

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Business and Management
Tietotekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

Petra Helmiö

Resoluutio ennen, nyt ja tulevaisuudessa. Onko 8K tarpeeksi ja kuinka paljon 16K oikeastaan on?

Työn tarkastaja(t): Tutkijatohtori Ari Happonen

Työn ohjaaja(t): Tutkijatohtori Ari Happonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Business and Management
Tietotekniikan koulutusohjelma

Petra Helmiö

Resoluutio ennen, nyt ja tulevaisuudessa. Onko 8K tarpeeksi ja kuinka paljon 16K oikeastaan on?

Kandidaatintyö

2015

51 sivua, 6 kuvaa, 4 taulukkoa, 2 liitettä

Työn tarkastajat: Tutkijatohtori Ari Happonen

Hakusanat: resoluutio, HDTV, HD, UHD, 4K, 8K, 16K, SHV, HEVC, Virtual Reality

Keywords: resolution, HDTV, HD, UHD, 4K, 8K, 16K, SHV, HEVC, Virtual Reality

Tämä työ on kirjallisuuskatsaus digitaalisen teräväpiirtoresoluution historiaan, nykyhetkeen ja tulevaisuuteen. Lisäksi käydään läpi eri medioista löytyviä termejä ja pyritään selvittämään näiden termien merkitys lukijalle. Työ on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston Tietotekniikan osastolle. Teräväpiirtotelevision historia alkaa jo 1960-luvulta ja ensimmäiset teräväpiirtoresoluutiot kehitettiin 1970-luvulla. Kun resoluutiota kasvatetaan, myös kuvatiedoston ja vaadittavan tallennustilan koko kasvaa. Se aiheuttaa uusia haasteita muun muassa lähetyks-, pakkaus- ja vastaanotintekniikoille. 4K-resoluutiot ovat jo täällä, mutta miten käy 16K-resoluution. Onko suuresta resoluutiosta hyötyä esimerkiksi Virtual Reality –sovelluksissa?

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Business and Management
Degree Program in Computer Science

Petra Helmiö

Resolution before, now and in the future. Is 8K enough and how much is 16K?

Bachelor's Thesis

51 pages, 6 figures, 4 tables, 2 appendices

Examiners : D.Sc. (Tech.) Ari Happonen

Keywords: resolution, HDTV, HD, UHD, 4K, 8K, 16K, SHV, HEVC, Virtual Reality

This thesis is a literature review to the high definition resolution past, the present and the future. It will also attempt to explain and describe the different abbreviations related to new high definition resolutions. The thesis is written for the Degree Program in Computer Science in Lappeenranta University of Technology. The history of high definition resolutions starts already from 1960s, with first high definition resolutions being developed in the 1970s. Increasing the resolution of an image increases the filesize and the requirements for disk space. This presents new challenges to the broadcasting, encoding and receiver technologies. 4K resolutions are already here, but what happens with the 16K-resolution? Does increased resolution have applications for example in Virtual Reality?

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	4
1.1	TAUSTA	4
1.2	TAVOITTEET JA RAJAUKSET	5
1.3	TYÖN RAKENNE	5
1.4	TYÖN TERMINOLOGIA	6
2	TELEVISION JA RESOLUUTION HISTORIA	9
2.1	TELEVISIOTEKNIIKAN KEHITYS	9
2.2	HDTV	13
2.3	MITÄ ON RESOLUUTIO.....	15
3	TERÄVÄPIIRTO NYKYÄÄN.....	18
3.1	HIGH DEFINITION TEKNIikka	18
3.2	4K JA UHD RESOLUUTIO	19
3.3	8K JA 8K UHD RESOLUUTIO	21
3.4	HEVC.....	22
3.5	TARVITAANKO NÄIN PALJON PIKSELEITÄ?	23
4	KUVANLAADUN PARANTAMINEN	26
5	POHDINTAA RESOLUUTION KEHITYKSESTÄ.....	32
6	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	38
	LIITTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

3D	3-Dimension, third dimension
AC-3	Arc Consistency Algorithm no. 3
AVC	Advanced Video Coding
CEA	Consumer Electronics Association
CES	Consumer Electronics Show
DCI	Digital Cinema Initiatives
DK	Developer Kit
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-C	Digital Video Broadcasting - Cable
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DVB-T2	Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2
DVD	Digital Video Disc
EBU	European Broadcasting Union
EHF	Extremely High Frequency
fps	frames per second
FUHD	Full Ultrahigh Definition
FullHD	Full High Definition
Gb/s	Gigabits per second
Gt	Gigatavu
HD	High Definition
HD-MAC	High Definition Multiplexed Analog Components
HDR	High Dynamic Range
HDTV	High Definition Television
HFR	High Frame Rate
IMAX	Image Maximum
IP	Integral Photography
ITU	International Telecommunication Union
JVC	Victor Company of Japan
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode

Mb/s	Megabits per second
MPEG	Moving Picture Experts Group
Mt/s	Megatavua sekunnissa
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NHK	Nippon Hōsō Kyōkai
NTSC	National Television Systems Committee
PAL	Phase Alternate Line
PAL-B	Phase Alternate Line – B
PAL-G	Phase Alternate Line – G
px	pikseli
QFHD	Quad Full High Definition
QHD	Quad High Definition
QUHD	Quad Ultrahigh Definition
SDTV	Standard Definition Television
SECAM	Séquentiel couleur avec mémoire
SHV	Super Hi-Vision
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
UHD	Ultrahigh Definition
UHDTV	Ultrahigh Definition Television
UHDTV-2	Ultrahigh Definition Television – 2
VoD	Video on Demand
VR	Virtual Reality
Yle	Yleisradio

1 JOHDANTO

Kuluttajat haluavat yhä tarkempaa ja realistisempaa televisiokuvaa. Tämä on pitänyt paikkansa jo 1960-luvulta lähtien, kun Japanin NHK (Nippon Hōsō Kyōkai) aloitti ensimmäiset tutkimukset teräväpiirtokuvien parissa. Tällöin alkaneen kehitystyön tavoite on ollut tuottaa kuluttajalle entistä realistisempi, kokonaisvaltaisempi ja parempi katselukokemus [1], jotta ”-- media sallisi käyttäjien tempautua mukaan ympäristöön, joka on luotu käyttäen audiovisuaalista esitystapaa --” [2]. Lähes 60-vuotta myöhemmin Japanissa kehitetään seuraavan sukupolven resoluutiota, joka on jopa 16 kertaa nykyään yleisimmän teräväpiirtostandardin, FullHD:n (Full High Definition) kokoinen. [3]

Artikkeleissa ja elektroniikkakauppojen televisio-osastoilla voi törmätä uusiin termeihin kuten UHD (Ultrahigh Definition) ja 4K. Kun kuluttaja on tottunut uusien termien määrään, edessä on seuraava ongelma; mitä nämä tarkoittavat ja minkälainen käytännön vaikutus niillä on television katseluun. Tässä työssä pyritään selvittämään lukijalle, mitä erilaiset uudet termit tarkoittavat ja minkälaista kehitystyötä resoluution ja siihen liittyvien teknologioiden parissa on tällähetkellä ja tulevaisuudessa.

Television tulevaisuus nykymuodossaan riippuu paljon katsojien mieltymyksistä. Television kanavalistaa selatessa huomaa, että vaikka televisiolähetys HD (High Definition) –resoluutiolla on jo tarjolla, eivät kaikki listauksessa olevat kanavat ole näkyvillä kaikille katsojille. Teräväpiirtosisältöä löytyy eri medioista, mutta sitä ei löydy niin paljon kuin kuluttaja voisi kaivata. Mikä on teräväpiirtoresoluution tulevaisuus ja tuleeko teräväpiirtosisällön yleisyys kasvamaan tulevaisuudessa?

1.1 Tausta

Työn aihe on valittu alunperin tarkoituksena selvittää mitä nykyisin kaikilla uusilla termeillä resoluutioista puhuttaessa tarkoitetaan. Nykyään törmää esimerkiksi elokuvateattereiden ohjelmistoissa termeihin, kuten 4K ja televisiokaupoilla ei voi välttyä lyhenteeltä UHD. Työn edetessä sovellusalueet kasvavalle resoluutiolle ja konkreettiset esimerkit seuraavan sukupolven resoluutioista tuovat esiin lisää näkökulmia. Televisio ja

elokuvat ovat yksi suosituimmista viihdemuodoista ympäri maailmaa [2] ja kirjallisuusselvitys eri resoluutioista ja tarjolla olevasta kirjallisuudesta on tarpeellinen. Työssä muun muassa käydään läpi televisioiden ja teräväpiirtoresoluutioiden historiaa ja nykyhetkeä, sekä pohditaan mahdollisia tulevaisuudensuunnitelmia ja –kehitysalueita.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää mitä on tapahtunut viime vuosikymmenien aikana resoluutioiden kehityksessä ja mistä kehitys on alkanut. Työssä keskitytään digitaalisten televisionäyttöjen ja elokuvaprojektoreiden resoluutioiden tutkimiseen kirjallisuuskatsauksen avulla. Työn lähtökohtana on selvittää lyhyesti teräväpiirtoresoluution ja television historiaa, sekä paneutua resoluution nykytilanteeseen ja tulevaisuuteen. Työ vastaa kysymyksiin mitä ovat 4K, 8K ja 16K, miten teräväpiirtoresoluutioon on päädytty ja minkälaisia haasteita resoluution kasvattamisella on. Työssä esitellään lisäksi sovellusalueita resoluution kasvattamiselle ja pohditaan minne näyttöteknologiassa ollaan menossa.

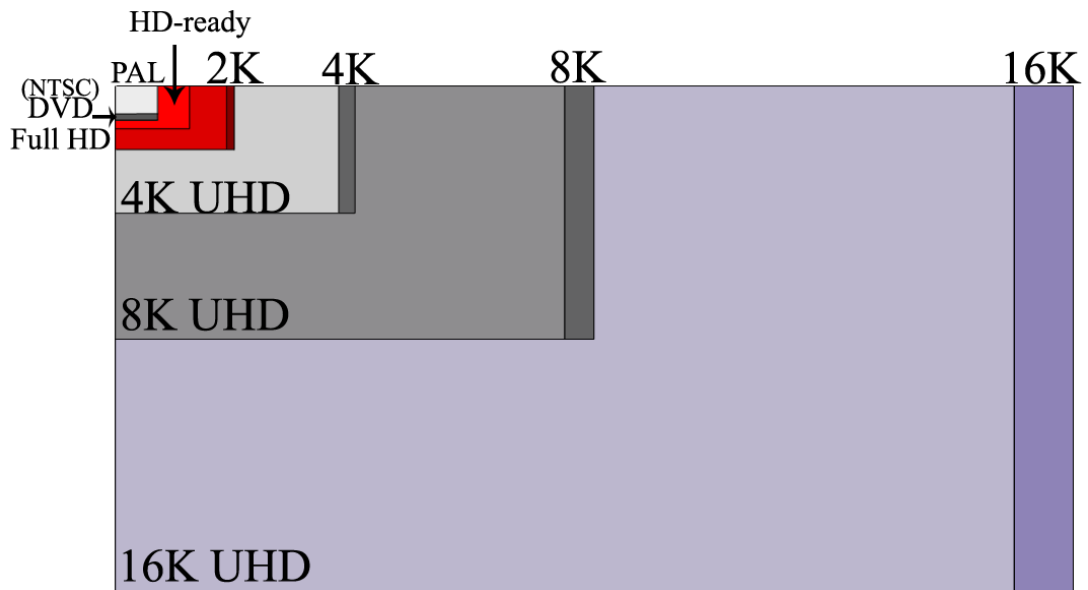
1.3 Työn rakenne

Johdannossa käsitellään työn tavoitteet ja rajaukset, sekä työssä käytetty terminologia. Johdannon jälkeen työ on jaoteltu osioihin historian, nykyhetken ja tulevaisuuden mukaan. Luvussa 2 esitellään aikaisempia tutkimuksia samasta aihealueesta, sekä käydään läpi television ja teräväpiirtotelevision historiaa. Luvussa 3 keskitytään siihen, mitä televisio- ja elokuvaresoluutioiden tutkimuksissa nykyään tapahtuu ja minkälaisia haasteita kasvava resoluutio mukanaan tuo. Luku 4 koostuu resoluution ja siihen liittyvien teknologioiden tulevaisuuden pohdinnasta. Samassa luvussa esitellään myös vaihtoehtoisia kehityssuuntia resoluution kehittämisen ohella. Luvussa 5 koostetaan työn tulokset ja vedetään johtopäätökset. Viimeinen luku on yhteenveto tässä työssä käsitellyistä asioista.

1.4 Työn terminologia

Teräväpiirtoresoluutioiden terminologia on laajentunut huomattavasti sen jälkeen kun 4K esiteltiin. Ensimmäisten uusien teräväpiirtotelevisioiden tultua markkinoille 4K resoluutiolla oli yhtä monta nimeämistapaa kuin oli laitevalmistajia. [4] Nimi 4K tulee DCI (Digital Cinema Initiatives) yhteishankkeen kehittämästä standardista 4K “Digital Cinema”, joka määrittelee 4K digitaalisen kuvan horisontaaliseksi resoluutioksi 4096 pikseliä, eli neljä kertaa 1024 pikseliä. [5] Tätä standardia käytetään kaupallisissa elokuvateattereissa ja videolaitteissa. 4K nimeä on käytetty myös tarkoittamaan televisioresoluutiota, kun television horisontaalinen resoluutio on 3840 pikseliä. [4] Vuonna 2012 CEA (Consumer Electronics Association) määritteli edellämainituille 3840 pikselin horisontaalisen resoluution 4K teräväpiirtotelevisioille nimeksi UHD, eli Ultrahigh Definition. Määritelmän mukaan UHD-resoluutio on vähintään 3840 x 2160 pikseliä (px) ja sen kuvasuhteen tulee olla 16:9. [6, 7] Tämän perusteella 4K ei tarkoita samaa asiaa kuin UHD, sillä elokuvastandardin kuvasuhde on 17:9 ja sen horisontaalinen resoluutio on 4096px [4].

Edellämainittujen määritelmien lisäksi esimerkiksi ITU (International Telecommunication Union), EBU (European Broadcasting Union) ja SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) ovat luoneet omat, laajemmat määritelmänsä UHD-resoluution kuvalle. Standardit sisältävät resoluution ja kuvasuhteen lisäksi muun muassa määritellyt UHD-videon ja UHD-televisioiden kuvataajuudelle, bittisyvyydelle ja väriavaruudelle. [8, 4] Suurin ero näissä CEA:n UHD-määritelmään verrattuna on se, että ITU, EBU ja SMPTE sisällyttävät määritelmiinsä 3840 x 2160 resoluution lisäksi myös sitä suuremman 7680 x 4320 resoluution [4]. 7680 x 4320 pikselin resoluutiolle on määritelty Japanin NHK:n toimesta oma nimi Super Hi-Vision (SHV) [8, 9], kun ITU, EBU ja SMPTE kutsuvat sitä nimellä UHD-2 tai UHDTV-2 (Ultrahigh Definition Television-2) [8]. Elokuvateollisuudessa vastaavan kokoluokan 17:9 kuvasuhteen resoluutiota kutsutaan nimellä 8K [5]. Kuvassa 1 havainnollistetaan teräväpiirtoresoluutiot ja niiden kuvasuhde verrattuna toisiin resoluutioihin.



Kuva 1. Resoluutiot skaalattuna

Näiden standardien määrittelemien termien lisäksi artikkeleissa, uutisissa ja televisiomainoksissa käytetään UHD-resoluutioista puhuttaessa termejä kuten QHD (Quad High Definition) [7], 4K UHD [7], 4Kx2K [7], 2Kx4K [10], QUHD (Quad Ultrahigh Definition), FUHD (Full Ultrahigh Definition) [11], 8K UHD [12], 8K ja 4Kx8K [10]. Taulukossa 1 on jaoteltu teräväpiirtoresoluutioiden termejä kokoluokkien mukaan ja kirjattu televisioresoluutioille elokuvastandardeja vastaavat ”K”-luvut.

Tässä työssä käytetään selkeyden vuoksi 17:9 kuvasuhteen elokuvaresoluutiosta puhuttaessa DCI:n standardia, eli termejä 2K, 4K ja 8K. Ensimmäisistä HD (High Definition) –resoluutioista käytetään jo vakiintuneita termejä HD-ready ja FullHD (Full High Definition). Puhuttaessa seuraavan sukupolven televisionäyttöjen resoluutioista käytetään termiä UHD, kun tarkoitetaan 16:9 kuvasuhteen vastiketta 4K elokuvaresoluutiolle. Suurempia televisioresoluutioita merkitään termeillä 8K UHD ja 16K UHD. Vastaavista HD-televisioista käytetään termejä UHDTV (Ultrahigh Definition Television), 8K UHDTV ja 16K UHDTV.

Taulukko 1. Teräväpiirtoresoluutioiden termejä kokoluokkien mukaan [4].

Termi	Resoluutio (korkeus x leveys)	Standardi	Vastaava ”K”-koko (kun 1K on 1024)
FullHD	1920 x 1080 px		1,87K
1080i/p			
2K	2048 x 1080 px	DCI	2K
UHD	3840 x 2160 px	CEA	3,75K
UHD-1		EBU	
UHDTV taso 1		ITU	
QFHD (Quad FullHD)			
4K UHD			
4K TV			
4Kx2K tai 2Kx4K	4096 x 2160 px		4K
4K		DCI	
UHD-2	7680 x 4320 px	EBU	7,5K
UHDTV taso 2		ITU	
SHV (Super Hi-Vision)		NHK	
QUHD (Quad UltraHD)			
FUHD (Full UltraHD)			
8K UHD			
8Kx4K tai 4Kx8K	8192 x 4320 px		8K
8K		DCI	

2 TELEVISION JA RESOLUUTION HISTORIA

Televisio on nyky muodossaan yksi suosituimmista viihdelaitteista ympäri maailmaa. Television ja videokuvien kehittäjien tavoitteena on ollut aina parantaa kuvanlaatua ja realismia, jotta katsojat voisivat nauttia television kuvasta enemmän [2, 10]. Television kehitys on ollut yli sadan vuoden ajan useiden eri tutkijoiden ja keksijöiden työn tulosta. Ensimmäiset television kehitykseen vaikuttaneet keksinnöt tehtiin jo 1800-luvulla. [13, 14]

Teräväpiirtotelevision historiaa on tutkittu muun muassa Yhdysvaltojen kongressin teettämässä tutkimuksessa ”The Big Picture: HDTV & High-Resolution Systems” [15] vuodelta 1990. Toinen teräväpiirtotelevision historiaa tutkiva teos on [16], jossa perehdytään teräväpiirtotelevision historian lisäksi teräväpiirron nykytilanteeseen. Mark Schubin koostaa 4K-resoluution historiaa ja tulevaisuutta esityksessään [17] vuodelta 2012. Resoluutioiden ja erityisesti teräväpiirtotelevisioiden tulevaisuutta ovat tutkineet muun muassa [1], [2] ja [8]. Japanin NHK:n tutkimusryhmät ovat tutkineet paljon 8K UHD-resoluutiota ja julkaisseet muun muassa seuraavia tutkimustöitä [10], [18] ja [20]. Resoluution kasvamisesta aiheutuvia haasteita on selvitetty ja tutkittu [21], [22] ja [23] tutkimuksissa. Resoluution kehitysvauhdista kertoo jotain myös se, että tämä kandidaattityö on tehty vuonna 2015 ja jo nyt on varmaa, että 8K-resoluution lähetykset ovat tulossa televisionkatsojien käyttöön. Markkinoilla on useita 8K-resoluution kameramalleja eri valmistajilta ja esimerkiksi Japanin tavoitteena on lähettää vuoden 2020 Tokion Olympialaiset kokonaan 8K-teräväpiirtolähetyksinä. [11, 24] Vuonna 2015 4K-resoluution näytöt ovat jo yleisempiä kuin HD (High Definition) –resoluution näytöt [25], joka myös osoittaa, että korkeamman resoluution näytöillä on tarjontaa ja kysyntää.

2.1 Televisiotekniikan kehitys

1920-luvun lopulla esiteltiin ensimmäiset television mekaaniset prototyypit, jotka pystyivät toistamaan kuvaa ja ääntä. Tunnetuimpia television kehittäjistä ovat Englantilainen J. L. Baird ja Yhdysvaltalainen C.F. Jenkins. [13] Ensimmäisissä Bairdin ja Jenkinsin televisiomalleissa televisio toisti ainoastaan kuvaa ja ääni tuli radiosta, joka oli kytkettävä

erikseen kuvantoistolaitteeseen. Vasta näiden televisioiden jälkeen kehitettiin laitteet, jotka toistivat sekä kuvaa, että ääntä. [13] Ensimmäisten televisioiden fyysinen koko oli huomattavasti niiden ruutua suurempi koska sen aikainen television kuvantoistotekniikka vei enemmän tilaa kuin nykyään. Kuvassa 2 on esitelty Bairdin ”Model B Televisor”-televisio vuodelta 1928.



Kuva 2. Bairdin televisio ”Model B Televisor”, © [26]

Kooltaan näiden ensimmäisten elektromekaanisten televisioiden näytöt olivat 7 senttimetrin (2,8 tuumaa) ja 20 senttimetrin (7,9 tuumaa) välillä. [13, 14] 1920-luvulla, samoihin aikoihin mekaanisen television kanssa, kehitystyötä tehtiin myös elektronisen television parissa. [13] Kokonaan elektroniset televisiot esiteltiin kuluttajille 1930- ja 40-lukujen aikana. Edes 1930-luvun ekonomiset rajoitteet eivät hidastaneet television kehitystä. Vuosien 1931 ja 1936 välillä tehtiin suuria edistysaskeleita muun muassa radioteknologioiden, vastaanotinten ja television kuvan parissa, esimerkiksi aikaisempi mustavalkokuva muuttui värikuvaksi ja television ruudun koko kasvoi. Edistys johti lopulta 525 vaakajuovaisten televisiojärjestelmien kehittämiseen. [2, 13]

Seuraava television huomattava kehitysaskel tapahtui 1950-luvulla kun väritelevisio keksittiin. Ensimmäisiä analogisen television väri- ja koodausmenetelmiä ovat muun muassa Yhdysvalloissa kehitetty NTSC (National Television Systems Committee), 15

vuotta myöhemmin Euroopassa kehitetyt PAL (Phase Alternate Line) ja sen pohjalta kehitetty SECAM (Séquentiel couleur avec mémoire). [13, 16] Resoluutioiltaan nämä analogiset televisiojärjestelmät ovat huomattavasti mekaanisia ja elektronisia edeltäjiään suurempia. Esimerkiksi NTSC-järjestelmän kuvassa on käytössä 525 vaakajuovaa ja PAL- ja SECAM-järjestelmissä 625 juovaa. Vaakajuovien lukumäärä ei kerro koko kuvan resoluutiota. Osaa juovista kutsutaan aktiivisiksi juoviksi, ja ne on varattu kuvaa varten. Sen lisäksi juovien kokonaismäärään kuuluu juovia, jotka sisältävät toissijaista tietoa, kuten tekstitelevision ja kuvataajuuden. [13, 16]

Kolmen pääjärjestelmän lisäksi olemassa on muita, näistä järjestelmistä johdettuja pienemmän suosion saavuttaneita järjestelmiä. Tällaisia ovat esimerkiksi PAL-G tai PAL-B, jotka olivat pääasiassa käytössä läntisessä Euroopassa, Australiassa ja Uudessa-Seelannissa. [15] NTSC, PAL ja SECAM ovat nykyään digitalisoituna käytössä SDTV (Standard-Definition Television), eli vakiopiirtotelevisioissa. [2, 16]

Analogisissa televisiostandardeissa käytetyt vaakajuovat tai vaakaviivat eivät täysin vastaa nykyisten digitaalisten signaalien resoluutioita. Analogisessa signaalissa kuvan pystyresoluutio on määritetty sen perusteella, kuinka monesta viivasta kuva koostuu. Kuvan vaakasuuntainen resoluutio taas määritellään sen mukaan, kuinka monta kuvalementtiä (eli pikseliä) millä tahansa viivalla voi olla. Mitä enemmän vaakasuuntaisia viivoja systeemissä on, sitä enemmän elementtejä voidaan toistaa. [27]

Esimerkiksi 625 juovaisen television analoginen resoluutio saadaan selvittämällä viivamäärä, joka sisältää kuvatietoa. PAL näytössä, jossa on yhteensä 625 juovaa, aktiivisten juovien lukumäärä on 585. NTSC-järjestelmässä aktiivisia juovia on 483 kappaletta, toissijaista tietoa varten juovia on 42 kappaletta. Lomitetussa kuvassa osa viivoista sisältää kuvaan liittyvää infoa, joka hukkuu näytön virkistystaajuuden vuoksi. Kun käytetään 4:3 kuvasuhdetta saadaan 585 viivaisen näytön vaakaresoluutioksi laskukaavalla ($585 \times 4/3 = 780$) yhteensä 780 pikseliä. [27] Taulukossa 2 on esitelty merkittävimmät analogiset standardit ja niiden resoluutiot.

SDTV, eli vakiopiirtotelevisio, on teknologia, joka käyttää analogisia lähetystekniikoita

(NTSC, PAL ja SECAM). Vakiopiirtotelevisio on teräväpiirtotelevision eli HDTV:n edeltäjä. [16] Analogiset vakiopiirtotelevision lähetykset lähetettiin 4:3 kuvasuhteella, joka oli analogisten lähetystekniikoiden kuvasuhde. Digitalisoitumisen myötä vakiopiirtotelevisio käyttää samaa 16:9 kuvasuhdetta kuin teräväpiirtotelevisio. Analogisen ja digitaalisen resoluution välillä on eroja resoluutioiden arvoissa, esimerkiksi NTSC:n aktiivisten juovien määrä muuttui analogisesta 483 koosta muotoon 480. Numeroita on muutettu selkeyden ja pienemmän pakkauskoon vuoksi. Sen lisäksi 480 on sekä jaollinen kahdella, että numeron 16 moninkerta. [28]

Taulukko 2. Analogiset resoluutiot [13, 14, 16, 27]

Järjestelmä	Juovien määrä	Aktiiviset juovat	Resoluutio	Kuvasuhde	Vuosi
NTSC	525	483	~720 x 483	4:3	1941
PAL	625	585	~780 x 585	4:3	1962
SECAM	625	585	~780 x 585	4:3	1967

Vakiopiirtotelevision lähetykset käyttävät Euroopassa DVB (Digital Video Broadcasting) – tekniikkaa. Suomessa antennilähetyksissä otettiin vuonna 2001 käyttöön DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) –tekniikka, joka mahdollisti digitaaliset lähetykset. Digitaalisiin televisiolähetyksiin siirtyminen aloitettiin ympäri maailmaa 90-luvulla, esimerkiksi Yhdysvalloissa digitaaliset kaapelilähetykset aloitettiin vuonna 1997 ja antennilähetykset vuonna 1998. [29] Suomessa vastaavat digitaaliset lähetykset aloitettiin vuonna 2001, mutta siirtymä kokonaan analogisesta digitaaliseen tehtiin antenniverkossa vuonna 2007 ja kaapeliverkossa vuonna 2008. [30]

Vuonna 2010 Suomessa otettiin käyttöön toinen tekniikka DVB-T-lähetystekniikan rinnalle. Tätä tekniikkaa kutsutaan DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2) termillä ja sen avulla on mahdollista lähettää teräväpiirtolähetyksiä. [30] DVB-T ja DVB-T2 –tekniikat käyttävät samoja videon pakkausstandardeja. Näitä ovat esimerkiksi H.264/MPEG-4 AVC (H.264/Moving Picture Experts Group-4 Advanced Video Coding) ja H.264-standardista johdettu uudempi H.265 eli HEVC (High Efficiency Video Coding). Nämä antennilähetystekniikat eroavat toisistaan muun muassa lähetyksien bittinopeuden osalta. Pakkausstandardien avulla kuva pakataan lähetyksen ajaksi ja puretaan

vastaanottimissa. [19, 21] Kuvassa 3 on esitetty missä maissa DVB-T ja DVB-T2 – tekniikat ovat käytössä ja missä maissa näitä tekniikoita ei käytetä.



Kuva 3. DVB-T- ja DVB-T2-lähetykset ympäri maailmaa [32].

2.2 HDTV

Tarve kuvanlaadun parantamiselle huomattiin jo 1950-luvulla kun televisioiden kuva ei ollut erityisen korkealaatuista [15]. Ensimmäiset teräväpiirtotelevision tutkimukset tehtiin 1960-luvulla, samoihin aikoihin kun väritelevisio julkaistiin yleisölle ensimmäistä kertaa [18]. Teräväpiirtotelevisio, eli HDTV, on suuri muutos aikaisempiin tekniikoihin ja jo siitä käytetty nimi ”HDTV” tarkoittaa suurempiresoluutioista televisiota kuin SDTV. Tutkimukset teräväpiirron kanssa aloitettiin, koska kuluttajat kaipasivat korkeampaa ja tarkempaa kuvanlaatua. [15] Ensimmäinen virallinen HDTV-tutkimusryhmä perustettiin vuonna 1968 [31] Japanin yleisradion NHK:n STRL-laitokselle (Science and Technology Research Laboratories) [18]. NHK on säilyttänyt vuonna 1964 alkaneen kiinnostuksensa teräväpiirtotelevisioita ja –resoluutioita kohtaan [31] tähän päivään asti. [18] NHK on Japanin hallituksen rahoittama yleisradio, jonka kautta Japanin hallitus on voinut toteuttaa korkeamman riskin T&K (tutkimus ja kehitystyö) hankkeita [3, 15]. Yhtiö tunnetaan muun muassa juuri teräväpiirtotelevision pioneerina.

Ensimmäisiä analogisia HDTV-lähetyksiä testattiin jo vuonna 1979, mutta vasta 1980

saatiin muodostettua ensimmäinen kestävä EHF-linkki (Extremely high frequency) 38 gigahertsin taajuudella Teknisen tutkimuslaitoksen ja NHK:n välille. [15] Aikaisempiin järjestelmiin verrattuna HDTV tarjosi huomattavan parannuksen kuvan tarkkuuteen ja äänenlaatuun [15]. NHK:n tutkimusryhmän kehittämässä analogisessa HD-kuvassa, jota kutsutaan HiVisioniksi on 1125 juovaa, joista 1035 on aktiivisia. [16] HiVision-standardin analogisia teräväpiirtolähetyksiä on ollut Japanissa vuodesta 1989 lähtien. [15, 16] Vaikka Japani siirtyi ensimmäisten joukossa analogisiin HD-lähetyksiin, se oli hitaimpia siirtymään digitaalisiin televisiolähetyksiin. Japani siirtyi käyttämään digitaalista antenniverkkoa vasta 2003, kun Yhdysvallat siirtyi digitaaliseen antenniverkkoon jo 1998. [29]

HiVision oli ensimmäinen teräväpiirtoresoluutio. [16] Vuoden 1979 jälkeen teräväpiirtotelevision kehitys on jatkunut [16] ja digitaalisiksi standardeiksi on vakiintunut vuoteen 2015 mennessä seuraavat koot: HD-ready, FullHD ja UHD. Analogisia teräväpiirtoresoluutioita ovat muun muassa HiVision ja HD-MAC (High Definition Multiplexed Analog Components). HD-MAC on ensimmäinen Eurooppalainen teräväpiirtoresoluutio. HD-MAC-standardissa oli 1250 juovaa, joista 1152 oli varattu kuvalle. [15] Taulukossa 3 on listattu television yleisimmät digitaaliset resoluutiot sekä teräväpiirtoresoluutiot.

Japani on ollut edelläkävijä teräväpiirtotekniikkojen kanssa myös HiVisionia suurempien resoluutioiden tutkimuksessa ja käyttöönotossa. Vuonna 1994 NHK aloitti tutkimuksen 8K resoluution, eli 4K x 8K standardin kanssa ja jo vuonna 2012 Japanin televisioasemat lähettivät suoratoistona 8K UHD-videota Lontoon Olympialaisista kuudella lähetystaajuudella [2, 3].

Eurooppalainen vastine Japanin NHK:n HiVisionin kehittäneelle tutkimusryhmälle on vuonna 1986 aloitettu Eureka 95-projekti. [15] Yhdysvaltojen kongressin teettämän taustatutkimuksen ”The Big Picture: HDTV & High-resolution systems” (1990) mukaan Eureka 95-projektin oli tarkoitus kehittää Eurooppalainen HDTV-järjestelmä, johon kuuluisi tuotanto-, lähetyks-, näyttö- ja nauhoitusstandardit ja laitteisto. Projektin aikana kehitettiin analoginen teräväpiirtoresoluutio HD-MAC. Japanissa kehitettyä HiVision

järjestelmää ja sen 1035 resoluutiota ei hyväksytty yleisesti käyttöön ympäri maailmaa. 1990-luvulla Eurooppa hylkäsi analogisen teräväpiirtostandardin kehitystyön. Sen tilalla aloitettiin DVB-lähetystekniikoiden ja digitaalisten televisioiden lähetystekniikoiden kehittäminen. [15]

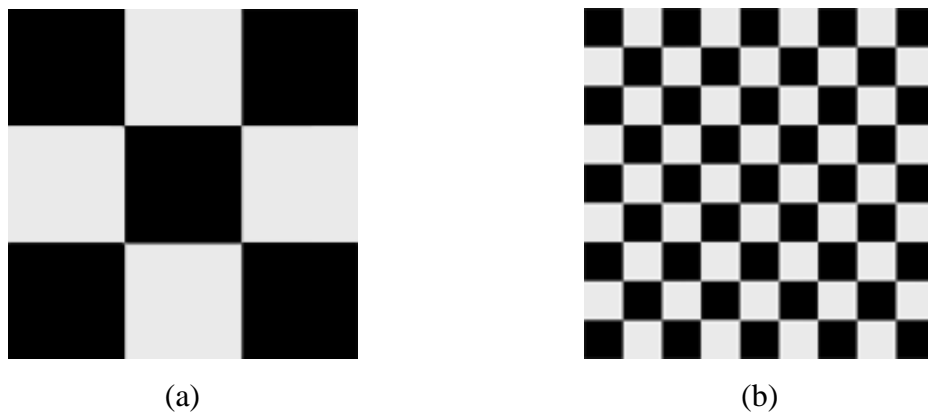
Taulukko 3. Digitaaliset televisioresoluutiot [13, 15, 16, 33]

Järjestelmä	Resoluutio	Kuvasuhde	Kommentteja
NTSC / DVD	640 x 480 720 x 480	4:3, 16:9, 3:2	Digitaalinen resoluutio, 720x480px resoluutiota kutsutaan joskus myös DVD (Digital Video Disc)-resoluutioksi. Käsite sisältää useita resoluutioita ja kuvasuhteita.
PAL & SECAM	720 x 576	4:3, 16:9	Digitaalinen resoluutio. Käsite sisältää useita kuvasuhteita.
HiVision	~ 1035 juovaa		Analoginen resoluutio. Ensimmäinen HD-resoluutio.
HD-MAC	~ 1440 x 1152	16:9	Analoginen resoluutio, Euroopan vastike Japanin HiVision standardille.
HD-ready	1280 x 720	16:9	Digitaalinen resoluutio. HD-ready resoluutiota kutsutaan myös 720p resoluutioksi.
FullHD	1920 x 1080	16:9	Digitaalinen resoluutio. FullHD-resoluutiota kutsutaan myös 1080p/i resoluutioksi.
UHD	3840 x 2160	16:9	Digitaalinen resoluutio.
8K UHD	7680 x 4320	16:9	Digitaalinen resoluutio.
16K UHD	15360 x 8640	16:9	Digitaalinen resoluutio.

2.3 Mitä on resoluutio

Resoluutiota käytetään ilmaisemaan digitaalisen näytön kuvan muodostavien elementtien, eli pikselien määrää. Resoluutio lasketaan kertomalla näytön pikseleiden määrä leveys- ja korkeussuunnassa. Tätä lukua kutsutaan näytön natiiviresoluutioksi ja se kertoo kuinka monta pikseliä maksimissaan mahtuu näytölle.

Yleensä näyttöjen resoluutio ilmaistaan pikselien kokonaismäärän sijasta käyttämällä leveys x korkeus –merkintää. Esimerkiksi FullHD-näytön resoluutio voidaan merkitä 1920 x 1080 pikseliä (px). Näyttöä voidaan kutsua myös sen korkeuden pikselimäärän perusteella, esimerkiksi FullHD-näyttöä voidaan kutsua myös 1080-resoluution näytöksi. Kuvassa 4 on havainnollistettu ero matalan (3 x 3px) ja korkeamman resoluution (9 x 9px) välillä, siitä näkee kuinka matalamman resoluution kuvaan mahtuu vähemmän elementtejä (neliöitä) kuin korkeamman resoluution kuvaan. Nykyaikaisten näyttöjen resoluutiota voi muuttaa näytön asetuksista. Esimerkiksi FullHD-resoluution näyttö (1920 x 1080px) voidaan muuttaa asetuksista vastaamaan HD-ready-resoluutiota (1280 x 720px). Näytön natiivipikselimäärä ei kuitenkaan muutu, vaan näyttö venytetään ja skaalataan vastaamaan uutta resoluutiota. Tällöin näytöllä olevat kuvat vaikuttavat isommilta näytön fyysiseen kokoon verrattuna.

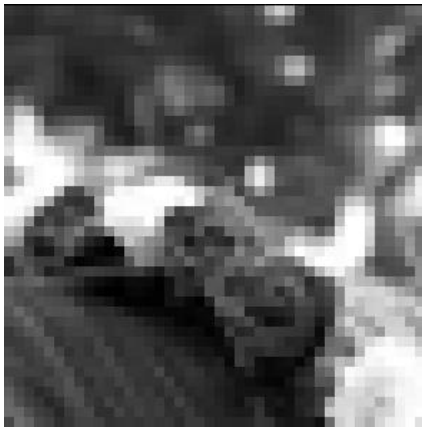


Kuva 4. (a) matala resoluutio, (b) korkeampi resoluutio, johon mahtuu enemmän pikseleitä samalle alueelle.

Resoluutio voi myös jossain yhteydessä tarkoittaa näytön erottelukykyä, eli kuinka hyvin yksittäiset pikselit näkyvät näytöllä. Tällöin käytetään ppi-yksikköä (”pixels per inch”, pikseliä pituusyksikköä kohti), joka kertoo kuinka paljon pikseleitä mahtuu tietylle alueelle. Kuvien tulostuksessa vastaava yksikkö on dpi (”dots per inch”, pistettä pituusyksikköä kohti), joka kertoo kuinka monta mustepistettä esimerkiksi tulostin voi tulostaa yhdelle alueelle. [34] Kuvassa 5 näkyy ero 10ppi ja 72ppi resoluutioiden välillä. Tietokoneen ja television ppi-arvo voidaan laskea jakamalla näytön horisontaalinen pikselimäärä näytön fyysisellä leveydellä. Esimerkiksi 17 tuumaisen FullHD-näytön ppi-

arvo lasketaan $1920 / 17$, eli tulokseksi saadaan arvo 112ppi. Samalla tavalla saadaan esimerkiksi 40 tuumaisen FullHD-television ppi-arvoksi 48ppi.

Analogisten SDTV näyttöjen resoluutiota ilmaistaan pikseleiden sijaan usein vaakajuovien määrällä [13, 15, 16]. Näytön aktiivisia vaakajuovia voidaan käyttää analogisen näytön resoluution selvittämisessä, kuten luvussa 2.1 on kerrottu. Analogisten SDTV-näyttöjen kuvasuhde on 4:3. Digitaalisten HD-näyttöjen resoluution standardi määrittää, että näiden näyttöjen kuvasuhde on 16:9 [5, 6]. Elokuvastandardien, kuten 2K ja 4K kuvasuhde on 17:9. [3]



(a)



(b)

Kuva 5. (a) Kuvan resoluutio 10ppi, (b) Kuvan resoluutio 72ppi

3 TERÄVÄPIIRTO NYKYÄÄN

Videoliikenteen arvioidaan olevan 80 prosenttia kuluttajien Internet-liikenteestä vuoteen 2019 mennessä [35]. Vuonna 2014 teräväpiirtovideoiden osuus kuluttajien videoliikenteestä oli 59 prosenttia ja vuonna 2019 sen ennustetaan olevan 70 prosenttia kaikista Internetissä tarjottavista videoista (VoD, ”Video on Demand”). [35] Tähän videoliikenteeseen kuuluu kaikki Internetistä tietokoneen ja television näytölle saapuva materiaali, kuten elokuvat, videoleikkeet ja mainokset. Teräväpiirtovideoiden määrä on kasvussa ja kuluttajat kaipaavat tarkempaa kuvaa, johon on vastattu muun muassa uusilla standardeilla kuten 4K ja 8K.

3.1 High Definition tekniikka

Vaikka HD:n kehitys on aloitettu jo 1964-luvulla, vasta vuonna 2014 noin 59 prosenttia Internetin videoliikenteestä oli HD-materiaalia. Sen lisäksi noin 80 prosentilla kaikista kotitalouksista on HD-kykenevä televisiovastaanotin. Esimerkiksi Suomessa televisiokanava MTV3 aloitti vasta 2015 teräväpiirtosisällön lähettämisen HD-kanavilla [36]. Suomen Yleisradio (Yle) aloitti HD-lähetykset D-kanavanipussa vuonna 2014 [37] ja F-kanavanipussa vuonna 2011. Kaikki televisiokanavat eivät ole kuitenkaan tarjolla teräväpiirtokanavina, eikä näiden kanavien näkyvyysalue kata koko Suomea (D-nipussa noin 85 prosenttia ja F-nipussa noin 60 prosenttia Suomesta) [37]. Antenniverkossa HD-lähetysten vastaanottamiseen tarvitaan lisäksi erillinen DVB-T2-viritin tai –digiboksi [38].

Finnpanelin vuoden 2014 raportin mukaan 43 prosentilla Suomen antennitelevisiotalouksista ja 72 prosentilla kaapelitelevisiotalouksista on televisio, joka pystyy vastaanottamaan HD-lähetyksiä (HD-ready tai Antenna Ready HD –televisio). Antenna Ready HD –televisio on televisiomerkinä, joka kertoo, että televisio pystyy vastaanottamaan HD-lähetyksiä. [39] Televisiovalmistajat ja ohjelmatuottajat varustautuvat jo seuraavan sukupolven resoluutioteknologian, UHD:n tulon. On arvioitu, että maailmanlaajuisesti UHD-lähetykset alkavat vuosina 2015-2016 ja 8K UHD-

lähetykset vuoden 2020 jälkeen [8]. Suomessa teleoperaattori DNA lähetti ensimmäistä kertaa vuoden 2014 joulukuussa UHD-lähetyksen UHD-kanavalla kaapeliverkossa [40].

Suomessa DVB-T2-tekniikkaan siirrytään laajemmin antennitelevisioverkon lähetyksissä vuodesta 2017 alkaen. DVB-T2 mahdollistaa teräväpiirtokuvan lähetykset ja se ”lisää kanavanippujen lähetyksen kapasiteettia”. [41] DVB-T2 –tekniikan lähetyksen lisääminen ei tarkoita, että vanhan DVB-T-tekniikan lähetykset loppuisivat kokonaan, mutta niiden lukumäärä vähenee huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että lähetyksille on varattu tietty määrä taajuusalueita ja niiden määrä pysyy samana. Kun siirrytään DVB-T2-tekniikkaan, taajuusalueita pystytään vapauttamaan esimerkiksi verkkoliikenteen käyttöön. [42] Niille kuluttajille, joilla ei ole jo DVB-T2-yhteensopivaa laitteistoa, tämä tarkoittaa sitä, että tarjolla olevat televisiokanavat vähenevät. Suomi on HD-lähetyksissä muuta Eurooppaa jäljessä, mutta Digita ja Viestintävirasto ovat jo aloittaneet valmistelut kokonaan uuteen DVB-T2-tekniikkaan siirtymisestä. Suomessa on tarkoitus siirtyä DVB-T2-lähetyksiin vuonna 2026. [43]

Muutokset eivät vaikuta kaapeli- tai sateliittilähetyksiin. Kaapeliverkossa käytetään DVB-C (Digital Video Broadcasting – Cable) –tekniikkaa, joka eroaa DVB-T-tekniikasta muun muassa sillä, että kaapeliverkossa on enemmän taajuusalueita ja sen kaistan nopeus on maksimissaan 38,1Mb/s (megabittia sekunnissa), joka riittää nykyisellään esimerkiksi teräväpiirtolähetyksiin. DVB-T-tekniikan maksiminopeus on 31,66Mb/s ja DVB-T2-tekniikan 50,32Mb/s. [44, 45]

3.2 4K ja UHD resoluutio

Siitä huolimatta, että olemassaolevaa infrastruktuuria HD-lähetyksille ei ole vielä kaikkialla, katseet on käännetty HD-kuvan seuraajiin, UHD ja 8K UHD –kuvaan. UHD-lähetyksiä on mahdollista katsoa Netflixistä [46] ja Youtube avasi vuonna 2010 ensimmäisen 4K-videoille tarkoitettun kanavan [11]. Vuonna 2015 markkinoilla on useita UHD-televisioita, vaikka Amazonin Instant Video ja Netflix -palvelut, sekä UHD Bluray –levyjen julkaisu on vasta vuoden 2015 lopussa. [46] Tällä hetkellä esimerkiksi blu-ray.com listaa 27 elokuvaa, jotka ovat UHD-tasoisia.

Elokuvateollisuudessa huomio on siirretty 4K-resoluutioihin [17, 47, 48], vaikka nykyään suurin osa elokuvaprojektoreista on vielä 2K-standardin mukaisia. Elokuvaprojektoreiden kehitys ei ole ollut nopeaa, sillä ensimmäiset, nykyään jo käytöstä poistetut, elokuvaprojektorit olivat 1.3K-järjestelmiä. [49] Seitsemän elokuvastudion yhteishanke DCI perustettiin vuonna 2002 edistämään digitaalisten elokuva-resoluutioiden kehitystä ja niiden järjestelmien standardisointia. [4, 5] Siitä lähtien DCI on ylläpitänyt ja kehittänyt elokuvaformaatteja, kuten 2K ja 4K. Standardi määrittelee pikselimäärän ja kuvasuhteen lisäksi muun muassa myös kuvaformaatin, kuvan pakkauksen, lähetyksen ja toiston. [6, 33] 4K-resolution kuvasuhde on 17:9 [4, 33] Televisiostandardi UHD kuvan kuvasuhde taas on 16:9. 4K-standardissa standardinmukaisesti pakattu nopeus voi olla 250Mb/s, kun taas 4K:n pakkaamaton bittinopeus voi olla jopa 7,65Gb/s [21].

4K (4096 x 2160px), eli neljä kertaa 2K (2048 x 1080px) standardin kokoinen resoluutio. Pikselien määrä muodostuu laskemalla 2K-resoluutio 2 kertaa vaakasuunnassa ja 2 kertaa pystysuunnassa yhteen. 4K-nimitystä käytetään elokuvateollisuudelle kehitetystä formaatista, jonka resoluutio on 4096 x 2160 pikseliä [33]. Saman kokoluokan televisiostandardin resoluutio on 3840 x 2160 pikseliä ja sitä kutsutaan termillä UHD. [1] Tätä pienempää resoluutiota käytetään televisioissa ja televisioiden teräväpiirto-ohjelmissa. UHD tarjoaa HD-kuvaan verrattuna kasvaneen resoluution lisäksi myös mahdollisuuden parantaa kuvaa esimerkiksi HFR (Higher Frame Rate), HDR (High Dynamic Range) – tekniikoiden ja laajemman väriavaruuden avulla. [50]

4K kehitettiin alunperin elokuvateollisuuden käyttöön (esimerkiksi jotkut projektorit ja ammattikamerat), jonka jälkeen siitä johdettiin pienempi resoluutio kuluttajien käyttöön. [6] 4K on ollut elokuvateollisuudessa keskustelunaihe vuodesta 2000 lähtien. Ensimmäiset 4K-kamerat tulivat vuosien 2007 ja 2008 aikana ja ensimmäinen kokonaan 4K-tekniikalla tuotettu elokuva, ”The Girl With the Dragon Tattoo”, julkaistiin 2011. [50] Suomessa on vain muutama 4K-elokuvateatteri, esimerkiksi Kouvolassa ja nyt vuonna 2015 pääkaupunkiseudulla Finnkino Sellon teatterissa, jonne hankittiin 4K-projektori kesäkuussa 2015. [47] Esimerkiksi elokuvat ”Tomorrowland – A World Beyond” ja ”Nälkäpeli – Matkijanärhi osa 2” on nähtävissä 4K-versioina. Muualla Euroopassa ollaan

vähän Suomea edellä, esimerkiksi Britanniassa ja Irlannissa 4K otettiin elokuvateattereissa käyttöön vuonna 2012 [48].

3.3 8K ja 8K UHD resoluutio

Kun muu maailma keskittyy 4K teknologiaan ja sen tuomiseen kuluttajille, Japani on siirtynyt UHD-resoluution kehitystyöstä eteenpäin, 8K UHD –resoluutioon. 8K UHD –resoluution kehitystyö on vienyt Japanilta tähän mennessä puolet siitä ajasta, kuin NHK:lta meni kehittää HD-resoluution laitteisto. [51] 8K, eli 8192 x 4320px resoluutio on seuraaja 4K-resoluutiolle. Samasta kokoluokasta johdettu televisiostandardi on 8K UHD, jota voidaan kutsua myös nimellä SHV (Super Hi-Vision) ja sen resoluutio on 7680 x 4320 pikseliä [9, 10, 20].

Lyhykäisyydessään 8K UHD on 16 kertaa tavallisen HD-resoluution kokoinen ja 4 kertaa uusimman kuluttajien käyttöön tulevan resoluution, UHD:n kokoinen. 8K UHD –resoluutiossa on 4000 vaakajuovaa ja sen kuvan- ja äänenlaatua esimerkiksi HD-standardiin verrattuna kuvaa myös monikanavaäänen ero. 8K UHD –resoluutiossa on 22.2-monikanavaääni [2, 9, 10, 20] kun esimerkiksi HD-standardissa on AC-3 (Arc Consistency Algorithm no. 3) –standardilla purettavaa 5.1-monikanavaääntä [9].

Tämän seuraavan generaation televisiojärjestelmän kehitystyö aloitettiin vuonna 1994 Japanin yleisradion (NHK) toimesta. [2] Ensimmäiset onnistuneet lähetykset 8K UHD:n videokuvalla tehtiin vuonna 2012, kun NHK onnistui lähettämään uuden tekniikan pakkaustekniikalla 8K UHD –videokuvaa 4,2 kilometrin päähän. [3] Sittenkin 8K tekniikka on ollut esillä muun muassa Lontoon Olympialaisissa, jossa Japani lähetti kilpailut 8K UHD suoratoistona. Japanin tavoite on lähettää Tokion Olympialaiset vuonna 2020 kokonaan 8K UHD teräväpiirtolähetyksinä [24]. Youtube aloitti tukemaan 8K UHD –resoluution videoita vuonna 2015 [11], vaikka laitteisto, jolla pystyy toistamaan tai nauhoittamaan videokuvaa, on vasta kehitystyön alla [9] tai liian kallista kuluttajien käyttöön. Siirtymä HD:sta edes UHD-lähetyksiin tulee olemaan ohjelmayhtiöille niin suuri investointi [24], että 8K UHD tuskin tulee olemaan kuluttajan käytössä tämän vuosikymmenen puolella.

8K-signaaleja voidaan lähettää pakkaamattomana noin 24 Gb/s (gigabits per second) nopeudella. Hyvälaatuista 8K UHD –signaalia on lähetty onnistuneesti myös 48Gb/s nopeudella ja 120fps (frames per second) taajuudella. [21] Myös pakkaamaton pienemmän 4K-resoluution signaali vaatii paljon kaistaa (jopa 7,65Gb/s). Suuri kuvanlaatu ja –koko aiheuttavat haasteita nykyaikaisille lähetys- ja pakkaustekniikoille [21]. Vuonna 2013 julkaistu HEVC, eli H.265, lupaa tuplata videonlaadun käytettävään verkkodatan kapasiteettiin nähden [22]. HEVC-pakkausstandardin kapasiteettia ja suorituskykyä on testattu muun muassa vuonna 2014 Z. Milicevicin ja Z. Bojkovicin toimesta [52].

3.4 HEVC

Yhä suurempaa kuvaa pitää pakata pienempään kokoon lähetystä varten ja purkaa vastaanottimessa ilman, että kuvanlaatu kärsii. [1, 22] Nykyään yleisesti käytössä oleva pakkausstandardi H.264/MPEG-4 AVC pystyy käsittelemään hyvin SD, HD ja FullHD –tason kuvaa [9, 19, 21]. H.264 on tehokkain nykyään yleisesti käytössä olevista videon pakkausstandardeista [9]. Standardi pystyy käsittelemään myös UHD- ja 8K UHD-kuvanlaatua, mutta uuden H.265 standardin avulla kaistaa pystytään vapauttamaan 50 prosenttia nykyisestä liikenteestä. H.264 standardilla esimerkiksi UHD- ja 8K UHD-kuvaa ei voi pakata tarpeeksi pieneen kokoon, jotta siitä ei aiheutuisi huomattavaa räsitusta muulle liikenteelle. [22] Uusia pakkausmenetelmiä käyttämällä UHD-tason signaali voidaan pakata 250Mb/s (pakkaamaton 7,65Gb/s) ja 8K UHD –signaali 300-500Mb/s (pakkaamaton 24Gb/s) [21].

Nykyiselle 25 gigatavun yksikerroksiselle Bluray-levylle mahtuisi 250Mb/s pakattua UHD-dataa noin 13 minuutin verran. Tulos saadaan laskemalla kuinka paljon tilaa yksi minuutti UHD-videota vie. Kun 1Mb/s tarkoittaa 0,125 megatavua sekunnissa, saadaan laskemalla $(250\text{Mb/s} \times 0,125\text{Mt/s}) \times 60\text{s}$ tulos 1,875Gt (gigatavua). Bluray-levyn koko 25 Gt jaettuna UHD-videominuutin koolla ($25\text{Gt} / 1,875\text{Gt}$) on 13 minuuttia. Samalla tavalla laskettuna pakkaamatonta UHD-videota mahtuisi 25Gt levyille 0,4 minuuttia. 500Mb/s kokoon pakattua 8K UHD –videota menee samalle levyille noin 6,6 minuuttia. Uusien UHD ja HEVC yhteensopivien Bluray-levyjien koot vaihtelevat kaksikerroksisen 66Gb ja

kolmikerroksisen 100Gb välillä ja ne pystyvät toimittamaan dataa 108Mb/s nopeudella [53].

Vuonna 2003 esitellyn H.264:n korvaajaksi on nousemassa vuonna 2013 julkaistu HEVC tai H.265, jonka uskotaan pienentävän bittinopeutta jopa 50 prosenttia niin, että kuvanlaatu pysyy ennallaan vanhaan H.264-standardiin verrattuna. [19, 22] Sittemmin väitettä on tutkittu ja arvioitu useiden tutkijoiden toimesta. Tutkimuksissa on todettu, että HEVC-standardin avulla kuvanlaatu pysyy H.264/MPEG-4 AVC –standardin tasolla ja bittinopeus puolittuu. [22, 52] HEVC-tekniikan kehitys aloitettiin vuonna 2010, kun ISO (International Standards Organization), MPEG (Moving Picture Experts Group) ja ITU perustivat kehitystiimin tutkimaan ”uutta korkean suorituskyvyn videon koodausstandardia” ja ensimmäinen versio julkaistiin 2013 [22]. Aikaisemmin todetun suorituskyvyn lisäksi HEVC eroaa vanhan standardin H.264/AVC:n toiminnallisuudesta muun muassa siten, että HEVC-standardissa kuva voidaan pakata joustavammin eri kokoihin osiin. [22, 52].

3.5 Tarvitaanko näin paljon pikseleitä?

Tekniikan kehityssuunta resoluutioissa on ollut voimakkaasti ylöspäinsuuntautuvaa. Vain muutamassa kymmenessä vuodessa HD-tason kuvasta on päädytty 8K UHD-tason, eli 16 kertaa HD-tason kokoiseen kuvaan [20]. Onko resoluution kasvattamisesta kuitenkin hyötyä ja millä hinnalla kasvava kuvakoko tulee kuluttajalle? 8K resoluution kamera- ja nauhoitustekniikka tulee huomattavasti resoluution kehitystä jäljessä [10]. Esimerkiksi ensimmäisten kokeellisten tallennuslaitteistojen kamerat vuodelta 2002 painoivat jopa 80 kilogrammaa (kg). Näillä laitteistoilla pystyttiin nauhoittamaan 18 minuutin edestä materiaalia 3,5 teratavun tallennustilalle. Vuoteen 2010 mennessä tallennuslaitteistot olivat kuitenkin kehittyneet huomattavasti, kameran koko oli pienentynyt 20 kilogrammaan ja uusilla laitteilla pystyttiin tallentamaan materiaalia 2 tunnin verran. [20] Vuonna 2013 oltiin neljän (4) kilogramman kokoluokassa [51]. Tunnettu kameravalmistaja Canon on nyt vuonna 2015 kehittämässä 4K- ja 8K-resoluution kameroita [53]. UHD televisiot alkavat nyt olla kuluttajille sopivissa hinnoissa ja ohjelmayhtiöt ovat vasta päivittämässä lähetystekniikkaansa nykyaikaisiin tekniikoihin, jotka tukevat HD-kuvaa. [55]

Resoluution kasvaessa myös näytön koon täytyy kasvaa, jotta suuremman resoluution hyödyt näkyvät ihmissilmälle [56]. UHD-näyttöjä on markkinoilla useita eri kokoja, esimerkiksi, jos selaa Amazon.comin televisiotarjontaa. Nykyään saatavilla olevien 8K UHD-televisioiden koot vaihtelevat 85 ja 145 tuuman välillä, kun keskimääräinen television koko on edelleen 46 tuumaa. [24] Television katseluetäisyydestä television kokoon nähden on useita eriäviä mielipiteitä. Saksalaisen Heinrich-Hertz Insituutin mukaan optimaalisin katseluetäisyys on 3-4 kertaa näytön korkeus [57]. Stefan Winklerin kirjassa ”Digital Video Quality: Vision Models and Metrics” [58] taas kerrotaan, että suosituin katseluetäisyys pienistä näytöistä on 6-7 kertaa näytön korkeus, vaikka näytön kasvaessa lähestytään etäisyyttä, joka on 3-4 kertaa näytön korkeus. Japanin NHK:n tutkimusten mukaan HDTV:n optimaalisin katseluetäisyys on 3 kertaa näytön korkeus 30 asteen kulmasta ja 8K UHD:n katseluetäisyyden tulisi olla 0,75 kertaa näytön korkeus 100 asteen kulmasta [9, 10, 31]. 8K UHD tutkimus vuodelta 2012 ehdottaa optimaaliseksi katseluetäisyydeksi 0,75-1,00 kertaa kuvan korkeutta, kun katselukulma on 80-100 astetta [20]. Carlton Balen mukaan UHD:n resoluution hyödyn huomaa kun katsoja on vähintään 1,6 metrin (5,5 jalkaa) etäisyydellä 84 tuuman näytöstä tai 55 tuuman näytön tapauksessa noin metrin etäisyydellä (3,5 jalkaa) ruudusta [56]. Yksimielistä päätöstä katseluetäisyydestä ei ole olemassa, mutta kuluttajien keskimääräisen näytön koon perusteella voidaan päätellä, että katseluetäisyys ei tule siirtymään niin lähelle, että esimerkiksi UHD ja 8K UHD resoluutioiden ero olisi selkeä.

Olemassa on myös 5K-resoluution tietokonenäyttöjä. Esimerkiksi Apple toi vuonna 2015 markkinoille 27 tuuman 5K-resoluution HD-näytön. Tätä resoluutiota ei kuitenkaan ole saatavilla televisionäyttöihin ja pääasiassa 5K-näytölle voisi kuvitella olevan käyttöä esimerkiksi 4K-videoiden jälkikäsitelyssä. 5K-resoluution näytöllä voisi näin käsitellä helposti täysikokoista 4K-resoluutiota ja samalle näytölle mahtuvat muun muassa kuvankäsittelyohjelmien valikot. [59] 4K-kokoista videota ei kuitenkaan ole vielä tarjolla huomattavia määriä, vuonna 2015 tähän mennessä on olemassa vain esimerkiksi Internet-palvelut Youtube, Netflix ja Amazon, jotka näyttävät UHD-sisältöä [12, 46].

Kun HD kuvan katsomiseen tarvitaan jo uutta laitteistoa, niin kuluttajan kuin lähetyksen tuottajan puolelta, mitä kaikkea tarvitaan UHD- tai jopa 8K UHD-kuvan katsomiseen?

Suomessa ollaan siirtymässä DVB-T2-lähetystekniikkaan, joka mahdollistaa HD-lähetykset toisin kuin aikaisempi DVB-T-tekniikka. Kuluttajien tulee parhaassa tapauksessa hankkia vain HD-viritin televisioonsa, mutta toisille se voi tarkoittaa kokonaan uuden television hankkimista, erityisesti UHD- ja 8K UHD-lähetyksien tapauksessa. [41, 42]

Suuremman resoluution videota on helpompi suurentaa ja pienentää ilman, että kuvanlaatu ja yksityiskohtien määrä vähenee verrattuna nykyisiin HD-resoluutioihin. SD-resoluutioihin verrattuna ero on huomattava. Siinä missä SD resoluutiolla on 100 prosentin tarkennuksella nähtävissä yksittäisiä pikseleitä, 100 prosentin suurennettu 8K UHD esimerkiksi FullHD-näytöllä näyttää edelleen todella tarkalta. Tässä kuitenkin huomataan sama, kuin mitä television katseluetäisyydellä voidaan todistaa, mitä lähempänä kuvaa olet, sitä tarkemmalta se näyttää aikaisempiin standardeihin verrattuna. Televisiota ei kuitenkaan katsota 20 senttimetrin etäisyydeltä, joten mitä kauempaa katsotaan, sitä epätodennäköisemmin katsoja näkee yksittäisiä pikseleitä matalamman resoluution näytöllä.

HD-tekniikkaan pystyvän kuva-, lähetys- ja katselutekniikan kehittyessä on keskityttävä myös tallennustekniikkaan. 8K UHD-videota voidaan toistaa pakkaamattomana 7,65Gb/s nopeudella, joten kameran pitää pystyä käsittelemään suuria datamääriä ja tallentamaan niitä riittävälle tallennusmedialle. Japanin NHK on kehittänyt tietokoneen, joka pystyy tallentamaan jopa 1,5 teratavua. Tämän kokoiselle medialle voidaan tallentaa 8K UHD -resoluution kuvaa noin 50 minuutin edestä. [60] Todennäköisesti suoratoistopalveluista ja Internetin videopalveluista tulee aikaisempaa suosituimpia suuren resoluution vaatiman tallennusmäärään vuoksi, vaikka tallennustilan hinta kuluttajalle on tullut huomattavasti alas HD-videoiden yleistyessä. Jos ei muuta, niin 8K:ta voidaan hyvin käyttää kun tallennetaan nykyaikaa tuleville jälkipolville [24].

4 KUVANLAADUN PARANTAMINEN

Tässä vaiheessa ollaan todettu, että UHD on täällä jäädäkseen ja 8K UHD on hyvää vauhtia tulossa. Vuonna 2015 eletään siinä mielessä erilaista kautta kuin aikaisemmin 2000-luvulla, kun olemassaolevaa lähetys- ja vastaanotinarkkitehtuuria täytyy päivittää uudempaan, jotta teknologia pysyy mukana tekniikan kehityksessä. Laittevalmistajat eivät todennäköisesti ota investointeja suurempien resoluutioiden kanssa ennen kuin UHD-televisiot ja –kamerat ovat saavuttaneet suosiota kuluttajien parissa.

Elokuvamaailmassa 4K on ollut tulossa jo vuodesta 2000 lähtien [50]. 4K elokuvateattereita löytyy jo ympäri Eurooppaa ja uusimpia elokuvia on mahdollista käydä katsomassa 4K-formaatissa. Tämän korkean resoluution sisältöä pystytään nauhoittamaan uusilla 4K-kameroilla, joita valmistavat esimerkiksi Canon, Olympus, NHK, Sony, Astro ja JVC (Victor Company of Japan) [17, 53]. Taulukossa 4 on listattu elokuvateollisuuden käyttämiä HD-elokuvakokoja. Muita sovellusalueita 4K-videolle elokuvateollisuuden lisäksi voisi olla esimerkiksi videokonferenssit. Videokonferenssit nykyään kärsivät huonosta kuvanlaadusta, sillä isolla näytöllä matalampiresoluutioinen kuva pikselöityy. 4K videon avulla pystytään tuomaan realistisempi kuva videoneuvotteluihin, jolloin osallistujat näkevät realistisemman kuvan videoneuvottelun osapuolista, joka tuo ”paikan päällä” tunteen. Tämä voi parantaa videoneuvotteluiden suosiota, erityisesti, kun nykytekniikka pystyy jo käsittelemään 4K-tason videokuvaa ilman lisäkustannuksia yrityksille. [61]

Taulukko 4. Digitaaliset elokuvaresoluutiot [13, 15, 27, 33]

Kokoluokka	Resoluutio (px)	Kuvasuhde
2K	2048 x 1080	17:9
4K	4096 x 2160	
8K	8192 x 4320	
16K	16384 x 8640	

Siinä missä UHD-televisioita on jo saatavilla kaupoista, UHD-resoluution sisältö näille televisioille löytyy pääasiassa Internet-palveluista, kuten Netflix, Youtube ja Amazon.

Televisiossa HEVC-pakatut UHD-lähetyskset ja -kanavat ovat vasta tulossa, ensimmäisiä kokeiluja on ollut vuodesta 2014 lähtien. Esimerkiksi Suomessa DNA kokeili vuoden 2014 lopussa lähettää kaapeliverkossa Eutelsatin HEVC-pakattua UHD-kanavaa ”HOT BIRD 4K1” [40]. Eutelsatin kanava oli ensimmäinen HEVC-pakattu kanava Euroopassa [62], toinen Eurooppalainen toimittaja on SES S.A., jonka satelliittiverkossa on lähetetty muun muassa UHD-tasoisia urheilukanavia [63]. Yhdysvalloissa NASA (National Aeronautics and Space Administration) suunnittelee aloittavansa ympärivuorokautiset UHD-lähetyskset UHD-kanavalla vuoden 2015 loppuun mennessä [64]. Suomessa antenniverkossa valmistaudutaan edelleen HD-kuvan lähetyskset mukanaan tuomiin muutoksiin. Kaapeliverkko on jo valmis siirtämään teräväpiirtolähetyskset ja Suomessa vuonna 2011 suurin kaapelitelevisio-operaattori DNA [65] on jo tehnyt kokeiluja UHD-kanavien lähetyskset. Tämän perusteella voidaan arvioida, että DNA on todennäköisesti yksi ensimmäisten operaattorien joukossa aloittamaan UHD-kanavien lähetyskset pysyvästi.

Jos näyttöjen resoluutio kasvaa edelleen, seuraava kokoluokka on nykytahdin mukaan 16K. 16K eli 128 megapikselin (16K noin 16384 x 8640 px, 16K UHD noin 15360 x 8640 px) näyttö olisi huomattavasti suurempi kuin nykyään suurin resoluutio 8K UHD, joka ylittää ”vain” 32 megapikselin pikselimäärään. UHD, eli 8 megapikselin näytöt ovat markkinoilla nyt ja 8K UHD on tulossa muutaman vuosikymmenen sisään [3, 18, 55], mutta käytännössä 16K UHD-resoluution näyttö tulisi olemaan liian suuri tavallisen kuluttajan käyttöön.

Esimerkiksi jos Amazon.comista tällähetkellä ostettavissa oleva pienin UHD-resoluution televisio on 39 tuumaa, samaa ppi-arvoa (noin 98,5ppi) käyttämällä saadaan 8K UHD-televisio kooksi 78 tuumaa ja 16K UHD-televisio kooksi 156 tuumaa. Uutena ostettuna 39 tuuman televisiolle tulee hintaa 344,53 dollaria (noin 323,55 euroa) ja 78 tuuman UHD-televisiolle 5 997,99 dollaria (noin 5632,71 euroa). 156 tuuman televisioita ei löytynyt, puhumattakaan 8K UHD tai 16K UHD-resoluution televisioista.

8K UHD ei välttämättä tule olemaan suosittu kuluttajien keskuudessa, mutta elokuvateollisuudessa ja projektorinäytöissä 8K-resoluutiolle on käyttöä. Jopa 16K resoluutiolle elokuvateollisuudessa voidaan löytää käyttökohteita, esimerkiksi IMAX-

näyttöjen (Image Maximum) kanssa. Maailman suurin IMAX-näyttö on 35,6 metriä leveä ja 29,4 metriä korkea [66], tuumakoossa se vastaisi noin 1406 tuumaa ja 16K-resoluutiolla sen ppi-arvo olisi noin 11ppi.

Vuonna 2013 3D-teknologia (”three dimensional”) oli uusin edistysaskel televisio- ja elokuvatekniikan saralla, mutta nyt vuonna 2015 se on kadonnut lähes kokonaan. Televisiovalmistajat, kuten muun muassa Samsung ja Sony, eivät enään tue 3D-tekniikkaa ja vuoden 2015 CES (Consumer Electronics Show) konferenssissa ei ollut yhtään 3D-tekniikkaa. Tänä vuonna CES esitteli muita innovaatioita, kuten kaarretut näytöt ja korkeammat resoluutiot. [67]

Korkeampi resoluutio voi kuitenkin olla hyödyksi 3D-tekniikassa, jossa pyritään realistisemman kuvan lisäksi luomaan realistisuutta ulottuvuuden avulla. 3D-tekniikan tulee kuitenkin kehittyä nykyisestä huomattavasti enemmän, jotta sen suosio saadaan uudelleen kasvuun. Nykyisellään 3D kärsii binokulaarisen parallaxsin, eli kahden erillisen kuvan aiheuttamasta ongelmasta, joka aiheuttaa muun muassa pahoinvointia kun katsoja joutuu keskittymään kuvaan jotta hahmottaisi ulottuvuudet. [18, 23] Tämän lisäksi kuluttajat eivät halua eristää television katselukokemusta käyttämällä 3D-laseja. Yksi 3D-television heikkouksista on myös se, että katsojan tulee istua suoraan television edessä, jotta kuva olisi tarkka myös reunoilta. [23]

Integraalista 3D –tekniikkaa on ehdotettu vanhan 3D:n korvaajaksi erityisesti teräväpiirtotelevisioille. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa 3D-kuvaa 8K UHD resoluutiolla ja esimerkiksi olla katsottavissa ilman 3D-laseja. Tekniikassa käytetään samoja periaatteita kuin IP-valokuvauksessa (Integral Photography), eli kuva muodostetaan tallentavan mikrolinssimatriisin ympärille ja 3D-kuva muodostuu näiden linssien generoimien valokuovien avulla [18, 23]. Jo vuonna 2010 Toshiba esitteli ilman laseja katsottavissa olevan 3D-näytön, jonka 3D-kuvaa pystyy katsomaan yhdeksästä (9) eri katselukulmasta. [68] Tämä poistaisi nykyisen 3D-katselun epäsuosiota aiheuttaneet seikat, kuten 3D-lasit sekä kahdesta eri kuvasta muodostuvan [18] 3D-kuvan aiheuttaman huimauksen.

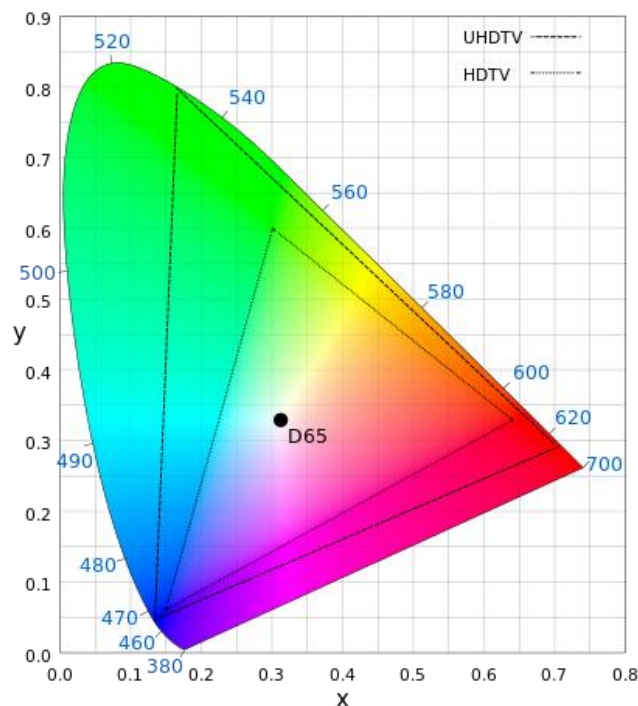
Kuvan laatua voidaan parantaa muillakin tavoilla kuin ainoastaan kasvattamalla pikselien määrää. Esimerkiksi nykyiset LCD-näytöt (Liquid Crystal Display) kärsivät liikeresoluutiosta, kun näytön kokoa suurennetaan ja resoluutio kasvaa. LCD-näyttöjen ongelmana on ollut aina liikeresoluution korostuminen, LCD-näytöissä käytetystä tekniikasta johtuen. Esimerkiksi LED-näytöt (Light Emitting Diode) käyttävät eri tekniikkaa, jossa jokaisella pikselillä on oma valonlähde, joten niissä esiintyy vähemmän liikeresoluutiota. Liikeresoluutiolla tarkoitetaan että HD-kuva muuttuu osittain epätarkaksi niiltä kohdin, missä kuvassa on liikkuvia elementtejä. Tämä korostuu erityisesti silloin, kun television suositeltu katseluetäisyys pienenee resoluution kasvaessa ja näytön koon suurentuessa. Liikeresoluutiota on pyritty ratkaisemaan muun muassa HFR-tekniikan (High Frame Rate) avulla [50]. HFR:llä videon kuvataajuutta nostetaan, esimerkiksi 240Hz LCD-televisiossa esiintyy vähemmän liikeresoluution epätarkkuutta kuin 120Hz näytöissä erityisesti jos lähdetiedoston on kuvattu samalla kuvataajuudella kuin millä se toistetaan. [69]

UHD-resoluution vaatimat datamäärät ovat 16 kertaa suurempia kuin HD-resoluution datamäärät. EBU on tutkinut kuvataajuuden kasvattamisen vaikutusta HD-kuvan parantamiseen. Tutkimuksessa todettiin, että tuplaamalla HD-videon kuvataajuus HFR-tekniikalla saadaan suurempi hyöty kuvanlaatuun kuin mitä resoluution kasvattamisella UHD-resoluutioksi pystytään saavuttamaan. Sen lisäksi HFR-tekniikan käyttö tuplaa HD-videon vaatiman datamäärän, kun UHD-resoluution käyttö vaatii 16 kertaisen datamäärän. [50]

HFR-tekniikkaa on käytetty paljon elokuvateollisuudessa, esimerkiksi uusimmista Hobitti-elokuvista on mahdollista käydä katsomassa HFR 3D-versio, joka tarkoittaa sitä, että elokuvateollisuudessa käytetyn 24fps kuvataajuuden sijasta elokuva on kuvattu käyttäen 48fps taajuutta. Tällöin kuvia toistetaan enemmän nopeammassa tahdissa, jonka sanotaan luovan realistisempi kuva liikkeessä. 48fps kuitenkin aiheuttaa herkästi ”fantasiamaisen”-efektin, kun liike videolla on huomattavasti sulavampi kuin mihin katsoja on tottunut. HFR-tekniikan lisäksi voidaan kehittää kuvan väriavaruutta. Kuvassa 6 on esitelty HD- ja UHD-televisioiden standardien väriavaruuksien välillä oleva ero ennen kuin väriavaruutta laajentavia tekniikoita on lisätty.

Valokuvateknologiassa jalansijaa saanut HDR (High Dynamic Range) on yksi tapa tuoda realistisempi kuva katsojalle. Ero voidaan huomata vertaamalla esimerkiksi samaa videokuvaa HDR HD-näytöllä ja tavallisella UHD-näytöllä. Tällöin HDR HD tuottaa realistisemmän kuvan kuin UHD. Tämä johtuu siitä, että HDR-tekniikalla voidaan korostaa kuvan yksityiskohtia ja se tarjoaa paremman kontrastin värien välillä kuin muut tekniikat. [50]

HDR-tekniikan avulla esimerkiksi televisionäyttöjen väriskaalaa voidaan laajentaa ja tuoda lähemmäksi sitä, mitä ihmissilmä pystyy erottamaan ja näin parantaa näyttöjen värejä. [70, 71] Syyskuussa 2015 resoluutiotekniikan pioneeri NHK julkaisi seuraavan HD-tekniikan kehitysaskelen; 8K resoluution näytön, joka käyttää HDR-tekniikkaa. [70] Käytännössä HDR tarkoittaa sitä, että kuvan värejä kirkastetaan ja valotusta parannetaan niin, että aikaisemmin kuvan varjoiset tai valoisat kohdat näyttäivät samansävyisiltä. Tällöin esimerkiksi kuvassa näkee sekä kirkkaan taivaan, että varjoisan maan selkeästi.



Kuva 6. HDTV ja UHD TV-näyttöjen väriavaruuden laajuuden ero [72].

Nyt myös Virtual Reality (VR) tekniikan suosio on korkeammalla kuin koskaan ennen [73]

ja VR-laitteet kehittyvät huimaa vauhtia. Korkean resoluution tuominen Virtual Reality –laitteisiin tuo käyttäjälle aikaisempaa realistisemman kokemuksen. Esimerkiksi, jos verrataan ensimmäisiä Oculus Rift DK (Developer Kit) uudempiin Oculus Rift HD-laitteisiin, ero resoluutiossa on merkittävä ja käyttäjä huomaa sen helposti. Jopa 8K-resoluutio per silmä on liian vähän näissä laitteissa [74]. Kun korkea resoluutio tuodaan lähemmäs katsojan silmää saadaan katselukokemuksesta realistisempi ja näin pystytään täyttämään muun muassa nekin edellytykset, joita ihmissilmältä vaaditaan 8K-resoluution erottamiseen isossa televisionäytössä.

5 POHDINTAA RESOLUUTION KEHITYKSESTÄ

Teräväpiirtoresoluutioiden kehitys on edennyt nopeaa vauhtia ensimmäisten tutkimusryhmien perustamisen jälkeen. 60-luvulta lähteneen kehityksen nopeudessa voidaan huomata vauhdin kiihtyminen edelleen erityisesti 90-luvun digitalisoitumisen myötä. Ensimmäisen analogisen teräväpiirtoresoluution kehittämiseen kuluneessa ajassa digitaaliaikana ollaan siirrytty HD-resoluutiosta (1920 x 720 pikseliä) jopa 16 kertaa HD-resoluutiota suurempiin, 8K UHD (7680 x 4320 pikseliä) -resoluutioihin. Olemassaoleva infrastruktuuri ei kuitenkaan pysy resoluution vaatimusten perässä, joten odotettavissa on kehityksen hidastumista. Ainakin siihen saakka, kunnes kuluttajat ovat hyväksyneet UHD-resoluution vastaavalla tavalla kuin FullHD-resoluution nykyään. Ennen tätä pistettä UHD ja 8K UHD-resoluutioiden ja niille sopivan laitteiston tuottaminen ei ole kannattavaa, sillä kuluttajat eivät pysy kehityksen mukana.

Elokuvateollisuudessa taas 2K on pitänyt johtoasemaa pitkän aikaa. Aikaisemmat 1.3K-elokuvaprojektorit on jo poistettu käytöstä ja esimerkiksi Suomessa tähän mennessä vasta vain muutamassa elokuvateatterissa on 4K (4093 x 2160 px) -projektorit. 3D-elokuvien suosion laskiessa 4K-elokuvilla on mahdollisuus nousta suosituimmaksi elokuvamediaksi, erityisesti nyt, kun monet mediat keskittyvät uutisoimaan korkeamman resoluution televisioista ja laitteista. Muualla Euroopassa 4K-elokuvateattereiden tilanne on Suomea parempi, mutta 4K-teattereiden lukumäärän ja 4K-elokuvien mainostuksen tulisi nousta huomattavasti, jotta suuri yleisö saadaan kiinnostumaan niistä.

Nykyteknologian puutteista huolimatta FullHD-resoluutiota korkeammalle resoluutiolle on kysyntää. Ihmiset ovat kiinnostuneita saamaan terävämmän kuvan televisioihinsa ja koska markkinoilla on tarjolla enään vain harvoja FullHD-televisioita, kuluttajat kääntyvät UHD:n puoleen. Tämän jälkeen kysyntä siirtyy katsottavan sisällön kohdalle. UHD ja 4K -sisältöä on tarjolla tällä hetkellä pääasiassa Internetissä ja sielläkin vain muutamilla palveluilla, kuten Youtube, Netflix ja Amazon. Nykyisillä pakkausstandardeilla pakattu UHD-video kuluttaa verkkoa huomattavasti enemmän kuin FullHD-video. Ongelmaa ratkaisemaan on kehitetty uusi H.264/AVC -standardista johdettu standardi, H.265 HEVC, joka puolittaa videoiden koon ja sen vaatiman kaistan. Monimutkaisemmin pakattu

video voi aiheuttaa uusia ongelmia, pystyvätkö nykypäätelaitteet purkamaan suuren määrän teräväpiirtoresoluutiovideota ilman liikaa rasitusta vai selviävätkö nykyiset laitteet uudesta standardista helposti? Esimerkiksi kaikki digiboksit tai virittimet eivät välttämättä pysty purkamaan HEVC-standardin videota.

Yksi potentiaalinen sovellusalue 4K-videon kuvalle on videokonferenssit ja yritysten videoneuvottelut. Korkeamman resoluution ja paremman lähetystekniikan avulla kuvan taso paranee ja videoneuvottelun osallistujat kokevat olevansa enemmän paikan päällä, vaikka kävisivät neuvottelua verkon yli. Nykyiset videoneuvottelusovellukset eivät toista korkeaa resoluutiota, mutta jos resoluutiota lisätään, videoneuvottelusta tulee realistisempi. Tällöin myös videoneuvotteluiden suosio voisi kasvaa ja yritykset voisivat säästää matkakuluissa. 4K-laitteiston hankkiminen videoneuvotteluihin onkin siksi hyvin vartenotettava hankinta.

UHD-resoluutiolle tarvitaan uusia tallennusmedioita. Nykyisille 25 gigatavun yksikerroksisille Bluray-levyille pakattua UHD-videota mahtuisi 13 minuuttia. Uuden standardin kaksi- ja kolmekerroksisten yli 60 gigatavun Bluray-levyjen julkaisu on arvioitu vuoden 2015 loppuun ja ne ratkaisevat ainakin hetkellisesti tallennusongelman. Tallennustilan vaatimuksista johtuen suoratoistopalveluiden suosio tulee todennäköisesti kasvamaan, sillä kuluttajien tulisi hankkia paljon tallennustilaa, jotta olisi mahdollista tallentaa useampi kuin yksi video yhdelle kovalevyille. Jos resoluution koko kasvaa, tulevatko kuluttajat hankkimaan koteihinsa edes 8K UHD-resoluution televisiota, jos televisio säilyy nykyisellään? Vai tuleeeko televisioteknologian kehittyä enemmän pois päin kaarevista ja 3D-näytöistä, kohti ohuempaa ja suurempaa näyttöä? Esimerkiksi projektorin tapaan koko seinän kokoiset heijastavat televisiopinnat tai –tapetit voisivat olla kehityssuunta myös televisioille.

4K ja UHD ovat jo täällä ja 8K on vakaasti tulossa, mutta sitä suuremman resoluution televisioille ja elokuville ei ole välttämättä tarvetta kuluttajien koteihin, ellei television nykyinen fyysinen muoto kehity esimerkiksi koko seinän televisiotapetiksi. Kun nykyteknologiat eivät pysty ongelmitta suoriutumaan UHD-resoluution kuvasta ja ongelmaa ratkaisemaan kehitetyt tekniikat huonontavat kuvanlaatua tai ainoastaan

puolittavat videon koon ja sen vaatiman kaistan, mitä tapahtuu kun videon koko on 16 kertaa UHD-resoluution koko? Nykyisellä kehitystahdilla 8K-resoluution seuraaja olisi 16K, eli 128 megapikselin (16384 x 8640 px) resoluutio. 16K-näytöt tulevat todennäköisesti olemaan liian suuria tavallisen kuluttajan käyttöön, mutta niille voi löytyä sovellusalueita esimerkiksi elokuvateollisuudesta. Nykyään maailman suurimmalla IMAX-näytöllä Sydneyssä voitaisiin toistaa 16K-resoluution kuvaa 11ppi tarkkuudella. 11ppi ei vastaa nykyisten näyttöjen noin 100ppi:n tarkkuutta suhteutettuna, mutta tässä voisi olla seuraava kehityskohde, jos resoluutiota halutaan kasvattaa edelleen.

Resoluution kasvattamisen ohella kuvanlaatua voidaan parantaa esimerkiksi HDR ja HFR-tekniikoiden avulla. HDR-tekniikalla kuvaan pystytään tuomaan laajempi väriskaala ja HFR-tekniikalla kuvan kuvataajuutta voidaan parantaa, jotta katsoja kokee näkemänsä kuvan aikaisempaa realistisemmin. Realismia voidaan hakea myös 3D-tekniikan avulla. Nykyisellään 3D-tekniikka ei ole suosittu kuluttajien keskuudessa, mutta esimerkiksi integraalisen 3D:n avulla nykyisiä ongelmia, kuten huimausta ja kuvan epätarkkuutta, voitaisiin korjata. 3D:n suosio voi nousta, jos hankalista 3D-laseista päästään eroon.

Virtual Reality (VR) tekee tuloaan ja ihmiset ovat aikaisempaa kiinnostuneempia VR-laitteista. VR-laitteiden resoluutiota ja muita ominaisuuksia on pyritty parantamaan jo useita vuosia ja esimerkiksi 8K- ja jopa 16K-resoluutioilla voisi olla hyvinkin sovellusalueita näiden laitteiden parissa. Jos 8K-resoluutio per silmä VR-laseissa on liian vähän, voisiko 16K olla tarpeeksi? 16K vaatii kuitenkin niin paljon tallennustilaa, ettei ole realistista odottaa, että virtuaalilasien kehittäjät keskittyisivät ensisijaisesti tallennus-, pakkaus- tai lähetysstandardien kehittämiseen. Varsinkaan kun televisio- ja elokuvateknologiassa nämä ovat tällä hetkellä suuntia, joissa aktiivista kehitystyötä tapahtuu paljon.

Mahdollisia jatkotutkimusaiheita resoluution parissa voisi olla esimerkiksi 16K-resoluutio ja sen sovellukset, 3D-tekniikka 8K UHD-resoluutiolla tai television siirtäminen televisiotasoilta seinille. Vaikka science fiction-elokuvat ovat näyttäneet hologrammeja avaruudessa jo vuosikymmeniä, ei tekniikka nykyisellään ole ihan vielä samalla tasolla. Olemassa on jo kuitenkin hyviä sovelluksia, joita kehittämällä ja mahdollisesti

yhdistämällä tulevaisuudessa voidaan kuvaa katsella kolmiulotteisesti yhdeltä pinnalta heijastettuna.

6 YHTEENVETO

Työssä käytiin läpi television kehitystä painottuen erityisesti teräväpiirtotekniikkaan. Teräväpiirtoresoluutiot ja niiden tutkimustyö on kehittynyt nopeasti viimeisen 60 vuoden aikana ja tekniikka on pyritty pitämään kehityksessä mukana. Uudet UHD ja 8K UHD -resoluutiot ovat tulossa ja niiden vaatimien teknologisten resurssien vuoksi on kehitetty esimerkiksi uusia pakkausstandardeja, joista HEVC jopa puolittaa videon koon ja sen vaatiman kaistan määrän. Eri laitevalmistajat ja televisio-operaattorit päivittävät lähetystekniikoitansa yhä uudempiin, UHD-yhteensopiviin tekniikoihin ja UHD-lähetyskiä on suunnitteilla jo vuoden 2015 aikana.

4K UHD-resoluutio on markkinoilla ja erityisesti Japani valmistautuu 8K UHD:n tuloon. Vaikka 4K-sisältöä ei ole vielä tarjolla paljoa, 4K-teknologioiden kehitys on siinä pisteessä, että 4K-sovelluksille elokuvateollisuuden ulkopuolella on käyttöä. 4K-videoneuvotteluiden avulla yritykset voivat tuoda videoneuvotteluita realistisemmiksi korkeamman ja tarkemman kuvan avulla. Tällöin videoneuvotteluista voidaan saada aikaisempaa houkuttelevampia, jos realistisemmän videokuvan avulla voidaan vähentää kokousmatkustusta ja näin myös niistä aiheutuvia matkakuluja. Toisen sukupolven televisioiden lähetystekniikan standardit ovat valmiita ja esimerkiksi Suomessa ollaan tehty suunnitelma nykyisen infrastruktuurin päivittämisestä uuteen, DVB-T2-tekniikkaan antenniverkossa. HD-sisällön suosio tulee kasvamaan entisestään, joten infrastruktuurin pitää päivittyä ja ottaa huomioon myös tulevaisuuden haasteet. Esimerkiksi 8K UHD-resolution kuvaa ei nykyisillä standardeilla voi toistaa ilman merkittävää räsitystä verkolle, mutta uudempien tekniikoiden kanssa 8K UHD-resolutionin lähetykset ovat mahdollisia.

Elokuvateollisuudessa jopa hypoteettinen 16K-resoluutio voi olla kannattava, sillä nykyään on olemassa 16K-resoluutiolle sopivia näyttöjä. 8K UHD-resoluutio ei kuitenkaan vielä tule olemaan kuluttajien keskuudessa kannattava, sillä resoluution vaatima näytön koko kasvaa tämän hetken kuluttajien mieltymyksiin nähden liian suureksi. 8K-resoluutiolle löytyy sovellusalueita muun muassa Virtual Reality –sovelluksista. Resoluution kasvattaminen ei kuitenkaan ole ainoa vaihtoehto, millä kuvanlaatua voi parantaa. Täydentäviksi ja jopa korvaaviksi tekniikoiksi on ehdotettu muun muassa HDR, HFR ja väriavaruutta parantavia tekniikoita. Kaikista edellämainituista löytyy sovellusalueita

omina tutkimussuuntinaan, mutta myös yhdistettynä, jotta resoluutiosta saadaan paras mahdollinen potentiaali irti. Television fyysistä olemusta voidaan myös lähteä kehittämään ja tätä kautta luoda erilaista ja uutta katselukokemusta kuluttajien koteihin.

Tässä työssä käytiin läpi televisioiden ja television resoluution historiaa aikaisemmista vakiopiirtotekniikoista tulevaisuuden teräväpiirtotekniikoihin. Lisäksi pohdittiin kuvanlaatua parantavia tekniikoita resoluution näkökulmasta. Lopuksi koottiin resoluution tulevaisuudennäkymiä ja potentiaalisia kehityssuuntia.

LÄHTEET

1. Srećko, K., Zoran, Š., Beyond HDTV Technology, *ELMAR 2013, 55th International Symposium*, IEEE, September 25-27, Zadar, 2013, pp. 83-87.
2. Sugawara, M., Masaoka, K., UHDTV Image Format for Better Visual Experience, *Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No 1.*, January, 2013, pp. 8-17.
3. Hornyak, T., Japan's NHK tests long-distance 8K TV broadcast signal, *PC World*, January 22, 2014. Saatavilla: <http://www.pcworld.com/article/2089720/japans-nhk-tests-longdistance-8k-tv-broadcast-signal.html> [Viitattu: 16.11.2015]
4. La Maestra, R., Living with 4K (Part 3) – Which 4K ... DCI 4K, Ultra-HDTV, Ultra-HD, Quad-Full-HD?, *HDTV Magazine*, December 20, 2012. Saatavissa: <http://www.hdtvmagazine.com/articles/2012/12/living-with-4k-part-3-which-4k-dci-4k-ultrahdtv-ultrahd-quadfullhd.php> [Viitattu 21.11.2015]
5. DCI Digital Cinema Initiatives, LLC. Saatavissa: <http://www.dcimovies.com/> [Viitattu 15.11.2015]
6. White, S., The CEA Officially Names 4K HD Technology "Ultra HD", *Technology Guide*, October 19, 2012. Saatavissa: <http://www.technologyguide.com/news/the-cea-officially-names-4k-hd-technology-ultra-hd> [Viitattu 20.11.2015]
7. Pendlebury, T., What is 4K UHD? Next-generation resolution explained, *CNET*, January 29, 2014. Saatavissa: <http://www.cnet.com/news/what-is-4k-uhd-next-generation-resolution-explained/> [Viitattu 08.11.2015]
8. Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE), UHDTV Exosystem Study Group Report, March 28, USA, 2014 Saatavilla: <http://origin.library.constantcontact.com/download/get/file/1109962569416-729/SMPTE+UHDTV+Ecosytem+Study+Group+Report+28+March+2014.pdf> [Viitattu 21.11.2015]
9. Sakaida, S., Nakajima, N., Ichigaya, A., Kurozumi, M., Iguchi, K., Nishida, Y., Nakasu, E., Gohshi, S., The Super Hi-Vision Codec, *IEEE International Conference on Image Processing, 2007. ICIP 2007, Vol. 1*, September 16 – October 19, San Antonio, Texas, USA, 2007. pp. 21-24. Saatavilla: http://www.researchgate.net/profile/Seiichi_Gohshi/publication/4288653_The_Super_Hi-Vision_Codec/links/02e7e5168d2a1982b0000000.pdf [Viitattu: 05.11.2015]

10. Okano, F., Kanazawa, M., Mitani, K., Hamasaki, K., Sugawara, M., Seino, M., Mochimaru, A., Doi, K. Ultrahigh-Definition Television With 4000 Scanning Lines, *2004 NAB BEC Proceedings*, 2004.
11. Richardson, D., 8K video arrives on YouTube – good luck trying to play it, *Extreme Tech*, June 12, 2015. Saatavilla: <http://www.extremetech.com/mobile/208081-8k-video-arrives-on-youtube-good-luck-trying-to-play-it> [Viitattu 05.11.2015]
12. Denison, C., Forget 4K, LG's 98-inch 8K TV is the Window Into the Future We've Been Waiting For, *Digital Trends*, September 4, 2014. Saatavilla: <http://www.digitaltrends.com/home-theater/forget-4k-lgs-98-inch-8k-tv-window-future-weve-waiting/> [Viitattu: 01.11.2015]
13. Shiers, G., Shiers, M., Early Television: A Bibliographic Guide to 1940, *Garland Publishing, Inc.*, New York and London, 1997. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?isbn=0824077822> [Viitattu: 05.11.2015]
14. Burns, R.W., Television an international history of the formative years, *The Institution of Electrical Engineers*, London, United Kingdom, 1998. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=gZcwhVyiMqsC> [Viitattu 05.11.2015]
15. U.S. Congress, The Big Picture: HDTV and High-Resolution Systems, *U.S. Congress, Office of Technology Assessment, U.S. Government Printing Office*, June, Washington, 1990. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=aQpEZtaiaq0C> [Viitattu: 05.11.215]
16. Farrell, J., Shapiro, C., Nelson, R.R., Noll, R.G., Standard Setting in High-Definition Television, *Brookings Papers on Economic Activity: Microeconomics, Vol. 1992 (1992)*, Brookings Institution Press, 1992, pp. 1-93.
17. Schubin, M., Why 4K: Vision & Television, *Spring Technical Forum of CableLabs – NCTA SCTE, National Cable Television Association*, May 21, 2012. Saatavilla: <http://www.schubincave.com/wp-content/uploads/2012/05/Schubin-NCTA-Vision-and-Television.pdf> [Viitattu: 20.11.2015]
18. Ito, T., Future Television – Super Hi-Vision and Beyond, *2010 IEEE Asian Solid State Circuits Conference (A-SSCC)*, Beijing, IEEE, November 8-10, 2010, pp. 1-4.
19. Mehul, T., Huang, C-T., Juvekar, C., Sze, V., Chandrakasan, A.P., A 249-Mpixel/s HEVC Video-Decoder Chip for 4K Ultra-HD Applications, *IEEE Journal of Solid-*

- State Circuits*, Vol. 49, No. 1, IEEE, December 20, 2013, pp. 61-82. Saatavilla: <http://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/93876> [Viitattu 14.11.2015]
20. Nakasu, E., Super Hi-Vision on the Horizon: A Future TV System That Conveys an Enhanced Sense of Reality and Presence, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol. 1, No. 2, IEEE, April 2012, pp. 36-42.
 21. Ntofon, O-D., Simeonidou, D., Hunter, D.K., Cloud-based Architecture for deploying Ultra-High-Definition Media over Intelligent Optical Networks, *16th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012*, Colchester, IEEE, April 17-20, 2012, pp. 1-6.
 22. Pourazad, M. T., Doutre, C., Azimi, M., Nasiopoulos, P., HEVC: The New Gold Standard for Video Compression: How Does HEVC Compare with H.264/AVC? *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol. 1, No. 3, IEEE, July, 2012, current version June 21, 2012, pp. 36-46.
 23. Forman, M., Aggoun, A., McCormick, M., Compression of integral 3D TV pictures, *Fifth International Conference on Image Processing and its Applications, 1995*, IET, July 4-6, Edinburgh, 1995, pp. 584-588.
 24. Beacham, F., As 4K Begins a Shaky Launch, Japan Aggressively Pushes 8K Video, *The Broadcast Bridge Acquisition*, April 08, 2015. Saatavilla: <https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/2547/as-4k-begins-a-shaky-launch-japan-aggressively-pushes-8k-video> [Viitattu 18.11.2015]
 25. Rivington, J., 4K TV and Ultra HD: Everything you need to know, *Techradar*, August 24, 2015. Saatavilla: <http://www.techradar.com/news/television/ultra-hd-everything-you-need-to-know-about-4k-tv-1048954> [Viitattu: 19.11.2015]
 26. National Media Museum / Science & Society Picture Library, Baird Model B 'Noah's Ark' Televisor, Science Museum Group, 2015 <http://www.nationalmediamuseum.org.uk/>, <http://www.scienceandsociety.co.uk/>, with permission.
 27. Cieszynski, J., Closed Circuit Television, 3rd edition, Newnes, December 28, 2006.
 28. Perkins, M., The Math Behind Analog Video Resolution, *Cardinal Peak*, December 23, 2009. Saatavilla: <https://cardinalpeak.com/blog/the-math-behind-analog-video-resolution/> [Viitattu: 21.11.2015]

29. Watanabe, C., *Managing Innovation in Japan: The Role Institutions Play in Helping or Hindering how Companies Develop Technology*, Springer Science & Business Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, April 21, 2009. Saatavilla: https://books.google.fi/books?id=D_USAFOIdwoC [Viitattu: 16.11.2015]
30. Testatutlaitteet, Unified Requirements of DVB-C and DVB-T2 digital receiver for Finnish market, 3rd edition, December 18, 2014. Saatavilla: http://www.testatutlaitteet.fi/linked/fi/Finnish_Unified_IRD_Specifications_Ver_3.pdf [Viitattu 22.11.2015]
31. Fujio, T., High-Definition Wide-Screen Television System for the Future – Present State of the Study of HD-TV Systems in Japan, *IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. BC-26, No. 4*, IEEE December 1980, current version January 2, 2007, pp. 113-124.
32. Original image: Brianski, BlankMap-World5.svg, *Wikimedia Commons*, released under public domain, July 31, 2006. Saatavilla: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlankMap-World5.svg> [Viitattu 15.11.2015]
33. Digital Cinema Initiatives LLC, DCI Digital Cinema System Specification v. 1.2 with Errata as of 30 August 2012 Incorporated, October 10, 2012. Saatavilla: http://dcimovies.com/specification/DCI_DCSS_v12_with_errata_2012-1010.pdf [Viitattu: 19.11.2015]
34. Gabriel, S., Designer's Guide to DPI, www.sebastien-gabriel.com. Saatavilla: <http://sebastien-gabriel.com/designers-guide-to-dpi/> [Viitattu: 21.11.2015]
35. Cisco, Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019, Cisco, May 27, 2015. Saatavilla: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf [Viitattu 20.11.2015]
36. MTV3, MTV3-kanava myös teräväpiirtona, MTV3 Viihde. March 30, 2015. Saatavilla: <http://www.mtv.fi/hd> [Viitattu: 20.11.2015]
37. Talouselämä, Teräväpiirto-tv ottaa Suomessa uuden askeleen, Talouselämä, February 7, 2014. Saatavilla: <http://www.talouselama.fi/uutiset/teravapiirto-tv-ottaa-suomessa-uuden-askeleen-3451801> [Viitattu: 21.11.2015]

38. Yle Kuningaskuluttaja, Tarkista voiko televisiollasi katsoa myös HD-lähetyksiä, Yle, January 19, 2015. Saatavilla: <http://yle.fi/aihe/artikkeli/2015/01/19/tarkista-voiko-televisiollasi-katsoa-myo-hd-lahetyksia> [Viitattu: 21.11.2015]
39. Viestintävirasto, Teräväpiirtovastaanottimia vielä alle puolella antenniverkossa olevista talouksista, Viestintävirasto, March 3, 2015. Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2015/teravapiirtovastaanottimiavielaallepuolellaantenniverkossaolevistatalouksista.html> [Viitattu: 21.11.2015]
40. DNA, DNA esittelee aitoa Ultra HD -lähetystä kaapeliverkossaan, DNA lehdistötiedote, December 18, 2014. Saatavilla: <https://www.dna.fi/dna-oy/lehdistotiedotteet?relativeUrl=lehdistotiedotteet&id=650> [Viitattu 21.11.2015]
41. Viestintävirasto, DVB-T2-tekniikka tuo antennitalouksiin terävemmän televisiokuvan, *Viestintävirasto Signaali-uutiskirje*, published May 28, 2014, updated January 2, 2015. Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/signaali/signaali12014/dvb-t2-tekniikkatuoantennitalouksiinteravammantelevisiokuvan.html> [Viitattu 21.11.2015]
42. Viestintävirasto, Antenniverkon muutokset ja HD-lähetykset, Viestintävirasto, October 9, 2015. Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/tvradio/antenniverkonmuutokset.html> [Viitattu 21.11.2015]
43. Digita, Suomi kansainvälisesti teräväpiirtolähetyksen jälkijunassa – Digitalla on tekniset valmiudet välittää HD-lähetykset koko Suomeen, *Ajankohtaista, Digitan tiedotteet*, March 3, 2015. Saatavilla: http://www.digita.fi/medialle/tiedotteet/suomi_kansainvalisesti_teravapiirtolahetysten_jalkijunassa_-_digitalla_on_tekniset_valmiudet_valittaa_hd-lahetykset_koko_suomeen.3469.news?134_o=20 [Viitattu: 21.11.2015]
44. European Broadcasting Union, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems, EN 300 429 V. 1.2.1, *European Standard (Telecommunications series)* April, 1998. Saatavilla: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300429/01.02.01_60/en_300429v010201p.pdf [Viitattu 21.11.2015]

45. DVB, DVB Fact Sheet: 2nd Generation Terrestrial, The World's Most Advanced Digital Terrestrial TV System, August 2015. Saatavilla: https://www.dvb.org/resources/public/factsheets/dvb-t2_factsheet.pdf [Viitattu: 21.11.2015]
46. Holland, J. The Future of Resolution: 8K Reasons 4K is Here to Stay, *Streamingmedia.com*, March 12, 2015. Saatavilla: <http://www.streamingmedia.com/Articles/Editorial/Featured-Articles/The-Future-of-Resolution-8K-Reasons-4K-is-Here-to-Stay-102570.aspx> [Viitattu 19.11.2015]
47. Finnkino, Finnkino Sellossa nyt entistä parempi kuvanlaatu uuden 4K-projektorin myötä, June 9, 2015. Saatavilla: <http://www.finnkino.fi/News/Ajankohtaista/2015-06-09/4066/Finnkino-Sellossa-nyt-entista-parempi-kuvanlaatu-uuden-4K-projektorin-myota/> [Viitattu 22.11.2015]
48. Sandwell, I., Vue completes roll-out of Sony 4K projectors, *Screen Daily*, August 15, 2012. Saatavilla: <http://www.screendaily.com/news/vue-completes-roll-out-of-sony-4k-projectors/5045376.article> [Viitattu: 23.11.2015]
49. The BigScreen Cinema Guide, What is Digital Cinema Projection?, *SVJ Designs LLC*, March 15, 2011. Saatavilla: <http://www.bigscreen.com/about/help.php?id=36> [Viitattu: 22.11.2015]
50. Schubin, M., Higher Resolution, Higher Frame Rate, and Better Pixels in Context The Visual Quality Improvement Each Can Offer, and at What Cost, *SMPTE HPA Tech Retreat 2014*, 2014. Saatavilla: <https://www.smpte.org/publications/industry-perspectives/schubin-HPA2014> [Viitattu: 21.11.2015]
51. May, S., Forget UHD: 8K is closer than you think, *Home Cinema Choice Magazine*. Saatavilla: <http://www.homecinemachoice.com/news/article/forget-ultra-hd-8k-is-closer-than-you-think/14385> [Viitattu 14.11.2015]
52. Milicevic, Z., Bojkovic, Z., HEVC vs. H.264/AVC Through Performance and Complexity Comparison, *Recent Advances in Computer Science, Proceedings of the 13th International Conference on Applications of Computer Engineering (ACE '14)*, October 30 – November 1, Lisbon, Portugal, 2014, pp. 58-62. Saatavilla: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Lisbon/ACE/ACE-08.pdf> [Viitattu 21.11.2015]

53. Bluray.com, Bluray Disc Association Completes Ultra HD Blu-ray Specification and Releases New Logo, *blu-ray.com*, May 13, 2015. Saatavilla: <http://www.bluray.com/news/?id=16752> [Viitattu 02.12.2015]
54. Marine, J., Canon is Developing an 8K Cinema Camera & 120 Megapixel DSLR, *No Film School*, September 8, 2015. Saatavilla: <http://nofilmschool.com/2015/09/canon-developing-8k-uhd-cinema-camera-120-megapixel-dslr-display> [Viitattu: 20.11.2015]
55. Hruska, J., Sharp will launch 8K TVs next month, at six-digit prices, *Tech Extreme*, September 21, 2015. Saatavilla: <http://www.extremetech.com/extreme/214618-sharp-will-launch-8k-tvs-next-month-at-six-digit-prices> [Viitattu 20.11.2015]
56. Bale, C., Does 4K Resolution Matter? *CarltonBale.com*, September 19, 2015. Saatavilla: <http://carltonbale.com/does-4k-resolution-matter/> [Viitattu: 15.11.2015]
57. Javidi, B., Okano, F., Three-Dimensional Television, Video and Display Technologies, Springer Science & Business Media-Verlag Berlin Heidelberg New York, August 15, 2002. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=y-xS4MyF-TQC> [Viitattu: 17.11.2015]
58. Winkler, S., Digital Video Quality: Vision Models and Metrics, John Wiley & Sons, Ltd., 2005. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=NDNfMaht37cC> [Viitattu 17.11.2015]
59. Villas-Boas, A., Why Apple made a computer with a screen sharper than most people need, *Tech insider*, October 18, 2015. Saatavilla: <http://www.techinsider.io/why-apples-imac-is-5k-2015-10> [Viitattu: 09.11.2015]
60. Alabaster, J., Japan's NHK shows off haptic TV, mini 8k video camera, *PC World*, May 31, 2013. Saatavilla: http://www.pcworld.idg.com.au/article/463378/japan_nhk_shows_off_haptic_tv_mini_8k_video_camera/ [Viitattu: 09.11.2015]
61. Kaneko, K., Ohta, N., 4K Applications Beyond Digital Cinema, *2010 6th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*, IEEE, October 20-23, Seoul, 2010, pp. 133-136.
62. Eutelsat, Eutelsat Boosts Ultra HD Content on "HOT BIRD 4K1" TV Platform, *Eutelsat Press Release*, June 8, Paris, 2015. Saatavilla:

- <http://news.eutelsat.com/pressreleases/eutelsat-boosts-ultra-hd-content-on-hot-bird-4k1-tv-platform-1175033> [Viitattu: 20.11.2015]
63. Business Wire, SES To Test Broadcast Real Madrid vs. Barcelona Football Match in Ultra High Definition, *Business Wire*, November 20, Luxemburg, 2015. Saatavilla: <http://www.businesswire.com/news/home/20151120005190/en/SES-Test-Broadcast-Real-Madrid-vs.-Barcelona> [Viitattu: 22.11.2015]
64. Williams, M., NASA will launch a 4K TV channel later this year, *TechHive*, September 8, 2015. Saatavilla: <http://www.techhive.com/article/2980709/streaming-services/nasa-will-launch-a-4k-tv-channel-later-this-year.html> [Viitattu: 22.11.2015]
65. Siljander, K., Kaapelitelevisio tulevaisuus Suomessa kaapelitelevisio-operaattorin näkökulmasta tarkasteltuna, Opinnäytetyö Vaasan Ammattikorkeakoulu, Informaatiotekniikka, 2013. Saatavilla: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60474/KAAPELITELEVISIION%20TULEVAISUUS%20SUOMESSA.pdf> [Viitattu: 22.11.2015]
66. IMAX Theatre Darling Harbour, <https://www.imax.com.au/>, Sydney, 2015. [Viitattu: 22.11.2015]
67. Williams, O., 3D TVs are dead at CES 2015 with the fight moving to 4K and curved displays, *The Next Web News, Insider*, January 7, 2015. Saatavilla: <http://thenextweb.com/insider/2015/01/07/3d-tvs-dead-ces-2015-fight-moving-4k-curved-displays/> [Viitattu 20.11.2015]
68. DigInfo TV, Glasses-Free 3D Display Using Integral Imaging – Toshiba, *youtube.com*, September 8, 2010. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=8uUWydvF18I> [Viitattu: 19.11.2015]
69. Nam, H., Lee, S-W., Low-Power Liquid Crystal Display Television Panel with Reduced Motion Blur, *IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 2*, IEEE, May 2010, current version July 15, 2010, pp. 307-311.
70. NHK, World's First 84V 8K LCD with HDR, *NHK Press Release*, September 3, Tokyo, 2015. Saatavilla: <https://www.nhk.or.jp/corporateinfo/english/press/pdf/20150903-1.pdf> [Viitattu: 20.11.2015]

71. Shahid, H., Li, D., Fanaswala, A., Pourazad, M.T., Nasiopoulos, P., A New Hybrid Tone Mapping Scheme for High Dynamic Range (HDR) Videos, *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) 2015*, IEEE, 9-12 January, Las Vegas, Nevada, USA, 2015.
72. Sakurambo & GrandDrake, CIExy1931 Rec 2020 and Rec 709.svg, *Wikimedia Commons*, licenced under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported –licence (CC BY-SA 3.0), October 1, 2012. Saatavilla: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931_Rec_2020_and_Rec_709.svg [Viitattu 15.11.2015]
73. Ripton, JT., Prasuethsut, L., The VR race: What you need to know about Oculus Rift, HTC Vive and more, *techradar*, October 1, 2015. Saatavilla: <http://www.techradar.com/news/world-of-tech/future-tech/the-vr-race-who-s-closest-to-making-vr-a-reality--1266538> [Viitattu 20.11.2015]
74. Orland, K., Virtual Perfection: Why 8K resolution per eye isn't enough for perfect VR, *ars technical*, September 11, 2013. Saatavilla: <http://arstechnica.com/gaming/2013/09/virtual-perfection-why-8k-resolution-per-eye-isnt-enough-for-perfect-vr/> [Viitattu: 19.11.2015]

LIITE 1. Merkittävimpiä resoluutioita

Järjestelmä	Resoluutio	Kuvasuhde	Kommentteja
NTSC	640 x 480 720 x 480	4:3, 16:9, 3:2	Useita kuvasuhteita, analoginen ja digitaalinen resoluutio.
PAL & SECAM	720 x 576	4:3, 16:9	Useita kuvasuhteita, analoginen 4:3 ja digitaalinen 16:9.
HiVision	x 1035		Ensimmäinen analoginen HD-resoluutio.
HD-ready	1280 x 720	16:9	Ensimmäinen digitaalinen HD-resoluutio, voidaan kutsua myös 720p resoluutioksi
FullHD	1920 x 1080	16:9	Digitaalinen resoluutio, voidaan kutsua myös 1080p/i resoluutioksi
2K	2048 x 1080	17:9	Digitaalinen elokuvaresoluutio
UHD	3840 x 2160	16:9	Digitaalinen televisiostandardin teräväpiirtoresoluutio.
4K	4096 x 2160	17:9	Digitaalinen elokuvastandardin teräväpiirtoresoluutio.
8K UHD	7680 x 4320	16:9	Digitaalinen televisiostandardin teräväpiirtoresoluutio.
8K	8192 x 4320	17:9	Digitaalinen elokuvastandardin teräväpiirtoresoluutio.
16K UHD	15360 x 8640	16:9	Hypoteettinen televisiostandardin resoluutio, ei ole vielä kehitteillä.
16K	16384 x 8640	17:9	Hypoteettinen tulevaisuuden elokuvastandardin resoluutio.

(jatkuu)

LIITE 2. Resoluutiot skaalattuna

