieninkin valopiste leviää useamman pikselin alueelle, jolloin kameran resoluutio on ehkä 1/4, tai jopa huonompi, luvattusta 7,1 megapikselistä. Yhden pikselin koko g6:ssa on 2,34 μm

3 Linssillä lisää valoa ja ongelmia

3.1 Linssiin liittyviä ominaisuuksia

3.1.1 Polttoväli

Polttoväli on se etäisyys linssin keskeltä, jossa linssin läpi kulkeneet optisen akselin suuntaiset valonsäteet kerääntyvät yhdeksi pisteeksi.



Kuva 20. Linssin ominaisuudet

3.1.2 Halkaisija

Halkaisija on linssin koko reunasta reunaan. Mitä isompi halkaisija linssillä on, sitä suuremmalta alueelta linssi kykenee keräämään valoa.

3.1.3 Valoteho

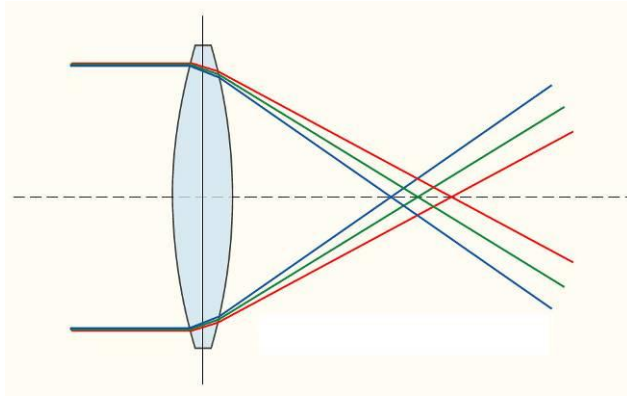
Valoteho eli f -arvo on linssin polttoväli jaettuna linssin halkaisijalla (suurin aukko).
100 mm:n objektiivi, jonka f -arvo on 2.0, tarvitsee halkaisijaltaan 50 mm:n etulinssin ($100 \text{ mm} / 50 \text{ mm} = 2$). Mitä pidempi polttovälinen objektiivi, sitä suurempi linssi tarvitaan, jotta saadaan aikaiseksi sama valoteho.

3.2 Aberraatiot ja heijastuminen tuo ongelmia kuvanmuodostuksen kannalta.

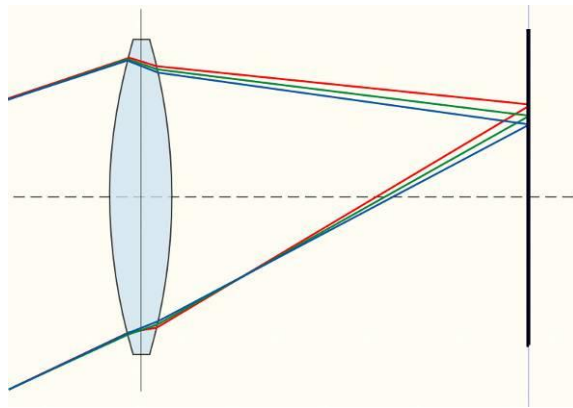
Täydellinen objektiivinen olisi sellainen, joka 1) piirtäisi missä tahansa kuva-alalla, samalla etäisyydellä objektiivista olevan pisteen, pisteensä kuvapinnalle 2) piirtäisi kuvassa olevat suorat viivat suorina kuvapinnalle ja 3) pitäisi kuva-alalta tulevat värit muuttumattomina (Canon Inc. 2006 s.198, Fischer 2008. s. 38) . Kuten jo aikaisemmin huomasimme, niin viimeistään diffraktio asettaa rajat sille, miten tarkaksi optinen järjestelmä voidaan rakentaa. Diffraktion lisäksi on kuitenkin myös monta muuta aberraatioiksi, eli virheiksi tai vääristymiksi, kutsuttua ilmiötä, jotka haittaavat kuvan muodostamista. Lisäksi heijastuminen muodostuu ongelmaksi optisissa järjestelmissä.

3.2.1 Väripoikkeama I. kromaattinen poikkeama (Chromatic aberration)

Kuten jo aiemmin taittumisen yhteydessä tuli mainituksi, eri aallonpituudet taittuvat eri lailla kohdatessaan optisesti eri tiheyksisen aineen. Kun valkoinen valo kohtaa kahden eri optisen tiheyden omaavan aineen rajapinnan, muussa kuin suorassa kulmassa, hajoaa se sateenkaaren väreihin sinisen valon taittuessa eniten ja punaisen vähiten. Mitä jyrkemmässä kulmassa valo osuu linssiin, sitä enemmän eri aaltoalueet hajoavat. Väripoikkeamaa on kahta eri tyyppiä. Pitkittäinen väripoikkeama (axial chromatic aberration tai axial color) ja sivuttainen väripoikkeama (lateral chromatic aberration tai lateral color). Pitkittäisessä väripoikkeamassa eri värit fokuusoituvat optisen akselin suuntaisesti eri etäisyydelle linssistä. Tuloksena on värikehä tai – kehät pisteen ympärillä. Sivuttaisessa väripoikkeamassa eri värit tarkentuvat oikealle etäisyydelle mutta eri korkeudelle optisesta akselista. Tuloksena on värillisiä haamukuvia kohteen reunassa. Väripoikkeama korostuu kuvan reuna-alueilla, koska kuvan reunoilta tuleva valo poikkeaa optisesta akselista. Sivuttainen väripoikkeama on usein vaikeimmin korjattava poikkeama laajakulmaisissa objektiivissa (Hawkins & Avon 1979, 15,16. Fisher 2008 s. 89-91)



Kuva 21. Pitkittäisessä väripikkeamassa eri aallon pituudet tarkentuvat eri etäisyydelle.

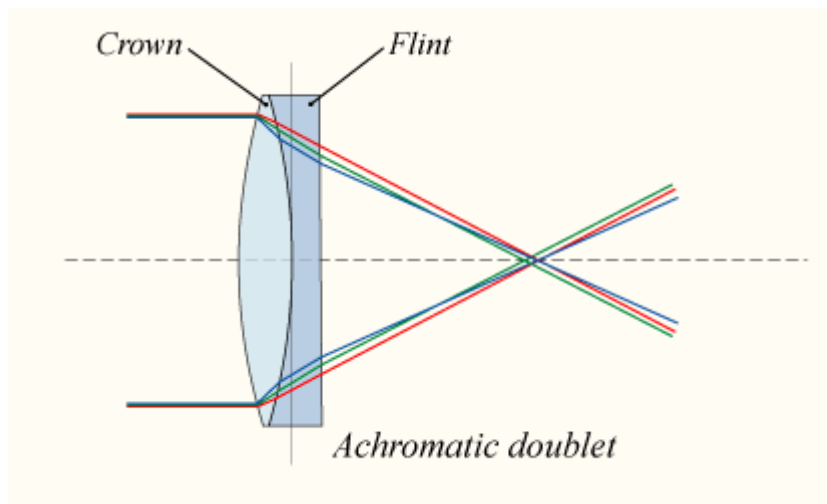


Kuva 22. Lateraalisisessä värivirheessä eri värit osuvat eri kohtaan kuvapintaa.

3.2.1.1 Miten väripikkeama korjataan.

Väripikkeamaa voidaan korjata käyttämällä ns. akromaattista (achromatic) linssiparia. Akromaattinen pari koostuu kahdesta toisiinsa sementöidystä linssistä, joilla on erilainen hajonta-arvo. Kun linssit ovat kiinni toisissaan siten, ettei väliin jää ilmaa. Syntyy kahden eri taitekertoimen omaavan lasin rajapinta. Akromaattisessa parissa on tyypillisesti kupera (positiivinen) ja kovera (negatiivinen) linssi. Kovera linssi (flint) on tehty aineesta, jolla on suuri hajonta-arvo. Kupera linssi (crown), omaa pienemmän hajonta-arvon ja sen optinen teho on ensimmäistä linssiä pienempi, jotta parin yhteinen teho on positiivinen. Akromaattisen parin avulla saadaan valon kaksi aaltoaluetta, sininen ja punainen, fokusoitua samaan pisteeseen kuvapinnalla. Kuvasta ei tule täydellistä mutta huomattava parannus saadaan aikaiseksi.

Akromaattinen pari keksittiin jo 1700-luvulla. Koveran linssin aineena käytettiin aiemmin lyijylasia, joka on jo nykyisin onneksi poistunut käytöstä. Lyijylasi sisälsi 4-60 % lyijyä ja sen valmistus ja hävittäminen oli hyvin saastuttavaa. Nykyisin lyijy on korvattu esim. titaani- tai zirkoniumoksidilla. (Fisher 2008 s. 89 Canon 2009 [viitattu 15.8.2009]).

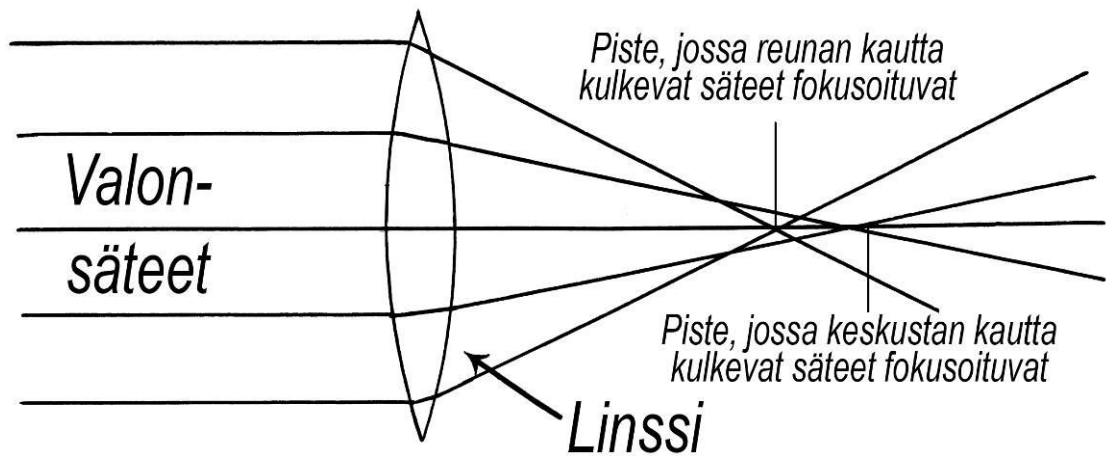


Kuva 23. Akromaattinen pari taivuttaa sinisen ja punaisen aaltoalueen yhteen.

Tehokkaampi tapa korjata väripoikkeamaa on ns. apokromaattinen pari, jolla saadaan kolme aallon pituutta tarkennettua samaan pisteeseen. Apokromaattinen pari on samanlainen kuin akromaattinenkin pari, mutta päälinssin (crown) aineena on fluoriittilasi ja linssien välissä saattaa olla neste. Apokromaattinen pari on herkkä lämpötilan muutoksille, joka aiheuttaa ongelmia niiden käytössä

Seuraava askel väripoikkeaman korjauksessa on superakromaattinen pari. Siinä saadaan koottua neljä eri aallon pituutta samaan pisteeseen. Superakromaattinen linssi on saatu aikaan linssien materiaaleja kehittämällä. Nykyisistä objektiivivalmistajista ainakin Zeiss valmistaa superakromaattisia objektiiveja. (Wildi 2004, 220) (Carl Zeiss AG 2009 [viitattu 25.9.2009]).

3.2.2 Pallopoikkeama (Spherical aberration)

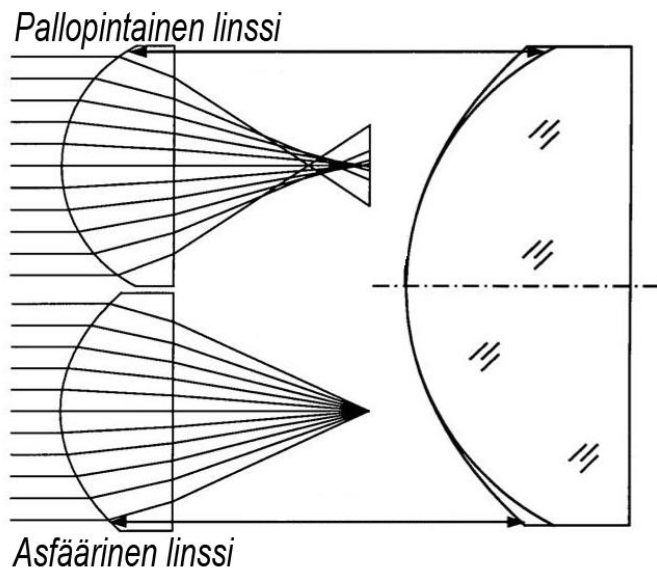


Kuva 24. Pallopoikkeamassa säteet, jotka kulkevat pallonmuotoisen linssin reunojen kautta, fokuoitetuvat lähemmäksi linssiä, kuin keskustan kautta kulkevat. Etäisyyttä näiden kahden fokuointipisteen välillä kutsutaan pituussuuntaiseksi pallopoikkeamaksi (longitudinal spherical aberration). Kuva-alalla oleva piste ei muodosta kuvapinnalle pistettä vaan epäterävän pallon. Tämän pallon halkaisijaa kutsutaan lateraaliseksi pallopoikkeamaksi (lateral spherical aberration).

Pallopintainen linssi ei ole täydellinen ratkaisu valopisteen fokuoimiseksi yhteen pisteeseen. Pallopintaiset linssit ovat kuitenkin laajasti käytettyjä niiden valmistamisen halpuuden vuoksi (Fisher 2008. s.59). Linssin reunojen kautta kulkevat valon säteet eivät piirry samaan kohtaan, kuin linssin keskialueen läpi kulkevat, tätä kutsutaan pallopoikkeamaksi. Linssin kokoa isonnettaessa poikkeama lisääntyy runsaasti, sillä virhe on suoraan verrannollinen valonsäteen ja optisen akselin etäisyyden neliöön. Ongelma on siten suurempi isolinssisillä eli suuren valovoiman omaavilla linseillä. Vääristymä on pienempi pienellä aukolla, koska pienen aukon käyttö poistaa juuri reuna-alueilta tulevat valonsäteet. Virhe on myös riippuvainen kohteen etäisyydestä, sillä mitä lähempänä linssiä kohde on, sitä jyrkemmässä kulmassa siitä lähtevät säteet kohtaavat linssin reunan ja taipuvat linssin takapuolella yhä vain lähemmäksi linssiä. (Fisher 2008. s.61, Canon Inc. 2006 s.198)

3.2.2.1 Pallopoikkeaman korjaaminen

Pallopoikkeama johtuu pallomuotoisen linssin kyvyttömyydestä fokusoida reunan kautta kulkevat valonsäteet samaan pisteeseen, kuin keskustan kautta kulkevat. Pallopoikkeama on siten mahdollista korjata linssin muodolla. Jos linssin muodoksi valitaan ns. asfäärinen (aspherical) linssi, niin saadaan pallopoikkeama eliminoidua. Asfäärisen linssin pinta loivenee reunoja kohti, joten reunojen kautta kulkevat säteet kohtaavat linssin pinnan pienemmässä kulmassa kuin pallopintaissa linssissä ja taittuvat siksi vähemmän.

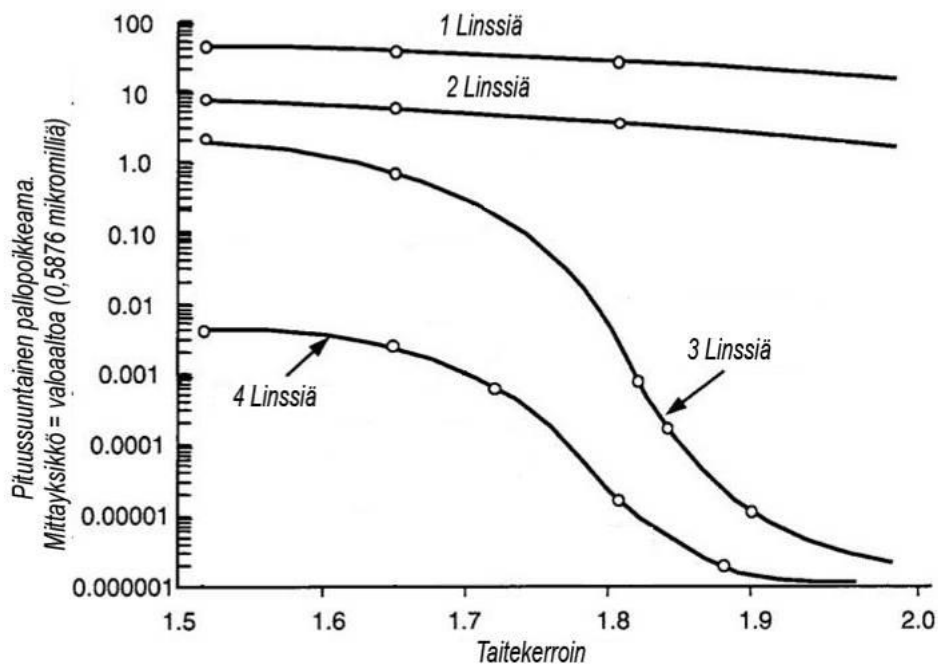


Kuva 25. Asfäärinen linssi loivenee reunojaan kohti verrattuna pallopintaiseen linssiin. Tällöin reunan kautta kulkevat säteet fokusoiduvat samaan pisteeseen keskustan kautta kulkevien kanssa. Kuvan oikeassa reunassa on molempien linssien poikkileikkaus

Asfäärinen linssi on tehokkain tapa poistaa pallopoikkeamaa. Sen käyttöä on kuitenkin rajoittanut niiden valmistamisen hintavuus. Linssien valmistustekniikoiden kehittyessä on asfäärisiä linsejä ilmestynyt runsaasti eri valmistajien objektiivivalikoimiin. (Canon Inc. 2006 s.199).

Optiikassa, jossa käytetään pallopintaista linssiä, täytyy ensiksi optimoida linssin muoto. Tämä tehdään siten, että linssin molempia pintoja muotoillaan, säilyttäen

linssin optinen teho (optical power) ja polttoväli, kunnes löydetään muoto, joka tuottaa pienimmän pallopoikkeaman. Kun linssin optimi muoto on löydetty, voidaan linssin optinen teho jakaa useampaan linssiin, jolloin linssien pallopinnan säteestä tulee loivempi. Kun valonsäteet kohtaavat linssin pinnan loivemmassa kulmassa, vähenee pallopoikkeama. Myös linssin materiaalivalinnalla, linssin taitekertoimella, on iso merkitys pallopoikkeaman korjaamisessa.

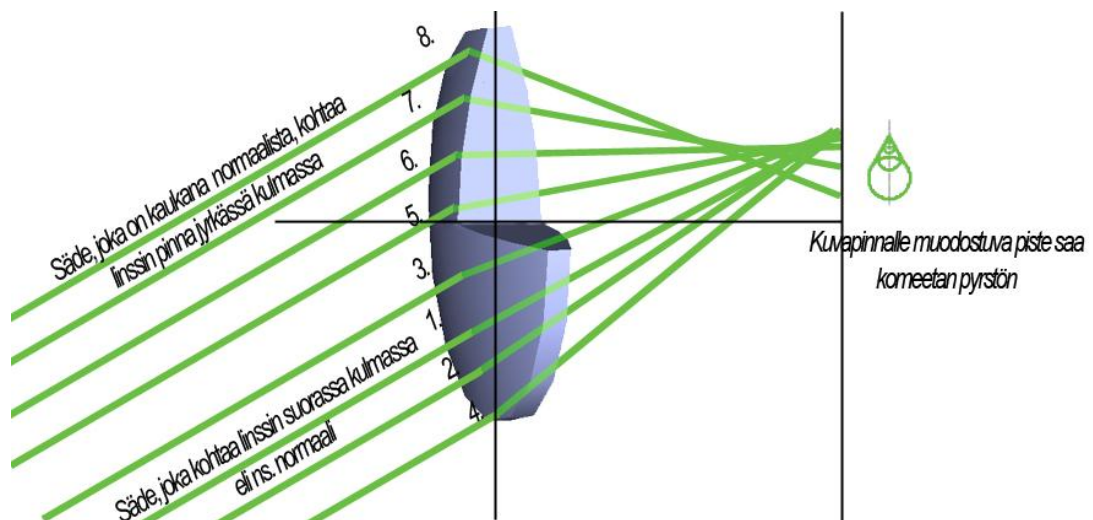


Kuva 26 Pystyakselilta on luettavissa pallopoikkeaman suuruus ja vaakakselilta linssin taitekerroin. Käyrät kuvaavat optiikan pallopoikkeamaa, kun optinen teho jaetaan 1,2,3 tai 4:än linssiin. 3 linssiä ja oikea taitekerroin pudottaa poikkeaman jo varsin pieneksi

3.2.3 Koma (Coma)

Optinen järjestelmä on suhteellisen helppo saada toimimaan, jos sitä mitataan vain optisen akselin kanssa samansuuntaisilla säteillä. Valo- ja elokuvauksessa käytettävän optiikan tulee kuitenkin selvittää koko kuva-alalta tulevasta valosta. Kuvien reunoissakin olevien pisteiden täytyisi muodostaa kuvapinnalle piste. Mitä laajakulmaisempi optiikka on käytössä, sitä suuremmissa kulmissa valonsäteet linssin

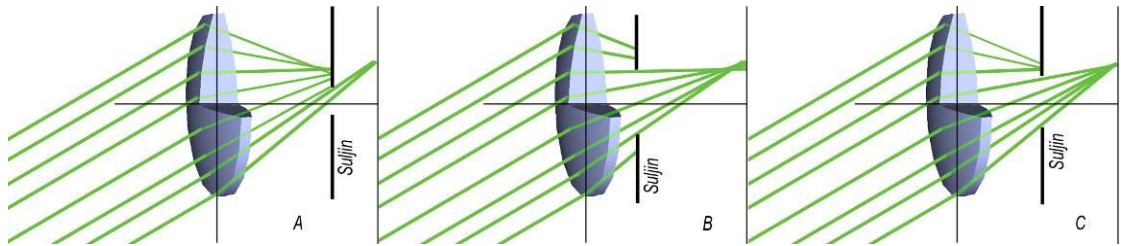
pinnan kohtaavat. Sädettä, joka kohtaa linssin pinnan suorassa kulmassa, kutsutaan normaaliksi. Kun valo tulee kuva-alan reunalta, on normaali lähellä linssin reunaa. Silloin säteet, jotka osuvat linssin vastakkaiseen reunaan osuvat siihen jyrkässä kulmassa ja taipuvat liian voimakkaasti synnyttäen koman tunnetun poikkeaman. Koma aiheuttaa ilmiön jossa piste ei piirry terävänä, vaan saa itselleen komeetan kaltaisen hännän, josta ilmiö on saanut nimensä. (Fisher 2008. s. 72-73 Canon Inc.2006 s. 199)



Kuva 27. Komalle tyypillinen epäsymmetrinen valojakauma. Säde 1 kohtaa linssin pinnan kohtisuoraan. Säteet 2 ja 3 sekä 4 ja 5 ovat symmetrisiä toistensa suhteen mutta säteillä 6, 7 ja 8 ei ole symmetrisiä pareja. Kuvassa on huomioitu valon taittuminen vain linssin etupinnasta.

3.2.3.1 Koman korjaaminen

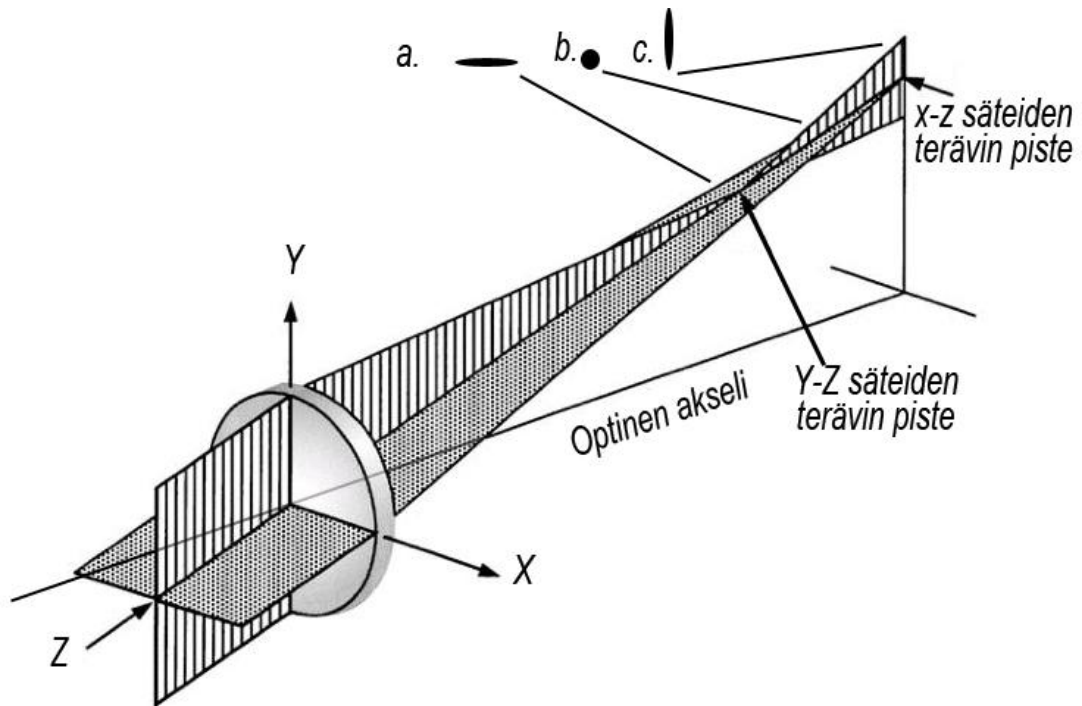
Tärkein apu koman korjaamiseen on suljimen oikea sijoittaminen. Mitä lähempänä linssiä suljin sijaitsee, sitä epäsymmetrisempi sädekimppu pääsee aukosta läpi. Koman kannalta optimaalisessa kohdassa suljin päästää lävitseen symmetrisen sädekimppun myös kuvanalan reunalta. Jos suljin sijoitetaan liian kauaksi linssistä, kuvan reunat vinjetoituvat, koska läpi pääsevän valon määrä kuvan reunoilta vähenee. Koma on riippuvainen aukon koosta, koska juuri reunan kautta kulkevat valosäteet aiheuttavat suurimman koman. (Fisher 2008. s. 73-75 Canon Inc.2006 s. 199)



Kuva 28. Tapauksessa A suljin on sijoitettu liian kauaksi linssistä. Komasta selvittäään, mutta ratkaisu aiheuttaa vinjetointia. Kuva-alan reunoilta tulevasta valosta pääsee kuvapinnalle vähemmän, kuin keskeltä tulevasta valosta. Tapauksessa B suljin on liian lähellä linssiä. Kuvapinnalle pääsee epäsymmetrinen valosädekimppu, eikä komasta päästä kokonaan eroon. Tapauksessa C Suljin on sijoitettu oikein ja kuvapinnalle pääsee symmetrinen valosädekimppu. Koma on minimissään.

3.2.4 Astigmaattisuus (Astigmatism)

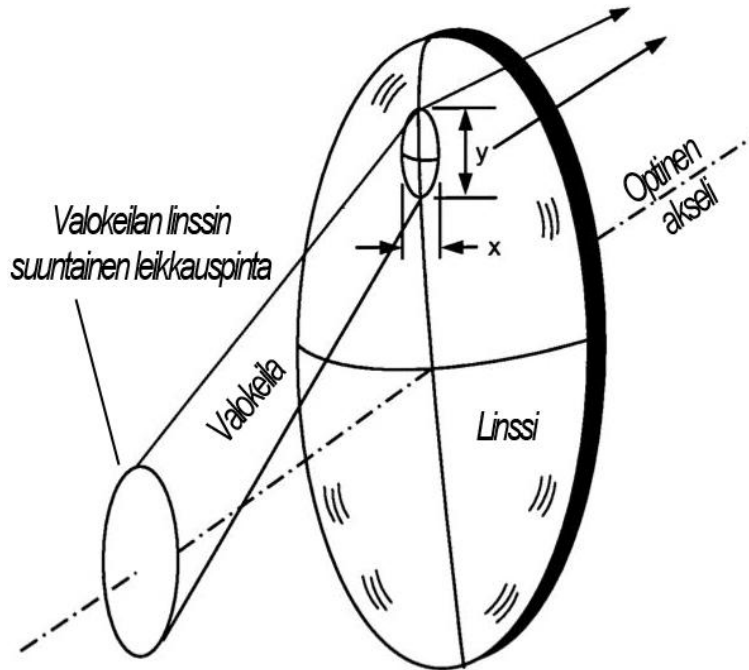
Astigmaattisuus on ilmiö, jossa optisen akselin ulkopuolelta tulevat vaaka- ja pystysuorat sädekimput fokuoituvat eri kohtiin (katso kuva 29). Astigmaattinen optiikka ei piirrä kuva-alalla olevaa pistettä pisteinä kuvapinnalle vaikka kuvapintaa siirrettäisiin lähemmäksi tai kauemmaksi linssistä. Kuvapintaa siirrettäessä kohtaan, jossa pysty akselin suuntaiset säteet fokuoituvat, piirtyy kuvapinnalle horisontin suuntainen soikio tai viiva. Siirrettäessä kuvapintaa taaksepäin vaaka- ja pystysuuntaisten säteiden terävyyspisteiden puoliväliin, piirtyy piste epäterävänä ympyränä. Vaakasuuntaisten säteiden terävyyspisteessä on tuloksena pystysuuntainen soikio tai viiva. (Fisher 2008. s. 75, 76)



Kuva 29. Optisen akselin ulkopuolella olevasta pisteestä lähtevien pystysuuntaisten säteiden kimppu fokuoituu lähempänä linssiä, kuin vaakasuuntaisten säteiden kimppu. a. on kuvio, joka syntyy kuva-alalla olevasta pisteestä, pystysuuntaisten säteiden fokuoitumispisteessä. c. on kuvio vaakasuuntaisten säteiden fokuoitumispisteessä ja b. näiden puolivälistä.

Astigmaattisuus syntyy, kun optisen akselin ulkopuolelta tuleva valokartio kohtaa pallopintaisen linssin. Jos valokartioon tehdään linssin suuntainen leikkauspinta, on se soikio, eikä pyöreä, kuten olisi tilanne optisen akselin suunnasta tulevalla valokartiolla. Samoin kuin komassakin, säteet, jotka kohtaavat linssin lähempänä vastakkaisista reunaan, taipuvat enemmän. Kuvassa 29. y-akselin säteet taipuvat lähemmäksi linssiä, kuin x-akselin säteet. Y-akselin säteet, jotka ovat lähimpänä linssin reunaan, taipuvat siis eniten ja kohtaavat ne säteet, jota ovat tulleet y-akselilta lähimpää linssin keskustaa, aiemmin, kuin x-akselin säteet toisensa. Mitä kauempaa optisesta-akselista säteet tulevat, sitä vinommaksi valokartio muodostuu linssin suhteen ja astigmaattisuus lisääntyy, joten laajakulmainen linssi tuottaa suuremman astigmaattisuuden kuin pitkäpolttovälinen. Koska astigmaattisuus on voimakkaampaa

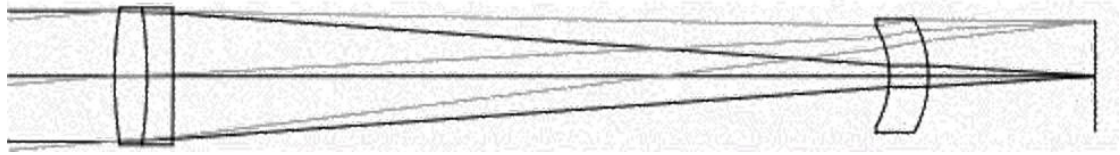
kuva-alan reunoilta, niin se on riippuvainen myös aukon koosta. Pienempi aukko jättää pois juuri reunoilta tulevia säteitä. (Fisher 2008, s. 76, 78).



Kuva 30. Kuva-alan reunalla olevasta pisteestä tuleva valo muodostaa linssin suuntaisessa poikkileikkauksessa ympyrän sijasta soikion. Reunaa lähimpänä oleva säde taipuu eniten.

3.2.4.1 astigmaattisuuden korjaaminen.

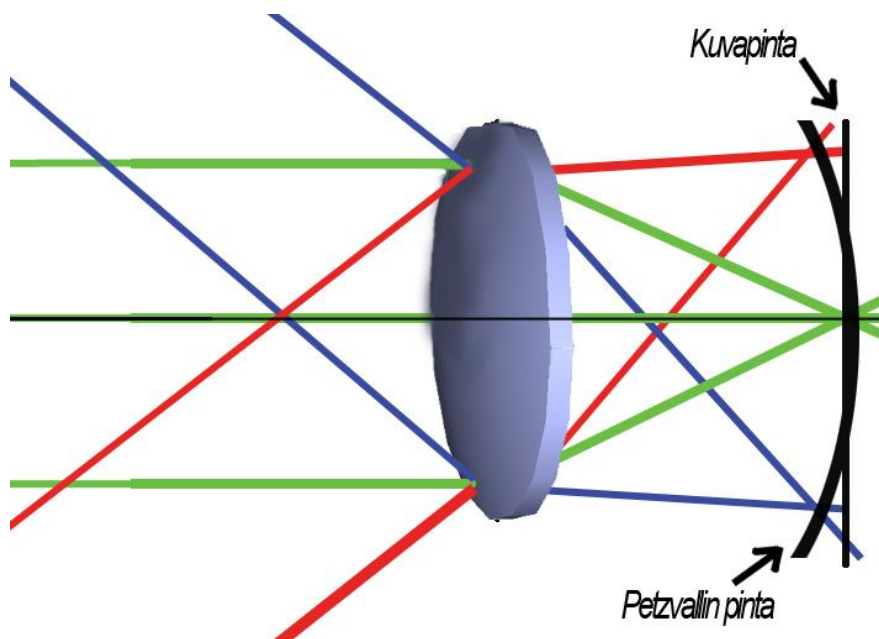
Koska astigmaattisuus johtuu pallopintaisen linssin muodosta, niin asfäärinen linssi korjaa astigmaattisuutta. Myös aukon sijoittelulla on merkitystä, saman logiikan mukaisesti, kuin koman korjaamisessa (katso kuva 28). Tehokas tapa astigmaattisuuden poistamiseen optisesta järjestelmästä on asettaa lievästi kovera linssi niin lähelle kuvapintaa kuin mahdollista. Takalinssi tuottaa astigmaattisuutta toiseen suuntaan, kuin etulinssi, joten ne kompensoivat toistensa virheen ja tuloksena astigmaattisuus poistuu lähes kokonaan. (Fisher 2008 s.76-77).



Kuva 31. Astigmaattisuus korjataan lähelle kuvapintaa asetettavalla linssillä. Vaaleilla viivoilla kuvatut säteet tulevat kuva-alan reunalla olevasta pisteestä ja fokusoituvat nyt yhteen pisteeseen.

3.2.5 Kuvatason kaareutuminen (Curvature of field)

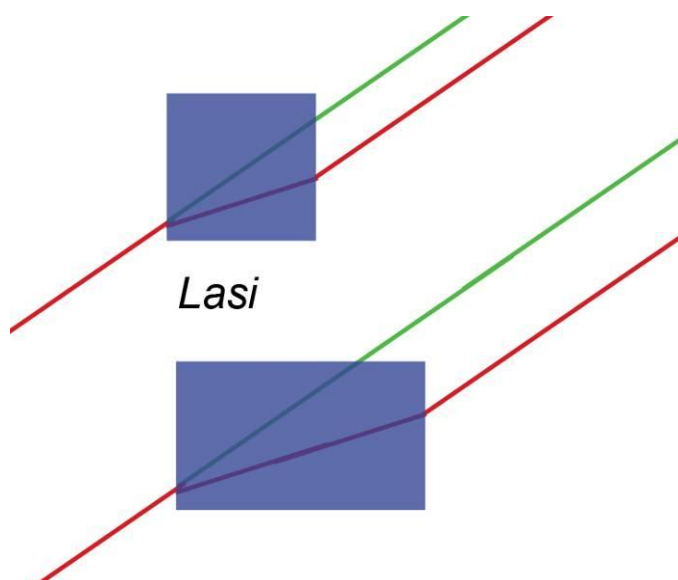
Kun astigmaattisuus jätetään huomioimatta, fokusoituvat pallopintaisen linssin kautta kulkevat säteet kaarevalle pinnalle. Tätä pintaa kutsutaan Petzvallin tasoksi (Petzval surface). Ilmiötä kutsutaan kuvatason kaareutumiseksi. Filmi tai digitaalinen kenno ovat suorapintaisia ja Petzvallin tasolle fokusoituva kuva on kuvan keskelle fokusoitaessa reunoiltaan epäterävä ja reunoille fokusoitaessa keskusta jää epäteräväksi. (Fisher 2008 s.79)



Kuva 32. Pallopintainen linssi fokusoi eri puolilta kuva-alaa tulevat säteet kaarevalle pinnalle. Punaiset ja siniset viivat kuvaavat säteitä, jotka tulevat kuva-alan reunalla olevista pisteistä. Vihreällä kuvatut säteet tulevat kuva-alan keskustasta. Jotta kuva olisi kauttaaltaan terävä, tulisi kaikkien säteiden fokusoitua kuvapinnalle.

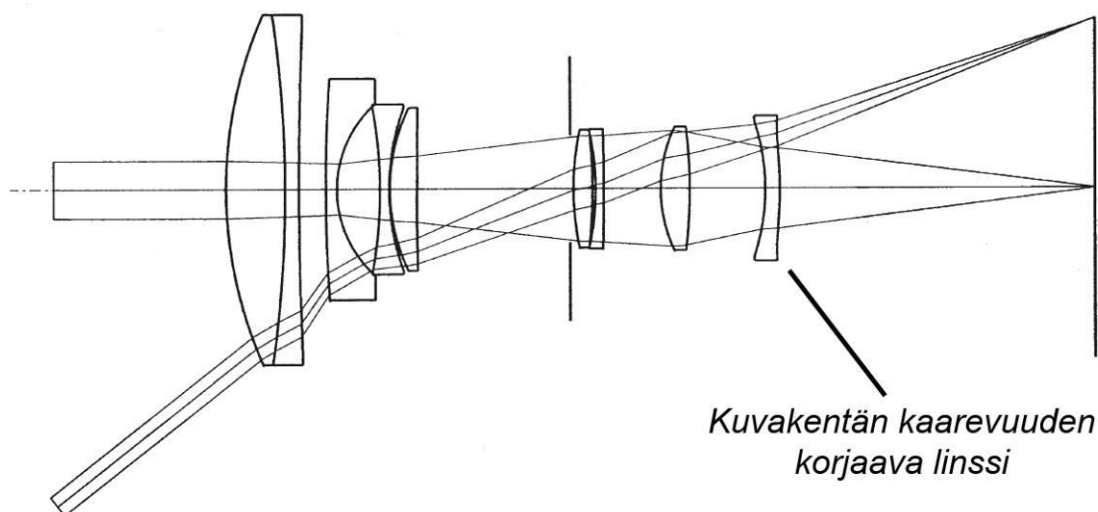
3.2.5.1 Kuvatason kaareutumisen korjaaminen

Kuvatason kaareutumisen eliminoidaan negatiivisella linssillä. Linssi, joka on reunoiltaan paksumpi, siirtää fokusointipistettä sitä kauemmaksi, mitä paksumman kohdan läpi valo kulkee. Kuvassa 33 on esimerkki, miten paksumpi lasi siirtää valonsädettä enemmän. Kuvassa 34 Korjaavan linssin reunan kautta kulkevat säteet kulkevat pidemmän matkan lasin sisällä, kuin keskeltä kulkevat. Reunojen fokuksipiste siirtyy kauemmaksi. (Fisher 2008. s.80)



Kuva 33. Lasin paksuus vaikuttaa valonsiirtymän määrään. Kuvassa valo kulkee kahden eri paksuisen lasin läpi. Punainen viiva kuvaa valon kulkua ja vihreä kuvaa miten valo kulkisi ilman välissä olevaa lasia. Vihreiden ja punaisten viivojen erosta lasien oikealla puolella näkyy, että paksumman lasin läpi kulkenut valo on siirtynyt enemmän.

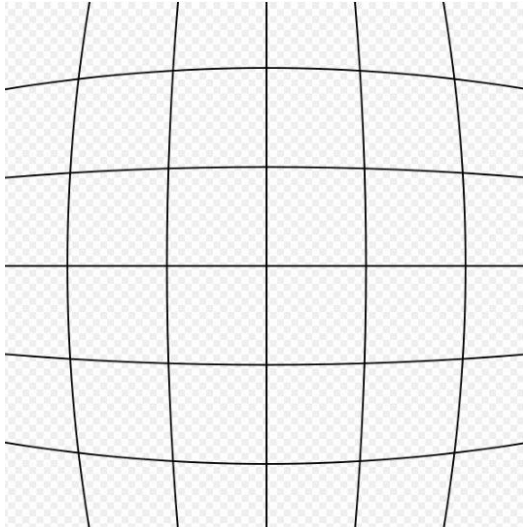
Negatiivinen kuvatason korjaava linssi täytyy sijoittaa optiikassa oikein. Negatiivisella linssillä on aina optiikan optista tehoa vähentävä vaikutus. Mitä lähemmäksi kuvapintaa kuvatasa korjaava linssi asetetaan, sitä pienempi negatiivinen teho siihen tarvitaan saman kuvakentän oikaisutehon saamiseksi ja sitä pienempi on sen aiheuttama optisen tehon häviö. Yleensä sama linssi korjaa optiikasta sekä kuvatason kaareutumisen, että astigmaattisuuden. (Fisher 2008 s. 79-80 Canon inc. 2006 s.200)



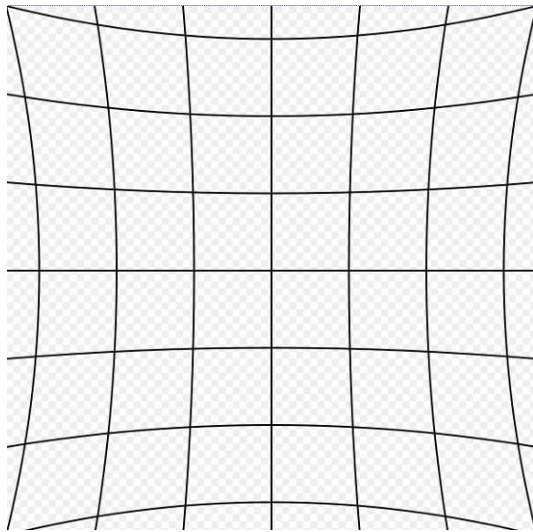
Kuva 34. Canonin objektiivin suunnitteluohjelmasta otettu kuva. Kuvakentän kaarevuuden korjaava linssi on sijoitettu viimeiseksi, jolloin optisen tehon menetys saadaan vähäiseksi.

3.2.6 Linjavääristymä (Distortion)

Linjavääristymä on ainoa vääristymä, joka ei aiheuta kuvan terävyyden huononemista. Kuva-alalta tuleva piste piirtyy kuvapinnalle pisteenä mutta väärään kohtaan, jotta kuva muodostuisi todellisuutta vastaavana. Linjavääristymässä suorat viivat taipuvat. Kun kyseessä on ns. tynnyrivääristymä, taipuvat kuvan nurkat kohti keskustaa ja tynnyrvääristymässä poispäin keskustasta. Tynnyrivääristymä on laajakulmaobjektiivien ongelma ja kuvaajille tuttu ilmiö. Linjavääristymä on suoraan verrannollinen kuvakulman laajenemisen neliöön ja näin ollen se on kääntäen verrannollinen polttovälin neliöön. Objektiivin linjavääristymä ilmoitetaan yleensä prosentteina. 2-3 %:n linjavääristymä on vielä silmälle käytännössä huomaamaton. Kalansilmäobjektiivit kehitettiin ensin pilvenmuodostumisen tarkkailua varten mutta päätyivät nopeasti myös luontokuvaajien käsiin omaperäisen kuvanmuodostuksen takia. (Fisher 2008. s.85–87, Wikipedia 2009 [viitattu 13.11.2009])

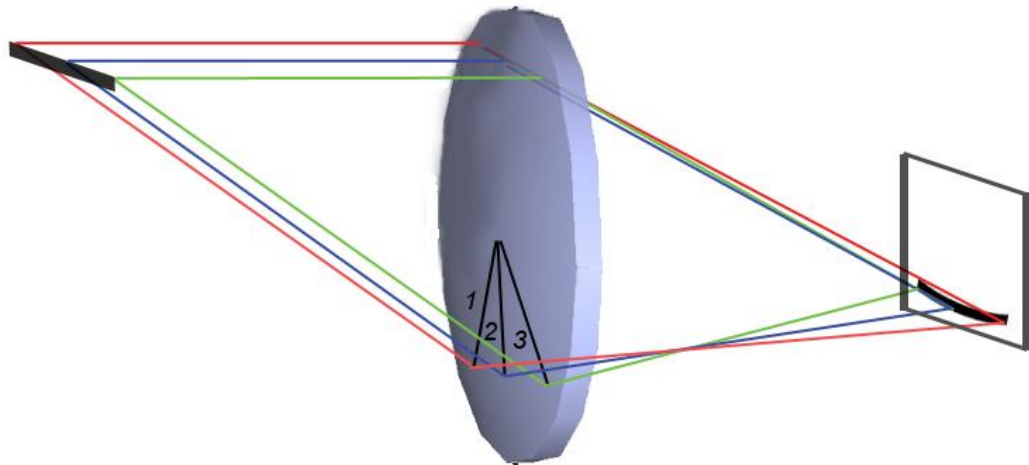


Kuva 35. Tynnyrivääristymä.



Kuva 36. Tyynyvääristymä.

Kun kuva-alan reunassa oleva suora viiva projisoidaan pallopinnalle, se taipuu. Mitä pienempi on pallopinnan säde, sitä voimakkaammin viiva taipuu. Toisin sanottuna polttovälin lyhentyessä linjavääristymä kasvaa. Viivan projisoin päät kohtaavat linssin jyrkemmässä kulmassa kuin keskeltä kulkeva säde, ja ne taipuvat siksi keskustaa enemmän. Näin kuvapinnalle muodostuu vääristynyt kuva.



Kuva 37. Linjavääritymä aiheutuu etulinssin muodosta. Jos tarkastelee pisteiden 1,2 ja 3 etäisyyttä linssin keskipisteestä, huomaa, että nurkat (1 ja 3) ovat kauempana keskustasta ja siksi myös nämä säteet kohtaavat linssin jyrkemmissä kulmassa, joten ne taipuvat enemmän.

3.2.6.1 Linjavääritymän korjaaminen

Koska linjavääritymä johtuu linssin muodosta, on se aina pallopintaisen linssin seuralaisena. Asfäärinen linssi tuottaa huomattavasti pienemmän linjavääritymän. Nykyisin valmistetaan laajakulmaobjektiveja, jotka korjaavat tynnyrivääritymän. Tällaisia objektiveja kutsutaan rectilinearisiksi objektiveiksi ja niissä käytetään linsejä, joiden muoto korjaa linjavääritymän. Kuvakulman laajuuden tuomaa ”outoutta” ei tosin voi mitenkään korjata. Kameraliikkeet näyttävät omituisilta rectilinearisilla objektiveilla kuvattuna. Kohteet siirtyvät pienellä kameraliikkeellä läheltä todella kauaksi ja maailma pyörähtää oudon voimakkaasti pannatessa ja tiltattaessa. (Canon inc. 2006 s.200,)



Kuva 38. Rectilineaarinen objektiivi suoristaa linjavääristymän.

3.2.7 Heijastuminen (Reflection)

Kun katsoo linssiä, niin siitä näkee yleensä linssin läpi mutta myös linssin pinnasta heijastuvan peilikuvan. Osa valosta menee linssin läpi ja osa heijastuu takaisin. Ensimmäinen haitta tästä on se, että linssin valoteho heikkenee. Valoa hukkaantuu heijastukseen. Valon kulkiessa tavallisen lasin läpi, tapahtuu heijastumista sekä ilma-lasi pinnasta että lasi-ilma pinnasta. Tällaisessa tapauksessa lasiin osuvasta valosta noin 5-10 % heijastuu takaisin. Heijastumista tapahtuu objektiivin jokaisen linssin pinnasta, joten heijastumista täytyy saada optiikassa vähennettyä runsaasti. Kuvaustilanteessa heijastuminen tulee esiin, kun valo, joka saattaa olla myös kuvan ulkopuolella, osuu linssiin. Tällöin syntyy kaikkien kuvaajien tuntema flare-ilmio. Sarja valopalloja syntyy, kun valo heijastuu jokaisen linssin etu ja takapinnasta ja osa siitä valosta ponnahtaa taas edellisen linssin pinnasta takaisin kohti kuvatasoa. Valo saattaa myös sirotta objektiivin sisällä huonontaa objektiivin kontrastia ja saturaatiota (Wildi 2004, 220).

3.2.7.1 Heijastuksien korjaaminen

Ensimmäinen apu heijastuksista aiheutuvien haittojen eliminoimisessa on käyttää vastavalosuojaa tai matteboksia. Näillä estetään kuva-alan ulkopuolelta tulevan valon pääsy linssiin. Ehkä suurin kehitys nykyiseen optikkaan tapahtui 1935, kun Zeissilla

työskentelevä Alexander Smakula keksi yksikerrospinnoitteen (Single-layer coating). Jo vuonna 1886 oli Sir Rayleigh tehnyt tärkeän havainnon tutkiessaan vanhentunutta sen aikaista optista lasia. Sir Raleighin aikaisella optisella lasilla oli taipumuksena tahraantua, johtuen lasin pinnassa tapahtuvista kemiallisista reaktioista. Sir Raleigh huomasi mittauksissaan, että tahraantunut lasi päästikin lävitseen enemmän valoa kuin uusi pinnoittumaton linssi. Puhtaan linssin ilma-lasi pinta oli muuttunut ilma-tahra tahra-lasi pinnoiksi ja näistä kahdesta pinnasta heijastui valoa yhteensä vähemmän takaisin, kuin yhdestä ilma-lasi pinnasta. Smakula keksi, että heijastuminen saada minimiin, jos linssi pinnoitetaan läpinäkyvällä aineella, jonka taitekerroin on neliöjuuri käytetyn linssin taitekertoimesta. Pinnoitetta laitetaan linssin pintaan noin neljäsosa heijastumattomaksi halutun valon aallonpituudesta. Yksikerrospinnoite eliminoi heijastukset yhden värin alueelta, joten se vaikuttaa voimakkaasti objektiivin värintoistoon. Yksikerrospinnoite vähentää heijastuksen linssin pinnasta noin yhteen prosenttiin. Smakulan keksintö pysyi toisen maailmansodan alun Saksan sotasalaisuutena mutta valloitti optiikkateollisuuden kautta maailman päästyään julkisuuteen. (Wikipedia 2009 [viitattu 8.10.2009])

1970-luvulla kehitettiin monikerrospinnoitteet (multi-layer coating). Siinä linssin pintaan laitetaan useita ohuita kerroksia. Tällaisella rakenteella voidaan heijastuksia poistaa koko näkyvän valon alueelta. Valon takaisin heijastuminen saadaan laskettua jo 0,1:en prosenttiin. Myös värintoisto toimii monikerrospinnoitteella paremmin, koska se käsittelee tasaisesti kaikkia näkyvän valon alueita. (Arri 2009 [viitattu 9.10.2009]).

Pinnoitteiden keksiminen on mahdollistanut useiden linssien käytön objektiiveissa. Ennen pinnoitteita linssien lisääminen objektiin, lisäsi myös siroilevan valon ja heijastuskuvien määrää, sekä huononsi objektiivin valotehoa. Kun 99,9 %:a valosta menee oikeaan osoitteeseen, ei linssien määrä enää muodostu ongelmaksi. Tämä johtaa myös siihen, että voidaan valmistaa yhä paremmin toimivia zoom-objektiivejä, erilaisine kelluvine linssiryhmineen.

4 Yhteenveto

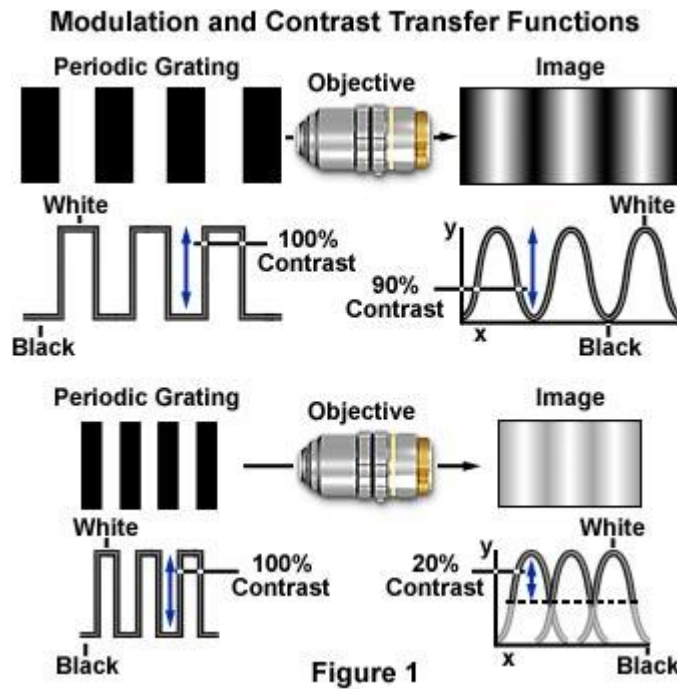
Aberraatioita ei saada siis kokonaan poistetuksi. Yhden virheen poistaminen johtaa toisen kasvamiseen jne. Optisen järjestelmän tuottama kuva sisältää aina virheitä ja sen takia ne myös tuottavat persoonallisen, itselleen ominaisen kuvan. Zeissin Linssiosaston työntekijä H.H. Nasse kuvaa Objektiivin tapaa piirtää piste, objektiivin sormenjäljeksi, objektiivit ovat ikään kuin pensseleitä, on kovia ja karkeita, pehmeitä, hienoja jne. Objektiivissa on lukemattomia muuttuvia tekijöitä, joista jokainen vaikuttaa sen tuottamaan kuvaan, linssissä käytetyt materiaalit ja pinnoitteet, linssien muodot, linssien sijoittelu, himmentimen sijoittelu, himmentimen pyöreys tai kulmikkuus, objektiivin valmistuksessa tapahtuneet virheet ja toleranssit jne. Jokaisen pienen yksityiskohdan muuttaminen objektiivissa aiheuttaa oman seurauksensa lopputulokseen.

Myöskään kuvan tallentava filmi tai ccd-kenno ei ole täydellinen, joten tarpeeksi pienet optiikan tuottamat virheet eivät erotu kuvassa. Jokaisella tallentavalle medialle on laskettavissa ns. epäterävyysympyrä (circle of confusion lyh. CoC). Jos optiikka piirtää pisteen sijasta ympyrän, joka on kooltaan pienempi kuin epäterävyysympyrä, on tuloksena terävä piste, koska tallentava media ei pysty tekemään eroa epäterävyysympyrää pienemmille yksityiskohdille. 35 mm filmin epäterävyysympyrä on 0,03 mm.

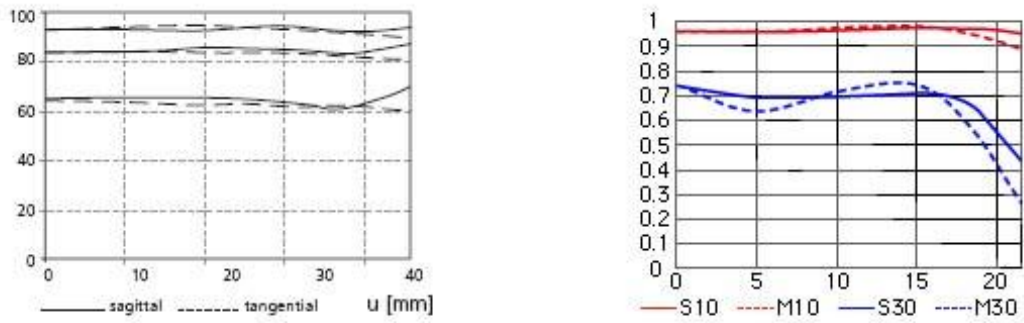
Jokaisen objektiivin kyky tuottaa kontrastia ja resoluutiota on ko. objektiivin ominaispiirre. Jotkut objektiivit piirtävät hyvin täydelläkin aukolla ja toiset huonosti. Objektiivien ns. bokeh on erilainen. Bokeh tarkoittaa sitä kuinka objektiivi piirtää epäterävyyden. Kun taustalla olevat pisteet muuttuvat epäteräviksi, halutaan niiden yleensä olevan pyöreitä, pehmeäreunaisia, tasaisesti tummenevia tai vaalenevia ympyröitä. Koska epäterävissä kohteissa näkyy aina sulkimen muoto, esimerkiksi kulmikas suljin tuottaa epäterävistä palloistakin kulmikkaita Bokeh näyttää olevan tällä hetkellä yksi suuri kiinnostuksen kohde internetin kuvausaiheisilla sivustoilla.

Useista objektiiveista on saatavilla ns. MTF-kaavio (modular transfer function), joka antaa kuvan objektiivin erottelukyvystä (resolving power RP) ja kontrastista.

Mittauksessa käytetään taulua, jossa on mustia ja valkoisia viivoja tasaisin välein. Kokeessa käytetään eri tiheydellä olevia tauluja. Tiheys ilmoitetaan viivaparia millimetriä kohden (lp/mm). Viivatiheys voi olla esim. 10 lp/mm, 20lp/mm ja 40 lp/mm. Tauluissa on sekä vaaka- että pystysuuntaisina ja ne kuvataan yleensä pienimmällä, suurimmalla ja keskikoon aukolla.



Kuva 39: MTF-mittauksessa tutkitaan objektiivin kontrastia ja erottelukykä. Kuvan vasemalla puolella on alkuperäinen kuva ja sitä vastaavat sähköiset käyrät. Oikealla puolella on samat kuviot tarkasteltuna objektiivin läpi. Kuviot ovat korostetun suuria, viivatiheydet voisivat olla esim. ylemmässä kuviossa 10lp/mm ja alemmassa 20lp/mm. Se miten hyvin objektiivi toistaa musta ja valkeat, kertoo objektiivin kontrastista. Viivatiheyttä suurennettaessa löytyy vaihe, jossa mustat ja valkoiset viivat sulavat yhdeksi harmaaksi, objektiivi ei kykene enää erottelemaan niitä



Kuva 40. Vasemmalla on Zeissin Makro-Planar 100/2.0 ja oikealla Micro-Nikkor 100/2.8 VR objektiivien MTF-kaaviot. Zeiss käyttää pystyakselilla arvoa 0-100 ja Nikon arvoa 0-1. Zeissin viivatiheydet on ylhäältä alaspäin 10lp/mm, 20lp/mm ja 40lp/mm. Nikon käyttää arvoja 10lp/mm ja 30lp/mm. Ehjät viivat kuvaavat pystyraidoilla tehtyä mittausta ja katkoviivat vaakaviivoilla tehtyä mittausta.

Kuvassa 39 on esimerkki MTF kaaviosta, jota vastaavia on saatavilla useista optiikoista. Kaavion y-akselilla on MTF arvo, joka on arvo nolasta yhteen tai prosenttein ilmaistuna 0 - 100 %:a. ja x-akselilla on etäisyys kuvan keskeltä. Kymmenellä viivaparilla per millimetri, tämä antaa käsityksen optiikan kontrastista. Erottelukyvyistä kertoo ohuemmilla viivoilla kuvattu testi. Katko- ja yhtenäisten viivojen irtoaminen toisistaan kertoo, että epäterävyysalueella olevat pisteet eivät toistu enää ympyröinä, vaan soikioina. Osa valmistajista ottaa mtf-kaaviot suoraan ohjelmista, joilla objektiivi on suunniteltu. Tämä jättää huomioimatta valmistuksessa ja materiaaleissa olevat toleranssit. Laadukkaampien objektiivien mtf-kaaviot ovat yleensä mitattuja joten niissä on huomioitu kaikki tekijät, jotka lopputulokseen vaikuttavat.

On tärkeää pitää mielessä, että mtf-kaavio antaa kuvan optiikan resoluutiosta ja kontrastista, joten se kertoo mihin objektiivi kykenee mutta ei kerro, onko objektiivi hyvä. Objektiivin hyvyys on subjektiivinen käsite, eikä sitä voida mittaamalla todeta. Mtf-kaavio antaa kuitenkin tärkeää tietoa objektiivin soveltuvuudesta erilaisiin tilanteisiin. Kuvatessa hiusmainosta olisi kiva, jos pystyisi kuvaamaan siten, että hiukset todellakin erottuvat ja tähän tarvitaan hyvän erottelukyvyn omaavaa optiikkaa. Täytyy pitää myös mielessä, että optiikka on vain pieni osa siitä ketjusta, joka tuottaa kuvan. Jotta optiikan piirtokyky tulisi esille, pitää tallentavan median (filmin tai

kennon) kyetä resoluutioltaan tarpeeksi hyvään suoritukseen. Elokuvan ollessa kyseessä, pitää projektorin, videotykin tai television kyetä toistamaan tallennettu kuvanlaatu. Viimeisenä ketjussa on ihmissilmä, jolle on myös turha tuottaa sen kyvyt runsaasti ylittävää kuvanlaatua.

Myös kotikonstein voi objektiivin ominaisuuksia tutkia helposti. Yksi tapa on laittaa sanomalehden aukea seinälle, valaista se tasaisesti, tarkentaa hyvin ja kuvata se eri aukoilla. Kuvankäsittelyohjelmalla voi suurentaa eri kohtia kuvasta ja tarkkailla miten hyvin objektiivi piirtää kirjaimien rajat ja miten kuvan reuna-alueet eroavat keskiosasta. Samoja alueita eri aukoin otetuista kuvista voi vertailla toisiinsa.

Lähteet

Kirjalliset lähteet:

Canon Inc. Lens Production group. 2006 EF Lens Work III. 8. Painos. Nikko Graphics Co. Ltd.

Fischer, Robert F 2008. Optical System Design. 2. painos. McGraw-Hill Professional Publishing

Hawkings, Andrew Avon, Dennis. 1981 Valokuvaus kuvaustekniikan opas Toppan printing co. Singapore

Linkoaho, Matti, Valjakka, Jukka 1982. Valo-oppi. Espoo: Otapaino

Nasse, H.H 2008. How to Read MTF Curves. Carl Zeiss Camera Lens Division

Rihlma, Seppo 1997. Värioppi. 6., uusittu painos. Tampere: Rakennustieto Oy

Wildi, Ernst 2004. The Hasselblad manual. Elsevier: Focal press publications

5 Sähköiset lähteet:

http://www.arri.de/camera/tutorials/what_is_the_t_xp_anti_reflection_coating.html#

<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/diffraction-photography.htm>

http://www.canon.fi/For_Home/Product_Finder/Cameras/EF_Lenses/Fluorite_and_UD_Lenses.asp

<http://diglloyd.com/diglloyd/free/Diffraction/index.html>

<http://www.ee.tut.fi/fys/labrapruju/optiikka.pdf>

<http://www.ava.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.html>

http://fi.wikipedia.org/wiki/Valo#Valo_ja_v.C3.A4rit

<http://foto.hut.fi/opetus/350/k03/luento4/luento4.html>

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Polarisaatio>

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Amplitudi>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Interference>

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Interferenssi>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction>

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Diffraktio>

http://en.wikipedia.org/wiki/Fisheye_lens

http://en.wikipedia.org/wiki/Achromatic_doublet

<http://www.zeiss.de/c12567a8003b58b9/Contents-Frame/ff8a7b7a369c1549c12570fb0048e952>

6 Kuviot

| | | |
|----------|--|----|
| Kuva 1. | Kuvaaja: Daniel Schwen. Kuvan lähde: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Tree_example_VI_S.jpg | 8 |
| Kuva 2. | Kuvaaja: Daniel Schwen. Kuvan lähde: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Tree_example_IR.jpg | 8 |
| Kuva 3. | Kuvan lähde: http://www.latentmaster.com/index_files/image004.jpg | 8 |
| Kuva 4. | Kuvan lähde: www.ava.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.html | 9 |
| Kuva 5. | Kuvan lähde: www.ava.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.html . Alkuperäistä kuvaa muokattu | 9 |
| Kuva 6. | Kuvan lähde: www.ava.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.html | 9 |
| Kuva 7. | Kuvan lähde: http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:Sinus_amplitude_en.svg . Alkuperäistä kuvaa muokattu | 10 |
| Kuva 8. | Kuvan lähde: http://astro-canada.ca/_en/_illustrations/a4312_polarisation_en_p.jpg . Alkuperäistä kuvaa on muokattu | 10 |
| Kuva 9. | Kuva: © The Physics Classroom. Kuvan lähde: http://images-cdn01.associatedcontent.com/image/A10 . Alkuperäistä kuvaa on muokattu | 11 |
| Kuva 10. | Kuva: Jari Uusitalo | 12 |
| Kuva 11. | Kuvan lähde: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Example_snells_law.gif . Alkuperäistä kuvaa on muokattu. | 13 |
| Kuva 12. | Kuvan lähde: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/fi/3/3f/Interferenssi.png | 14 |
| Kuva 13. | Kuvan lähde: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oelfleckerp.jpg Kuvaaja: Anton | 15 |
| Kuva 14. | Kuvan lähde: http://www.upscale.utoronto.ca/PVB/Harrison/Diffraction/Images/waterdiffract ion.jpg | 15 |
| Kuva 15. | Kuva: Jari Uusitalo. | 16 |
| Kuva 16. | Kuva: Jari Uusitalo. | 16 |
| Kuva 17. | Kuva: Dick Lyon. Kuvan lähde: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Wave_Diffraction_4Lamb da_Slit.png | 17 |
| Kuva 18. | Kuva: Sakurambo. | 17 |

| | |
|--|----|
| Kuva 19. Kuvan lähde: http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/diffraction-photography.htm | 18 |
| Kuva 20. Kuva: Jari Uusitalo | 19 |
| Kuva 21. Kuvan lähde: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lens6a.png Kuva: Bob Mellish | 21 |
| Kuva 22. Kuvan lähde: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lens6a.png Kuva: Bob Mellish. Kuvaa muokattu | 21 |
| Kuva 23. Kuvan lähde: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lens6b.png | 22 |
| Kuva 24. Kuva: Jari Uusitalo | 23 |
| Kuva 25. Kuvan lähde: Fisher Robert F. Optical systems design s. 116. Alkuperäistä kuvaa on muokattu. | 24 |
| Kuva 26. Kuvan lähde: Fisher Robert F. Optical systems design s. 66. Alkuperäistä kuvaa on muokattu. | 25 |
| Kuva 27. Kuva: Jari Uusitalo | 26 |
| Kuva 28. Kuva: jari Uusitalo | 27 |
| Kuva 29. Kuvan lähde: Fisher, Robert F. Optical Systems Design (2nd Edition) s.76. Alkuperäistä kuvaa on muokattu | 28 |
| Kuva 30. Kuvan lähde: Fisher Robert F. Optical systems design s. 78. Alkuperäistä kuvaa on muokattu. | 29 |
| Kuva 31. Kuva: Jari Uusitalo | 30 |
| Kuva 32. Kuva: Jari Uusitalo | 30 |
| Kuva 33. Kuva: Jari Uusitalo | 31 |
| Kuva 34. Kuvan lähde: Canon inc. EF Lens Work III s. 165. Alkuperäistä kuvaa on muokattu. | 32 |
| Kuva 35. Kuvan lähde: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Barrel_distortion.svg | 35 |
| Kuva 36. Kuvan lähde: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pincushion_distortion.svg | 36 |
| Kuva 37. Kuva: Jari uusitalo | 34 |
| Kuva 38. Kuvan lähde: http://www.arri.de/camera/tutorials/what_is_rectilinear_what_is_a_fisheye.html# | 35 |
| Kuva 39. Kuvan lähde: http://www.microscopyu.com/articles/optics/mtfintro.html | 38 |
| Kuva 40. Kuvan lähde: http://ceres.informatik.fh-kl.de/mediafotografie/extra/makro100/ | 39 |