

# Digitaalisen valokuvan kohina ja sen hallinta

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Mediatekniikka  
Tekninen visualisointi  
Opinnäytetyö  
Kevät 2018  
Olli Myllymäki

Lahden ammattikorkeakoulu  
Mediatekniikka

MYLLYMÄKI, OLLI:

Digitaalisen valokuvan kohina ja sen  
hallinta

Teknisen visualisoinnin opinnäytetyö, 43 sivua

Kevät 2018

TIIVISTELMÄ

---

Työssä perehdyttiin kohinan syntyyn, luonteeseen ja periaatteisiin digitaalisessa valokuvassa sekä eriteltiin kohinan eri lähteitä ja tyyppejä. Tutkittiin myös kameran ominaisuuksia, sekä vakioita että muuttujia, jotka vaikuttavat osaltaan kohinan voimakkuuteen tai laatuun. Tämän tarkoituksena oli auttaa valitsemaan parhaat mahdolliset olosuhteet ja tekniikat kohinan minimoimiseksi sekä varmistaa, että tekniikkojen toimivuutta voitiin arvioida tarkasti.

Seuraavaksi valittiin erilaisia, hyväksi todettuja valokuvaus- ja jälkikäsittelytekniikoita, joita kokeiltiin käytännössä. Arvioitiin tekniikkojen onnistumista sekä haittoja ja pohdittiin niiden tarpeellisuutta. Yhtenä tekniikoista käytettiin työtä varten luotua mukautettua tekniikkaa valotusten sekoittamiseen, joka todettiin toimivaksi ja aikaisempia tekniikoita helppokäyttöisemmäksi. Käytetty tekniikka toi mukanaan ideoita jatkokehitykselle.

Työssä selvitettiin joitakin ristiriitaisia käsityksiä kohinaan liittyen. Selvitettiin myös, millaiset kamerat ja niiden asetukset antavat parhaat tulokset. Työssä käytetyn kameran kohinan luonteen todistettiin empiirisesti riippuvan vahvasti ISO-arvosta. Huomattiin kuvan suurentamisella olevan erittäin merkittävä vaikutus kohinan näkyvyyteen.

Asiasanat: signaali, dynaaminen alue, valotus, leikkautuminen, analogia-digitaalimuunnin, RAW-kuva

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in Media Technology

MYLLYMÄKI, OLLI:

Noise in Digital Photographs and  
Controlling it

Bachelor's Thesis in Technical Visualization, 43 pages

Spring 2018

ABSTRACT

---

In the paper, the origin, characteristics and principles of noise in digital photographs were explored, and different sources and types of noise were categorized. Those constant and variable properties of a camera which influence either the amplitude or the nature of noise, were studied as well. The purpose was to help choose the best possible shooting conditions and techniques for minimizing noise, and to make certain that the effectiveness of those techniques could be properly evaluated.

Several proven photography and post-processing techniques were then chosen to be tested in practice. The success and disadvantages of these techniques were then evaluated, and their necessity was analyzed. One of the techniques used was a custom exposure blending technique created for the purposes of the paper. It was found effective and simpler to implement than previous techniques. The technique brought along ideas for further improvement.

Some conflicting ideas regarding noise were clarified. It was also studied, what types of cameras and their settings give the best results. The noise profile of the camera used was empirically proved to have a significant relation with its chosen ISO value. The enlargement of an image was found to have a major impact on the visibility of noise.

Key words: signal, dynamic range, exposure, clipping, analog-to-digital converter, RAW photograph

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	KOHINAN LÄHTEET	2
2.1	Kohina tilastotieteessä	3
2.2	Fotonit	4
2.3	Elektroninen kohina	6
2.3.1	Epäyhtenäinen kohina	7
2.3.2	Muita kohinan lähteitä	8
2.4	Dynaaminen alue	9
2.5	Filmin rakeisuus	10
3	KOHINAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	12
3.1	Transmittanssi	12
3.2	Kenno	13
3.2.1	Kennon tyyppi	14
3.2.2	Solun koko	15
3.2.3	Kennon koko	16
3.2.4	Bayer-suodin	17
3.3	Signaalin vahvistaminen	19
3.3.1	ISO-arvo	19
3.3.2	ISO-varianssi	21
4	KOHINAA VÄHENTÄVÄT TEKNIIKAT	24
4.1	RAW-valokuvaus	24
4.2	Dynaamisen alueen hallinta	26
4.2.1	Valotusten sekoitus	26
4.2.2	Ylivalotus	28
4.3	Kuvasarjan keskiarvo	31
4.4	Digitaalinen kohinan vähennys	34
5	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	41

## 1 JOHDANTO

On mahdotonta ottaa täydellinen kuva, joka esittäisi kuvattavan kohteen virheettömästi ja juuri sellaisena kuin se on. Syynä siihen ovat sekä kameran että fyysisen maailman useat eri rajoitteet, joista tässä työssä keskitytään kohinaan. Valokuvan kohina, jota usein kutsutaan myös rakeisuudeksi, on kuvan kirkkauden ja värien kokonaan tai osittain satunnaista vaihtelua kuvan eri kohdissa. Digitaalisista kuvista puhuttaessa kohina näkyy kuvan pikselien (pixel, picture element) arvaamattomina ja epähaluttuina eriäväisyyksinä ympäröiviin pikseleihin.

Kamerat, sekä niissä käytettävät objektiivit, filmit ja kennot, kehittyvät jatkuvasti parempilaatuisten kuvien toivossa. Samalla myös kuvien kohina on vähentynyt. Siitä huolimatta kohinan merkitys kuvien laatuun vaikuttavana tekijänä on edelleen suuri, ja jokainen valokuvaaja joutuu taistelemaan sitä vastaan. Kohinaa voi minimoida hyvällä kameralla, kameran asetuksilla, valaisulla sekä kohinaa vähentävillä erikoistekniikoilla.

Tässä työssä tutkitaan aluksi digitaalisen kuvan kohinan alkuperiä, sen luonnetta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Periaatteet ymmärtämällä voi kohinaa paremmin havaita, arvioida ja estää. Seuraavaksi valikoidaan eri valokuvaus- ja jälkikäsittelytekniikoita kohinan minimoimiseksi ja kokeillaan niiden toimivuutta käytännössä.

## 2 KOHINAN LÄHTEET

Alun perin kohinalla tarkoitettiin radiosignaaleissa kuuluvaa ylimääräistä melua, joka johtuu sähköisistä häiriöistä signaalissa. Termin määritelmä on laajentunut tarkoittamaan sähköisiä häiriöitä yleensä kaikenlaisissa signaaleissa. (Farooque & Rohankar 2013, 217.) Valokuvaa voidaan myös pitää signaalina, jonka laatu kärsii monen tyyppisestä sekä monesta lähteestä juontuvasta kohinasta.

Digitaalisen kameran kenno on valolle herkkien solujen (photosite) ruudukko. Soluja kutsutaan usein myös pikseleiksi, vaikka pikseli on tarkasti ottaen digitaalisen kuvan elementti, ei fyysisen kennon. Valokuvan kohinaa tarkastellaan mittaamalla ja vertailemalla pikseleihin tallennettuja arvoja.

Tarkastellaan erilaisia kohinan lähteitä ja syitä sekä niiden tuottaman kohinan laatua ja ominaispiirteitä. Samalla tutkitaan kohinan perimmäistä luonnetta ja sen merkitystä kuvan laatuun. Tutkitaan kohinan suhdetta kuvan dynaamiseen alueeseen ja verrataan digitaalista kohinaa fyysisessä filmissä tapahtuvaan kohinaan.

Lähdekirjallisuudessa mainitaan monia kohinan tyyppisiä. Useimmissa teksteissä näitä kaikkia ei kuitenkaan mainita, mikä johtuu osittain kirjoittajien tulkinnoista siitä, mitkä kohinan tyypit ovat vaikutuksiltaan huomioonotettavia kokonaisuuteen nähtynä. On myös huomattava, että erilaisen kohinan lähteiden merkitys vaihtelee sekä teknologian kehittyessä että erityyppisiä kameroita tarkasteltaessa. Eri teksteistä löytyy myös erilaisia tapoja jaotella kohinan tyyppisiä ja jopa erilaisia selityksiä niiden syistä. Tässä luvussa käsitellään joitakin lähdekirjallisuudessa eniten esiintyviä kohinan tyyppisiä.

## 2.1 Kohina tilastotieteessä

Mitä tahansa informaatiota voidaan ajatella signaalina. Informaatiossa on yleensä myös tilastollisia poikkeamia odotetuista arvoista eli kohinaa. Tarkalla, hyvälaatuisella informaatiolla on mahdollisimman suuri signaalin ja kohinan suhde (Signal-to-noise ratio, SNR), joka lasketaan kaavalla 1:

$$SNR = \frac{S}{N}$$

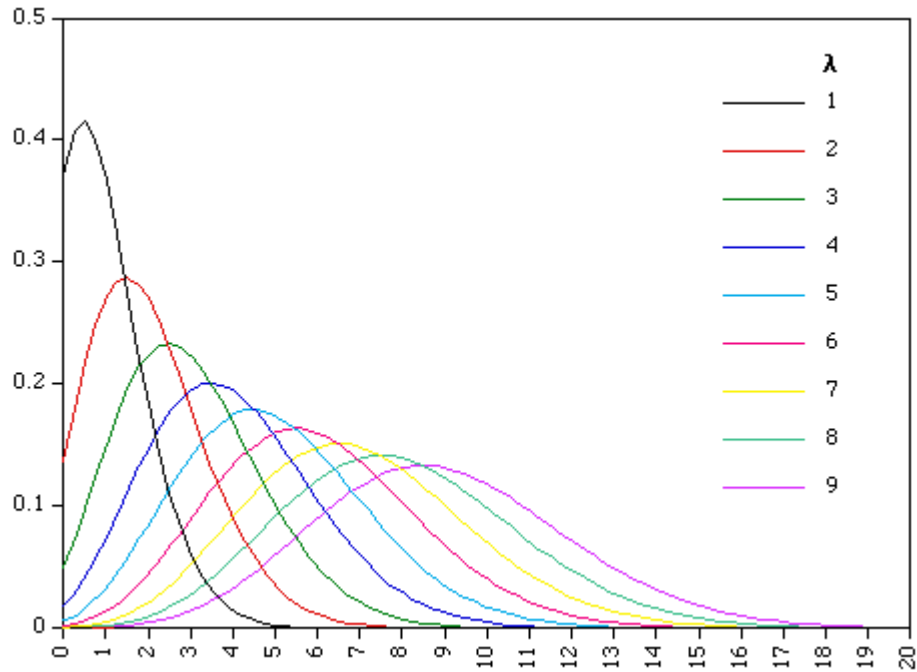
On mahdotonta ennustaa tarkasti, mitä arvoja tutkimuksessa saadaan. Sen sijaan voidaan laskea todennäköisyysjakauma, joka kertoo kunkin arvon todennäköisyyden.

Monissa tapauksissa informaatio koostuu yksittäisistä tapahtumista. Mitä vähemmän tapahtumia dokumentoidaan, sitä enemmän kohinaa esiintyy. (Jin, Grama & Liu 2013, 2.) Tutkittavat yksittäiset tapaukset voivat olla luonteeltaan binäärisiä, eli ne ovat joko tosia tai epätosia, esimerkiksi kruunan saaminen kolikonheitosta. Jos tavoitteena on dokumentoida tietty määrä tapauksia, todennäköisyysjakauma on binomijakauma. Jos sen sijaan tutkitaan tosien tapahtumien määrää tietyssä ajankohtana, käytetään Poissonin jakaumaa. Molemmissa tapauksissa oletetaan, että tapahtumat ovat täysin toisistaan riippumattomia. (Lamar 2015.)

Kameran kohinaa mallintaessa käytetään eritoten Poissonin jakaumaa, jonka pistetodennäköisyysfunktio näkyy kaavassa 2:

$$P(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

Kaavassa  $\lambda$  on tapahtumien odotettu määrä ja  $k$  havaittujen tapahtumien määrä. Funktio  $P(k)$  antaa todennäköisyyden kullekin  $k$ :n arvolle. Kuviossa 1 näkyy lambda:n eli oletusarvon vaikutus Poisson-jakaumaan. Poisson-jakaumassa oletusarvo  $\lambda$  on yhtä kuin sen keskiarvo ja yhtä kuin sen varianssi (Maître 2015, 256). Suurilla  $\lambda$ :n arvoilla jakauma lähestyy normaalijakaumaa, mikä voidaan havaita myös kuviosta 1. Normaalijakauman piirtämää käyrää sanotaan Gaussin käyräksi.



KUVIO 1. Poisson-todennäköisyysjakaumia (Massachusettsin yliopisto 2007)

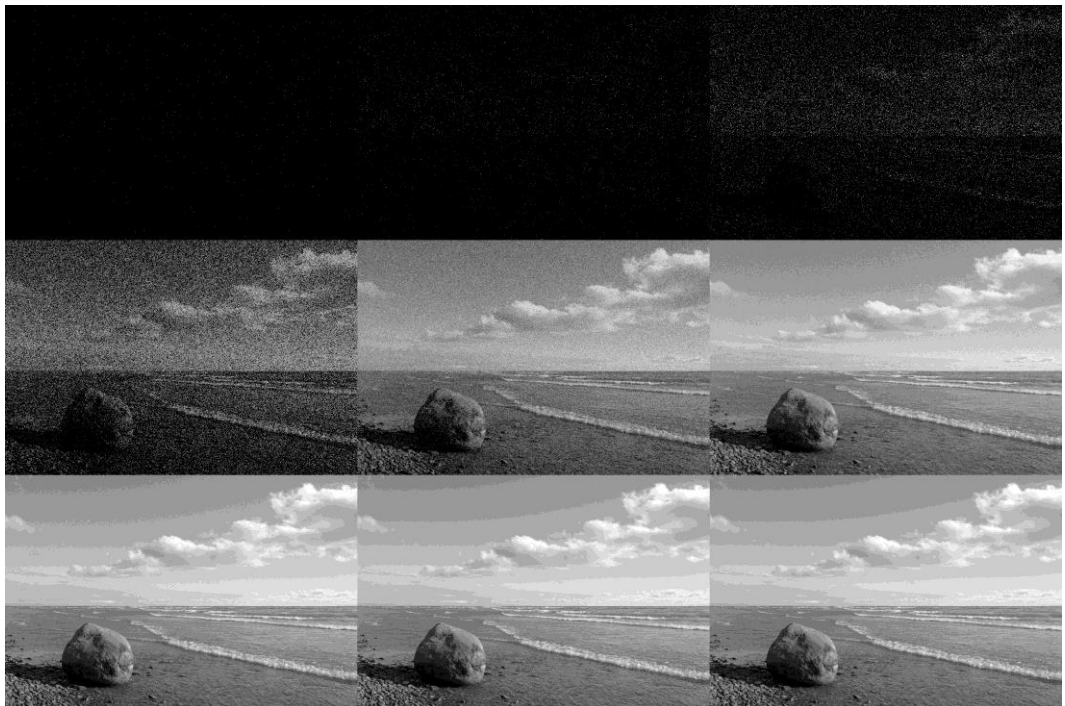
Binomijakauma, Poissonin jakauma ja normaalijakauma ovat kaikki toisiinsa liittyviä ja toisiaan graafisesti muistuttavia jakaumia. Niitä voidaan jopa ajatella samana funktiona, mutta erilaisiin tilanteisiin sovellettuina. Kaikissa todennäköisyysjakaumissa voidaan huomata se ominaisuus, että signaalin vahvistuessa eli keskiarvon kasvaessa kohina eli keskiarvoikkema kasvaa myös, mutta ei yhtä paljon kuin itse signaali. Signaalin vahvuus siis parantaa signaali-kohinasuhdetta.

## 2.2 Fotonit

Valon luonne on dualistinen; se käyttäytyy sekä aaltojen että hiukkasten tapaan. Aalto-opista on hyötyä ymmärtäessä, miten kameran kuva muodostuu, mutta kohinaa tutkittaessa valoa kannattaa tarkastella hiukkasina eli fotoneina. Kameran keskeisimpiä tehtäviä on mitata kuvan eri kohtien valotus eli valon määrä pinta-alayksikköä kohden. Kameran kennon solut laskevat niille osuvien fotonien määrää ja siten valotusta.



Koska valo koostuu yksittäisistä fotoneista, sitä mitattaessa esiintyy kohinaa kuten mitä tahansa yksittäisistä tapahtumista koostuvaa informaatiota kerätessä. Toisin sanoen valo on kvantittunutta ja luonteeltaan satunnaista (Maître 2015, 254). Valoa voi verrata sateeseen. Sateen määrän tietyllä alalla voi melko tarkasti mitata tilavuutena. Sen sijaan on käytännössä mahdotonta arvioida, mihin yksittäiset pisarat osuvat tai kuinka monta pisaraa osuu tiettyyn pisteeseen. Samoin ei pystytä arvioimaan, mihin yksittäiset fotonit osuvat.



KUVA 1. Fotonikohinan simulaatio (Bajart 2010)

Fotonien satunnaisuudesta johtuva kohina noudattaa Poissonin jakaumaa, joten sitä sanotaan Poisson-kohinaksi (Boncelet 2005, 404). Tässä tapauksessa  $\lambda$  on valotuksesta riippuva fotonien odotettu määrä ja  $k$  kerättyjen fotonien määrä Poissonin jakauman yhtälössä. Kuvassa 1 näkyy simulaatio fotonien asteittaisesta kertymisestä kennolle ja tämän vaikutuksesta kohinaan.

Kun kamera muuttaa keräämänsä fotonit signaaliksi, kohinaa sanotaan myös shot- tai Schottky-kohinaksi (Maître 2015, 254). Samannimistä kohinaa tapahtuu myös digitaalisen kameran eri osissa sekä täysin erilaisissa

sovelluksissa. Kameran eri shot-kohinan lähteet voidaan yhdistää helposti: eri Poisson-jakaumien summa on itsessään myös Poisson-jakauma, jonka oletusarvo on erillisten jakaumien oletusarvojen summa (Maitre 2015, 256).

Osuessaan soluihin fotonit vapauttavat niissä elektroneja, jotka luovat kamerasignaalin. Poisson-kohinan määrän voi laskea yksinkertaisella kaavalla 3:

$$N = \sqrt{S}$$

Kohina  $N$  ja signaali  $S$  kertovat kunkin voimakkuuden elektroneina. (Moomaw 2013, 255.) Tällöin signaali-kohinasuhde saadaan kaavalla 4:

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S}} = \sqrt{S}$$

Kaavasta huomaa, että signaali-kohinasuhde ja siten myös signaalin laatu paranee juurifunktion mukaisesti signaalin voimistuessa. Esimerkiksi signaalin kaksinkertaistuessa SNR kasvaa kertoimella  $\sqrt{2}$ . Tämän takia valokuvan tummissa kohdissa (heikko signaali) kuva on huonolaatuisempi kuin vaaleissa kohdissa (vahva signaali).

### 2.3 Elektroninen kohina

Kennon kerättyä valo-informaation (jossa esiintyy jo fotonien Poisson-kohinaa) se muuttuu solujen vapauttamien elektronien luomaksi sähköiseksi signaaliksi. Kuten kaikki sähköiset signaalit, tämäkin kärsii sähköisistä häiriöistä, jotka lisäävät signaaliin toisen kerroksen kohinaa. Yksi tärkeimmistä elektronisen kohinan tyypeistä on lukukohina, joka on yleinen termi monelle eri kohinan lähteelle, mutta jota yleensä käsitellään lähdekirjallisuudessa yhtenä kokonaisuutena.

Lukukohina syntyy lukuprosessissa, eli siinä kun kamera lukee jokaisen solun keräämän jännitteen arvon ja muodostaa niistä sähköisen signaalin. Se noudattaa normaalijakaumaa, mikä tarkoittaa, että luetut arvot voivat

olla myös negatiivisia. Tämän takia arvoihin lisätään tarpeeksi suuri poikkeama, mistä taas johtuu, että lukukohinaa esiintyy, vaikka signaali olisi nolla. Lukukohinaksi lasketaan myös kaikki kennon ja analogia-digitaalimuuntimen välillä syntyvä kohina, joka johtuu lämmöstä. (Aguerreberre, Delon, Gousseau & Musé 2014, 3.) Lukukohinan oletusarvo on yleensä vakio eikä riipu lämpötilasta (Moomaw 2013, 255).

### 2.3.1 Epäyhtenäinen kohina

Epäyhtenäinen eli spatiaalinen eli Fixed Pattern -kohina (FPN) on kaikenlaista kohinaa, joka ei riipu signaalista, jakautuu kuvassa epätasaisesti eikä ole temporaalista eli satunnaista. Tällainen kohina luo valokuvaan käytetylle kameralle ominaisen kuvion, joka ei paljolti vaihtele kuvasta toiseen. Koska kuvio on kullekin kameralle tyypillinen, voidaan kamera kalibroida niin, että tämäntyyppinen kohina vähenee.

Pimeä virta on valokennon luoma heikko signaali, joka esiintyy, vaikka kennolle ei osuisi lainkaan valoa. Se johtuu lämpö- eli Johnson-Nyquist-kohinasta (Maître 2015, 262), joka on lämmöstä johtuvaa elektronien värähtelyä virtapiirissä. Pimeän virran kohina johtuu tämän ei-halutun signaalin vaihteluista.

Kennossa syntyvä pimeä virta johtuu kennon lämmöstä, joka vapauttaa elektroneja kennon piirissä. Pimeä virta on vahvempi toisissa soluissa ja heikompä toisissa, joten pimeän virran kohina on tyypiltään Fixed Pattern -kohinaa. Pimeä virta kennossa puolittuu aina kun sitä viilentää 8 - 9°C verran. (Hytti 2005, 5 - 6.) Tämän takia jotkin erikoiskäyttöön tarkoitetut kamerrat ovat viilennettyjä.

Pimeä virta noudattaa Maître'n mukaan Poissonin jakaumaa tai Bonceletin mukaan normaalijakaumaa, mutta jakauman oletusarvo ei riipu signaalista, vaan on verrannollinen sekä kennon lämpötilaan että valotusaikaan (Maître 2015, 262 & Boncelet 2005, 406). Jakauma kertoo vapautuvien

elektronien määrän, joka lisätään signaaliin. Kun valotusaika on pitkä, tulee pimeästä virrasta huomattava tekijä, jolloin kohinan vähentämiseen käytetään erikoistekniikoita.

Toinen Fixed Pattern -tyyppinen kohina on ”suola-ja-pippuri-kohina”. Se saa nimensä harvoista, mutta täysin mustista tai täysin valkoisista pikseleistä, jotka on ”ripoteltu” kuvaan. (Boncelet 2005, 403.) Tämä kohina johtuu virheistä tietyissä kennon soluissa, jotka antavat aina joko minimi- tai maksimiarvon digitaaliseksi dataksi muunnettaessa (Maître 2015, 264).

### 2.3.2 Muita kohinan lähteitä

Vaaleanpunaista kohinaa (pink noise, flicker noise) tavataan lähes kaikissa sähköisissä laitteissa sekä joissakin muissa tilastollisissa sovelluksissa. Kohinan syyllä ei ole löydetty yksimielisesti hyväksyttyä teoriaa. Sitä kutsutaan myös  $1/f$  -kohinaksi, koska sen vahvuus on kääntäen verrannollinen signaalin taajuuteen, nimessään esiintyvän funktion mukaisesti. Se on siis voimakkaimmillaan matalilla taajuuksilla. (Lundberg 2002, 3.)

Kun kameran luoma signaali muutetaan digitaaliseksi, tapahtuu kvantittumiskohinaa. Se johtuu digitaalisten numeroiden kvanttiluonteesta, eli siitä, että numerot voivat saada vain tiettyjä arvoja. Kvantittumiskohina on siis käytännössä pyöristysvirhe, jonka maksimiarvo riippuu mahdollisten arvojen tiheydestä. Arvojen määrä  $N$  riippuu digitaalisen kuvan bittisyvyydestä kaavan 5 mukaisesti:

$$N = 2^{\text{syvyys}}$$

Kvantittumiskohina on merkityksetön silloin, kun kuvan bittisyvyys on suurempi tai yhtä suuri kuin näyttölaitteen bittisyvyys, sillä silloin jälkimmäinen on rajoittava tekijä. Kuvan sävyjä muokkaamalla kohina voi kuitenkin tulla esiin, jolloin se näkyy posterisaationa eli sävyjen porrastumisena.

## 2.4 Dynaaminen alue

Valokuvauksesta puhuttaessa dynaaminen alue (Dynamic Range, DR) tarkoittaa kirkkaimpien ja tummimpien valotuksen arvojen, jotka kamera pystyy tallentamaan, suhdetta. Kameran dynaaminen alue mitataan usein valotusarvoina (EV, Exposure Value) eli stop-arvoina. Myös desibelejä voidaan käyttää. Valotusarvot ilmoitetaan logaritmisella asteikolla. Dynaamisen alueen voi laskea EV-arvoina kaavalla 6:

$$DR = \log_2 \frac{H_{max}}{H_{min}}$$

$H_{max}$  ja  $H_{min}$  ovat vastaavasti suurin ja pienin valotus. Dynaamisen alueen kaksinkertaistuessa se kasvaa yhdellä EV:llä. Dynaaminen alue on usein epätarkka käsite. Sen laskemiseksi täytyy ensin sopia, miten  $H_{max}$  ja  $H_{min}$  määritellään.

ISO 15739 on standardi joka määrittää valokuvan, muttei kameran, dynaamisen alueen. Sen mukaan alueen ylärajaksi määritellään piste, missä kuvan kirkkaus kyllästyy eli lakkaa saamasta ainutlaatuisia arvoja (leikkautuminen). Alarajaksi määritellään se kirkkauden arvo, missä signaali-kohinasuhde on tasan 1. Standardi ottaa tässä huomioon ainoastaan tempo-raalisen eli signaalista riippuvan kohinan. (Kerr 2008, 6 - 7.) Tämän alarajan alla signaalin ei voida enää sanoa varmuudella sisältävän tarkkaa informaatiota. Siksi rajan alle jääviä kuvan tummimpia alueita ei standardin mukaan pidetä osana kuvan dynaamisesta aluetta. Kohinalla ja dynaamisella alueella on siis tärkeä suhde.

Kuten muissakin kohinasta kärsivissä sähköisissä laitteissa, digitaalikameroissa esiintyy aina jonkin verran kohinaa, signaalista riippumatta. Tämä kohinan minimiarvo on kohinan lattia (noise floor). Signaalin vahvuuden pudotessa lattian alle signaali-kohinasuhde on alle 1, eli dynaamisen alueen alaraja on saavutettu. Jos tämä signaalista riippumaton kohina otetaan huomioon ISO 15739 -standardin vastaisesti, kuvan kohinan voidaan sanoa vaikuttavan suoraan sen dynaamiseen alueeseen asettamalla käytännössä sen alarajan.

## 2.5 Filmin rakeisuus

Termejä kohina ja rakeisuus käytetään arkikielessä usein synonyymeina valokuvista puhuttaessa. Rakeisuus on kuitenkin tietyn tyyppistä kohinaa, joka johtuu fyysisen valokuvausfilmin tekstuurista ja sen käyttäytymisestä luonteeltaan satunnaiselle fotonijakaumalle altistuessaan. Digitaalisessa valokuvassa ei siis ole rakeisuutta, ellei kuva ole skannaus fyysisestä valokuvasta. Toisaalta filmissä ei ole rakeisuutensa ja fotonikohinan lisäksi muita kohinan lähteitä.

Filmin pinnalla on miljoonia valolle herkkiä hopeahalidikristalleja eli rakeita. Altistuttuaan valolle hopeahalidit muuttuvat kemiallisessa prosessissa hopea-atomeiksi, jotka kehiteliuokselle altistuessaan muuttuvat edelleen nopeasti hopeametalliksi (Keller, Kampfner, Matejec, Lapp, Krafft, Frenken, Lührig, Scheerer, Heilmann, Meckl, Bergthaller, Hübner, Wolff, Morcher, Zahn, Buschmann, Blank, Tromnau, Plamper, Seiler, Nieswandt, Boie, Moisar, Winiker, Schellenberg & Ketellapper 2000, 6). Hopeasta muodostuu kuva filmille. Kemiallisen prosessin binäärinen luonteen takia (halidi on joko muuttunut hopeaksi tai ei) kuvan voidaan katsoa koostuvan täysin tummista ja täysin vaaleista pisteistä. Pisteiden jakauma on osin satunnainen fotonien luonteen takia. Filmin rakeet toimivat siis hyvin eri tavalla kuin digitaalisen kennon solut, jotka eivät toimi binäärisesti vaan voivat kerätä suuren määrän fotoneita.

Filmin kirkkaus tietyssä kohdassa mitataan optisena tiheytenä, joka saadaan laskemalla kehittyneiden rakeiden määrä pinta-alaa kohden. Optinen tiheys alkaa kasvaa vasta silloin, kun valotus saavuttaa tietyn raja-arvon. Valotuksen saavutettua toisen, suuremman raja-arvon filmin optinen tiheys ei enää kasva eli se on palanut puhki. (Keller ym. 2000, 11.) Näitä raja-arvoja voidaan pitää käytännössä mustana ja valkoisena ja ne asettavat filmille sen maksimaalisen dynaamisen alueen. Sen sijaan digitaalisen kennon valotusta ei mitata fotonien tiheytenä vaan määränä solua kohden. Lisäksi kennolla ei ole filmille ominaista valotuksen raja-arvoa, jolloin digitaalisen kuvan tummat alueet eivät leikkaudu samalla tavalla.

Filmin nopeus eli herkkyys riippuu eritoten rakeiden koosta. Suuremmat rakeet (herkkä filmi) ottavat valon fotoneita vastaan suuremmalla todennäköisyydellä kuin pienet ja siten kehittyvät nopeammin. Toisaalta suuremmat rakeet lisäävät filmin rakeisuutta, mikä saa kuvan näyttämään karkeammalta. (Keller ym. 2000, 28 - 29.)

### 3 KOHINAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kohinan vahvuus riippuu paljolti signaalin vahvuudesta ja sen vahvistamisesta. On useita tekijöitä, jotka vaikuttavat näihin ja siten myös kohinaan. Kameran kennolla ja virtapiirillä on myös ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kohinan vahvuuteen suoraan.

Eritellään kameran ja kuvan ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kuvassa näkyvään kohinan vahvuuteen tai luonteeseen ja selitetään, millä tavalla ne vaikuttavat. Joihinkin kohinaan vaikuttaviin tekijöihin valokuvaaja ei voi vaikuttaa muuten, kuin oikeanlaisen kameran hankkimalla. Toisiin voi vaikuttaa käytännössä, ja näiden tekijöiden ymmärtäminen on erityisen tärkeää kohinan hallitsemisessa.

#### 3.1 Transmittanssi

Koska kohina riippuu valon voimakkuudesta, hyvä valaistus on aina tarpeen kuvattaessa. Toisaalta on yhtä tärkeää, että mahdollisimman suuri osa valosta pääsee kennolle asti. Kuvattavan kohteen ja kennon välissä on esteitä: objektiivi, siinä mahdollisesti käytetyt suotimet sekä kennon pinnalla sijaitsevat suotimet ja muut rakenteet. Sony:n SLT-kameroissa (Single-Lens Translucent) objektiivin ja kennon välissä on lisäksi kiinteä, puoliläpäisevä peili, joka heijastaa huomattavan osan valosta kameran eri osaan automaattitarkennusta varten. Kappaleen kykyä päästää valoa lävitensä sanotaan transmittanssiksi.

Moderni kameran objektiivi koostuu useasta linssistä. Jokaiseen linssiin osuessaan valonsäde saattaa heijastua takaisin, tai jopa absorboitua linssin lasiin. Heijastuminen voi tapahtua kummalla tahansa linssin rajapinnalla. Objektiivin transmittanssiin vaikuttaa muun muassa käytettyjen linsien määrä, linssien materiaali ja niissä käytetty heijastusta ehkäisevä pinnoite. Linssissä käytetään yleensä mineraalilasia, johon on lisätty raskasmetallien suoloja (Maître 2015, 42 - 43).

Objektiivin läpäisemää valoa hallitaan säädettävällä himmenninaukolla. Erityisesti mobiililaitteiden kameroissa aukon koko pysyy tosin vakiona.



Aukon koko eli arvo ilmoitetaan F-numerona, joka on objektiivin polttovälin ja aukon halkaisijan suhde. Objektiiveissa ilmoitetaan yleensä sen suurin aukko eli pienin mahdollinen F-numero. Maksimiaukon koon sanotaan vaikuttavan objektiivin valovoimaisuuteen. F-numero vaikuttaa valotukseen suhteessa, joka näkyy kaavassa 7:

$$\frac{1}{N^2}$$

Kaava olettaa, että objektiivilla on täydellinen transmittanssi. Todellinen valotuksen määrä eli transmittanssi mitataan T-stop-arvona, mikä eroaa aina hieman F-numerosta. Elokuvakäyttöön tarkoitetut objektiivit ilmoittavat valovoimansa yleensä tässä formaatissa. Kummatkin arvot pyöristetään kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, esimerkiksi f/2.8 on tarkalta arvoltaan  $f/\sqrt{8}$ .

Objektiivissa esiintyy lisäksi yleensä optista vinjetointia, mikä tarkoittaa valaistuksen voimakkuuden heikkenemistä kuvan reunoja kohden. Kun valonsäde kulkee kameran aukon läpi viistossa kulmassa optiseen akseliin nähden, sen todennäköisyys pysähtyä objektiivin sisällä kasvaa kulman funktiona. Vinjetoinnin vaikutus kasvaa aukon kasvaessa, joten sitä voi minimoida valitsemalla pienen aukon. (Maître 2015, 48, 82.) Tämän takia valovoimainen objektiivi ei anna aukkonsa mukaista hyvää valotusta koko kovalle. Vinjetti näkyy kuvassa reunojaan kohti asteittaisesti tummenevana ympyränä.

### 3.2 Kenno

Kenno on kameran suurimpia kohinaan vaikuttavia tekijöitä, sillä suuri osa kohinasta syntyy siinä ja siinä sijaitsevassa virtapiirissä. Yhdessä ne muodostavat monimutkaisen rakenteen, joka vaihtelee kamerasta toiseen ja jonka tarkka tunteminen ei ole tarpeellista tämän työn puitteissa. Sen sijaan pyritään selvittämään kennon toimintaperiaate hyvin yleisellä tasolla, jotta pystytään ymmärtämään, miten kennon ominaisuudet vaikuttavat kuvan laatuun.

Kennon kyky kerätä valoa riippuu sen ja sen solujen pinta-alasta, mutta myös valolle herkän osan eli valodiodin pinta-alasta, sillä se ei täytä koko solun alaa. Toisaalta valoa voidaan kohdistaa valodiodille asettamalla sen päälle valoa taittava mikrolinssi. Osa valosta suodattuu ennen kuin se pääsee kennolle. Kennolla on myös valon aallonpituudesta riippuva kvanttihyötysuhde, joka kertoo kyseisen aallonpituuden omaavan fotonin todennäköisyyden tuottaa signaali. Kvanttihyötysuhde ei voi määritelmänsä mukaan olla suurempi kuin 1, ja tämä raja voi tulevaisuudessa huomattavasti hidastaa kameroiden kehitystä.

Hyvä valonkeräämiskyky vahvistaa signaalia, mutta kameran virtapiiri lisää siihen kohinaa. Piiri pyritään suunnittelemaan niin, että kohinaa on mahdollisimman vähän ja että sen laatu on esteettisesti hyväksyttävää. Tähän vaikuttaa paljolti se, missä vaiheessa ja miten signaalia vahvistetaan. Täysin kohinaton virtapiiri on fyysinen mahdottomuus.

### 3.2.1 Kennon tyyppi

Aiemmin digitaalisissa kameroissa käytettiin enimmäkseen CCD-kennoja (charge-coupled device). Fotonin osuessa CCD-kennoon siinä tapahtuu valosähköinen ilmiö, jossa fotonin sisältämä energia nostaa elektronin suuremmalle energiatasolle (Boncelet 2005, 405). Jokaisen solun näin luoma varaus säilötään niissä sijaitseviin potentiaalikuoppiin ja siirretään ensin pystysuorien ja sitten yksittäisen vaakasuoran kanavan kautta vahvistimeen, joka luo varauksista jännitteen. Analogia-digitaalimuunnin muuntaa jännitteen digitaalseksi harmaasävydataksi. Koska jokaiselle solulle tehdään samat operaatiot, niitä vahvistetaan saman verran, mikä yhdenmukaistaa niissä esiintyvää kohinaa. (Maître 2015, 93 - 94.)

CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) on uudempi kennotyyppi. CMOS-kennoissa luku toimii hajasaantimuistina (RAM, Random Access Memory) tapaan eli yksittäisiä soluja voidaan lukea mielivaltaisessa järjestyksessä. Luku on nopeaa ja vie vähän energiaa CCD-kennoihin verraten. CMOS-kennossa solujen sarakkeet myös vahvistetaan erikseen en-

nen koko signaalin vahvistusta. (Tian 2000, 3.) Erot sarakkeiden vahvistimissa johtavat kohinaan, joka luo CMOS-kennoille ominaisen raidakkaan kuvion (Aguerreberere ym. 2014, 4).

Alun perin CMOS-kennot olivat passiivista tyyppiä PPS (passive pixel sensor), nykyään aktiivista tyyppiä APS (active pixel sensor). CMOS APS-kennossa jokaisella solulla on siinä sijaitseva oma vahvistin ja joskus myös analogia-digitaalimuunnin, mitkä parantavat signaali-kohinasuhdetta huomattavasti (Maître 2015, 95). APS-kennoilla on myös niille ominainen kohinan lähde (reset noise), joka syntyy lämmön vaihteluista, kun kennon solut ladataan aina ennen valotusta (Maître 2015, 263).

CMOS-kennoissa esiintyy perinteisesti enemmän kohinaa kuin CCD-kennoissa. Niiden suosio nousi aluksi halvemman hintansa ja pienemmän energiankulutuksensa takia. Nykyään CMOS-kennot yltyvät CCD-kennoihin verrattavaan kuvanlaatuun, ja suurin osa tuotetuista kameroista käyttää CMOS-teknologiaa.

Kennot voidaan myös jaotella etu- ja takavalaistuihin. Suurin osa kennoista on etuvalaistuja mutta takavalaistut yleistyvät varsinkin mobiililaitteissa. Etuvalaistussa kennossa solujen tarvitsemat virtapiirit ovat niiden päällä, mikä heikentää valon pääsyä soluun asti. Takavalaistuissa kennoissa kaikki piirit ovat siirretty kennon taakse. Takavalaistun kennon huono puoli on ylikuuluminen, eli kohina jossa fotonit tai elektronit ohjautuvat väärään soluun (Kitamura, Aikawa, Kakehi, Yousyou, Eda, Minami, Uya, Takegawa, Yamashita, Kohyama & Asami 2012, 1). Se on ongelma erityisesti silloin, kun solut jakautuvat kennolle tiheästi (Maître 2015, 263).

### 3.2.2 Solun koko

Valotus (yksikkö lx/s) saadaan kaavasta 8:

$$H_v = E_v t$$

$E$  on valaistusvoimakkuus lukseissa ja  $t$  aika sekunneissa. Valotus kertoo kuvan kirkkauden tietyssä kohtaa. Jos halutaan arvioida yksittäisen solun

signaalin vahvuutta, täytyy laskea sen keräämä valomäärä (yksikkö lm/s) kaavalla 9:

$$Q_v = H_v A$$

Solun keräämä valomäärä ja siten sen signaalin vahvuus riippuu siis lineaarisesti solun pinta-alasta  $A$ . Oletetaan kameran kohinan olevan signaalin neliöjuuri eli koostuvan täysin Poisson-kohinasta ja solun muodoksi neliö. Silloin yksittäisen solun signaali-kohinasuhde riippuu solun sivun pituudesta  $x$  kaavan 10 mukaisesti:

$$SNR = \sqrt{H_v A} = \sqrt{A} \sqrt{H_v} = \sqrt{x^2} \sqrt{H_v} = x \sqrt{H_v}$$

Tällöin solun sivun pituuden kasvaessa SNR kasvaa siis lineaarisesti.

### 3.2.3 Kennon koko

Yksittäisen solun signaali-kohinasuhde ei välttämättä ole tarkka malli koko valokuvan kohinalle. Se toimii silloin, kun vertailtavien kuvien pikselit suurennetaan saman kokoisiksi niitä tarkasteltaessa, eli lopullisen kuvan koko riippuisi täysin kuvan resoluutiosta. Käytännössä lopullisen kuvan koko riippuu kuitenkin lähinnä sille asetetuista vaatimuksista ja mediasta, jossa se esitetään. Tällöin voi olla mielekkäämpää laskea kuvan SNR koko kennon keräämän valomäärän avulla.

Kennoa voidaan tarkastella yksittäisenä elementtinä, jonka keräämä signaali riippuu lineaarisesti kennon pinta-alasta, aivan kuten yksittäisen solun tapauksessa. Signaalista riippuva kokonaiskohina lasketaan myös samalla tavalla. Tämän kilpailevan näkökulman mukaan solun koolla ja siten kennon resoluutiolla ei ole merkitystä kohinan määrään, kunhan kennon koko vain pysyy samana. Tämä laskentatapa ei tosin ole täysin tarkka silloin, kun otetaan huomioon signaalista riippumaton kohina. Silloin solujen koolla saattaa olla pieni merkitys kohinaan.

Pienten solujen signaalissa esiintyy kyllä enemmän kohinaa, mutta juuri niiden koon takia niiden vaikutus kuvaan on suhteellisen merkityksetön.

Kun pikselit ovat tarpeeksi pieniä, niitä ei enää nähdä yksittäisinä pikseleinä, vaan ne sekoittuvat toisiinsa silmän soluissa, kuten mustavalkofilmikään ei näytä koostuvan mustista ja valkoisista pisteistä. Jos digitaalinen kuva esitetään kokonaisena näyttölaitteella, jonka resoluutio on kuvan resoluutiota pienempi, nähtävät pikselit ovat usean kuvan pikselin keskiarvo, mikä vähentää kohinaa. Samanlaista interpolointia käytetään, kun kuvan resoluutiota pienennetään.

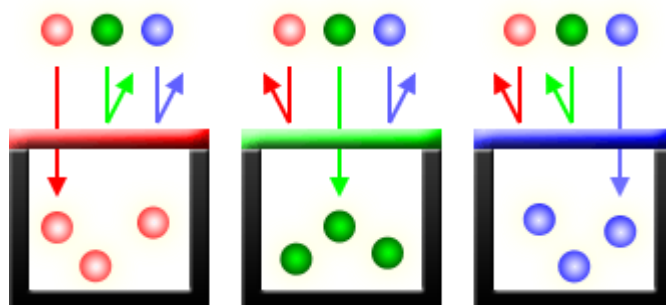
Kennon koko ja kuvasuhde noudattavat enemmän tai vähemmän tarkasti tiettyjä formaatteja, jotka ovat paljolti jäänteitä filmiformaateista. Ammatti- ja puoliammattilaiskäytössä yleisimpiä formaatteja ovat kinokoko (36 x 24mm), APS-C (noin 23 x 15mm) ja Micro Four Thirds (17,2 x 13mm). Kennon koko vaikuttaa kameran hintaan, mutta ei ole aina sen merkittävin tekijä.

#### 3.2.4 Bayer-suodin

Tähän asti työssä kameran kennoa on käsitelty laitteena, joka tallentaa kuvan kirkkauden sen eri kohdissa. Sellainen laite riittäisi harmaasävykuvien, muttei värikuvien tallentamiseen. Normaalisti näkevän ihmissilmän verkkokalvolla on kolmenlaisia valolle herkkiä tappisoluja, jotka ovat herkimpiä punaista, vihreää ja sinistä väriä vastaaville valon aallonpituuksille. Näistä väreistä käytetään jatkossa lyhennettä RGB (Red, Green & Blue). Solujen aktivoituminen tietyssä suhteessa luo aistimuksen tietyistä väreistä. Sekoitamalla RGB-valoa voi silmässä luoda aistimuksen lähes mille tahansa valon värille. Siksi näyttölaitteissa käytetään RGB:tä. Painettaessa värejä taas sekoitetaan mustan lisäksi syaania, magentaa ja keltaista, jotka vastaavasti suodattavat punaista, vihreää ja sinistä valoa. Realistisen värikuvan luomiseksi kameran täytyy osata erottaa nämä värit toisistaan.

Toisin kuin silmän solut, kameran kennon solut ovat identtisiä eivätkä kykene erottamaan vastaanottamiensa fotonien aallonpituutta eri väreitä. Sen sijaan kennon päällä on Bayer-suodin: värikäs lasinen mosaiikki, joka koostuu RGB-värien mukaisista palasista. Jokaisen solun päällä on yhden

värinen palanen, joka suodattaa valoa ja päästää läpi vain tiettyjä aallonpituuksia. Näin yhteen soluun pääsee vain tietyn väristä valoa, kuten kuva 2 havainnollistaa. Arvot tallennetaan digitaalisen kuvan R- G- ja B-värikanaviin.



KUVA 2. Bayer-suotimen toimintaperiaate (Cambride in colour 2017)

Bayer-suodatetussa RAW-kuvassa jokaisella pikselillä on dataa vain yhdessä värikanavassa. Värikuvan luomiseksi jokainen pikseli tarvitsee kaikkia kolmea väriä. Tämä saavutetaan tallennettujen arvojen interpoloinnilla, jota sanotaan demosaicingiksi, tässä työssä mosaikoinnin poistoksi. Koska vain osa kennon soluista tallentaa kutakin väriä, jokaisen värikanavan resoluutio on käytännössä pienempi kuin kameran resoluutio. Bayer-suotimessa on eniten vihreitä elementtejä, koska ihmissilmä on herkin vihreälle valolle ja koska se havaitsee siinä sävyeroja herkimmin. (Pound 2015.)

Bayer-suodin vaikuttaa kuvan kohinaan ainakin kahdella tavalla. Koska se suodattaa valoa, se myös heikentää sen transmittanssia ja siten signaali-kohinasuhdetta. Koska valo jaetaan suotimessa kolmeen eri väriin, valotuksen voidaan ajatella tippuvan noin kolmasosaan. Joissakin kameroissa Bayer-suodin on jätetty tästä syystä pois, jolloin ne tuottavat harmaasävykuvia. Toinen suotimen merkitys on kohinan muuttuminen värilliseksi. Koska jokainen kennon solu antaa toisista soluista riippumattoman, osittain satunnaisen signaalin, ja koska eri solut tallentavat eri värejä, yksittäisten pikselien värit voivat vaihdella huomattavasti. Värikohina voi jopa tuottaa koko kuvaa hallitsevan värivirheen. Mosaikoinnin poistossa käytetty algoritmi vaikuttaa myös kohinan laatuun.

### 3.3 Signaalin vahvistaminen

Mitä tahansa signaalia vahvistaessa myös signaalissa oleva kohina vahvistuu vääjäämättä. Kameran kennon antaman signaalin vahvistaminen nostaa kuvan kirkkautta, ja samalla kohinan kirkkaus kasvaa. Valokuvan kirkkautta täytyy vahvistaa silloin, kun valitut kamerasulkuriikot ja suljinaika eivät anna tarpeeksi hyvää valotusta. Kuvan kirkkautta voi nostaa joko kamerasulkuriikkoa nostamalla tai jälkikäsitteilyssä. Jälkimmäinen tapa mahdollistaa myös kuvan kirkkautta säädyttömästi paikallisesti, jolloin kohina voi mistä vain valituissa alueissa tai sävyissä.

Jos vahvistin oletetaan täydelliseksi, eli se ei aiheuta signaaliin lisää kohinaa, vahvistaa se signaalia ja kohinaa samassa suhteessa. Tällöin signaali-kohinasuhde pysyy vakiona. Aiemmin on todettu, että vahvalla signaalilla on yleensä hyvä SNR. Heikolla signaalilla SNR on huono, vaikka sitä jälkikäteen vahvistettaisiin. Siksi sähköistä informaatiota tallennettaessa kannattaa käyttää signaalia, joka on jo alun perin mahdollisimman vahva.

Kun signaalia vahvistetaan, voi se saavuttaa paikoin niin suuren amplitudin, että sitä ei pystytä tallentamaan. Tällöin signaali leikkautuu (clipping) ja informaatiota menetetään pysyvästi. Leikkaavissa kohdissa signaalista tallennetaan suurin mahdollinen arvo, todellisesta arvosta riippumatta. Valokuvissa tämä näkyy liian kirkkaiden alueiden puhki palamisella, ja sitä sanotaan myös kyllästymiseksi. Sekä leikkaaminen että kohinan vahvistaminen rajoittavat signaalin dynaamista aluetta.

#### 3.3.1 ISO-arvo

Yksittäisen solun keräämä signaali riippuu sille osuvasta valomäärästä sekä kennon kvanttihyötysuhteesta, joka kertoo, kuinka suuri prosentti fotoneista muutetaan onnistuneesti elektroneiksi. Kvanttihyötysuhde on kennon ominaisuus, eikä sitä voi muuttaa (Dietz & Eberhart 2015, 2). Kvantti-

hyötysuhde ja valomäärään vaikuttava solun pinta-ala yhdessä toimivat filmin herkkyteen verrattavalla tavalla: ne kertovat signaalin vahvuuden tietyllä valotuksella.

Digitaalisen kameran herkkydellä tarkoitetaan kuitenkin yleensä säädettävää arvoa, jonka avulla saadaan kuvalle tietty kirkkaus. Arvoa kutsutaan ISO-herkkydeksi ja se tulee ISO-järjestön standardista ISO-12232. Arvo vastaa suurin piirtein filmin herkkyttä mittaavaa ISO-herkkyttä (ISO-5800 värillisille negatiivifilmeille). Filmin ja digitaalisen kameran ISO-herkkydet ovat yhteensopivia standardeja, mutta ovat käytännössä aivan eri asioita. Digitaalinen ISO-herkkyys lasketaan yleensä standardin esittelemän kylästysmetodin avulla. Herkkyys  $S_{sat}$  saadaan tällöin kaavasta 11:

$$S_{sat} = \frac{78}{H_{sat}}$$

$H_{sat}$  on se valotuksen arvo, jossa signaali kyllästyy eli saa maksimiarvonsa (Maître 2015, 139).

Käytännössä kamerasta valitaan haluttu ISO-arvo. Kamerassa sijaitseva analoginen vahvistin vahvistaa sähköistä signaalia ISO-arvon mukaisesti ennen kuin se muutetaan analogia-digitaalimuuntimessa digitaaliseksi dataksi (Kerr 2008, 4). Vahvistus on peruuttamaton toimenpide, myös kennon raakadataa käytettäessä. Koska eri kennoilla on erilaiset kvanttihyötysuhteet ja koska ne keräävät erilaisen valomäärän, pitää kennon antamaa signaalia vahvistaa tietyn verran niin, että lopullisen kuvan kirkkaus on ISO-standardin mukainen kamerasta riippumatta. Esimerkiksi ISO 1600 -arvon saavuttamiseksi yhden kennon signaalia täytyy vahvistaa enemmän kuin toisen, fysikaalisesti herkemman kennon signaalia.

ISO-arvo ei siis ole varsinaisesti digitaalisen kameran herkkyys, vaan kennon ominaisuuksien ja signaalin sähköisen vahvistamisen yhteistulos. ISO-arvo on suoraan verrannollinen vahvistuksen määrään ja siten myös kohinan määrään.

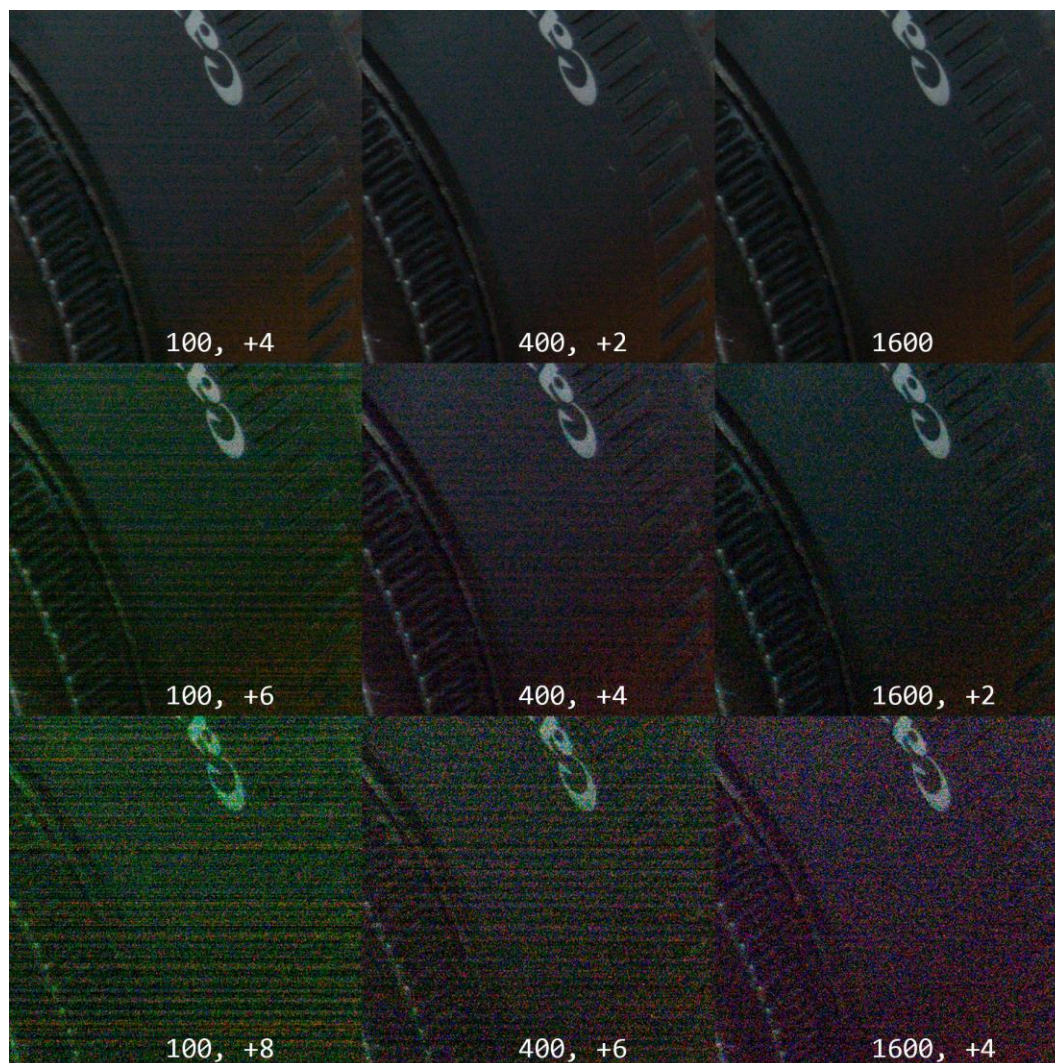


### 3.3.2 ISO-varianssi

Kamerasta aiheutuva kohina voidaan jakaa ylävirran ja alavirran kohinaksi (upstream eli front end, downstream eli back end). Ylävirraksi lasketaan kaikki ennen ISO-arvon mukaista analogista vahvistamista sijaitsevat kohinan lähteet, alavirraksi kaikkia sen jälkeen sijaitsevia. Vahvistin vahvistaa ainoastaan ylävirran kohinaa, sekä sitä ennen tapahtuvaa fotonikohinaa. Digitaalinen vahvistaminen sen sijaan vahvistaa kaikkia kohinan lähteitä, joten se on huonompi tekniikka hyvän signaali-kohinasuhteen saavuttamiseksi. (Cox 2017.) Digitaaliseen vahvistamiseen kuuluu myös kuvan kirkkauden nosto jälkikäsittelyssä. Tähän kannattaa käyttää RAW-kuvaa, sillä sen suuri bittisyvyys ja pakkausartefaktien puute mahdollistavat kirkkauden noston ilman porrastumista tai muita ongelmia.

Suurilla ISO-arvoilla alavirran kohina jää mitättömäksi muuhun kohinaan nähden, sillä sitä ei tarvitse vahvistaa. Jos sen sijaan otetaan kuva pienellä ISO-arvolla ja sitä vahvistetaan digitaalisesti, alavirran kohinasta voi tulla huomattava laatua heikentävä ominaisuus lopullisessa kuvassa.

Kuvassa 3 näkyy yhdeksän erilaisilla asetuksilla otettua mutta yhtä kirkasta kuvaa. Kussakin kuvassa sijaitseva ensimmäinen luku kertoo kuvan ISO-arvon, toinen jälkikäsittelyssä lisätyn valotusarvon. ylimmällä rivillä kuvissa on vähiten kokonaiskohinaa, alimmalla eniten. Ensimmäisessä sarakkeessa on eniten alavirran kohinaa, viimeisessä vähiten. Kuvasarjasta tulee esiin myös alavirran kohinan raidakas luonne sekä signaalin vahvistamisesta aiheutuvat värivirheet.



KUVA 3. ISO-varienssitesti

Kuvasarja demonstroi ISO-varienssia, eli sitä, kuinka suuri ero ISO-arvon nostamisella ja digitaalisella vahvistamisella on kuvan kohinaan. Se on kameras ominaisuus, joka riippuu kameras alavirran kohinan määrästä. Jos sitä ei olisi yhtään, olisi kamera ISO-invariantti. Tämä näkyisi niin, että jokaisen sarakkeen kuvat sisältäisivät yhtä paljon kohinaa. Koe todistaa, että käytetty kamera on ISO-variantti.

ISO-invarienssin eli ISO-arvottomuuden mahdollistaa modernien kameroiden suuri bittisyvyys, johon mahtuu kuvattavan kohteen koko dynaaminen alue ilman, että signaalia tarvitsee vahvistaa. Ideaalinen ISO-arvoton kamera antaa laadultaan identtisen kuvan käytetystä ISO-arvosta riippumatta, kunhan kuvien valotus on sama. Dietz ja Eberhart eivät löytäneet

testeissään aidosti ISO-arvotonta kameraa. (Dietz & Eberhart 2015, 2 – 3, 9.) Monissa uusissa kameroissa on kuitenkin niin vähän alavirran kohinaa, että niitä pidetään käytännössä ISO-invariantteina.

## 4 KOHINAA VÄHENTÄVÄT TEKNIIKAT

Kuvan kohinaa ei voi täysin poistaa, ainakaan muuttamatta koko kuvan olemusta. Sitä voi kuitenkin vähentää, mikä on usein tarpeellista. Yksi lähestymistapa kohinan vähentämiseksi on ottaa kuva tiettyjä tekniikoita käyttäen. Toinen on digitaalisessa kuvassa jo esiintyvän kohinan rajoittaminen siihen tarkoitetuilla algoritmeilla. Kolmas tapa on yhdistää digitaaliset ja käytännön tekniikat ottamalla sarja kuvia, joita eri tavoin yhdistelemällä voi kohinaa vähentää.

Käytännön tekniikat ovat usein objektiivisesti parempia kuin luottaminen algoritmeihin, jotka teoriassa tuottavat välttämättä kuvaan artefakteja. Toisaalta digitaalinen kohinanpoisto voidaan suorittaa jälkikäteen ilman suunnitelmia ja pienemmällä vaivalla. Metodien valitsemisessa pitää punnita kuvan tärkeyttä ja siinä esiintyvän kohinan vakavuutta. Erikoistekniikat eivät ole aina vaivan arvoisia.

Kappaleessa esiteltävissä kokeissa käytettiin Nikon D5200 -kameraa, jossa on 24 megapikselin APS-C-koon kenno. Kenno on tyypiltään etuva-laistu CMOS APS-kenno. Kamera ottaa 14 bitin RAW-kuvia. ISO-herkkyys asetetaan välillä 100-25600, mutta arvon 6400 ylitettäessä signaalin vahvistus toimii eri tavalla, joten sitä ei suositella. Automaattiasetuksilla kamera ei koskaan ylitä tuota arvoa. Kuvia tarkasteltaessa pitää ottaa huomioon, että pienennetyissä kuvissa kohinaa ei helposti huomaa. Siksi tarkasteltavaksi on otettu myös suurennoksia.

### 4.1 RAW-valokuvaus

Kamera tallentaa kennosta keräämänsä datan kameralle natiiviin RAW-formaattiin. RAW ei ole lyhenne, vaan viittaa siihen, että data on käsittelemätöntä, raakaa. Se ei ole myöskään RAW-kuville yleinen tiedostopääte, sillä formaatteja on useita. Käsittelemätön RAW-kuva ei näytä realistiselta, valmiilta valokuvalta, vaan se pitää "kehittää". Tähän kuuluu esimerkiksi mosaikoinnin poisto, valko- ja väritasapainon säätäminen sekä tone mapping. Se on prosessi, joka määrää, mitkä digitaalisen kuvan väriavaruuden

arvot vastaavat kennon keräämän datan arvoja. RAW-tiedosto sisältää myös metadataa, joka muun muassa kertoo, miten edellä mainitut toimenpiteet tulee suorittaa. Metadatan ansiosta RAW-kuva näyttää suurin piirtein normaalilta, valmiilta valokuvalta heti kun sen avaa RAW-kuvien käsittelyyn tarkoitettussa sovelluksessa. Metadata sisältää myös pienen JPG-kuvan, joka mahdollistaa kuvan esikatselun kameran tai tietokoneen ruudulta. Sovelluksen avulla kuvan kehittämisessä käytettyjä parametreja pääsee kuitenkin muokkaamaan, sillä kennon raakadata on edelleen jäljellä ja koska metadata antaa parametreille vain viitteelliset arvot.

Kameran asetuksista pystyy säätämään, tallentaako kamera RAW-kuvia vai antaako kameran suoraan luoda valmiin JPG-kuvan prosessoimalla väliaikaisesti tallentamaansa RAW-kuvaa, minkä jälkeen väliaikaistiedosto poistetaan. Prosessointi on peruuttamaton toimenpide. JPG on yleinen, valokuvaan hyvin soveltuva formaatti, joka pakkaa kuvan häviöllisesti. Tämän työn puitteissa on paljon mielekkäämpää ottaa talteen RAW-kuvia, sillä tarkoituksena on nähdä kuvan kohina sellaisena kuin se on. Tästä näkökulmasta katsottuna valmis JPG-kuva on huono vaihtoehto ainakin seuraavien seikkojen takia:

- Kameran tekemä tuhoisa tone mapping antaa usein kennon tallentaman dynaamisen alueen ylä- ja alapään leikkautua.
- Kamera saattaa vähentää kohinaa digitaalisesti.
- Kamera saattaa terävöittää kuvaa, mikä vaikuttaa kohinan näkyvyyteen.
- JPG-kuvien matalampi bittisyvyys ja häviölliset pakkausalgoritmit luovat omaa kohinaansa ja rajoittavat kuvan käsittelymahdollisuuksia.

Tämän työn kokeissa käytetään pääasiallisesti RAW-kuvia, jotka prosessoidaan manuaalisesti ja muunnetaan valmiiksi JPG-kuviksi. Näin voidaan varmistua, että ei-toivottua prosessointia ei tapahdu.

## 4.2 Dynaamisen alueen hallinta

Aiemmin on todettu, että signaalin vahvuus, ja siten myös valotuksen voimakkuus, vaikuttaa signaali-kohinasuhteeseen positiivisesti. Siksi on periaatteessa suotavaa ottaa kuva mahdollisimman suurella valotuksella ja tarvittaessa tummentaa kuvaa jälkikäsittelyssä. Ongelmana on kameran rajallinen dynaaminen alue: liian suuri valotus saa kirkkaat alueet palaamaan puhki, jolloin niistä ei tallennu mitään mielekäästä tai todenmukaista informaatiota.

Ratkaisu on hallita maiseman dynaamista aluetta rajoittamalla kirkkaimpien alueiden valotusta ja samalla nostamalla varjokohtien valotusta. Yksi tapa saavuttaa tämä on käyttää suotimia kameran objektiivissa. Asteittainen harmaasuodin tummentaa toisen puolen kuvasta. Jos maisemassa on selvä raja, kuten horisontti, jonka toinen puoli on liian kirkas toiseen verrattuna, kiinnittämällä oikeantyyppisen suotimen sopivasti objektiin saadaan kuvan dynaamista aluetta laistettua. Taivaalta sironnut valo sekä peilimäiset heijastukset ovat usein polarisoituneita tietyistä kulmista tarkasteltaessa, joten niitä voi tummentaa myös polarisaatiosuotimella. Suodin perustuu siihen, että tietyssä kulmassa jo polarisoitunut valo ei pääse toisessa kulmassa polarisoivan suotimen läpi.

### 4.2.1 Valotusten sekoitus

Toinen tapa on ottaa kaksi tai useampi kuva eri valotuksilla ja sekoittaa ne jälkikäsittelyssä, luoden näin HDR-kuvan (High Dynamic Range). Tähän tarkoitukseen käytetään usein erikoistyökaluja, jotka käyttävät monimutkaisia algoritmeja kuvien sekoitukseen. Tässä kappaleessa kokeillaan sen sijaan manuaalista sekoitustekniikkaa, joka on teknisesti yksinkertaisempi ja vähemmän käytetty, mutta johtaa usein luonnollisempaan tulokseen. Seuraavaksi esitellyt menetelmät eivät ole vakiintuneet, vaan kirjoittajan kokeilujen tulos.

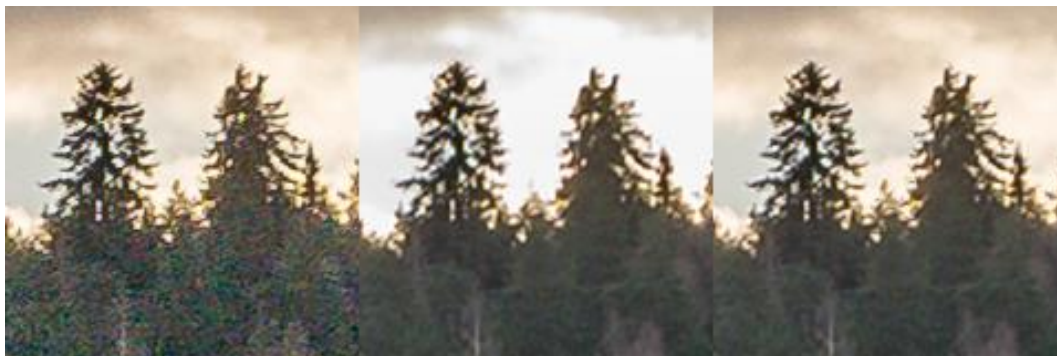
Otettiin kaksi RAW-kuvaa maisemasta eri valotuksilla, toinen alivalotettu -2 EV ja toinen ylivalotettu +2 EV. Myös kolmas, kameran mittarin mukaan oikein valotettu kuva otettiin, mutta sen käyttö huomattiin tuloksen kannalta

mitättömäksi. Usean eri valotuksen ottaminen käy helpoiten käyttämällä monista kameroista löytyvää valotuksen haarukointia. Kuvat käsiteltiin Adobe Camera Raw -ohjelmassa. Ensin kuvien valotukset korjattiin niin, että se on molemmissa kuvissa sama. Toisin sanoen valotukset normalisoitiin. Sitten kuvia käsiteltiin täysin identtisesti, litistään niiden dynaamista aluetta ja tekemällä muutamia luovia muokkauksia. Lopuksi kuvan kohdistettiin toistensa päälle tarkasti, jotta niiden sekoittaminen olisi mahdollista.

Kuvat 4a ja 4b ovat vastaavasti alivalotettu ja ylivalotettu kuva käsittelyn jälkeen. Kuvat ovat lähes identtisiä, suurimpina eroina ylivalottuneen kuvan puhki palaminen ja alivalottuneen kuvan suuri kohina, jonka tosin huomaa vasta suurennoksessa. Alivalottuneesta kuvasta luodaan sen kirkkauden perusteella kuvan 4c maski eli sapluuna, joka määrää kuvien sekoitussuhteen. Kuva 4d on molempien valotusten sekoitus. Kuvassa 5 on suurennokset alivalottuneesta, ylivalottuneesta ja sekoitetusta kuvasta. Kuvien puutteet ja niiden korjautuminen viimeisessä kuvassa näkyvät selvästi.



KUVA 4. Valotusten sekoittaminen sapluunan avulla



KUVA 5. Suurennot ali- ja ylivalottuneesta sekä sekoitetusta kuvasta

Yleensä valotusten sekoituksessa eri valotuksia ei juuri käsitellä ennen sekoitusta, vaan lopullisen kuvan dynaamista aluetta ja sävyjen jakaumaa hallitaan lähinnä maskeilla. Käytetyssä metodissa kuvaa voidaan sen sijaan käsitellä kuin mitä tahansa RAW-kuvaa, mikä on monelle tutumpi työskentelytapa. Kuvien sekoitus on paljon helpompi tehdä luonnollisesti, sillä se vaikuttaa lähinnä kuvan laatuun, ei sen sävyihin. Tämän takia maskinkaan ei tarvitse olla kovin tarkka.

#### 4.2.2 Ylivalotus

Usean valotuksen ottaminen ei aina ole mahdollista tai vaivan arvoista. Yksinkertaisin tapa parantaa valokuvan signaalia on ottaa kuva mahdollisimman voimakkaalla valotuksella. Kuvan voidaan jopa antaa tahallisesti ylivalottua. Kuvan kirkkautta voi tarvittaessa laskea jälkikäsitelyssä. Tällä tavoin voidaan emuloida kameran minimiä matalampaa ISO-herkkyyttä, tosin ilman dynaamisen alueen laajenemista. Metodi on karkea, mutta tehokas.

Normaalisti oikea valotus mitataan valitsemalla maisemasta sävy, joka tulkitaan keskiharmaaksi. Ainoastaan sävyn kirkkaudella, ei värillä, on väliä. Valotusmittari mittaa halutun sävyn kirkkauden ja laskee, millaisilla asetuksilla kyseinen sävy saadaan tallennettua keskiharmaaksi, joka on 18% maksimiarvosta. Valotusmittari ei mittaa kappaleen heijastamaa valoa, vaan kappaleelle lankeavaa valoa. Nykyään käytetään yleensä kameraan sisäänrakennettua valotusmittaria, joka mittaa valotuksen automaattisesti.



Kameroissa on erilaisia algoritmeja, jotka valitsevat mitattavan pisteen ja laskevat valotuksen. Jotkut algoritmit mittaavat useita pisteitä, joista otetaan painotettu tai painottamaton keskiarvo. Ylivalotus tarkoittaa voimakkaamman valotuksen käyttämistä, kuin mitä mittari suosittelee.

Kennossa tapahtuva valosähköinen ilmiö toimii lineaarisesti, mikä tarkoittaa, että kenno tallentaa arvoja lähes virheettömästi, kunnes saavutetaan raja-arvo, missä signaali leikkautuu. Siksi digitaalisella kameralla otettuja kuvia voi ylivalottaa lähes huoletta niin kauan, kun tätä raja-arvoa ei saavuteta. Maksimaalinen ylivalotus, joka pystytään tätä ehtoa noudattaen saavuttamaan, riippuu kuvan kirkkaimman pisteen suhteesta valittuun keskiharmaaseen. Joskus valokuvaaja ei välitä, että kuvan kirkkaimmat alueet palavat puhki. Tällöin kuvaa voi ylivalottaa vielä enemmän. Valotuksen valitsemista kuvan kirkkaimpien alueiden perusteella keskiharmaan sijaan kutsutaan ETTR-tekniikaksi (expose to the right).

Maisemasta otettiin kuvasarja, joka näkyy kuvassa 6. Ensimmäinen kuva otettiin kameran suosittelmalla valotuksella, jonka kamera mittasi kuvan keskipisteen ympärille painotettuna keskiarvona. Kuvasta tuli hieman tumma, mutta sen ansiosta kirkas taivas piirtyi kennolle hienosti. Seuraavat kuvat otettiin antamalla valotusarvon kasvaa asteittain. Sen jälkeen kuvien valotus korjattiin vähentämällä niistä ylivalotuksessa käytetty valotusarvo. Kokeen tarkoitus oli tarkastella, miten dynaamisen alueen yläpää kärsii valotusta kasvattaessa ja arvioida, kuinka suurella ylivalotuksella saadaan vielä siedettävä tulos.



KUVA 6. Asteittainen ylivalotus ja valotusten normalisointi

Yhden EV:n ylivalotus tuottaa käytännössä identtisen tuloksen normaalille valotukselle, mikä todistaa, että maiseman koko dynaaminen alue mahtuu vielä kuvan sisään, ja että kameran valitsema valotus oli turhan tumma. Toisaalta se osoittaa myös RAW-kuvien kykyä pelastaa kuvan huippukohtia. +2 EV:n ylivalotus heikentää taivaan väriä lievästi ja pilvet alkavat palttaa puhki. +3 EV polttaa osan taivaasta kokonaan puhki, tuhoamalla samalla sen värit. Veden heijastukset leikkaavat myös lievästi, ja lumen väri alkaa lievästi muuttua. +4 EV on tuhonnut lähes koko taivaan ja osan vedestä. Lumi lähestyy väriltään syaania. +5 EV saa kuvan menettämään lähes kaikki värinsä.

Kuvasarjasta huomaa, että kuvat näyttävät tummenevan sarjan edetessä. Se johtuu siitä, että leikkaantuneet alueet ovat saaneet maksimiarvonsa,

ja valotusta jälkikäsitellyssä laskeissa nämä alueet tummenevat myös, saaden harmaan, tasaisen sävyn. Tämän voi välttää laskemalla kuvan valotusta valikoivasti, niin että puhki palaneet kohdat säilyvät valkoisina. Värisävyjen muuttuminen ja lopulta tuhoutuminen selittyy sillä, että kuvan jokainen värikanava voi myös leikkautua muista kanavista itsenäisesti.

Koe näyttää, että kyseistä maisemaa kuvattaessa kuvaa voi ylivalottaa yhdellä EV:llä, jopa kahdella, jos pilvien tekstuuria ei pidetä kuvalle välttämättömänä. Kahden EV:n ylivalotus voimistaa signaalia kertoimella 4. Tällöin signaali-kohinasuhde paranee kertoimella 2, jos kaikki kohina oletetaan Poisson-kohinaksi. Kuvassa 7 näkyy suurennokset kuvasarjan ensimmäisen ja viimeisen kuvan vasemmasta alanurkasta. Jälkimmäisessä on murto-osa ensimmäisen kohinasta, osoittaen kuinka ylivalottamalla voidaan parantaa tummien alueiden laatua kirkkaiden alueiden hinnalla. Veden liike kuvien välillä saattaa hankaloittaa vertailua.



KUVA 7. Suurennokset normaalista ja ylivalottuneesta kuvasta

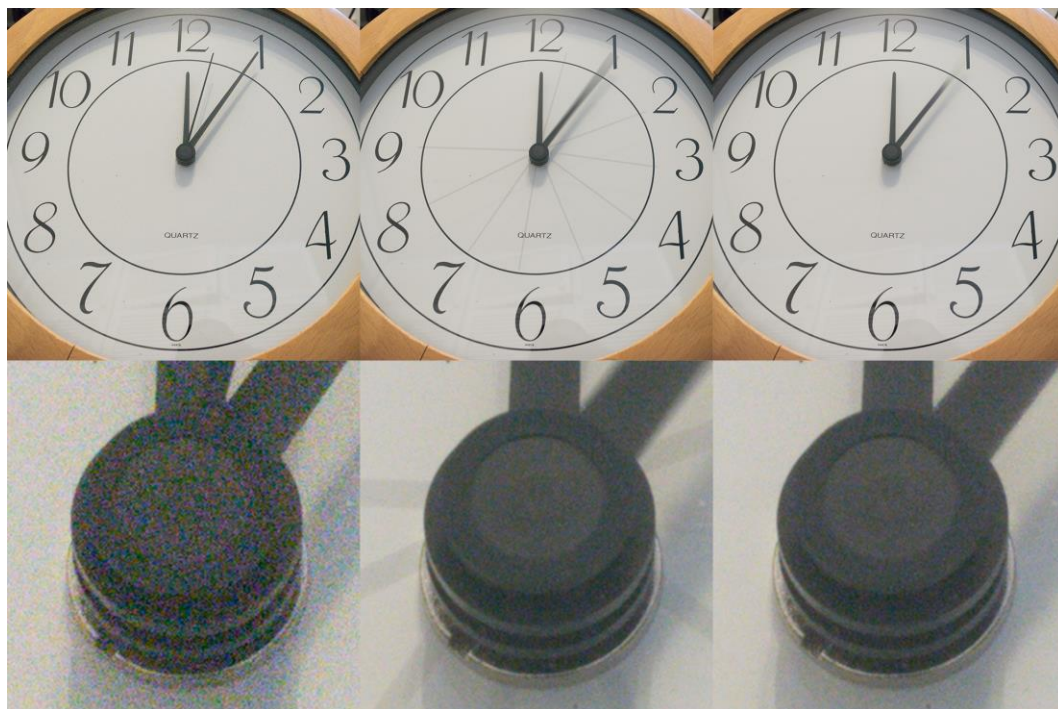
#### 4.3 Kuvasarjan keskiarvo

Tilastotieteessä kohinaa voi minimoida ottamalla kerättävästä datasta useita näytteitä. Ynnäämällä näytteiden signaalit ja jakamalla ne näytteiden määrällä saadaan signaali, joka on yhtä suuri kuin yksittäisten signaa-

lien keskiarvo, mutta jonka kohina on pienempi. Tällöin signaalikohinasuhde paranee näytteiden määrän  $n$  mukaan suhteessa  $\sqrt{n}$ , jos kohina noudattaa Poissonin jakaumaa.

Myös valokuvien signaalista riippuvaa kohinaa voidaan minimoida ottamalla useita kuvia ainakin silloin, kun kuvattava kohde ei eri kuvien välillä liiku kameran suhteen. Kuvat kohdistetaan tarkasti toistensa päälle kerroksittain kuvankäsittelyohjelmassa, jonka jälkeen ohjelman käsketään lukea jokaisesta kerroksesta toisiaan vastaavat pikselit ja ottaa niistä keskiarvo jokaista kuvan pikseliä kohden. Toinen vaihtoehto kohinan poistoon on ottaa pikselien arvoista mediaani eli keskiluku, jolla pyritään kuvaamaan kyseisen pikselin tyypillisintä arvoa kuvien kesken. Mediaani saadaan ottamalla tarkasteltavista arvoista keskimmäisin. Muita arvoja ei oteta ollenkaan huomioon. Se, kumpi metodi poistaa kohinaa tehokkaammin ja tarkemmin, riippuu tilanteesta.

Otettiin suhteellisen tasaisin väliajoin kymmenen kuvan sarja kellosta, joka on omiaan esittelemään sekä paikallaan pysyvän, että liikkuvan kappaleen käyttäytymistä. Kuvat otettiin ISO-herkkyydellä 6400. Kuvassa 8 on vasemmalla yksi sarjan kuvista, jossa esiintyy paljon kohinaa. Keskellä on kuvien keskiarvo ja oikealla mediaani. Alarivillä on suurennokset. Keskiarvon ottaminen vähensi kohinaa huomattavasti, mediaanin ottaminen suunnilleen saman verran. Mediaani näyttää säilyttävän värin lievästi paremmin.



KUVA 8. Yksittäinen kuva, keskiarvo ja mediaani

Keskiarvokuvassa näkyy 10 sekuntiviisaria, kukin 10% sekoitussuhteella, mikä tekee viisareista läpinäkyviä. Minuuttiviisarin hitaampi liike antaa sille tehosteen, joka muistuttaa pitkistä suljinajasta johtuvaa liikkeen sumeutta. Keskiarvon ottaminen ei ole hyvä metodi liikkuvan kohteen kuvaamiseen, koska se tuottaa tämänkaltaisia haamukuvia. Toisaalta haamukuvat on helppo maskeerata pois yksittäisistä kuvista ennen keskiarvon ottamista. Keskiarvolla voidaan myös simuloida pitkää suljinaikaa tilanteissa, jossa suljinaika on pidettävä lyhyenä esimerkiksi kameran tärähdysvaaran takia.

Mediaanikuvasta sekuntiviisari on kadonnut kokonaan, mikä johtuu siitä, että tumman viisarin pikseleitä ei oteta ollenkaan huomioon keskilukua mitattaessa. Osa minuuttiviisarista on myös kadonnut, kun taas osa näkyy terävänä. Mediaanin otto siis jähmettää liikkeen, tai piilottaa liikkuvan kappaleen kokonaan. Tästä on hyötyä silloin, kun kuvassa näkyvistä liikkuvista kohteista, kuten ihmisistä, tahdotaan kokonaan eroon. Se auttaa myös siinä tapauksessa, että osa kuvista on kohdistettu huonosti, sillä poikkeavista kuvista ei todennäköisesti oteta keskilukuja.

Kuvasarja on tarpeellinen erityisesti käsivaralla kuvattaessa heikossa valossa, sillä liian pitkä suljinaika johtaa koko kuvan tärähtämiseen, mitä ei voi myöhemmin korjata. Eri kuvien välillä tapahtuva liike sen sijaan voidaan korjata kohdistamalla kuvat. Menetelmä on hyvä myös silloin, kun kameran maksimaalinen suljinaika ei riitä, tai kun halutaan minimoida pitkälle valotusajalle ominaista pimeän virran kohinaa. Menetelmän tehokkuus riippuu otettujen kuvien määrästä. Määrän kasvaessa signaalista riippumaton kohina ei kuitenkaan pienene, sillä se ei ole satunnaista. Ääretön määräkään kuvia ei siis poistaisi kaikkea kohinaa.

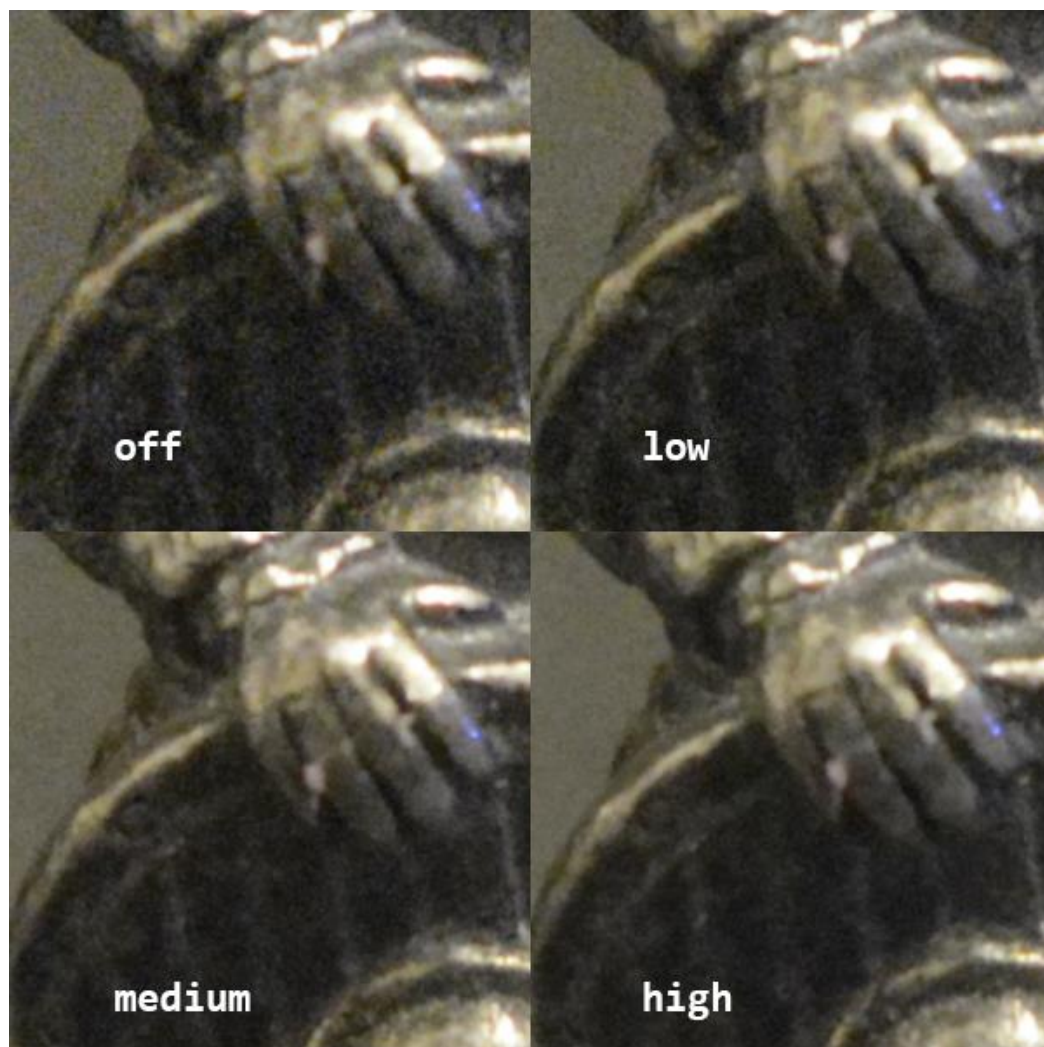
#### 4.4 Digitaalinen kohinan vähennys

Edellä mainitut tekniikat toimivat hyvin, sillä ne kaikki perustuvat jollakin tapaa signaalin vahvistamiseen. Puhtaasti digitaalinen kohinan vähennys sen sijaan perustuu matemaattiseen arviointiin siitä, millainen signaalin pitäisi olla. Tällöin informaation tarkkuutta voidaan parantaa, mutta ei täysin luotettavasti. Digitaalinen menetelmä on tarpeellinen silloin, kun aiemmat menetelmät koetaan liian vaivalloiseksi. Jopa niitä käytettäessä valokuvalle voidaan antaa viimeinen, digitaalinen loppukäsittely.

Kohinan poistossa käytettyjä algoritmeja ja niiden variaatioita on valtava määrä, ja niille annettavilla parametreilla saadaan vielä useampia eri tuloksia. Lähes kaikki algoritmit kuitenkin perustuvat samaan periaatteeseen: pikseleissä esiintyvien ei-haluttujen poikkeamien löytäminen ja korjaaminen vertailemalla niitä ympäröiviin tai koko kuvan pikseleihin. Algoritmit tekevät väistämättä virheitä, jopa sellaisia, mitä ihminen ei itse tekisi. Viime vuosien kehitykset koneoppimisessa mahdollistavat kohinan vähentämisen myös ”älykkäästi”, emuloiden inhimillisempää käyttäytymistä. Tässä työssä keskitytään kuitenkin perinteisempiin algoritmeihin.

Algoritmien tekemät virheet näkyvät kuvassa artefakteina, esimerkiksi kuvan sumenemisena. Kone ei tiedä, onko muista erottuva pikseli kohinan ilmentymä, vai oikea detalji. Tästä syystä kohinaa ei kannata yrittää poistaa kokonaan, vaan on löydettävä esteettisesti optimaalinen tasapaino kohi-

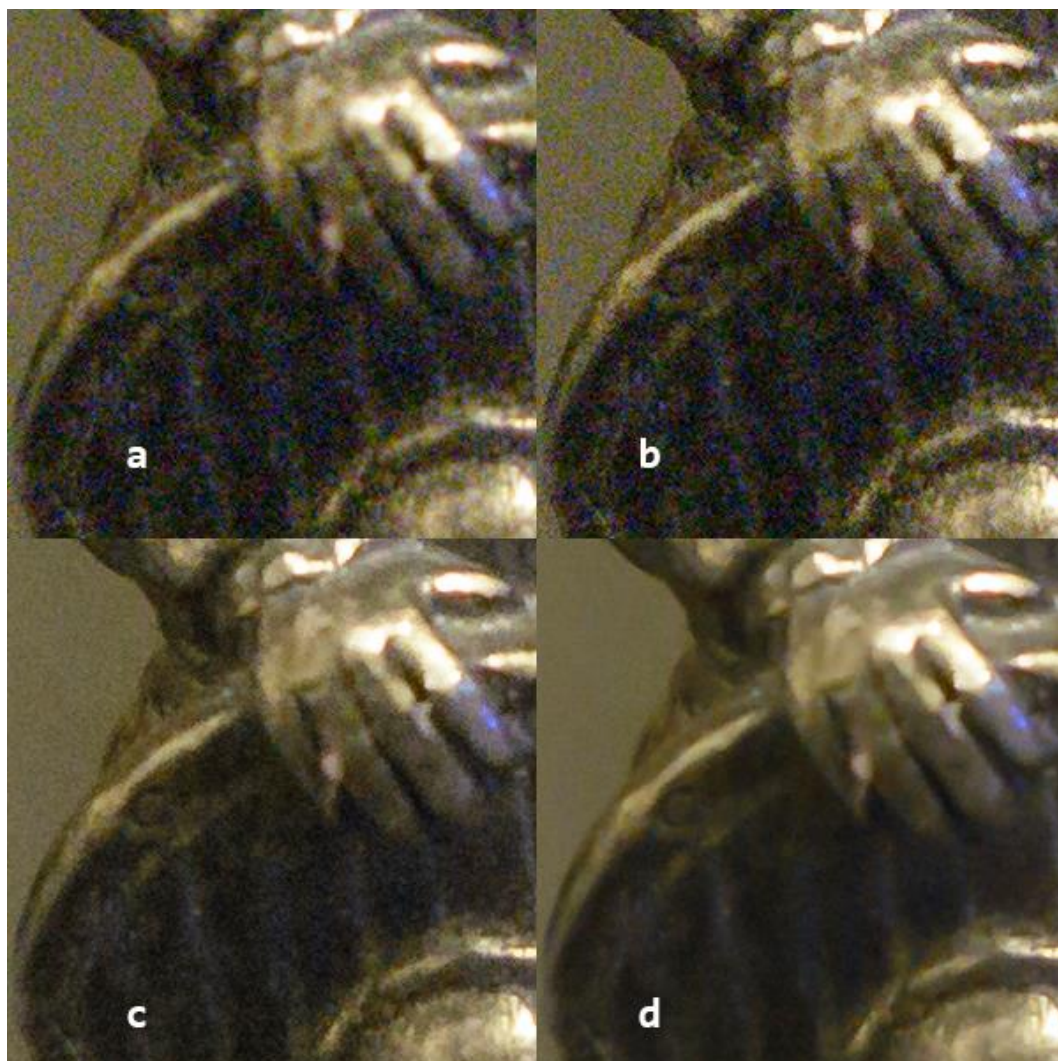
nan ja artefaktien välillä. Kuvan sumenemista voidaan osin välttää terävöittämällä kuvaa, joka toimii osin vastakkaisella tavalla, etsien detaljeja ja vahvistaen niiden mikrokontrastia ympäröiviin pikseleihin. Terävöitys johtaa myös artefakteihin, kuten kohinan voimistumiseen. Siispä myös terävöittämisen kanssa täytyy löytää tasapaino.



KUVA 9. Kameran sisäinen kohinanpoisto

Ensin kokeiltiin kameran omaa kohinanpoistoa, joka toimii, kun tallennetaan JPG-kuva. Kuvan muut asetukset, kuten terävöinti, jätettiin oletusarvoiksi. Kohinanpoistoa kokeiltiin eri vahvuuksilla ja ISO-arvoilla. Kuvia vertailemalla todettiin, että kohinanpoisto ei toimi ainakaan ISO-arvolla 400 tai alle, arvolla 1600 ja yli taas toimii selvästi. Tämä oli odotettavissa, sillä toiminnon nimi on high ISO noise reduction. Kuvassa 9 on ISO 6400 -arvolla otettu kuva suurennettuna, eri kohinanpoiston vahvuuksilla. Suuremmat

arvot poistavat kohinaa yhä tehokkaammin, kuvan terävyyden kärsiessä lievästi.



KUVA 10. Kohinan poisto Camera Raw:ssa

Seuraavaksi kokeiltiin vähentää kohinaa RAW-kuvista jälkikäsittelyssä, jolloin parametreja pääsee säätämään tarkemmin. Algoritmiksi valittiin Camera Raw -ohjelmasta löytyvä kohinanpoisto, joka muun muassa antaa säätää erikseen luminanssi- ja värikohinaa. Kuvassa 10a on käsittelemättömän raakakuva, ISO 6400. Valkotasapaino näyttää huonolta, vaikka käytettiin kuvan metadatatista löytyvää valkotasapainoa, samaa mitä käytettiin JPG-kuvissa. Toinen huomattava seikka on kuvan kohinan vahvuus ja eritoten värikkyys JPG-versioon verrattuna. Se saattaa merkitä, että kamera



vähentää JPG-kuvan kohinaa, vaikka siihen tarkoitettu toiminto olisi kytetty pois päältä.

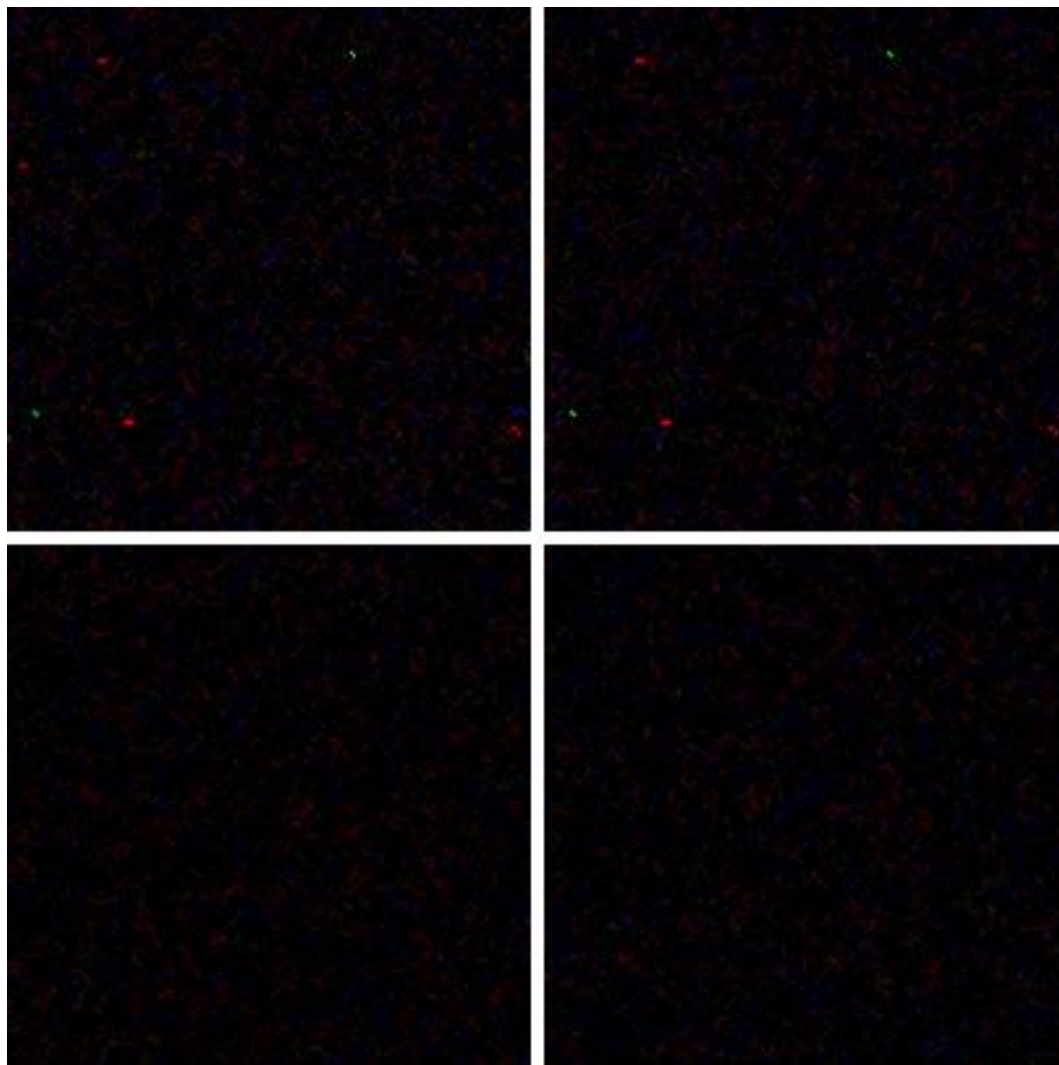
Kuvaa 10b on terävöitetty hienovaraisesti, jotta kohina ei voimistuisi liikaa. Sama terävöitys säilyy seuraavissa kuvan versioissa. Kuvasta 10c on vähennetty kohinaa, erityisesti värikohinaa, mutta prosessia on varottu vievästä liian pitkälle. Kohinan laatu on nyt hyvin harmaasävyistä eikä yhtä läikikästä kuin JPG-kuvissa. Kuvassa 10d on käytetty paljon vahvempaa kohinanpoistoa, joka myös sumentaa kuvaa ja antaa sille tyyllitellyn ilmeen. On vaikea arvioida, onko käytetty algoritmi parempi kuin kamerasäätämällä, mutta sen joustavuus voi auttaa hankalissa tapauksissa.

Koska pimeä virta riippuu valotusajasta, on monissa kameroissa erityinen kohinanpoistoalgoritmi, jota kamera käyttää automaattisesti vain silloin, kun valotusaika on pitkä. Koska tämä kohina on fixed pattern -tyyppistä, tiedetään, että tietyt pikselit saavat suurempia arvoja kuin toiset, ja että nämä pikselit eivät juuri vaihtelee kuvien välillä. Näiden pikselien paikat ja oletusarvot voidaan kartoittaa ottamalla pimeä kuva (dark frame) eli kuva, jossa kennolle ei päästetä ollenkaan valoa. Tämän takia pimeässä kuvassa on ainoastaan elektronista, signaalista riippumatonta kohinaa, jossa pimeällä virralla on merkittävä osa.

Käytännössä kamera ottaa jokaisen pitkän valotusajan valokuvan jälkeen automaattisesti pimeän kuvan pitämällä suljimen kiinni. Pimeä kuva vähennetään halutusta kuvasta (dark frame subtraction), jolloin pimeän virran vaikutus teoriassa mitätöidään. Tämän toimenpiteen aikana kamera ei reagoi käyttäjän komentoihin. Tarkempi menetelmä olisi ottaa useita pimeitä kuvia ja ottaa niistä keskiarvo, jonka sitten vähentää halutusta kuvasta, mutta se vaatisi paljon manuaalista työtä.

Kuvassa 11 on suurennokset neljästä eri kuvasta. Ylärivin kuvissa pitkän valotusajan kohinanpoisto on pakotettu pois päältä, alimmissa se on päällä. Kuvat otettiin linssinsuojus kiinnitettynä, estäen valon pääsy kennolle. Molemmista kuvista valotusaika on 30 sekuntia, aukko f/36 ja herkkyys ISO 6400. Pitkä valotusaika maksimoi pimeän virran vaikutuksen,

aukko minimoi valon määrän siinä tapauksessa, että valoa vuotaisi kennolle. Suuri ISO-arvo nostaa kohinan esiin ilman, että alavirran kohina voimistuu.



KUVA 11. Pitkän valotusajan kohinan vähennys

Yläriivin kuvissa näkyy selvästi enemmän kohinaa, erityisesti tietyt, harvasti jakaantuneet pikselit saavat suhteettoman suuria arvoja ja siksi näkyvät kirkkaina väripisteinä. Pisteet ovat jakautuneet molempiin kuviin identtisesti, mikä todistaa sen olevan fixed pattern -kohinaa. Alarivin kuvissa kamera on onnistunut poistamaan pahimman kohinan ottamansa pimeän kuvan avulla. Kuvista huomaa merkittävän seikan: kohinanpoisto toimii, vaikka otetut kuvat ovat RAW-kuvia. RAW-kuvien ”raakuuteen” ei voi siis täysin luottaa, sillä kamera saattaa prosessoida niitä tietyin tavoin.

## 5 YHTEENVETO

Työn teoriaosuus syntyi kiinnostuksesta kohinaan, jonka läsnäolo ja vaikutus jokaisessa valokuvassa on valokuvaajalle ilmiselvä asia ja usein suuri haaste, mutta josta löytyy tietoa valokuvausyhteisössä rajallisesti ja usein ristiriitaisesti. Toinen kiinnostuksen kohde oli pohdinta siitä, miten pitkälle kamerateknologia voi kehittyä fysiikan lakien ja käytännön vaatimusten puitteissa. Kvanttihyötysuhteen kasvaessa kohti yhtä ja sähköisen kohinan pienetessä kohti nollaa saatetaan tulevaisuudessa saavuttaa raja, jonka jälkeen kuvan laatua ei pystytä enää parantamaan käyttämättä yhä suurempia kennoja, jotka keräävät yhä enemmän valoa ja siten kärsivät yhä vähemmän välttämättömästä, fotonien mukanaan tuomasta kohinasta.

Kohinan teoriaa tutkittaessa paljastui, että kyseessä on oletettua monimutkaisempi aihe, jota ei voi yksinkertaisesti jaotella mekaaniseen, sähköiseen ja digitaaliseen komponenttiin. Ei myöskään löytynyt matemaattista kaavaa, joka laskisi kohinan määrän tarkasti ilman, että täytyisi ottaa huomioon useita käytetystä kamerasta riippuvia muuttujia. Teoria mahdollistaa kuitenkin kohinan likiarvoisen arvioinnin. Kameran kennon ja virtapiirin rakennetta selitettiin hyvin pintapuolisesti, sillä niiden ymmärtäminen vaatisi kyseisiin laitteisiin erikoistuneempaa opiskelua.

Työn käytännön osuus pyrki näyttämään, että kohinan välttäminen ei ole ainoastaan kameran käsissä ja että digitaalinen lähestymistapa ei ole ainoa tapa käsitellä sitä. Siksi digitaalista kohinan vähennystä tarkasteltiin yhtenä tekniikkana, paljolti vertailun vuoksi. Todellisuudessa digitaaliset tekniikat ovat paljon monipuolisempia: eri algoritmit, sekoitustekniikat, manuaalinen muokkaus ja muut digitaaliset suotimet luovat yhdessä moniulotteisen tekniikoiden verkon, jonka selvittäminen tarvitsisi oman työnsä. Digitaalisista tekniikoista löytyykin erittäin paljon lähdekirjallisuutta, mutta juuri sen takia keskityttiin tekniikoihin, joita ei yleensä mainita kohinasta puhuttaessa.

Työtä varten otetut valokuvat otettiin pitkällä aikavälillä, sillä sopivien koe-

järjestelyiden keksiminen vaati ymmärrystä, joka kasvoi tutkimuksen edetessä. Myös kauden sääolosuhteet vaikuttivat, erityisesti koska suuren dynaamisen alueen kuvaamisen vaatima valo oli vähissä.

Kokeita tehdessä huomattiin, miten paljon kuvan suurentaminen vaikuttaa kohinan näennäiseen vahvuuteen. Jopa hämärästä kuvasta, joka näyttää koostuvan ainoastaan kohinasta, saattaa erottaa kuvatun kohteen, kun sitä tarkastelee tarpeeksi kaukaa. Tämän takia kokeissa jouduttiin käyttämään suuria ISO-arvoja ja suurennoksia. Tämä tieto kannustaa myös jatkossa käyttämään suurempia ISO-arvoja, tietoisena siitä, että kohinaa ei lopullisessa kuvassa välttämättä huomaa.

Työssä kokeiltu tekniikka valotusten sekoittamiseksi oli työtä edeltävä, aiempaan tekniikkaan perustuva idea, jonka kokeilemiseksi ja hiomiseksi työ oli oivallinen. Sen onnistuminen ylitti kaikki odotukset; eri kuvien sekoitus oli yllättävän helppoa ja luontevaa, vaikka kuvilla oli suuri valotusero ja vaikka pilvet liikkuvat kuvien välissä. Tekniikka mahdollistaa koko dynaamisen alueen taltioinnin hyvällä signaali-kohinasuhteella. Sen kehittämistä voisi jatkaa sen virtaviivaistamiseksi.

## LÄHTEET

### Painetut lähteet

Bonchelet, C. G. 2005. Image Noise Models. Teoksessa Handbook of Image and Video Processing (toinen painos). Burlington: Academic Press, 397-409.

Keller, K., Kampfer, H., Matejec, R., Lapp, O., Krafft, W., Frenken, H., Lüh-  
rig, H., Scheerer, R., Heilmann, M., Meckl, H., Bergthaller, P., Hübner, D.,  
Wolff, E., Morcher, B., Zahn, W., Buschmann, H., Blank, R., Tromnau, R.,  
Plamper, J., Seiler, A., Nieswandt, K., Boie, I., Moisar, E., Winiker, R.,  
Schellenberg, M. & Ketellapper, L. 2000. Photography. Teoksessa Elvers,  
B. (toim.). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim:  
Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Maître, H. 2015. From Photon to Pixel: The Digital Camera Handbook. Ho-  
boken: John Wiley & Sons, Inc.

Tian, H. 2000. Noise analysis in CMOS image sensors. Väitöskirja. Stan-  
ford: Stanfordin yliopisto, Department of Applied Physics.

### Elektroniset lähteet

Aguerreberre, C., Delon, J., Gousseau, Y. & Musé, P. 2014. Study of the  
digital camera acquisition process and statistical modelling of the sensor  
raw data. Hyper Articles en Ligne [viitattu 3.12.2017]. Saatavissa:  
[https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00733538/file/camera\\_model.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00733538/file/camera_model.pdf)

Cox, S. 2017. Iso Invariance Explained. photographylife.com [viitattu  
3.12.2017]. Saatavissa: <https://photographylife.com/iso-invariance-explained>

Dietz, H. G. & Eberhart, P. S. 2015. ISO-less? SPIE 9404, Digital Photography XI, 94040L [viitattu 15.12.2017]. Saatavissa:

<http://dx.doi.org/10.1117/12.2080168>

Farooque, M. A. & Rohankar, J. S. 2013. Survey on various noises and techniques for denoising the color image. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. Vol 2, Iss 11, 2013, 217-221 [viitattu 18.11.2017]. Saatavissa: <http://ijaiem.org/volume2issue11/IJAEM-2013-11-24-070.pdf>

Hytti, H. T. 2005. Characterization of digital image noise properties based on RAW data. Image Quality and System Performance III. SPIE 6059, Image Quality and System Performance III, 60590A [viitattu 18.11.2017].

Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1117/12.640500>

Jin, Q., Grama, I. & Liu, Q. 2013. A New Poisson Noise Filter Based on Weights Optimization. Journal of Scientific Computing. Vol 50, num 3, 2014, 548-573 [viitattu 18.11.2017]. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1007/s10915-013-9743-7>

Kerr, D. A. 2008. The ISO Definition of the Dynamic Range of a Digital Still Camera. [viitattu 3.12.2017]. Saatavissa: [http://dougkerr.net/Pumpkin/articles/ISO\\_Dynamic\\_range.pdf](http://dougkerr.net/Pumpkin/articles/ISO_Dynamic_range.pdf)

Kitamura, Y., Aikawa, H., Takechi, K., Yousyou, T., Eda, K., Minami, T., Uya, S., Takegawa, Y., Yamashita, H., Kohyama, Y & Asami, T. 2012. Suppression of crosstalk by using backside deep trench isolation for 1.12 $\mu$ m backside illuminated CMOS image sensor. [viitattu 3.12.2017].

Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2012.6479093>

Lamar, M. 2015. Propability (statistics): What is difference between binominal, poisson and normal distribution? Quora [viitattu 16.11.2017]. Saata-

vissa: <https://www.quora.com/Probability-statistics-What-is-difference-between-binominal-poisson-and-normal-distribution>

Moomaw, B. 2007. Camera Technologies for Low Light Imaging: Overview and Relative Advantages. *Methods in Cell Biology* Vol 81, 2007, 251-283. Academic Press [viitattu 18.11.2017]. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0091-679X\(06\)81013-7](https://doi.org/10.1016/S0091-679X(06)81013-7)

Pound, M. 2015. Capturing Digital Images (The Bayer Filter) – Computerphile. [viitattu 3.12.2017]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=LWxu4rkZBLw>

#### Kuvalähteet

KUVA 1. Eric Bajart. 2010. Photon noise. Wikimedia Commons [viitattu 3.12.2017]. Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photon-noise.jpg>

KUVA 2. Cambridge in colour. Digital camera sensors [viitattu 3.12.2017]. Saatavissa: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>

KUVIO 1. Massachusettsin yliopisto. 2007. The Poisson Distribution [viitattu 3.12.2017]. Saatavissa: <http://www.umass.edu/wsp/resources/poisson/index.html>