

3D-mallin valaisu

Sisätilan valaisu Arnold for 3ds Max:n valoilla



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäen kampus, Tieto- ja viestintäteknikka

Kevät 2020

Ville Luoma

Tieto- ja viestintätekniikka
Riihimäki

Tekijä	Ville Luoma	Vuosi 2020
Työn nimi	3D-mallin valaisu	
Työn ohjaaja/t	Antti Laakso	

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli esitellä Arnold for 3ds Max:n mukana tulevien valojen ja materiaalien, etenkin Standard Surface -materiaalin ominaisuuksia, keskittyen erityisesti sisätilojen valaisuun. Opinnäytetyössä esitellään erityyppisiä Arnold-valomalleja sekä pintamateriaaleja, joita hyödynnetään valmiiksi mallinnetun sisätilan valaisuun.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa esitellään mitä 3D-grafiikan renderöinti tarkoittaa, mitä on fysiikkaperusteinen renderöinti ja miten Arnold Renderer käyttää tätä hyödykseen. Lisäksi käydään läpi valon heijastumis- ja taittumislakia ja miten ne tulevat ilmi Arnoldin valoilla ja materiaaleilla.

Soveltavassa osuudessa keskitytään Arnold for 3ds Max:n valojen esittelyyn, painopisteenä kuitenkin piste-, spotti- ja nelivalojen ominaisuudet. Ominaisuuksien esittelyn jälkeen valaistaan yksi valmiiksi mallinnettu sisätila käyttäen aikaisemmin esiteltyjä valoja ja Standard Surface -materiaaleja. Lopuksi vielä otetaan korkealaatuinen renderöinti valmiista sisätilasta.

Avainsanat 3D-mallin valaisu, Arnold for 3ds Max, Arnold Renderer, physically based rendering

Sivut 29 sivua

Information and Communications Technology
Riihimäki

Author	Ville Luoma	Year 2020
Subject	Lighting a 3D Model	
Supervisors	Antti Laakso	

ABSTRACT

The goal of this project was to present the properties of the lights and materials, especially the Standard Surface material that come with Arnold for 3ds Max, focusing on interior lighting. Different types of Arnold lighting models as well as surface materials are showcased in the thesis that are then utilized for lighting a pre-modeled interior.

The theory part of the thesis introduces the concepts of 3D rendering, physically based rendering (PBR) and how Arnold Renderer uses these to its advantage. In addition, the thesis discusses the laws of reflection and refraction of light and how Arnold Renderer uses these scientific laws in its method of rendering lights.

The practical part of the thesis focuses on the presentation of Arnold for 3ds Max lights, with a special focus on the properties of Point, Spot and Quad lights. After going through the properties of the lights, one pre-modeled interior is illuminated using the lights and materials presented earlier. Finally, a high-quality rendering of the finished interior is presented.

Keywords 3D-model lighting, Arnold for 3ds Max, Arnold Renderer, physically based rendering

Pages 29 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	3D-GRAFIIKAN RENDERÖINTI	2
2.1	Reaaliaikainen renderöinti	2
2.2	Esirenderöity grafiikka.....	2
2.3	Renderöintimetodit.....	3
3	ARNOLD RENDERER	4
3.1	Monte Carlo ray tracing	5
3.2	Render Setup: Arnold	5
3.3	Valot	7
3.4	Standard Surface	8
4	VALO	9
4.1	Heijastuminen	9
4.2	Taittuminen	10
4.3	Valovoima (intensiteetti)	11
5	FYSIIKKAPERUSTEINEN RENDERÖINTI	11
5.1	Fysiikkaperusteisen renderöinnin ominaisia piirteitä	12
5.2	Fysiikkaperusteinen renderöinti Arnold Renderer:ssä	13
6	SOVELTAVA PROJEKTI.....	13
6.1	ActiveShade mode.....	13
6.2	Valot	15
6.3	Sisätilan valaisu	19
6.4	Materiaalit ja tekstuurit	22
6.5	Sisätilan renderöinti	25
7	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	28

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ja esitellä Arnold for 3ds Max:n mukana tulevien valojen ja materiaalien, etenkin Standard Surface -materiaalin ominaisuuksia ja käyttöä sisätilojen valaisussa.

Arnold Renderer on fysiikkaperusteinen renderöintimoottori (PBR), joka tarkoittaa, että Arnoldin valot käyttäytyvät renderöidessä fysiikan lakien mukaisesti osuessaan kappaleiden pintoihin. Standard Surface -materiaali on myös fysiikkaperusteinen materiaali. Kyseisen materiaalin pinnan ominaisuuksia voi muokata niin, että se saadaan käyttäytymään monien erilaisten oikeiden materiaalien ominaisuuksien mukaisesti valon osuessa siihen.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa esitellään mitä renderöinti tarkoittaa, mitä on fysiikkaperusteinen renderöinti ja kerrotaan fysiikan termein mitä valo on ja miten se käyttäytyy osuessaan pintoihin, teoriaosuudessa esitellään myös yksityiskohtaisemmin Arnold Rendererin toimintaa.

Soveltava osuus toteutetaan Autodesk 3ds Max 2020 -ohjelmistolla, käyttäen Arnold renderöintimoottoria ja sen mukana tulevia Arnold valoja ja Standard Surface -materiaaleja.

Opinnäytetyön soveltavan osuuden työvaiheet ovat valojen esittely sille tarkoitettussa ”studioissa”, keskittyen piste-, spotti- ja nelivaloon. Tekstuurien sekä materiaalien liittäminen kappaleisiin ennalta mallinnetussa sisätilassa sekä valojen asettelu ja lopulta korkealaatuisen renderöinnin ottaminen valmiista sisätilasta.

Valojen ja materiaalien parametrien säätelyssä käytetään hyödyksi 3ds Max:n ActiveShade-mode -renderöintiä, jolla saadaan nopeita tuloksia muutettujen arvojen vaikutuksista.

2 3D-GRAFIIKAN RENDERÖINTI

3D-renderöinnillä tarkoitetaan pohjimmillaan prosessia, jolla luodaan kaksiulotteisia kuvia 3D-mallista. Kuvat luodaan datan perusteella, joka määrittelee mitä väriä, tekstuuria ja materiaalia objektit kuvassa sisältävät. Konseptina 3D-renderöinti on hyvin samankaltaista valokuvauksen kanssa. Renderöidessä käytännössä osoitetaan kamera kuvattavaa objektia kohti valokuvan ottamiseksi. Tämän takia valaistus onkin erittäin tärkeä vaihe yksityiskohtaisen ja realistisen renderöinnin luomiseksi. (Emiliano, 2019.)

3D-renderöinnin avulla tietokonegrafiikka muuntaa 3D-kehysmallit 2D-kuviksi. Yhden kuvan tai framen renderöinti voi kestää sekunneista jopa päiviin, riippuen sen monimutkaisuudesta ja halutusta laadusta. Renderöinnillä yleisesti tarkoitetaan joko reaaliaikaista renderöintiä tai esirenderöityä grafiikkaa, ja tärkein ero niiden välillä on nopeus, jolla kuvat lasketaan ja prosessoidaan sekä laatu. (Unity3d, n.d.)

2.1 Reaaliaikainen renderöinti

Reaaliaikaisessa renderöinnissä, joka on yleisintä etenkin videopeleissä, 3D-kuvat lasketaan erittäin suurella nopeudella niin, että näyttää siltä, että kohtaukset, jotka koostuvat monista kuvista, tapahtuvat reaaliajassa, kun pelaajat ovat vuorovaikutuksessa pelin kanssa. Reaaliaikaista grafiikkaa käytetään etenkin, jos interaktiivisuus on tärkeässä asemassa. Reaaliaikaisen renderöinnin tavoitteena on fotorealismi hyväksyttävällä vähimmäisnopeudella, joka on noin 24 kuvaa/framea sekunnissa. Se on minimi, jota ihmisen silmä tarvitsee luodakseen illuusion liikkeestä. (Unity3d, n.d.)

2.2 Esirenderöity grafiikka

Termi esirenderöity viittaa mihin tahansa grafiikkaan, jota ei renderöidä reaaliajassa. Esirenderöinti on laskennallisesti intensiivinen prosessi, jota yleensä käytetään esimerkiksi elokuvien luontiin. Esirenderöinnin etuna on kyky käyttää graafisia malleja, jotka ovat monimutkaisempia ja laskennallisesti intensiivisempiä kuin ne, jotka voidaan tuottaa reaaliajassa, johtuen mahdollisuudesta käyttää useita tietokoneita samaan aikaan renderöintifarmeina. (Wikipedia, n.d.a.)

Esirenderöidyn grafiikan yksi iso haittapuoli etenkin videopeleissä, on alhaisempi interaktiivisuus tai sen puute kokonaan. Toinen negatiivinen puoli on, ettei esirenderöidylle grafiikalle voi tapahtua juuri minkäänlaista muutosta kesken pelaamisen. Esirenderöityä grafiikkaa ei juuri käytetäkään näistä ja lukuisista muista syistä johtuen modernien pelien pelattavissa osuuksissa. (Wikipedia, n.d.a.)

Vaikkakin esirenderöityä grafiikkaa ei juuri voida käyttää pelien interaktiivisissa osuuksissa, hyödynnetään sitä hyvinkin paljon esimerkiksi pelien välianimaatioissa, jotka voivat olla esirenderöidyn grafiikan ansiosta lähes elokuvaalaatuisia. Myös monet animaatioelokuvat ovat kokonaan esirenderöityjä, kuten esimerkiksi Toy Story ja Shrek. (Wikipedia, n.d.a.)

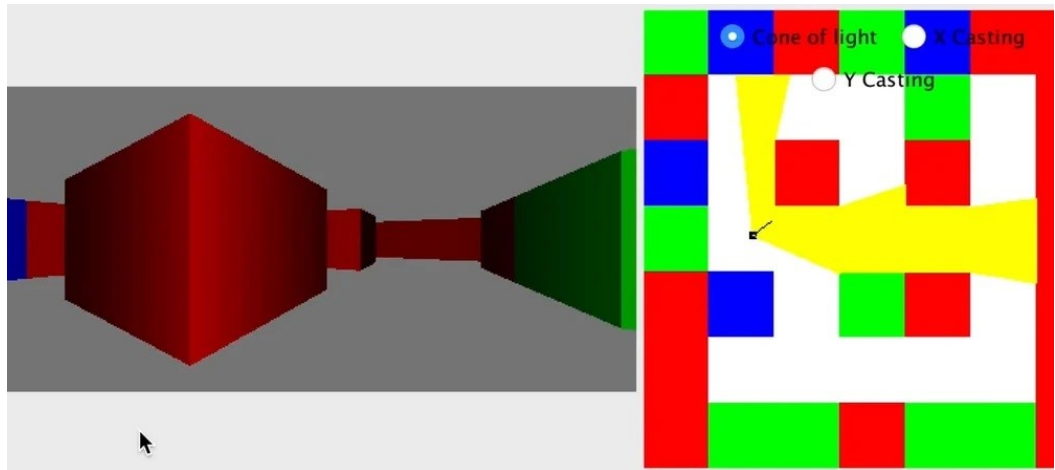
2.3 Renderöintimetodit

Renderöidessä ympäristöä, vaikka pelin sisällä, jokaisen valon hiukkasen jäljittäminen ympäristössä olisi täysin epäkäytännöllistä, ja se veisi aivan liian paljon aikaa, siksi onkin kehitelty tehokkaampia tapoja käsitellä valoa renderöidessä, näitä tapoja ovat mm. rasterointi, Ray casting (säteensuuntaus) ja Ray tracing (säteenseuranta). Kehittyneimmät ohjelmistot yhdistelevät näitä tekniikoita päästäkseen tarpeeksi hyvään lopputulokseen kustannustehokkaasti. (Wikipedia, n.d.b.)

Yksi varhaisimmista renderöintimenetelmistä on rasterointi, joka toimii käsittelemällä mallia polygoniverkkona. Näillä Polygoneilla on verteksit eli kulmapisteet, joihin on upotettu tietoja, kuten sijainti, rakenne ja väri. Rasterointi on nopea renderöintimetodi. Sitä käytetään edelleen laajasti, etenkin reaaliaikaisessa renderöinnissä, kuten tietokonepeleissä, simulaatioissa ja interaktiivisissa graafisissa käyttöliittymissä. (Emiliano, 2019.)

Ray casting, kuten nimi viittaa, suuntaa säteitä malliin kameran näkökulmasta. Säteet suunnataan jokaiseen kuvatason pikseliin. Pinta, johon se ensin osuu, näytetään renderöinnissä, eikä mitään muuta ensimmäisen pinnan jälkeistä pistettä renderöidä. Kuvassa 1 on esimerkki ray casting -metodista. (Emiliano, 2019.)

Ray casting -metodilla saadaan huomattavasti huonompaa jälkeä kuin muilla säteenjäljitys metodeilla, mutta se on paljon nopeampaa, tästä syystä sitä käytettiin paljon ensimmäisissä 3D-videopeleissä kuten Wolfenstein 3D:ssä. Ray casting ei sellaisenaan ole ollut käytössä enää pitkään aikaan videopelituotannossa, jossa vaaditaan jonkinlaista fotorealismia. (Computer Hope, 2019.)



Kuva 1. Ray casting renderöinti (Emiliano, 2019).

Ray tracing eli säteenseuranta toimii lähes samalla tavalla kuin ray casting, paitsi se kykenee paremmin käsittelemään valoa. Ray tracing metodissa ensisijaiset säteet osuvat kohteeseen ja luovat uusia säteitä. Valonsäteiden osuessa malliin, varjo, heijastus tai taitesäteitä säteilee eteenpäin, riippuen pinnan ominaisuuksista. (Emiliano, 2019.)

Ray tracing metodia on käytetty jo pitkään kehitettäessä elokuvien ja televisio-ohjelmien tietokonegrafiikkakuvia, johtuen siitä, että studiot ovat voineet hyödyntää kokonaisen palvelinparin kapasiteettia saadakseen tarpeeksi tehoa. Tekniikan hyödyntäminen reaaliajassa on kuitenkin ollut liian vaativaa olemassa oleville kuluttajalaitteistoille esimerkiksi videopeleissä, jonka takia säteenseurantaa ei ole voitu hyödyntää pelituotannossa, tämän takia videopeleissä onkin pääasiassa käytetty rasterointia. Tähän on tullut muutos 2019 markkinoille tulleiden Nvidia RTX näytönohjaimien myötä, jotka ovat mahdollistaneet säteenseurannan käytön myös reaaliajassa eli esimerkiksi videopeleissä. (Thomas & Hayward, 2019.)

3 ARNOLD RENDERER

Arnold on nykyaikainen Monte Carlo ray tracing renderöintimoottori, jonka kehitykseen osallistui muun muassa Sony Pictures Imageworks, jotka käyttävät sitä pääasiallisena renderöintimoottorinaan. Arnoldia käytetään yli 300 studiossa maailmanlaajuisesti elokuvien, televisiosarjojen ja animaatioiden luontiin. Arnold Renderer on saatavilla erillisenä renderöintiohjelmalla Linuxille, Windowsille ja Macille, sekä lisäosana Mayalle, 3ds Max:lle, Houdinille, Cinema 4D:lle ja Katanalle. Arnold on tätä nykyä myös sisäänrakennettuna renderöintimoottorina Maya:lla ja 3ds Max:lla. (Arnold renderer, n.d.a.)

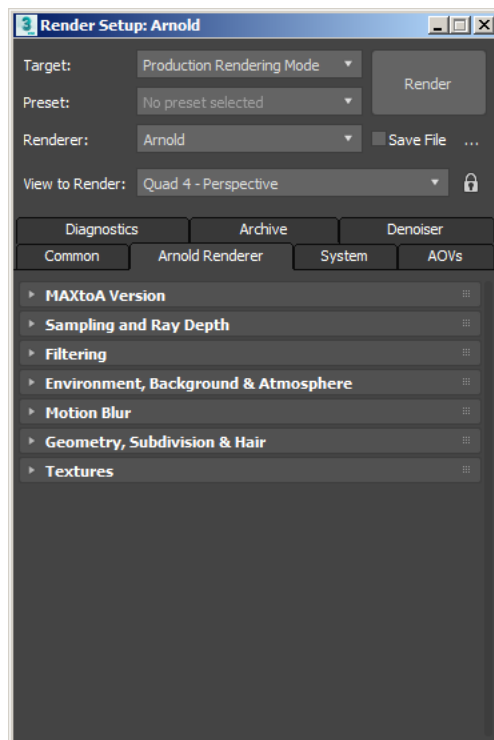
Arnold kehitettiin fotorealistisena, fysiikkaperusteisena ray tracing vaihtoehtona perinteisille scanline perustuvilla CG-animaatio-ohjelmistoille. Arnold ei muun muassa käytä välimuistialgoritmeja, kuten "Photon mapping" tai "Final gather" jotka ovat tuttuja joistain renderöintimoottoreista. Kyseiset algoritmit tallentavat dataa välimuistiin myöhempää käyttöä varten, nopeuttaakseen renderöintiä. Tämä kuitenkin käyttää suurta määrää muistia ja voi luoda visuaalisia artefakteja, jos käyttäjä ei tiedä täysin mitä asetuksia säätää milloinkin. (Arnold Documentation, n.d.a.)

3.1 Monte Carlo ray tracing

Arnold Renderer pohjautuu niin sanottuun Monte Carlo ray tracing -metodiin. Monte Carlo renderöi 3D-näkymän jäljittämällä satunnaisesti näytteitä mahdollisista valopoluista. Minkä tahansa pikselin toistuva näyte johtaa lopulta näytteiden keskiarvon supistumaan renderöintiyhtälön oikeaan ratkaisuun, mikä tekee siitä yhden fyysisesti tarkimmista olemassa olevista 3D-grafiikan renderöintimenetelmistä. (Wikipedia, n.d.c.)

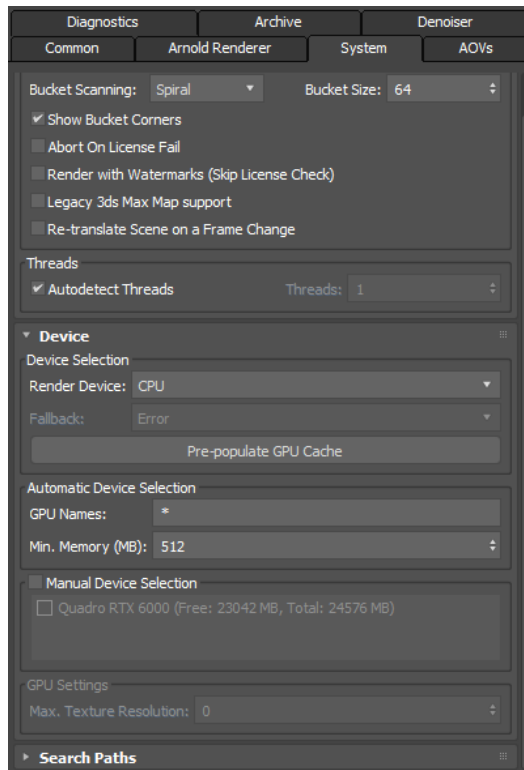
3.2 Render Setup: Arnold

Kuvassa 2 näkyy renderöintimoottorin asetusvalikko. Ensimmäisen välilehden (Common) alta voit määrittellä muun muassa missä muodossa renderöidyt kuvatiedostot tallennetaan, EXR, PNG, JPEG jne. Toinen välilehti (Arnold Renderer) tarjoaa pääsyn parametreihin, jotka säätävät renderöinnin laatua ja liikkeen epäterävyyttä, tästä lisää alempana. (Arnold Documentation, n.d.b.)



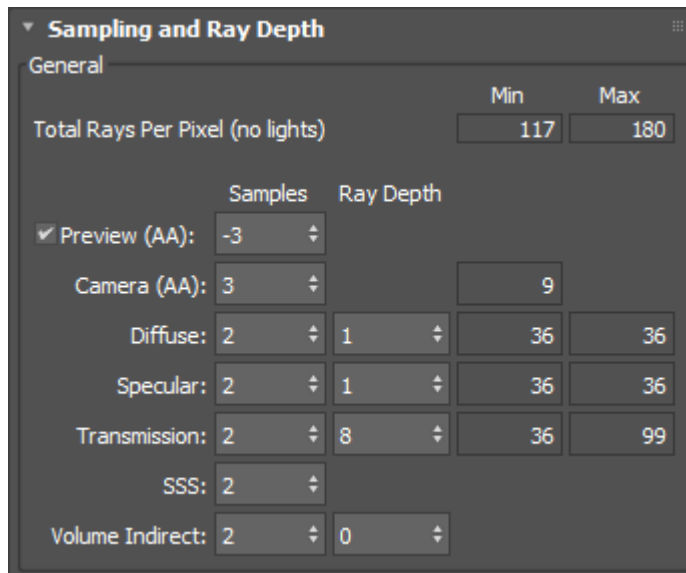
Kuva 2. Render Setup -valikko (Arnold Documentation, n.d.b).

Kuvassa 3 näytettävän System-valikon alta voi muun muassa valita missä järjestyksessä kuvan säikeet prosessoidaan renderöidessä. Oletuksena renderöinti alkaa kuvan keskeltä ja kulkee ulospäin kierrekuviona. System-valikon alta valitaan myös, käytetäänkö renderöintiin prosessoria (CPU) vai näytönohjainta (GPU). (Arnold Documentation, n.d.c.)



Kuva 3. System-valikko (Arnold Documentation, n.d.c.).

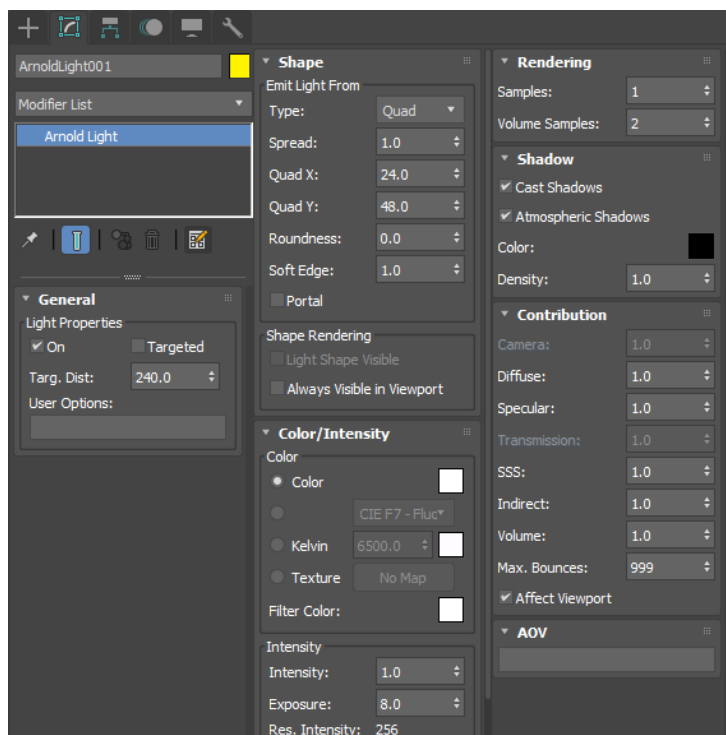
Arnold Renderer -valikon alla säädetään parametreja muun muassa kuvan laadun parantamiseksi. Yksi tärkeimmistä asetuksista ja kohinan syistä kuvissa on liian pieni samples eli otanta-arvo, tämä voi johtua myös valon sample-arvosta, jota muutetaan eri valikon alta. Arnold renderer -valikon alla muutetaan muun muassa kameran ja valon hajasäteiden sample-arvoa, nämä parametrit näkyvät kuvassa 4. Kameran sample-arvo säätelee, kuinka monta sädettä kamerasta lähtee jokaiseen pikseliin renderöidyssä kuvassa, eli kuinka monta otantaa jokaisesta pikselistä renderöidään. Nämä kameran otannat mielletään yleisesti primaarisäteiksi ja määrittelevät renderöitävän kuvan kokonaislaadun. (Arnold Documentation, n.d.d.)



Kuva 4. Sampling arvot (Arnold Documentation, n.d.d).

3.3 Valot

Kuvassa 5 näkyvä modifiointi paneeli näyttää standardien 3ds Max valoparametrien lisäksi myös lukuisia Arnoldille ominaisia parametreja, joista kerrotaan lisää opinnäytetyön soveltavassa osuudessa.



Kuva 5. Arnold Light parametrit (Arnold Documentation, n.d.e).

Exposure eli valotus on f-stop-arvo (aukkosuhde) joka kertoo Intensiteetin arvon 2:lla potenssiin valotuksen arvo. Valotuksen lisääminen yhdellä siis

kaksinkertaistaa valomäärän. Arnoldissa valon kokonaisvoimakkuus laske-
taan seuraavalla kaavalla:

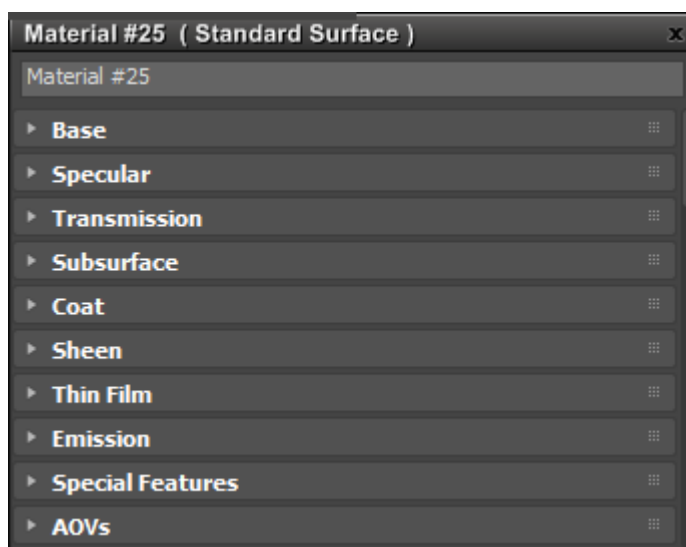
$$\text{väri} * \text{intensiteetti} * 2^{\text{valotus}} \quad (1)$$

Saman lopputuloksen voi saada muuttamalla joko intensiteettiä tai valo-
tusta. Esimerkiksi Intensiteetti=1, valotus=4 on täysin sama kuin intensi-
teetti=16, valotus=0. (Arnold Documentation, n.d.e.)

Samplet tarkoittavat kuinka monta otantaa tai tässä tapauksessa, kuinka
monta valonsädettä jokaiseen pikseliin lähtee, ne myös hallitsevat pehmei-
den varjojen kohinan laatua. Mitä suurempi samplejen lukumäärä, sitä pie-
nempää on kohina, mutta myös renderöintiäika nousee huomattavasti.
(Arnold Documentation, n.d.e.)

3.4 Standard Surface

Standard Surface -shader on fysiikkaperusteinen shaderi eli varjostin, joka
pystyy tuottamaan monenlaisia materiaaleja. Standard Surface -shader luo
materiaalin, joka koostuu kymmenestä muokattavasta komponentista,
jotka näkyvät kuvassa 6. (Arnold Documentation, n.d.f.)



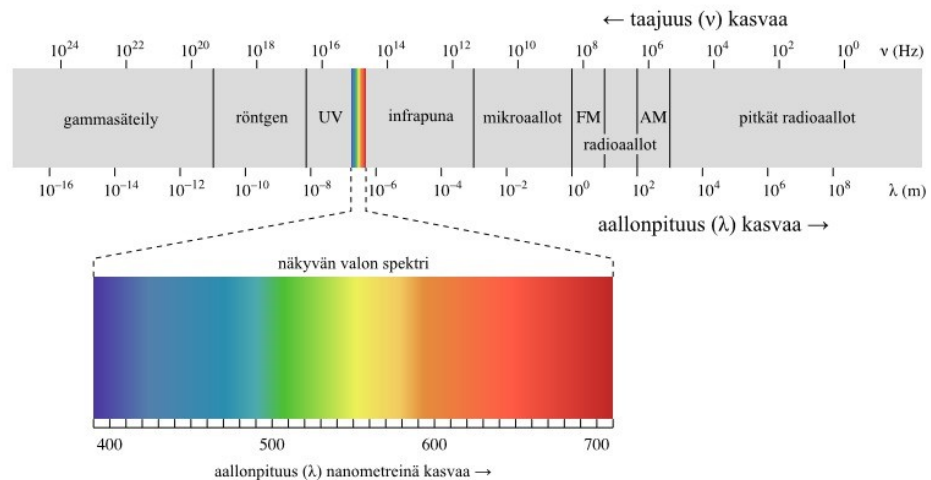
Kuva 6. Standard Surface (Arnold Documentation, n.d.f.)

Standard Surface on energiaa säilövä oletuksena. Kaikki sen kerrokset ovat
tasapainossa niin, että pinnalta lähtevän valon määrä ei ylitä tulevan valon
määrää. Kun pinta tehdään metallisemmaksi tai peiliheijastuksen (specu-
lar) osuus kasvaa, hajakerroksen (diffuse) osuus pienenee vastaavasti
energian säilömisen varmistamiseksi. (Arnold Documentation, n.d.f.)

4 VALO

Valo on sähkömagneettisen spektrin ihmissilmällä nähtävä osa. Valolla on kolme perusomaisuutta: kirkkaus eli amplitudi, väri eli aallonpituus sekä polarisaatio eli värähtelykulma. (Wikibooks, n.d.)

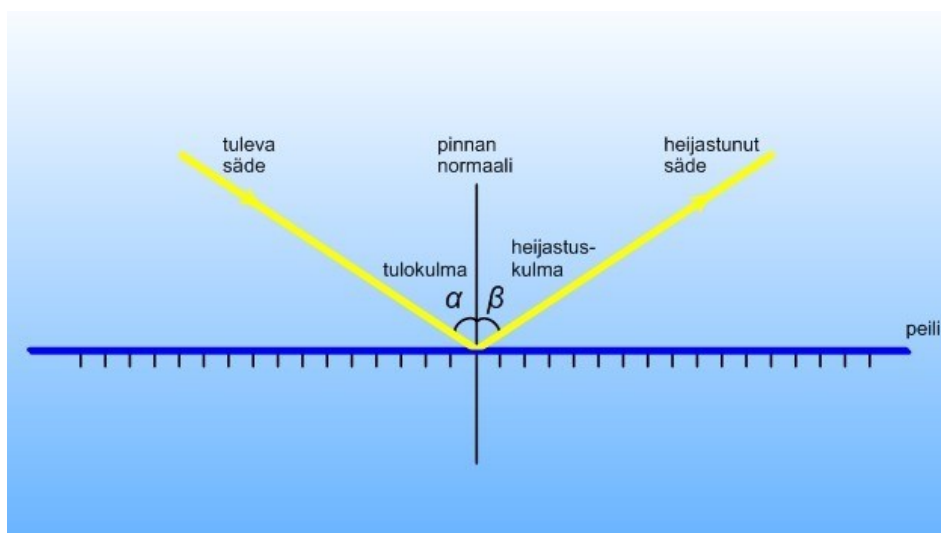
Kuten kuvassa 7 alla näytetään, näkyvän valon osuus sähkömagneettisesta spektristä on hyvin pieni. Valoaaltoja lyhyempiä aallonpituuksia ovat mm. ultravioletti- ja röntgensäteily, kun taas pidempiä aaltoja ovat esimerkiksi infrapuna- ja radioaallot. (Peda.net, n.d.a.)



Kuva 7. Sähkömagneettinen spektri (Peda.net, n.d.a).

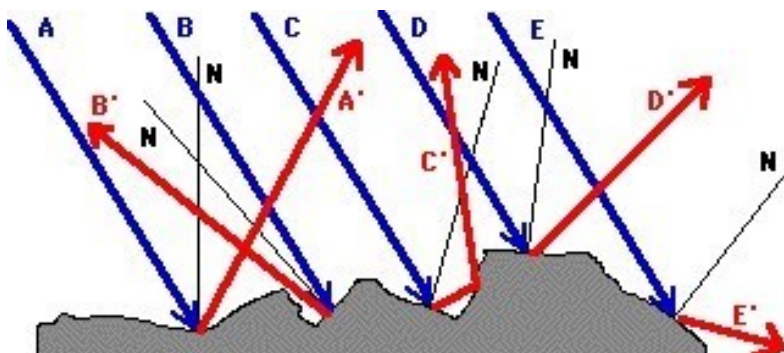
4.1 Heijastuminen

Valon kimpoamista pinnasta kutsutaan heijastumiseksi. Yksittäisen valonsäteen heijastuminen noudattaa heijastuslakia, joka on näytetty myös kuvassa 8, valonsäteen tulokulma on sama kuin heijastuskulma. Tulokulma on tulevan valonsäteen ja pinnan normaalin välinen kulma, kun taas heijastuskulma on heijastuneen valonsäteen ja pinnan normaalin välinen kulma. (Peda.net, n.d.b.)



Kuva 8. Heijastuslaki (Peda.net, n.d.b).

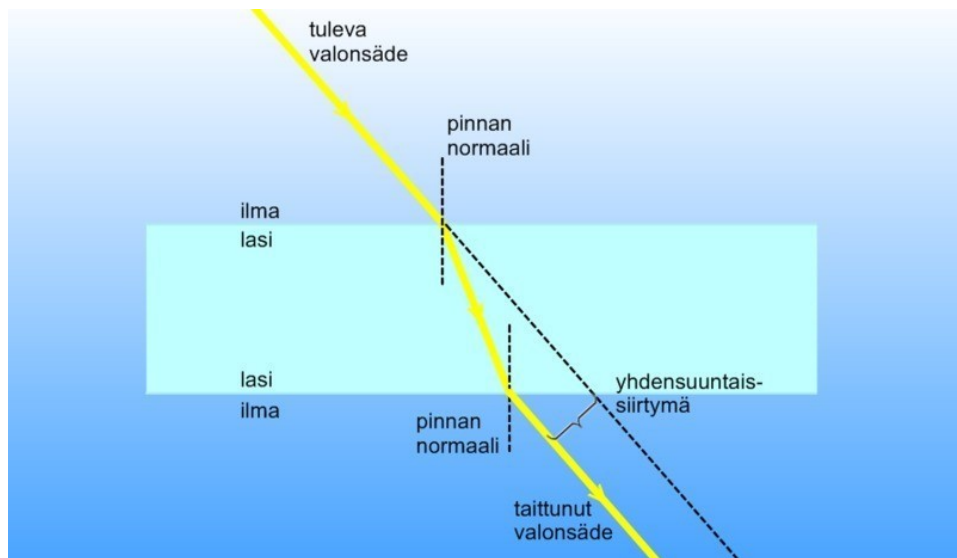
Hajaheijastukseksi kutsutaan valon heijastumista sellaisesta pinnasta, joka ei ole tasainen. Yksittäiset valonsäteet noudattavat tässäkin tapauksessa heijastuslakia, mutta kuten kuvassa 9 näytetään, koska pinta on epätasainen, valoa heijastuu pinnasta riippuen eri suuntiin. (Peda.net, n.d.b.)



Kuva 9. Hajaheijastus (Peda.net, n.d.b).

4.2 Taistuminen

Valon kohdatessa valoa läpäisevän aineen rajapinnan, valo pääsääntöisesti taittuu. Valon kulkiessa vinosti esimerkiksi ikkunalasin läpi, muuttuu sen kulkusuunta ensin taittuen pinnan normaalia kohti. Kun samainen valonsäde tulee lasista ulos, taittuu se saman verran pinnan normaalista pois-päin. Valo siis palaa alkuperäiseen suuntaansa, mutta kulkee nyt eri kohdassa. Tätä muutosta kutsutaan yhdensuuntaissiirtymäksi, joka on havainnollistettu kuvassa 10. Valon taittumista käytetään myös hyväksi kaikissa optisissa laitteissa, joissa on linssyjä tai prismoja. (Peda.net, n.d.c.)



Kuva 10. Valon taittuminen (Peda.net, n.d.c).

4.3 Valovoima (intensiteetti)

Valovoima kuvaa valonlähteen intensiteettiä eli valonlähteestä tiettyyn suuntaan säteilevän valon voimakkuutta. Valovoima kertoo valovirran avaruuskulmaa kohti. Valovoiman SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö on kandela (cd) ja tunnus on I . (Halonen & Lehtovaara 1992, 34)

Jos pistemäisen valonlähteen valovoima on jokaisessa suunnassa sama, lasketaan valovoima alla olevalla kaavalla missä Ω on avaruuskulma ja ϕ on valovirta

$$I = \phi / \Omega \quad (2)$$

5 FYSIIKKAPERUSTEINEN RENDERÖINTI

Fysiikkaperusteinen renderöinti (PBR) tarkoittaa pohjimmillaan sitä, että renderöidessä lasketaan valon kulku ja käyttäytyminen objektien pinnoilla aivan kuin oikeassa elämässä. PBR on enemmänkin konsepti kuin tiukka standardi, tämä johtaa siihen, että PBR-järjestelmien toteutustavat voivat vaihdella toisistaan jonkin verran. Kuitenkin jokainen PBR-järjestelmä perustuu samaan pääideaan renderöidä asiat mahdollisimman tarkasti noudattaen fysiikan sääntöjä. (Wilson, 2015.)

5.1 Fysiikkaperusteisen renderöinnin ominaisia piirteitä

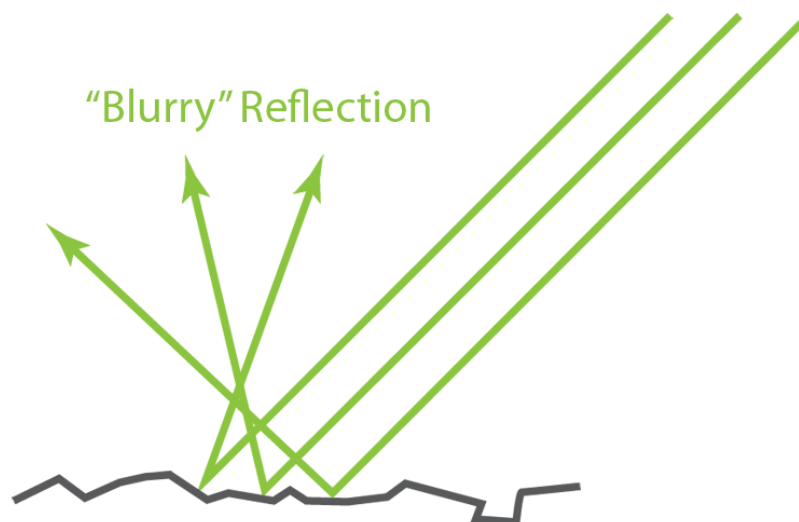
Koska PBR pyrkii noudattamaan fysiikan lakeja valon kulussa, energian säilymisen laki on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista. Energian säilymisen laki tarkoittaa, että kappale ei voi heijastaa enempää valoa kuin se ottaa vastaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että hajanaisemmat ja karkeammat materiaalit heijastavat himmeämmin ja laajemmalle, kun taas heijastavammat ja sileämmät materiaalit heijastavat kirkkaammin ja tiheämmin, tämä on myös havainnollistettu kuvassa 11. (Wilson, 2015.)



Kuva 11. Energian säilymisen laki (Wilson, 2015).

Tietokonegrafiikassa Augustin-Jean Fresnelin mukaan nimetty Fresnel-efekti viittaa muuttuvaan heijastuvuuteen riippuen kulmasta, jossa valo osuu pintaan. Tämä tarkoittaa, että kappaleet, jotka on renderöity kunnollisella Fresnel-efektillä, heijastavat kirkkaammin reunoilla. Fresnel-efekti ei ole uusi asia tietokonegrafiikassa, mutta PBR-shaderit ovat parantaneet Fresnel-efektin tarkkuutta. (Russell, 2015.)

Useimmissa niin sanotuissa oikean maailman pinnossa on paljon erittäin pieniä uria, halkeamia ja kohoumia, jotka ovat liian pieniä nähtäväksi paljaalla silmällä. Vaikkakin nämä mikroskooppisen pienet piirteet ovat näkymättömiä paljaalle silmälle, ne vaikuttavat valon leviämiseen ja heijastumiseen. Näitä pieniä epätäydellisyyksiä kutsutaan mikropinnoiksi. Mikropinnan yksityiskohdilla on huomattava vaikutus heijastumiseen, Kuvassa 12 näkyy kun saapuva valo alkaa hajota eri suuntiin heijastuessaan mikropinnasta. (Russell, 2015.)



Kuva 12. Heijastuminen mikropinnasta (Russell, 2015).

5.2 Fysiikkaperusteinen renderöinti Arnold Renderer:ssä

Nykyaikaisissa renderöintimoottoreissa fysiikkaperusteinen renderöinti viittaa jo yllä mainittuihin käsitteisiin kuten energian säilyminen ja fyysisesti mahdolliseen hajontaan (mikropinnat). Arnold on fysiikkaperusteinen renderöintimoottori, mutta sillä pystyy myös rikkomaan sääntöjä ja luomaan materiaaleja ja valoja, jotka eivät noudata fysiikan lakeja. (Arnold Documentation, n.d.g.)

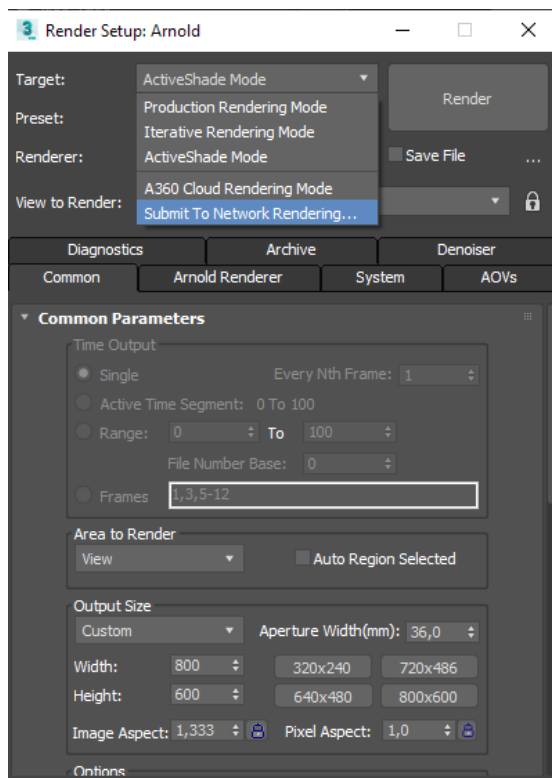
6 SOVELTAVA PROJEKTI

Soveltavan projektin tarkoituksena oli esitellä Arnold for 3ds Max:n erilaisten valomallien sekä Standard Surface -materiaalin käyttöä sisätilan valaistukseen ja varjostukseen. Valojen ominaisuuksien esittelyn jälkeen valaistiin ja ”maalattiin” sekä renderöitiin ennalta mallinnettu sisätila.

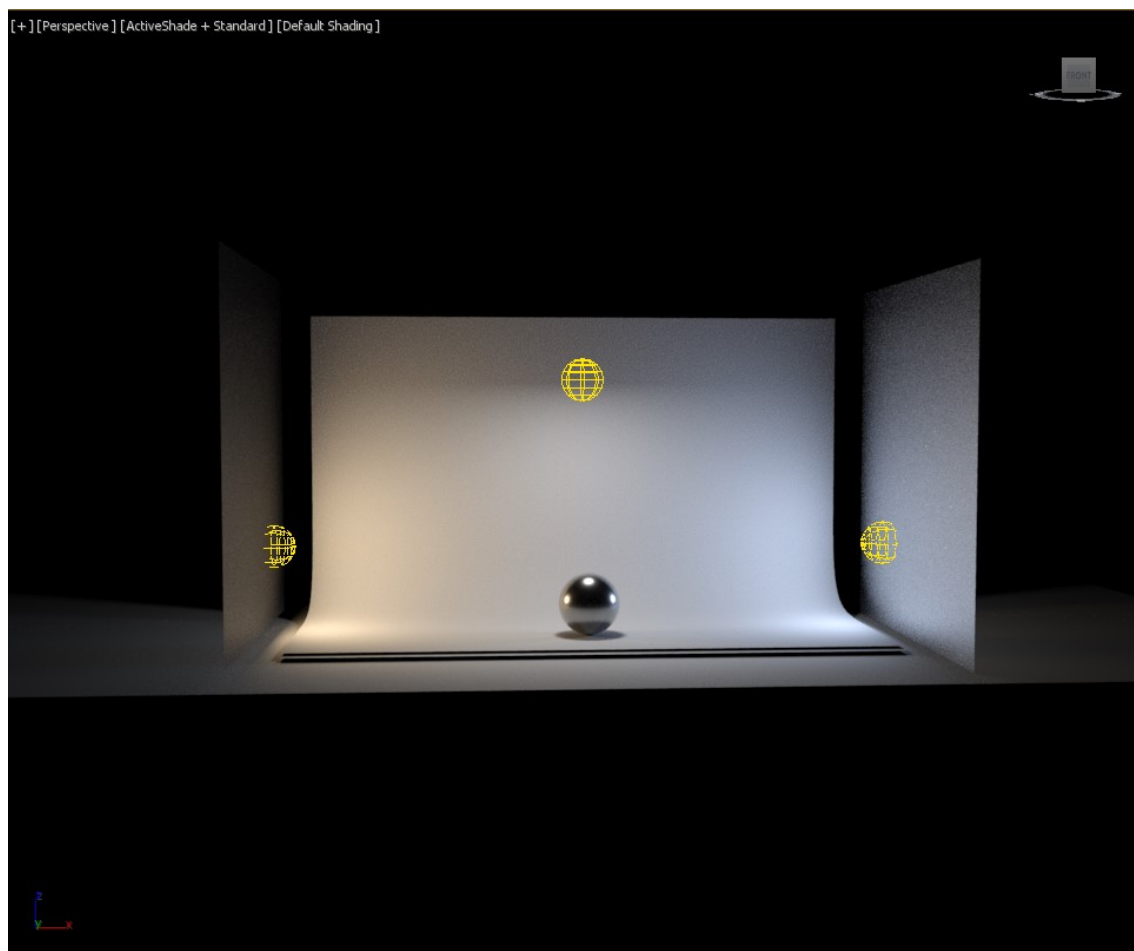
6.1 ActiveShade mode

ActiveShade renderöinnillä tarkoitetaan 3ds Max:ssa ominaisuutta, joka renderöi reaaliajassa muutoksia joita käyttäjä tekee kappaleisiin/valaistuksiin/mihin tahansa mallinnusympäristössä. Tämän renderöintimoodin hyöty tuli nopeasti ilmi, kun tarkoituksena oli säätää valojen parametreja ja nähdä muutokset mahdollisimman nopeasti, mielellään ilman että joutuu jokaisen muutoksen jälkeen renderöimään manuaalisesti.

Kuvassa 13 näytetään mistä ActiveShade moodin saa päälle renderöintivalikon alta, kuvassa 14 ActiveShade on käytössä mallinnusympäristössä, jolloin nähdään mallintaessa tehdyt muutokset reaaliajassa renderöitynä. ActiveShade on hieman käytännöllisempi kuitenkin olla erillisenä ikkunana vaikkapa mallinnettavan tilan vierellä, koska kaikki mitä muutetaan, renderöidään samalla hetkellä, voi tämä aiheuttaa hankaluuksia, jos jokainen pieninkin muutos mallintaessa aloittaa aina uudestaan renderöinnin käyttäjän pääasiallisessa työskentelyikkunassa. ActiveShade soveltuukin näistä syistä parhaiten juuri valojen ja tekstuuri tai materiaalipintojen muokkamiseen, eikä niinkään mallintamiseen.



Kuva 13. Rendering mode -valikko

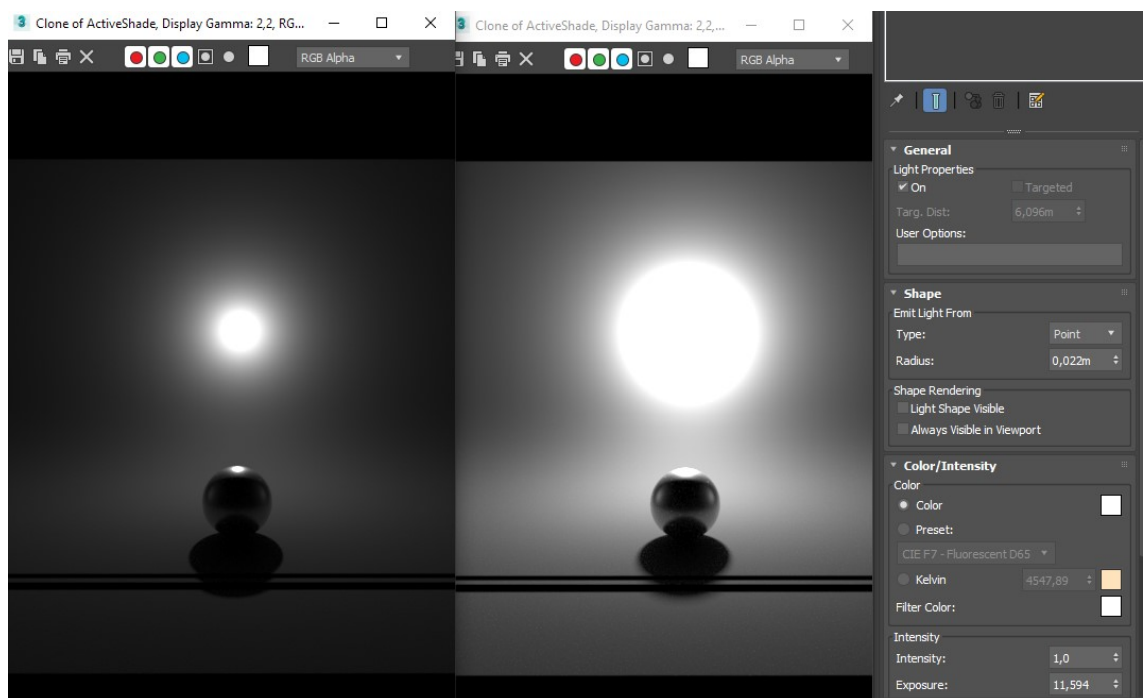


Kuva 14. ActiveShade mode käytössä

6.2 Valot

Arnold for 3ds Max sisältää oman valo-objektinsa, josta voi pudotusvalikon alta valita valon ”muodon” tai tyyppin, joilla on kaikilla omat parametrinsa, jota voidaan muuttaa, jokaisella eri valotyyppillä on omat käyttötarkoituksensa vaikkakin niitä voidaan soveltaa hyvinkin vapaasti. Keskityin projektissa erityisesti Point-, Spot- ja Quad -valotyyppeihin.

Point eli pistevaloa käytetään esimerkiksi, kun halutaan valaista ympäristöä esimerkiksi hehkulampulla, tai muilla valonlähteillä, joista valon kuuluu levitä tasaisesti joka suuntaan. pistevalo valaisee tasaisesti joka suuntaan yhdestä pisteestä nimensä mukaisesti, se toimii siis käytännössä kuin hehkulamppu. Kuvassa 15 oikealla näkyy pistevalon parametrit, joista sille ominaista on oikeastaan vain sen radius eli toimintasäde, joka on ehkä oikeammin valonlähteen koko, loput säädöt kuuluvat kaikkiin Arnold valoihin. Kuvassa 15 näytetään vasemmalla, miten radiusuksen nostaminen laajentaa aluetta, jota pistevalo valaisee.



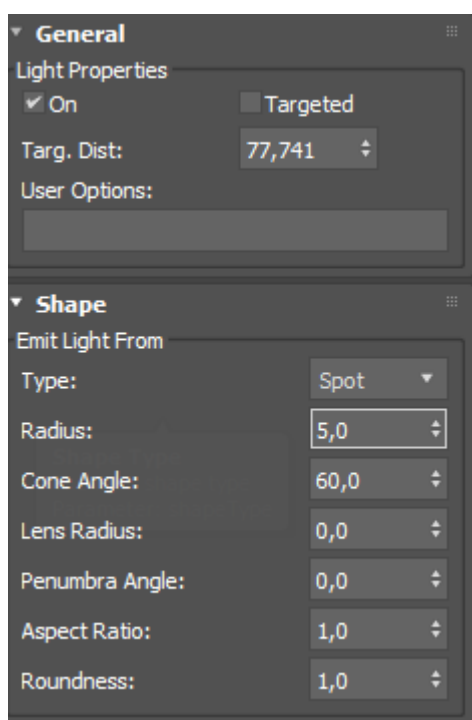
Kuva 15. Point valon radius-parametri

Spot eli kohdevalo tai spottivalo simuloi nimensä mukaisesti kohdevalaisinta, valo kohdistuu yhteen suuntaan valokeilana, tällä voidaan simuloida esimerkiksi auton ajovaloja, taskulampun valoa tai vaikka teatterin spottivaloja. Spottivaloa pystytään muokkaamaan jo huomattavasti enemmän kuin pistevaloa. Kuvassa 16 näytetään spottivalon parametrit, joihin kuuluu:

- Radius määrittelee spottivalon valonlähteen kokoa, joka määrittelee valon ”pehmeiden”. Valonlähde säteilee 0 arvolla kooltaan määrittämättömästi pisteestä ja varjot ovat aina teräviä, eli valon

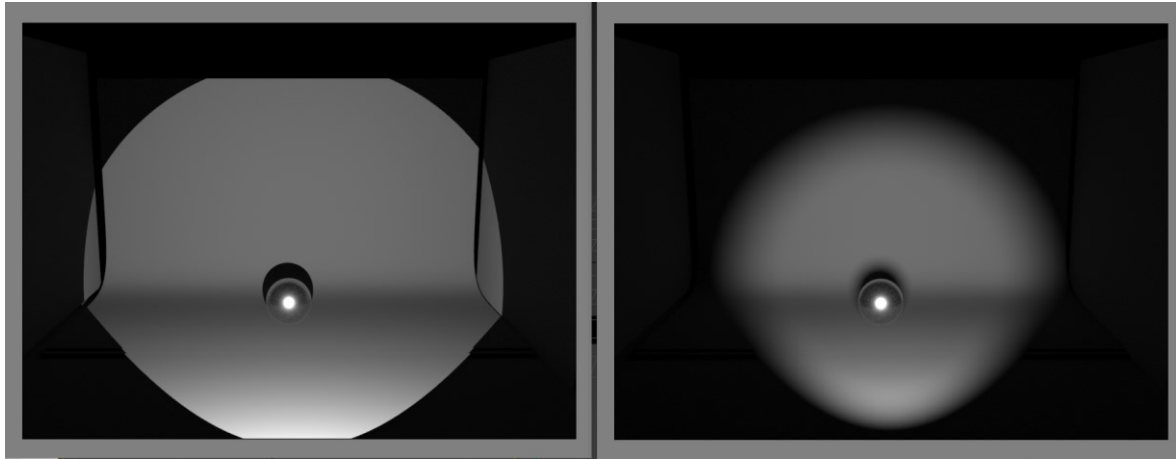
pehmeyttä ei oteta huomioon varjoissa. Jos taas radiusta aletaan säätämään ylöspäin, pehmenee kappaleiden varjotkin, koska valonlähteen koko suurenee.

- Cone Angle eli valokeilan koko, tällä säädetään alue, jolle valo kohdistuu, spottivaloa käytettäessä valo näkyy vain tämän parametrin määrittämän valokeilan sisäpuolella.
- Lens Radius -parametrilla säädellään spottivalon valonlähteen edessä olevan linssin kokoa.
- Penumbra angle määrittelee valokeilan keskeltä reunoja kohden, kohdan, jossa valo alkaa himmenemään tasaisesti, saavuttaen nolla arvon reunalla.
- Aspect Ratio -parametrilla voidaan muuttaa valokeilan muotoa ympyrästä ellipsimäiseksi säädettäessä arvoa 1:stä alaspäin.
- Roundness-parametri säätää valokeilaa pyöreästä neliöksi, kun arvoa säädetään 1:stä alaspäin.



Kuva 16. Spottivalon parametrit

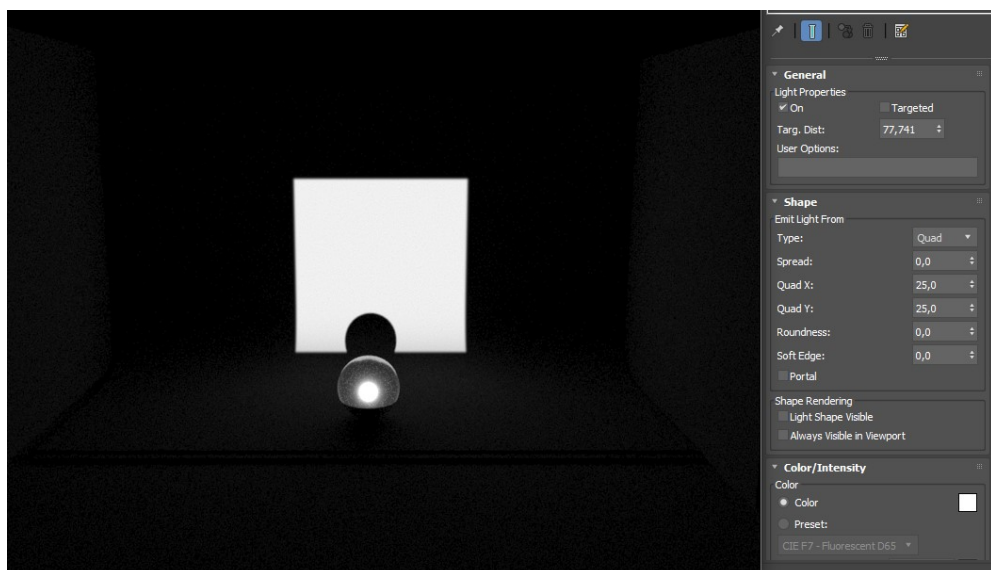
Kuvassa 17 vasemmalla on spottivalo, jossa radius-arvo on 0 ja muuten kaikki parametrit ovat vakioasetuksilla, joten varjot ovat terävät. Oikealla radiusta on nostettu, valokeilan kokoa on pienennetty ja penumbra-parametria on nostettu nolasta ylöspäin, joten varjot ovat nyt pehmeämmät, valokeila pienempi, ja valokeilan reunoilla valo himmenee.



Kuva 17. Spottivalon vertailu

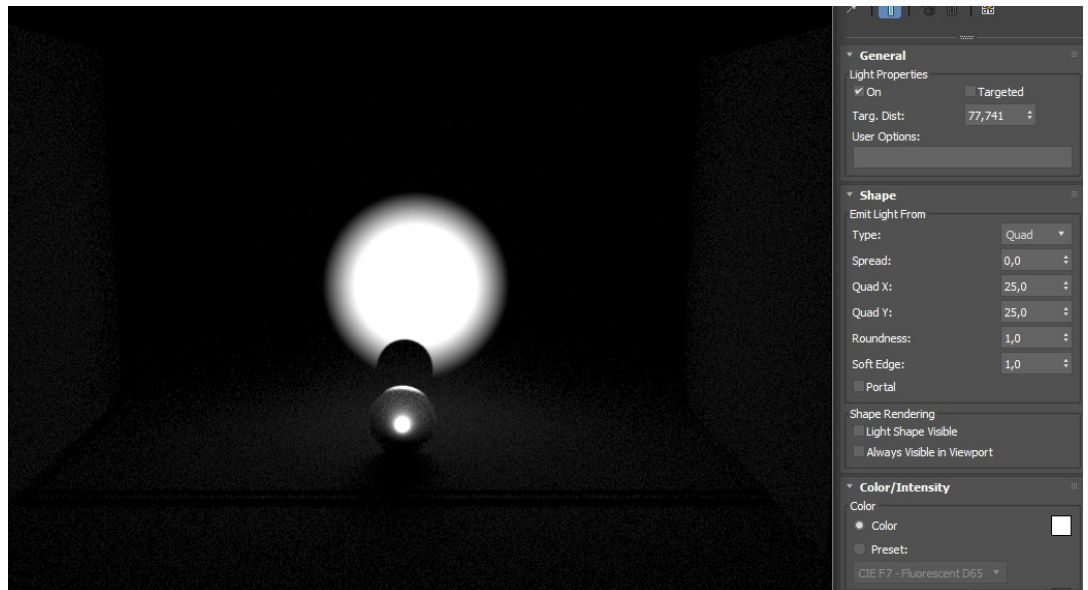
Quad eli nelivalo simuloi nelikulmaista aluetta, joka valaisee yhteen suuntaan. Nelivaloja voidaan käyttää esimerkiksi television ruudusta tulevan valon simuloimiseen tai jopa luonnonvalon, joka tulee ikkunasta sisälle. Nelivaloja käytetään yleisesti, kun halutaan valaista jokin kappale monesta suunnasta, niin sanotulla studiovalaistuksella.

Kuvassa 18 oikealla on nelivalon parametrit, joista spread eli hajontaparametria muuttamalla määritellään valon hajonnan laajuus, vakioarvo 1 antaa hajanaisia valonsäteitä, jotka valaisevat kauas nelikulmaisen alueen reunojen ulkopuolelle, kun arvoa lähdetään pudottamaan 1:stä alaspäin, keskittyvät valonsäteet, kunnes 0:ssa valo on enää täysin määritellyn nelikulmion kokoinen keskitetty valonsäde. Quad X ja Y määrittelevät nelikulmaisen valonlähteen koon. Roundness eli pyöreysparametri määrittelee valonlähteen muodon neliöstä 0 arvossa aina ympyräksi, kun arvo on 1. Soft Edge eli reunojen pehmeys parametrin 0 arvolla koko valaistuu alue on yhtä kirkas, kun taas arvoa nostetaan kohti 1:tä himmenee valo reunoilta. Kuvan 18 vasemmalla on renderöinti, jossa valon muoto on nelikulmio.



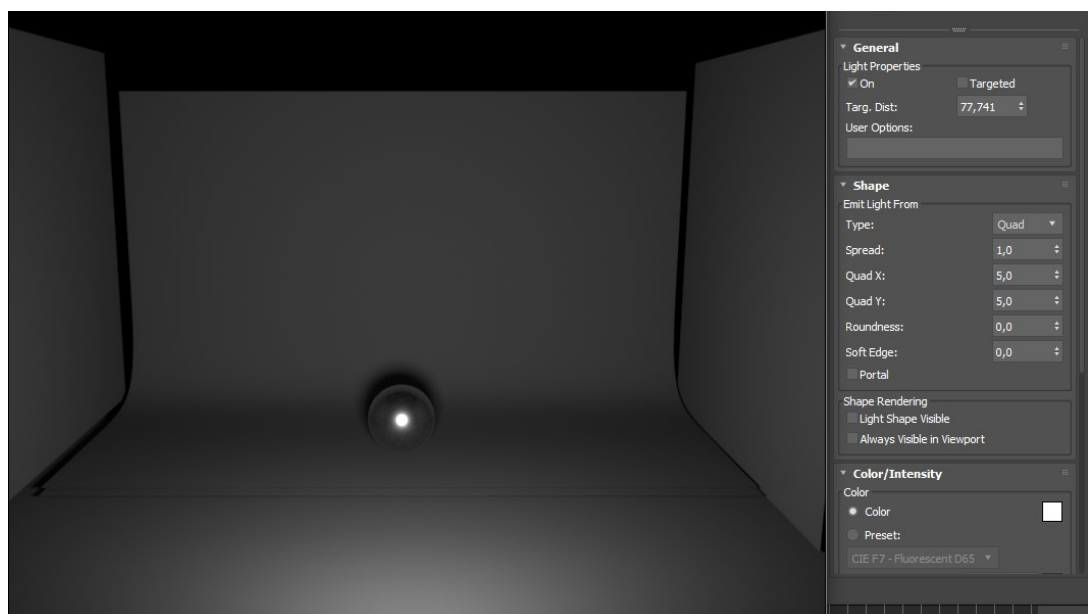
Kuva 18. Nelivalon keskitetty valonsäde

Kuvassa 19 vasemmalla on renderöinti, jossa valon muoto on pyöreä ja valo himmenee reunoilta, valo on kuitenkin edelleen keskitetty laskemalla hajonta-arvo minimiin, oikealla näkyy renderöinnissä käytetyt arvot.



Kuva 19. Nelivalo ympyrän muotoisena

Kuvissa 18 ja 19 nelivalosta hajonta on laitettu tarkoituksella pienimpään arvoon, jotta saadaan keskitetty valo, jotta muita parametreja olisi helpompi havainnollistaa, hajontaparametria ei kuitenkaan yleisesti käytetä tähän tapaan, vaan nelivaloilla valaistaan normaalisti isoja alueita käyttämällä isompaa arvoa hajontaparametrasta. Kuvassa 20 näytetään, miten isoimmalla hajonta-arvolla valo valaisee erittäin laajan alueen eteenpäin, tässä tapauksessa muut parametrit eivät kuitenkaan juuri vaikuta valoon millään lailla näin pienessä valaistussa tilassa.

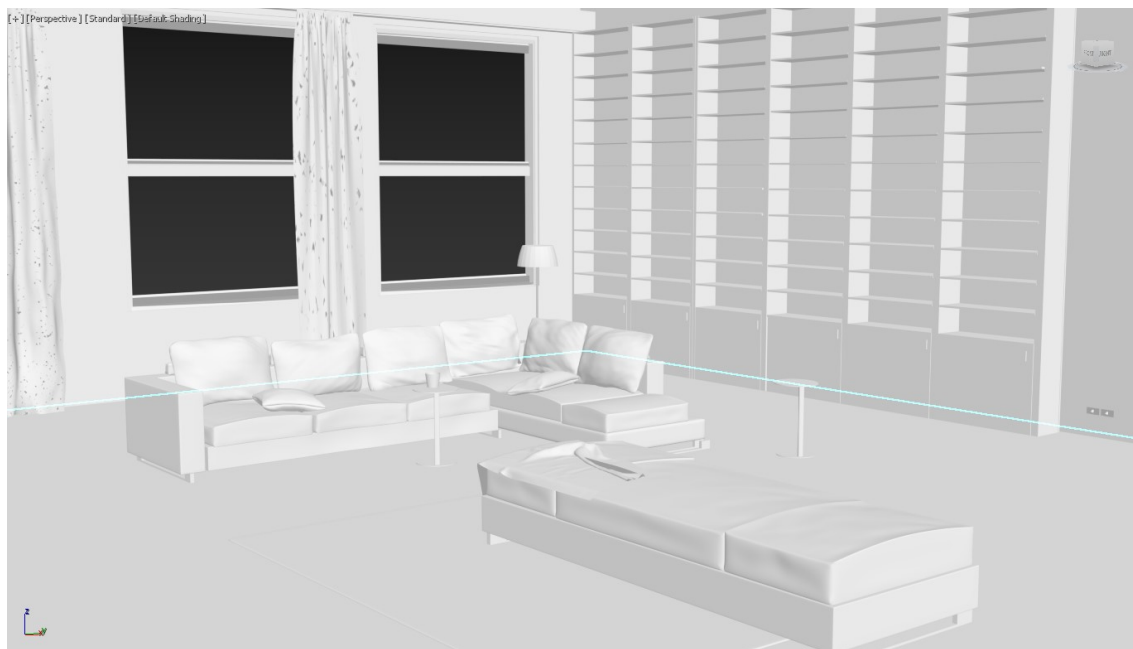


Kuva 20. Nelivalo isolla hajonnalla

Nelivaloja voidaan käyttää myös ”valoportaaleina”, joilla ohjataan Skydome valojen eli taivasta simuloivien valojen säteitä esimerkiksi ikkunoista sisään valaistaessa sisätiloja, ilman tämän tyyppisiä valoportaaleja skydome valaistus ei sovellu kovinkaan hyvin sisätilojen valaistukseen. Nelivalon ollessa portaali tilassa, se ei enää toimi valona, vaan pelkästään ohjaa ”taivaalta” tulevaa valoa.

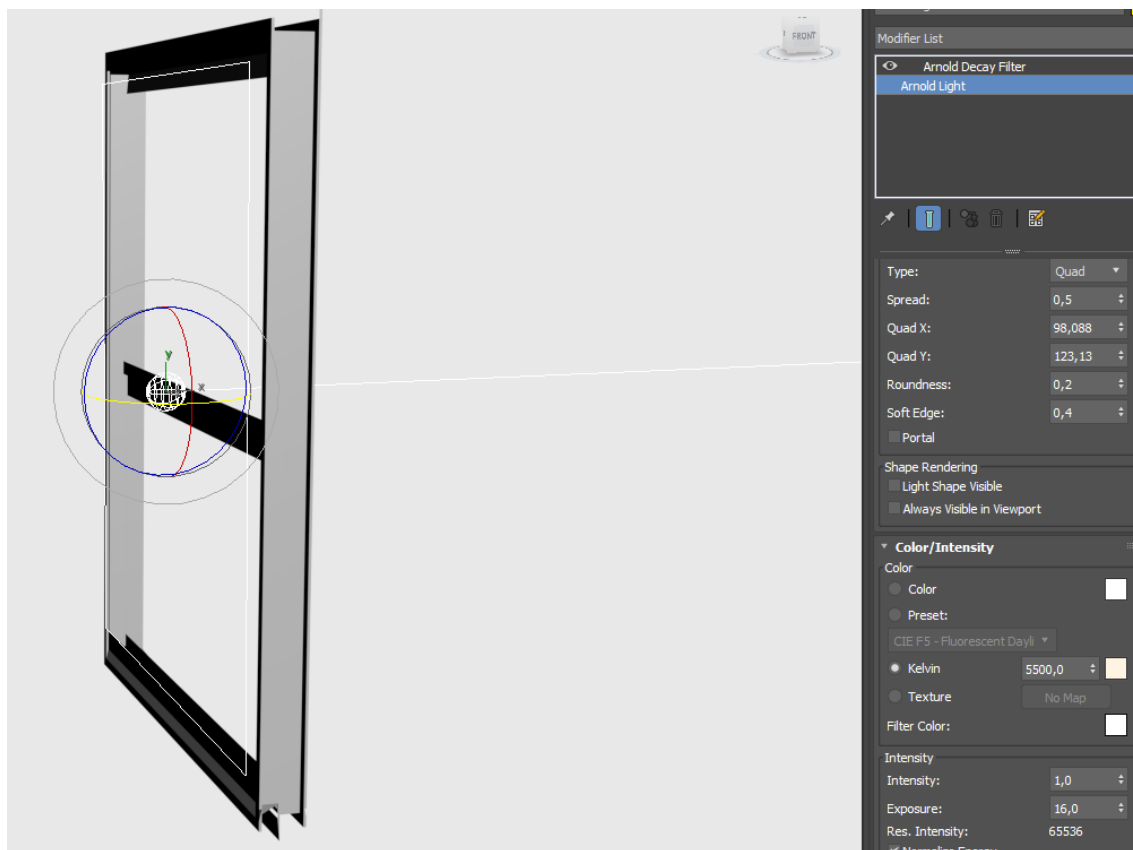
6.3 Sisätilan valaisu

Ennalta mallinnettu sisätila, johon lähdin laittamaan materiaaleja paikoilleen ja valaisemaan on kuvassa 21 alkuperäisessä muodossaan. Huone on Giorgio Lucianon mallintama, mutta sitä on saanut vapaasti käyttää ei-kaukallisessa tarkoituksessa, Huone on alkujaan mallinnettu 2013 kisaa varten, jossa oli tarkoitus valaista ja teksturoida huone omanlaiseksi.



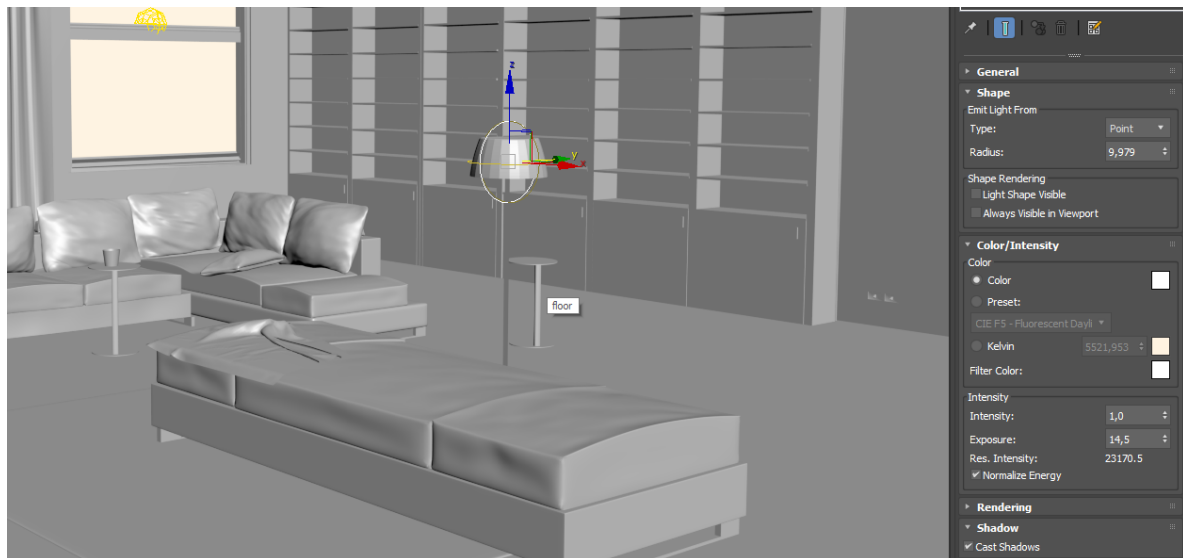
Kuva 21. Lähtökohta sisätilasta. Mallinnus (Luciano, 2013)

Aloitin huoneen viimeistelyn valaisusta, omassa versiossani valaisu tapahtui nelivaloilla ikkunoista, sekä pistevalolla pienen lampun sisällä, exposure control-asetukset on otettu pois päältä, joten kaikki valo tulee pelkästään paikalle asetetuista eri mallisista Arnold for 3ds Max:n valoista. Nelivalo aseteltiin ikkunan taakse ja sen koko muutettiin vastaamaan ikkunaa, tällä simuloidaan ulkoa tulevaa luonnonvaloa. Kun mallinnetussa ympäristössä ei ole kuin yksi pieni lamppu, valaistiin se pääasiassa luonnonvalolla. Kuvassa 22 näkyy nelivalon tärkeimmät asetukset ja niiden paikat ikkunoiden takana. Valotus- ja intensiteettiarvot todettiin hyväksi käyttämällä ActiveShade-tilaa valojen parametreja muutettaessa, Kelvin-parametrin muuttaminen arvoon 5500, muuttaa valon sävyn vastaamaan päivänvaloa.



Kuva 22. Nelivalo ikkunan takana

Nelivalojen asetteluun jälkeen halusin vielä sisätilaan kuitenkin jonkinlaisen lampun. Huoneessa oli valmiiksi mallinnettu jalkalamppu varjostimella, jonka sisälle laitettiin pistevalo. Pistevalon radiusta ja valotusta nostamalla saadaan se valaisemaan koko huonetta, kuvassa 23 on pistevalon parametrit ja paikka huoneessa. Pistevalon parametrien kanssa täytyy olla tarkkana, ettei valoa lähimpänä olevat kappaleet ylivälöty, esimerkiksi metalliset pinnat kuten jalkalamppun jalka voivat helposti valottua liikaa ja näkyä lopullisessa renderöinnissä valkoisena.



Kuva 23. Pistevalo varjostimen sisällä

Nelivaloihin ja pistevaloon asetettiin myös Decay filteri, jolla saadaan määriteltyä missä kohtaa valo alkaa himmentyä maksimi kirkkaudesta tasaisesti aina määriteltyyn lopetuspisteeseen, jossa valon säteet eivät valaise enää ollenkaan. Tällä asetuksella saadaan hyvin simuloitua auringonvaloa, joka valaisee kirkkaammin ikkunan lähellä kuin huoneen toisessa päädyssä.

Valojen jälkeen laitettiin kamera halutulle paikalle, kameran asettelu oli suotavaa tässä vaiheessa, ettei materiaaleja ja tekstuureja asetella turhaan paikkoihin, jotka eivät lopulta edes näkyisi renderöinneissä. Kameran asettelun yhteydessä asetettiin exposure control -valikon alla environment map kohtaan physical sky map eli fyysinen taivaskartta, jolla saadaan taustalle sinistä taivasta simuloiva kuva, joka näkyy renderöidessä ikkunasta. Kuvassa 24 on kuvakulma, josta kaikki lopulliset renderöinnit otettiin, vielä tässä vaiheessa ei materiaalit tai tekstuurit ole paikoillaan. Tässä työn vaiheessa käytettiin kameran kuvakulmassa pääasiassa ActiveShade-tilaa ja kaikki työskentely tapahtui viereisessä perspektiivi tilassa, näin saatiin reaaliaikaisia tuloksia valojen ja materiaalien muutoksista. Kaikissa kolmessa ympäristön valossa on käytetty valojen sample-arvoa 3.



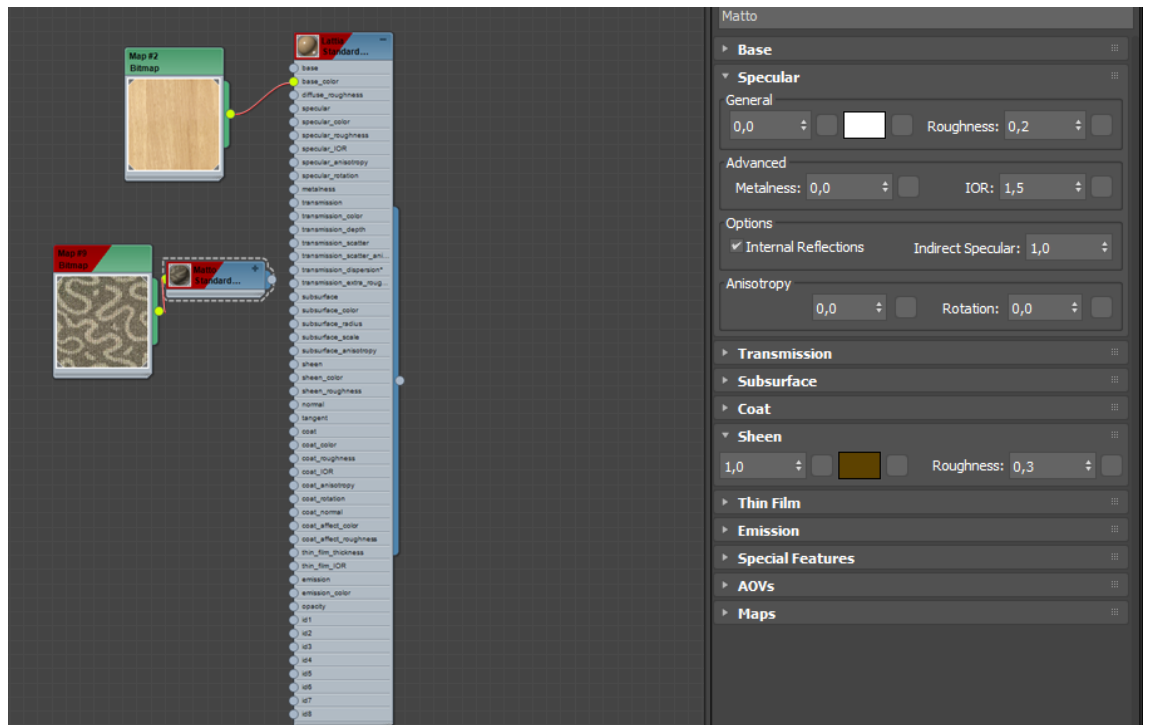
Kuva 24. Kameran kuvakulma

6.4 Materiaalit ja tekstuurit

Kun valot ja kamera oli saatu paikoilleen, oli vuorossa Standard Surface -materiaalien laittaminen paikoilleen mallinnettuihin kappaleisiin. Tässä kohtaa normaalisti hyödynnettäisiin tekstuureja lähestulkoon kaikissa kappaleissa materiaalin eri kohtiin kiinnitettynä, mutta koska opinnäytetyön aiheena ei niinkään ollut teksturointi, ei siihen perehdytä muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta juurikaan.

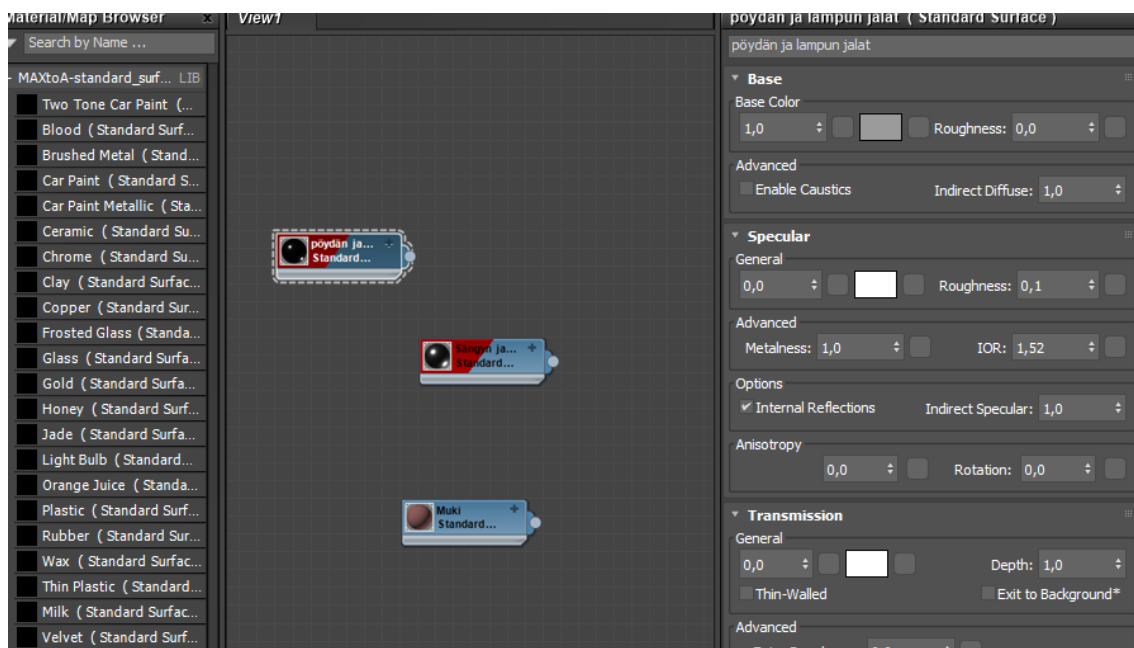
Aloitin kuitenkin juuri näistä muutamasta poikkeuksesta, johon oli lähes välttämätöntä joko tehdä itse tai etsiä valmis tekstuuri, nämä poikkeukset sisätilassa olivat lattia, seinät ja lattialla oleva matto, jotka ilman minkäänlaista tekstuuria poistaisivat kaiken fotorealistisuuden lopullisesta renderöinnistä. Kaikkiin kolmeen yllä mainittuun löytyi hyvin yksinkertaiset tekstuurit netistä, jotka lisättiin bittikarttana Standard Surface -materiaalin base_color kohtaan kuvan 25 näyttämällä tavalla.

Riippuen mihin tarkoitukseen materiaalia käytetään, säädettiin tarvittaessa lukuisia Standard Surfacen parametreja, jotka on myös näytetty kuvassa 25. Esimerkiksi lattiaan laitettavasta materiaalista säädettiin specular-arvoa alaspäin 0,25:een, ettei heijastukset näkyisi peilimäisinä lattian pinnasta. Matosta sen sijaan poistettiin kokonaan specular heijastukset, koska maton tekstuuri oli karvainen, joka ei juurikaan heijastaisi, tämän lisäksi sheen-arvo nostettiin 0:sta 1:een. Sheen-parametri luo pienen hohdon tai loisteen materiaalin ympärille, tätä käytetään usein juuri tekstiileissä. Yleisesti tekstuureihin luodaan vielä omat bump mapit eli kohoumakaartat, jolla saadaan tekstuurin pinta todenmukaisemmaksi, tätä en kuitenkaan työn lopputuloksen kannalta nähnyt tarpeelliseksi.



Kuva 25. Standard Surface parametreja

Loppuihin kappaleisiin ei käytetty tekstuureja, vaan pelkkä Standard Surface -materiaali pienillä säädöillä riitti tähän työhön. Kirjahyllyyn, pöytiin, sekä ikkunoiden reunoisiin käytettiin perusarvoilla Standard Surfacea, sillä materiaali perusarvoillaan simuloi suhteellisen hyvin puuta, pelkästään väriä muutettiin mieleiseksi. Pöytien, sohvien ja sängyn jalkoihin, lampun jalkaan sekä mukiin käytettiin Arnold for 3ds Max:iin saatavilla olevaa materiaalikirjastoa, joka sisältää kuvassa 26 näkyvät valmiit materiaalit, näistä käytettiin Brushed metal, (sängyn ja sohvien jalat) Chrome (pöytien ja lampun jalat) ja Ceramic (muki) materiaaleja. Sohvaan, sänkyyn ja sängyn päällä olevaan liinaan käytettiin samoilla asetuksilla olevaa materiaalia kuin mattoonkin, eri väreillä ja ilman tekstuuria.



Kuva 26. Arnold for 3ds Max materiaalikirjasto

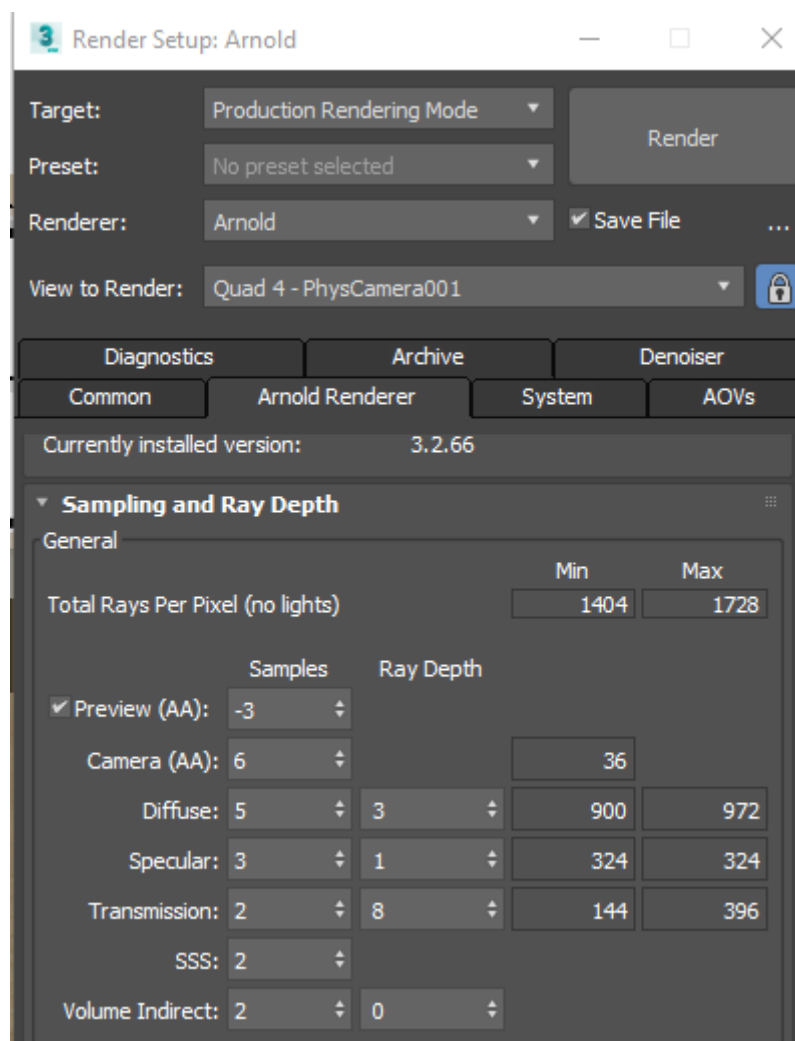
Kuvassa 27 on sisätila, johon on lisätty valot, materiaalit ja tekstuurit. Mahdolliset kohinat ja renderöinnin laadun parantamiset tehdään vielä työn viimeisessä vaiheessa. Renderöinnissä on kuitenkin jo nostettu kuvan tarkkuus 1920 x 1080 pikseliin, kamerasampling-arvo 4:ään sekä diffuse- ja specular sampling-arvot yhdellä ylöspäin vakioarvosta, nämä arvot tullaan kuitenkin vielä nostamaan ylöspäin lopullista renderöintiä varten.



Kuva 27. Sisätila valoilla ja materiaaleilla

6.5 Sisätilan renderöinti

Viimeistä korkealaatuista renderointiä varten täytyi vielä nostaa sampling-arvoja jonkin verran ylöspäin ja nostaa ikkunasta tulevan valon intensiteettiä, huoneesta oli tarkoitus saada päivänvalolla valaistu kirkas huone. Viimeistä renderointiä varten säädetyt arvot näkyvät kuvassa 28, renderöidyn kuvan tarkkuus on pidetty 1920 x 1080 pikseliä. Ray depth eli säteensyvyys-arvoilla saatiin huomattavasti enemmän valoa ympäristöön, sillä ne määrittelevät kuinka monta kertaa säteet, joita sample-arvo nostaa, kimpoilevat ympäristössä.



Kuva 28. Viimeiset renderöinti-arvot

Lopullinen korkealaatuinen renderöinti kuvassa 29 on tehty yllä olevan kuvan arvoilla, eikä kuvassa ole juurikaan havaittavissa kohinaa, jota ilmenee usein renderöintiä varten varjoisissa paikoissa, jos sample-arvot eivät ole säädetty tarpeeksi korkealle. On kuitenkin mahdollista, että pienemmilläkin arvoilla olisi tullut vastaava tulos huomattavasti lyhyemmällä renderöintiajalla.



Kuva 29. Viimeinen korkealaatuinen renderöinti

7 YHTEENVETO

Tavoitteena oli tutkia ja tuottaa korkealaatuinen valaistu sisätila Arnold for 3ds Max:n valoilla ja materiaaleilla, ja tämä toteutui pääasiassa hyvin. Kuitenkin juuri sisätilojen valaisuun ja renderöimiseen on olemassa sopivampiakin renderöintimoottoreita kuten V-Ray, joka käsittelee valoa hieman paremmin sisätiloissa. Arnold for 3ds Max:ia käytetään enemmän animaatioiden ja hahmojen luonnissa, mutta se on kuitenkin niin laaja renderöintimoottori, että soveltuu se lähes minkälaiseen tahansa mallintamiseen.

Lopulliseen tavoitteeseen, eli valaistuun ja maalattuun sisätilaan päästiin ensin tutkimalla yleisesti käytettyjä valomalleja samankaltaisista mallinnusprojekteista, sekä perehtymällä Standard Surface -materiaalin parametrien oikeaoppiseen säätämiseen. Pienen pohdinnan ja tiedonhaun jälkeen päädyttiin käyttämään opinnäytetyössä esiteltyjä neli- ja pistevaloja. Ulkoa tulevan valaisun olisi pystynyt toteuttamaan myös monella eri valomallilla, mutta päädyin käyttämään nelivaloa, koska se on helposti ja laajasti muokattavissa sen lukuisien parametrien avulla. Lampun valoon käytettiin pistevaloa, koska kyseistä valomallia käytetään yleisesti, kun halutaan simuloida lamppua, joka valaisee tasaisesti joka suuntaan. Standard Surface -materiaalin valinta käytettäväksi materiaaliksi projektissa oli helppo, sillä se on Arnoldin mukana tuleva fysiikkaperusteinen materiaali ja erittäin laajasti muokattavissa vastaamaan lukuisia oikean maailman pintamateriaaleja.

Kun käytössä olevat valomallit oli valittu, asetettiin ne paikoilleen ja niiden parametrit säädettiin lopullisiin arvoihin lukuisien testirenderöintien ja ActiveShade moodin käytön avulla. Valojen säädön jälkeen samanlaisella toimintatavalla säädettiin vielä Standard Surface -materiaalien parametrit lopullisiin arvoihin. Viimeiseen renderöityyn sisätilaan ja sen sample-arvoihin päästiin, samplejen määrää vaiheittain nostamalla ja renderöimällä, kunnes lopulta kohinaa ei ollut enää havaittavissa.

Kuten aikaisemmin mainitaan, valaisun olisi voinut hyvinkin toteuttaa myös eri tavalla, esimerkiksi käyttämällä vain Skydome valaistusta, joka ohjattaisiin huoneeseen nelivaloilla, jotka toimisivat valoportaaleina. Kuitenkin isoin asia, jonka olisi voinut toteuttaa eri tavalla, joka olisi parantanut laatua ja fotorealistisuutta huomattavasti, on laajempi materiaalien teksturointi. Rajasin kuitenkin teksturoinnin tarkoituksella pois työn tavoitteista, sillä aihe oli vieraampi ja aikaa työn valmiiksi saamiseen oli rajallisesti.

LÄHTEET

Arnold Documentation (n.d.a). Arnold. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/display/A5AF3DSUG/Arnold>

Arnold Documentation (n.d.b). Arnold Render Setup. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/display/A5AF3DSUG/Arnold+Render+Setup>

Arnold Documentation (n.d.c). System. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/display/A5AF3DSUG/System>

Arnold Documentation (n.d.d). Sampling. Haettu 15.4.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/pages/viewpage.action?pageId=40665689>

Arnold Documentation (n.d.e). Lights. Haettu 17.3.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/display/A5AF3DSUG/Lights>

Arnold Documentation (n.d.f). Standard Surface. Haettu 18.3.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/display/A5AF3DSUG/Standard+Surface>

Arnold Documentation (n.d.g). Understanding Physically Based Rendering in Arnold. Haettu 18.3.2020 osoitteesta <https://docs.arnoldrenderer.com/display/A5AF3DSUG/Understanding+Physically+Based+Rendering+in+Arnold>

Arnold renderer (n.d.). Arnold. Haettu 15.4.2020 osoitteesta <https://www.arnoldrenderer.com/arnold/>

Computer Hope (2019). Ray casting. Haettu 15.4.2020 osoitteesta <https://www.computerhope.com/jargon/r/ray-casting.htm>

Emiliano, S. (2019). What Is 3D Rendering? – Simply Explained. *All3dp* 8/2019. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://all3dp.com/2/what-is-3d-rendering-simply-explained/>

Halonen, L & Lehtovaara, J. (1992). Valaistustekniikka. Gummerus Kirjapaino Oy.

Peda.net (n.d.a). Valo ja varjo. Haettu 17.3.2020 osoitteesta <https://peda.net/yl%C3%B6j%C3%A4rvi/peruskoulut/viljakkalan-koulu/aineet/fysiikka/vja/valo-ja-v%C3%A4ri/valo-ja-varjo/mit%C3%A4-valo-on>

Peda.net (n.d.b). Heijastuminen. Haettu 17.3.2020 osoitteesta <https://peda.net/yl%C3%B6j%C3%A4rvi/peruskoulut/viljakkalan-koulu/aineet/fysiikka/vja/valo-ja-v%C3%A4ri/heijastuminen>

Peda.net (n.d.c). Taittuminen. Haettu 17.3.2020 osoitteesta <https://peda.net/yl%C3%B6j%C3%A4rvi/peruskoulut/viljakkalan-koulu/aineet/fysiikka/vja/valo-ja-v%C3%A4ri/taittuminen>

Russell, J. (2015). BASIC THEORY OF PHYSICALLY-BASED RENDERING. Blogijulkaisu 1.11.2015. Haettu 18.3.2020 osoitteesta <https://marmoset.co/posts/basic-theory-of-physically-based-rendering/>

Thomas, B. Hayward, A. (2019) What is ray tracing? The games, the graphics cards and everything else you need to know. Techradar 8/2019. Haettu 15.4.2020 osoitteesta <https://www.techradar.com/news/ray-tracing>

Unity3d (n.d.). Real-time rendering in 3D. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://unity3d.com/real-time-rendering-3d>

Wikibooks (n.d.). Fysiikan oppikirja: Valo. Haettu 17.3.2020 osoitteesta https://fi.wikibooks.org/wiki/Fysiikan_oppikirja/Valo

Wikipedia (n.d.a). Pre-Rendering. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://en.wikipedia.org/wiki/Pre-rendering>

Wikipedia (n.d.b). Rendering. Haettu 15.4.2020 osoitteesta [https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_\(computer_graphics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_(computer_graphics))

Wikipedia (n.d.c). Monte Carlo method. Haettu 4.3.2020 osoitteesta https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method#Computer_graphics

Wilson, J. (2015). PHYSICALLY-BASED RENDERING, AND YOU CAN TOO. Blogijulkaisu 1.10.2015. Haettu 18.3.2020 osoitteesta <https://marmoset.co/posts/physically-based-rendering-and-you-can-too/>