

MENTAL RAY -MATERIAALIT 3DS MAX -OHJELMASSA

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Mediatekniikan koulutusohjelma
Teknisen visualisoinnin suuntautumisvaihtoehto
Opinnäytetyö
4.5.2009
Jani Enqvist

**Lahden ammattikorkeakoulu
Mediatekniikan koulutusohjelma**

ENQVIST, JANI: Mental ray -materiaalit 3ds Max -ohjelmassa

Teknisen visualisoinnin opinnäytetyö, 49 sivua, 1 liitesivu

Kevät 2009

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyössä tutkitaan materiaalien ominaisuuksia ja roolia 3d-grafiikan luonnissa sekä selvitetään, että mitä eri piirteitä materiaalit esittävät ja mitkä asiat niihin vaikuttavat. Lopulta syvennytään tarkemmin mental ray -renderöintiohjelman tarjoamiin materiaalityyppeihin, niiden tärkeimpiin erityisominaisuuksiin ja laskentatapoihin, joihin ominaisuuksien renderöinti perustuu.

Materiaalien ominaisuudet pohjautuvat usein reaali maailman ilmiöiden simuloimiseen, jonka realismi riippuu käytettävästä materiaalityypistä. Jotkut mental ray -materiaaleista ovat juuri realismin kannalta edistyksellisiä mahdollistaen samalla helppokäyttöisyyden ja monipuolisuuden. Niistä tärkeimmät ovat uudehko arkkitehtuuri- ja tuotesuunnitteluun tarkoitettu Arch & Design ja pehmeän vaikutelman luovan pinnanalaisen sironnan huomioivat Subsurface scattering -materiaalit. Monipuoliset ominaisuudet voivat kasvattaa renderöintiäikää runsaasti, joten on tärkeää myös hallita materiaalien optimointi.

Case-osiossa tutkittiin Arch & Designin mahdollisuuksia luomalla kuva, jonka materiaaleissa sitä käytettiin. Lisäksi kuvaa verrattiin toiseen kuvaan, jossa taas käytettiin 3ds Maxin yksinkertaisempaa Architectural-materiaalia. Arch & Designin edut tulevat ilmi sitä selvemmin, mitä erikoisempia heijastus- ja läpinäkyvyysominaisuuksia kuvassa on tarve esittää.

Avainsanat: materiaali, shader, mental ray, 3ds Max

**Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Media Technology**

ENQVIST, JANI: Mental Ray Materials in 3ds Max Software

Bachelor's Thesis in Visualization Engineering 49 pages, 1 appendix

Spring 2009

ABSTRACT

This thesis deals with material properties and their role in 3d graphics. That includes the characteristics that surfaces present and factors that influence the appearance in rendered images. Further attention is devoted to the materials that are provided by mental ray rendering software, their properties and calculation methods.

Material properties are often based on the simulations of real-world phenomena. The realism depends on the type of material that is used. One of mental ray's strengths is realism, and some materials are not only advanced, but also quite easy to use. The most important ones are Arch & Design for architectural and design visualization and Subsurface scattering materials for surfaces with a softer appearance.

In the case study the possibilities of Arch & Design were studied by creating a picture using Arch & Design materials on the surfaces. It was also compared to a picture where the materials were less advanced Architectural materials of 3ds Max. The advantages of Arch & Design are obvious when complex reflection and transparency features are used.

Key words: material, shader, mental ray, 3ds Max

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	DIGITAALINEN MATERIAALI	3
2.1	Materiaali osana kokonaisuutta	3
2.2	Materiaalin tärkeimmät ominaisuudet	4
2.2.1	Reaalimaailman imitointi	4
2.2.2	Heijastuvuus	4
2.2.3	Läpinäkyvyys ja taittuminen	5
2.2.4	Valon sironta	6
2.2.5	Muut ominaisuudet.....	7
2.3	Materiaalieditori	8
2.4	Materiaalien luonnin hankaluudet	9
3	MENTAL RAY	10
3.1	Johdatus mental rayhin.....	10
3.2	Ulkoiset tekijät	11
3.2.1	Geometria ja muoto	11
3.2.2	Ympäristö.....	12
3.2.3	Valaistus	13
3.2.4	Renderöinti.....	13
4	MENTAL RAY -MATERIAALIT	16
4.1	Materiaalijärjestelmä.....	16
4.2	Mental ray -materiaalityyppi ja shaderit	17
4.3	Subsurface scattering -materiaalit	18
4.3.1	Materiaalivalikoima	18
4.3.2	SSS Fast Material	19
4.3.3	SSS Physical Material.....	21
4.4	Car Paint Material	23

4.5	Arch & Design.....	24
4.5.1	Edistynyt materiaalityyppi.....	24
4.5.2	Perusominaisuudet	25
4.5.3	Fysikaalinen tarkkuus	27
4.5.4	BRDF-heijastukset.....	28
4.5.5	Ambient occlusion.....	29
4.5.6	Round corners	30
4.5.7	Optimointimahdollisuudet.....	31
5	CASE: REALISTISESTI KÄYTTÄYTYVIEN PINTOJEN LUONTI MENTAL RAYN AVULLA	33
5.1	Lähtökohdat.....	33
5.2	Valmisteluvaiheet	33
5.2.1	Malli	33
5.2.2	Valaistus	34
5.2.3	Renderöintiasetukset	35
5.3	Materiaalien luonti	36
5.3.1	Yhteiset työskentelytavat	36
5.3.2	Metallit	37
5.3.3	Lasit	38
5.3.4	Muut pinnat	39
5.4	Architectural-materiaalin erot työskentelyssä	40
5.5	Arch & Designin ja Architecturalin vertailu	42
5.6	Arch & Design -kuvan jälkikäsittely	43
6	YHTEENVETO.....	46
	LÄHTEET	47
	LIITTEET	50

TERMISTÖ

Absorboituminen = säteilyn energian menetys sen osuessa pintoihin tai kulkiessa aineen läpi.

Fotoni = valonlähteistä lähetetty energiaa sisältävien säteiden tietoa välittävä hiukkanen.

Fresnel-heijastus = taitekertoimien eron perusteella laskettu heijastus kun valo siirtyy aineesta toiseen.

HDR-kuva = High Dynamic Range Image, eli korkeadynaaminen kuva, jonka suuria kirkkauseroja voidaan 3d-grafiikassa hyödyntää valaisussa.

Highlight-alue = kirkkaan valonlähteen heijastusta objektin pinnalla esittävä alue, joka voidaan luoda ilman hidasta säteenseurantaa.

Malli = mallinnettu geometria. Voidaan viitata yhteen objektiin tai kaikkiin objekteihin kokonaisuutena. Materiaalien tapauksessa malli on teoria, johon materiaalin laskenta perustuu.

Materiaali = mallinnetun kappaleen pinnoite, mutta tarkoittaa myös asiayhteydestä riippuen reaali maailman materiaalia tai materiaalityyppiä.

Max-tiedosto = 3ds Maxin käyttämä tiedostomuoto, joka sisältää tiedot muun muassa objekteista, materiaaleista ja asetuksista.

Multiply-sekoitustila = kuvankäsittelyssä toisen tason päällä olevalle tasolle käytetty asetetus, jossa suoraan toistensa päällä olevien pikseleiden väriarvot kerrotaan, ja tuloksena on tummempi kuva.

Oren-Nayar = varjostusmalli karkeiden pintojen diffuusiheijastuksille.

Pikseli = kuvapiste eli bittigrafiikassa kuvan pienin osa.

Polygoni = monikulmio, joilla luodaan geometriaa.

Renderöinti = kuvan luonti mallista tietokoneohjelman avulla.

Shader = pintaan osuvan valon käyttäytymisen määrittämiset materiaalissa.

Sironta = valonsäteen suunnan muutos sen kohdatessa esteen tai tiheyden muutoksen aineessa.

Säteenseuranta = valonsäteiden kulun jäljittely kuvaa muodostaessa.

Varjostusmalli = malli, jonka perusteella valaistus näytetään materiaalin pinnassa.

1 JOHDANTO

3d-grafiikka on kehittynyt valtavasti viimeisen vuosikymmenen aikana, mikä tarkoittaa samalla parempia mahdollisuuksia fotorealismuuteen pyrittäessä. Ohjelmistopuolella tapahtuvan kehityksen lisäksi kehittyvät myös tietokoneet, joiden tehokkuus edesauttaa realististen ilmiöiden luontia järkevässä ajassa. Tärkeässä osassa näiden realististen ilmiöiden luonnissa ovat materiaalit, eli mallinnetulle geometrialle annetut pinnoitteet.

Monet mallinnetut kappaleet on helppo tunnistaa muotonsa perusteella. Esimerkiksi mallinnusvaiheessa olevan talon voi tunnistaa taloksi, mutta paljon muuta siitä ei vielä tiedetäkään. Se voi olla tehty vaikkapa tiilistä, puusta tai betonista, jotka kaikki saavat sen näyttämään ihan erilaiselta. Pinta voi olla myös lasia, joka läpinäkyvänä paljastaa katsojalle enemmän talon sisällöstä. Toiset kappaleet taas voisivat olla muotonsa perusteella mitä tahansa. Etenkin melko suuripiirteisesti mallinnettu pyöreähkö möykky voi pelkän muotonsa perusteella olla esimerkiksi pehmeä tekstiilipintainen tyyny tai kova kivi. Vasta kun sen pinnalle lisätään materiaali, voidaan ymmärtää mistä kappaleesta on kyse. Tästä syystä materiaalit ovat tärkeitä yksinkertaisissakin tapauksissa, mutta vaatimustason kasvaessa niiden merkitys vielä korostuu. Samalla kasvavat myös vaatimukset materiaalin mahdollisuuksia ja yhtä lailla käyttäjän taitotasoa kohtaan.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan tarkemmin materiaalien ominaisuuksia ja roolia 3d-grafiikan luonnissa syventymällä mental ray -renderöintiohjelman tarjoamiin materiaaleihin. Ominaisuudet pohjautuvat usein reaali maailman ilmiöiden simuloimiseen, joten ominaisuuksien ymmärtäminen edellyttää kohtuullista perustietoa ilmiöiden syistä.

Materiaalien luonti voidaan helposti mieltää pintakuvioiden tekemiseksi, mutta yleensä yhtä tärkeää on materiaalin luonteen ja ominaisuuksien määrittely. Juuri tästä on kyse mental rayn materiaalityypeissä. Materiaaleista esiteltyjä perusteita käytetäänkin pohjatietona, kun perehdytään mental rayn materiaaleihin. Erytisen tarkasti keskitytään kaikista tärkeimpiin ominaisuuksiin ja tapoihin, joita niiden laskemiseen käytetään. Materiaalityypeistä uudehko Arch & Design saa erityishuomion korkealaatuisuudensa ja helppokäyttöisyytensä vuoksi.

Case-osiossa pyritään hyödyntämään monipuolisesti ja tehokkaasti Arch & Design -materiaalia ominaisuuksiltaan erilaisten pintamateriaalien luonnissa. Lopputuloksen arvioinnissa käytetään hyväksi vertailua 3ds Maxin vastaavaan, mutta yksinkertaisempaan Architectural-materiaaliin.

Työssä käsitellään materiaaleja ja useiden muidenkin mallinnusohjelmien mukana tulevaa mental rayta lähinnä Autodeskin 3ds Max 2008:n näkökulmasta, mutta niiden toimintaperiaatteet ovat vastaavat myös muissa ohjelmissa. Lähinnä käytännön työskentelytavat ja käytettävissä olevat vaihtoehdot eroavat ohjelmasta riippuen.

2 DIGITAALINEN MATERIAALI

2.1 Materiaali osana kokonaisuutta

Valmis renderöity kuva on monen tekijän summa, jossa jokainen tekijä vaikuttaa omalla tavallaan lopputulokseen. Reaalimaailmassakin esineillä on omat piirteensä, joiden perusteella ihminen tunnistaa sen ja voi arvioida esineen ominaisuuksia. Esineen tärkeimmiksi piirteiksi sen tunnistamisen kannalta mielletään usein muoto ja aine, josta se on tehty. Näiden lisäksi sen ulkonäköön vaikuttavat myös monet ulkoiset tekijät. Mallinnuksessa pyritään usein imitoimaan reaalimaailman ilmiöitä, joten esineiden luontikin on silmin havaittavissa olevien ominaisuuksien esittämistä muodossa, jonka tietokoneohjelma ymmärtää. Prosessiin kuuluu virtuaalisen kappaleen eli objektin muodon määrittely esimerkiksi polygoneilla ja niistä muodostetun pinnan peittäminen materiaalilla. Lisäksi malliin voidaan lisätä objekteina esimerkiksi valonlähteitä, jotka ovat kuin virtuaalisia lampuja, mutta eivät aina käyttäydy kuten oikeat lamput. Myös virtuaaliset kamerat ovat kuin reaalimaailman esikuvansa, ja niiden sijoittelu on objektin paikan ja suunnan muuttamista, jotta renderöitävässä kuvassa näkyisivät halutut kappaleet. Renderöintivaiheessa ohjelma osaa näiden tietojen perusteella laskea ominaisuuksien vaikutukset toisiinsa ja muodostaa niiden perusteella kuvan.

Kappaleen ulkonäön myös mallinnuksessa muodostavat siis sen geometria ja materiaali yhdessä ulkoisten tekijöiden kanssa. Jokainen tekijä tulee luoda ottaen huomioon muut tekijät, jotta ne toimivat kokonaisuutena. Itsessään ihan onnistuneelta vaikuttava materiaalikin voi olla tehty väärin, jos sitä ei ole suunniteltu ottamalla huomioon kokonaisuus. Toisaalta kaikin puolin hyvin tehdyn materiaalin ominaisuudet voivat mennä hukkaan, jos vaikkapa valaistus on huono. Tämän takia on syytä osata kaikki työvaiheet riittävän hyvin. Isoissa yrityksissä jokaisen osa-alueen hoitavat monesti siihen erikoistuneet ihmiset, joten työskentely kokonaisuus huomioon ottaen on erityisen tärkeää.

2.2 Materiaalin tärkeimmät ominaisuudet

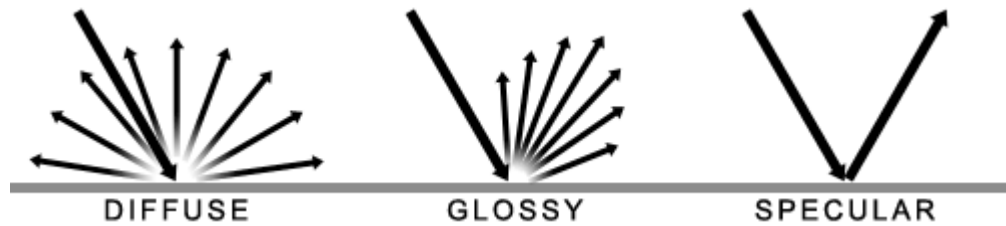
2.2.1 Reaalimaailman imitointi

Reaalimaailmassa kappaleen ulkonäön kannalta pinnan tärkeimmiksi ominaisuuksiksi mielletään yleensä sen väri, heijastuvuus ja läpinäkyvyys. Väri on teoriassa kappaleen pinnan diffuusiheijastus valkoisessa valossa, ja niin se määritellään myös tavallisemmissa mallinnusohjelmien varjostusmalleissa. Siitä on kuitenkin selkeyden vuoksi syytä puhua esimerkiksi kappaleen perusvärinä sen erottamiseksi heijastusasetuksista. Renderointiohjelma laskee renderöintivaiheessa näiden ja usein monien muiden erilaisten ominaisuuksien muodostaman yhteisvaikutuksen.

Materiaalien määrittelytavat vaihtelevat eri shadereissa riippuen siitä kuinka edistynyt shader on ja mikä sen käyttötarkoitus on. Jotkut niistä pyrkivät imitoimaan fysikaalisia ilmiöitä tarkasti tarviten siten monipuoliset ominaisuudet, jotkut ovat muuten vain monipuolisia monimutkaisen materiaalin takia ja toiset ovat yksinkertaisia antaen perustuloksen, mutta ollen samalla nopeammin renderöitäviä ja helppokäyttöisempiä. Useimmat varjostusmallit käyttävät reaalimaailmasta yksinkertaistettua funktiota nimeltä BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) laskeakseen valon heijastukset ja taittumiset.

2.2.2 Heijastuvuus

BSDF-mallin heijastuksia käsittelevästä osa-alueesta käytetään nimeä BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function). Se olettaa, että valo osuu pintaan ja heijastuu siitä samassa pisteessä, eli se jättää huomiomatta pinnan alla tapahtuvan sironnan. Se kuitenkin laskee kolme yleisintä tapaa, jolla valo heijastuu pinnasta (Kuvio 1). Näitä ovat eri suuntiin heijastuvista säteistä johtuen matan pinnan antava diffuusiheijastus (diffuse reflection), hiukan hajaantuvista säteistä johtuva sumea heijastus (glossy reflection) ja samaan suuntaan heijastuvista säteistä johtuen terävän heijastuksen antava spekulariheijastus (specular reflection). (Birn 2007, 248.)



Kuvio 1. Mallikuva säteiden suunnasta erilaisissa heijastuksissa.

Fysiikan heijastuslain mukaan valonsäteiden heijastuskulma on yhtä suuri kuin tulokulma materiaalista riippumatta. Lain periaatetta noudatetaan myös renderöinnissä. Säteiden hajautuminen eri suuntiin johtuu pinnan mikroskooppisen pienestä karkeudesta, jolla ei ole vaikutusta pinnan ulkonäköön muuten kuin heijastuksien kannalta. Anisotrooppinen heijastus on heijastuksen erityistapaus, silloin kun pinnan karkeus ei ole sattumanvaraisesti jakautunutta. Tällöin esimerkiksi valonlähteen heijastus ei näytä pyöreältä highlight-alueelta pinnalla vaan venyy elliptiseksi. (Birn 2007, 250-251.)

Reaalimaailmassa useimpien pintojen heijastukset koostuvat näistä kaikista heijastustyypeistä, vaikka esimerkiksi peilin näyttämän kuvan voisi tarkkuudesta johtuen luulla olevan pelkkää spekulariheijastusta tai karkean paperipussin aiheuttavan vain matan diffuusiheijastuksen.

Varjostusmallista riippuen heijastukset luodaan yleensä joko aidosti säteenseurantamenetelmällä tai yksinkertaistetusti luoden pinnalle vain highlight-alueita, jotka imitoivat kirkkaiden valonlähteiden heijastuksia ja antavat vaikutelman kiiltävyydestä.

2.2.3 Läpinäkyvyys ja taittuminen

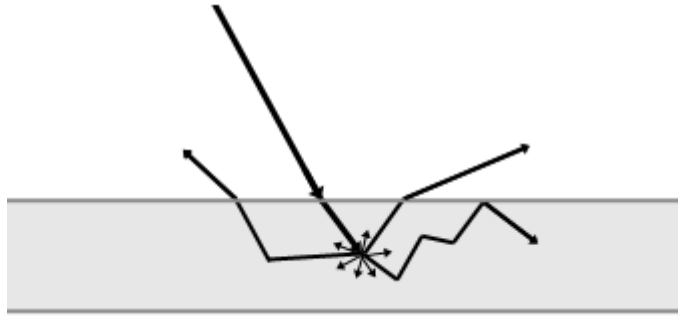
Useimmat varjostusmallit mahdollistavat kappaleen läpinäkyvyyden määrittämisen materiaalin asetusten avulla. Yleensä tavallisemmissa shade-reissa tämä läpinäkyvyys ei kuitenkaan vastaa reaalimaailman läpinäkyvyyttä materiaaleissa, kuten lasi ja vesi. Syynä ovat eri materiaaleille ominaiset ja realismisuuteen suuresti vaikuttavat taitekertoimet, joita ei tällöin osata ottaa huomioon, vaan taitekerroin on aina yksi, eli valon taittumista ei tapahdu.

Taitekertoimen määrittämisen mahdollistavat materiaalitkin ovat useimpien yksinkertaistettuja malleja valon käyttäytymisestä reaali maailmassa. BSDF-mallin valonlähteykseen keskittyvä osa-alue BTDF (Bidirectional Transmittance Distribution Function) määrittää heijastusmallin tavoin samat kolme ilmiötä, jotka tässä tapauksessa tapahtuvat säteen poistuessa kappaleesta. (Livny 2007, 311.)

2.2.4 Valon sironta

BSDF-mallia monipuolisempi valonkäsittelytapa on joissakin edistyneemmissä shadereissa käytetty BSSRDF (Bidirectional Surface Scattering Distribution Function), jonka tanskalainen Henrik Wann Jensen esitteli tietokonegrafiikkaan erikoistuneessa SIGGRAPH-konferenssissa vuonna 2001. BSSRDF-teknologiaa alettiin nopeasti hyödyntää elokuvateollisuudessa, ja siihen liittyvään tutkimukseen osallistuneille myönnettiin Yhdysvaltain elokuva-akatemian Technical Achievement Award elokuvateollisuutta kehittävästä työstä vuonna 2004. (Jensen 2008.)

BSSRDF ottaa huomioon pinnalla tapahtuvien heijastusten ja taittumisen lisäksi myös materiaalin sisällä tapahtuvan valon sironnan, joka on valonsäteen suunnan muutos sen kohdatessa esteen tai tiheyden muutoksen aineessa. Ilmiöstä käytetään nimeä subsurface scattering. Valo voi tietyn pinnalla olevan pisteen läpi tunkeuduttuaan sirota materiaalin sisällä useita kertoja ja palata takaisin ympäristöön aivan eri pisteestä (Kuvio 2). Se kuuluu siis aineen heijastus- ja läpinäkyvyysominaisuuksiin mutta on 3d-grafiikassa usein erityistapaus, jota perusmateriaalit eivät ota huomioon. Sironnan ominaisuuksiin tosin kuuluu läpikuultavuus, jossa valoa pääsee kappaleen läpi, mutta sen takana olevat esineet näkyvät epätarkkoina. Jotkut materiaalityypit kuten 3ds Maxista löytyvät Arch & Design ja Architectural osaavat huomioida sen läpinäkyvyyden erikoistapauksena. Tämä läpikuultavuus on pääasiassa havaittavissa vain tietyissä ohuissa kappaleissa, joten yleensä sitä ei tarvitse ottaa huomioon materiaalia luodessa. (Wikipedia 2008.)



Kuvio 2. Mallikuva säteen sironnasta BSSRDF-mallissa.

Useimmissa aineissa metalleja lukuun ottamatta esiintyy joitakin pinnan alla tapahtuvan sironnan piirteitä. Joissakin aineissa nämä piirteet tulevat niin vahvasti esiin, että ilmiöön erikoistuneen shaderin käyttö on välttämättöntä, jos pyritään realistiseen lopputulokseen. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi iho, lumi, maito ja vaha. Subsurface scattering tuo pintaan luonnollista pehmeyttä sen aiheuttaman pehmeän diffuusivalon ansiosta. (Jensen, Marschner, Levoy & Hanharan, 2001.)

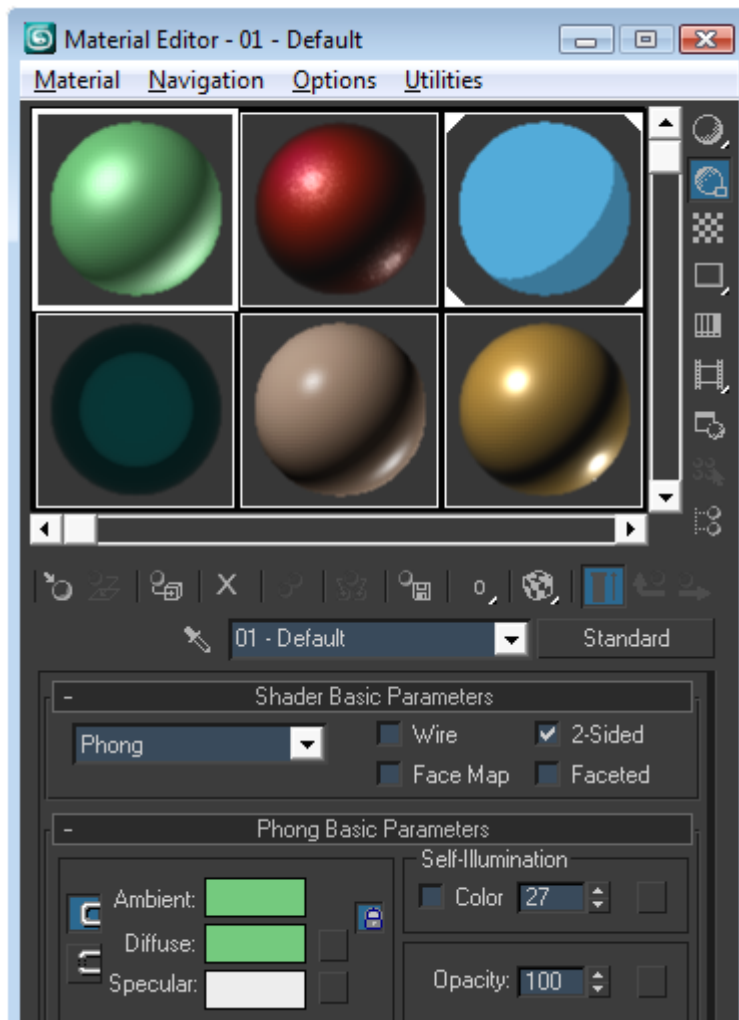
2.2.5 Muut ominaisuudet

Materiaaleilla on myös useita perusominaisuuksia, joilla ei vaikuteta valon käyttäytymiseen materiaalin kohdatessaan. Päinvastainen ilmiö on materiaalin itsevalaisu, jolla voi olla monenlaisia käyttötarkoituksia esimerkiksi läpikuultavissa lampunvarjostimissa tai kirkkaissa ja värikkäissä materiaaleissa, kun ei lainkaan pyritä realistisuuteen. Yleisimmin käytetty ominaisuus on pinnan muodon muokkaus shadereilla. Tällaisia tekniikoita ovat pikseleiden kirkkautta muokkaavan varjostusefektin avulla epätasaisen pinnan vaikutelman luova bump mapping, pinnan normaaleja muokkaava normal mapping ja pinnan geometriaa muokkaava displacement mapping. Niiden toiminta yksinkertaisemmissa varjostusmalleissa ja mental rayn materiaaleissa vastaavat toisiaan lähes täysin.

Monipuolisuudesta riippuen voidaan myös vaikuttaa esimerkiksi renderointiasetuksiin ja -efekteihin materiaaliikohtaisesti. Materiaalin ulkonäköasetusten ja renderointiefektien ero on melko häilyvä, koska pohjimmiltaan kaikessa on kyse siitä, että mental raylle kerrotaan, kuinka mikäkin pikseli renderöidään.

2.3 Materiaalieditori

Materiaaleja luodaan ja muokataan mallinnusohjelmiston materiaalieditorissa, joka kunkin tyyppisen materiaalin tai shaderin käyttöliittymän lisäksi sisältää esikatselukuvan materiaalista (Kuvio 3). Esikatselu ei kuitenkaan ota huomioon juuri kyseisen mallin valaistusolosuhteita ja renderöintiasetuksia, joten se ei kerro paljonkaan materiaalin ulkonäöstä renderöidyssä kuvassa. Materiaali luodaan valitsemalla materiaalityyppi ja muuttamalla sen ominaisuuksia. Se tallennetaan samaan tiedostoon mallin ja sen asetusten kanssa, mutta esimerkiksi tekstuureina käytetyt bittikartat säilyvät omina tiedostoinaan, joihin max-tiedostossa vain viitataan. (Matossian 1999.)



Kuvio 3. 3ds Maxin materiaalieditorin käyttöliittymä

2.4 Materiaalien luonnin hankaluudet

Reaalimaailman kappaleen värin arviointi voi olla hankalaa yksinkertaisemmissakin valaistusolosuhteissa. Etenkin värien kirkkautta ja värikylläisyyttä ajautuu helposti liioittelemaan, jos niitä arvioi vain materiaalieditorin esikatselukuvan perusteella. Tämä ei johda vain luonnottomilta näyttäviin väreihin renderöidyssä kuvassa, vaan helposti myös luonnottomaan valaistukseen käytettäessä epäsuoraa valaistusta renderöinnissä. Valkoiset seinätkään eivät yleensä heijasta kuin korkeintaan 85 prosenttia valosta takaisin ympäristöön epäsuorana valona, joten esimerkiksi täysin valkoiset materiaalit, jotka siis heijastavat 100 prosenttia, toimivat epäsuoran valaistuksen kanssa epärealistisesti. Koska vaaleammat materiaalit heijastavat valoa enemmän, valaistuu malli tehokkaammin ja tasaisemmin runsaasta epäsuoran valon määrästä johtuen. Joskus tämä voi olla toivottavaa, mutta se johtaa usein kontrastittomaan kuvaan ja tasapaksulta näyttävään valaistukseen etenkin, jos valonlähteitä näyttäisi olevan mallissa vain vähän. (Autodesk 2007.)

Vaikka tunnistettavan materiaalin luonti on melko yksinkertaista, nousee vaikeusaste huomattavasti pyrittäessä mahdollisimman realistiseen lopputulokseen. Ihminen huomaa helposti, jos renderöidyssä kuvassa joku asia ei näytä ihan siltä kuin pitäisi, vaikka hän ei osaisikaan tarkasti kertoa mitä muutoksia siihen pitäisi tehdä. Tästä johtuen hyvin realistisen materiaalin luominen on monesti yritysten ja erehdysten kautta oppimista. Valitettavasti nämä vaikeimmin luotavat materiaalit ovat usein niitä, joiden renderöintiin kuluu eniten aikaa.

Yksityiskohtaisestikin luoduilla digitaalisilla materiaaleilla voi olla vaikeaa välttää sitä, että kappale näyttää liian selvästi tietokonegrafiikalta. Usein tämä johtuu liian kovalta näyttävästä pinnasta, koska pinnan alla tapahtuvaa sirontaa ei ole otettu materiaalissa huomioon. Sironta tekee kappaleista luonnollisemman ja pehmeämmän oloisia. Sen simuloimista varten on olemassa erityisiä materiaaleja, mutta ne eivät sisällä monia muita mahdollisesti tarpeellisia ominaisuuksia, ja toisaalta ne ovatkin tarkoitettu käytettäväksi lähinnä silloin, kun sironta vaikuttaa merkittävästi lopputulokseen.

3 MENTAL RAY

3.1 Johdatus mental rayhin

Mental ray on saksalaisen mental images GmbH:n kehittämä korkeatasoinen renderöintiohjelma, jonka erityisvahvuuksiin kuuluu fotorealistisen valaistuksen mahdollistavat säteenseurantatekniikat ja renderöintiprosessin jakaminen usean tietokoneen kesken. Mental rayta käytetään paljon fotorealista jälkeä vaativassa tuote- ja arkkitehtuurisuunnittelussa sekä monissa elokuvissa. Suureksi osaksi tietokone-efektinsä ansiosta tunnetuista elokuvista esimerkiksi The Day After Tomorrow, The Hulk, Star Wars Episode II: Attack of the Clones, The Matrix Reloaded ja The Matrix Revolutions ovat käyttäneet mental rayta 3d-tehosteidensa renderöinnissä, ja mental imagesille onkin myönnetty Yhdysvaltain elokuva-akatemian Technical Achievement Award vuonna 2003. Animaatioelokuvien renderöintiin esimerkiksi Pixarin Rendermania pidetään parempana sen nopeuden vuoksi, mutta toisaalta se häviää esimerkiksi fyysisessä tarkkuudessa. (Wikipedia 2009.)

Renderöintimahdollisuuksiensa lisäksi mental ray tarjoaa käyttäjälleen materiaali- ja valotyyppejä, jotka on optimoitu käytettäväksi mental raylla renderöidessä, ja jotka toimivatkin ainoastaan sen kanssa. Monet materiaaleista ja valoista mahdollistavat mental rayn epäsuoran valaistuksen kanssa käytettynä fyysisesti tarkan renderöinnin ja siten realistisemmän sekä näyttävämmän lopputuloksen.

Mental ray tulee integroituna useiden suosittujen 3d-mallinnusohjelmien, kuten Autodeskin omistamien 3ds Maxin, Mayan ja Softimagen, mukana, mutta on saatavilla myös mallinnusohjelmista erillisenä sovelluksenaan. Eri ohjelmistojen kohdalla löytyy eroja esimerkiksi mental rayn käyttöliittymässä ja saatavilla olevissa shadereissa, mutta sen periaatteet ovat kaikkialla samat. (Mental images 2009.)

3.2 Ulkoiset tekijät

3.2.1 Geometria ja muoto

Objektin muoto ei ole tärkeä asia ainoastaan muodon itsensä vuoksi, vaan hyvällä muotoilulla saadaan enemmän irti myös materiaaleista ja valaistuksesta (Kuvio 4).



Kuvio 4. Valmiiksi luotuja materiaaleja tarjoavan MrMaterials-sivuston testiobjekti, jonka muoto on suunniteltu materiaalin ominaisuuksien monipuoliseen esittelyyn.

Yksinkertaisin, mutta fotometrisiä valoja tai tiettyjä materiaalien ominaisuuksia käytettäessä välttämätön, huomioon otettava tekijä mallin geometriassa on oikea koko. Esimerkiksi värjätty lasi luodaan oikeaoppisesti mental rayn Arch & Design -materiaalilla määrittämällä etäisyys, jonka päässä pinnasta lasi on halutun värinen. Tällaisissa tapauksissa oikeaa kokoa ei välttämättä vaadita, mutta realistinen mittakaava helpottaa huomattavasti tarvittavien etäisyyksien arviointia. Fotometriset valot taas matkivat valovoimakkuuden heikkenemistä fysiikan käänteisen neliölain mukaisesti etäisyyden kasvaessa, joten ne edellyttävät mallilta reaali maailman kokoluokkaa. Esimerkiksi hehkulamppu valaisee oikean auton täysin eri tavalla kuin pienen leluauton, eikä tietokoneohjelma ymmärrä eroa näiden välillä, jos ei käytetä oikeita mittoja. (Autodesk 2007.)

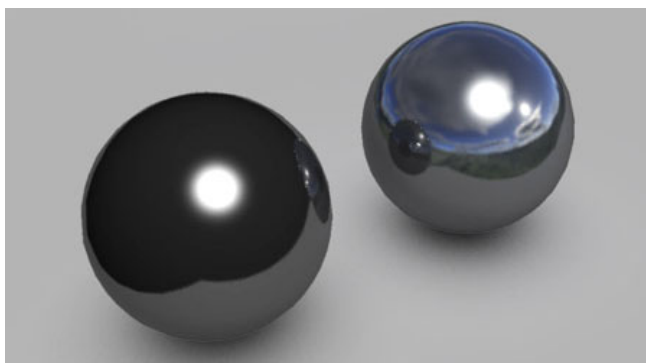
Koska mental rayn shadereita käyttämällä pyritään usein realistiselta näyttäviin materiaaleihin vaaditaan myös kappaleilta realistisuutta edistävää muotoa korkealaatuiseen lopputulokseen yltämiseksi. Tärkein asia on ma-

terialle tyypillisten ominaisuuksien ymmärtäminen ja kappaleen muotoilu siten, että ne ominaisuudet tulevat esille ja renderöidyn kuvan katsoja todennäköisemmin mieltää materiaalin realistiseksi sen tutun ominaisuuden vuoksi. Esimerkiksi jos varjostusmalli mahdollistaa erilaiset heijastukset pinnan ja kuvakulman suhteesta riippuen, voivat voimakkaat heijastukset tulla esille huomattavasti vahvemmin ja monipuolisemmin kappaleen pinnan ollessa tasaisen sijaan pyöristynyt.

Mental ray ei kuitenkaan vaikuta objektien geometriaan, joten muotojen huomioon ottaminen on lähinnä käyttäjän vastuulla. Pieniä yksityiskohtia se kuitenkin voi parantaa reunoja pyöristävällä renderöintiefektillä. Reunat jätetään malleissa usein teräviksi, vaikka reaali maailmassa useimmat teräviksi mielletyt reunatkin ovat jossain määrin pyöristyneitä. Juuri nämä pyöristyneet reunat tuovat monien kappaleiden luonteen paremmin esille heijastuksilla, vaikka pyöristys olisikin vain vähäinen.

3.2.2 Ympäristö

Materiaalista riippuen kappaletta ympäröivillä objekteilla tai taustakuvilla voi olla erittäin tärkeä vaikutus. Hyväkään materiaali ei saa näyttämään runsaasti heijastavia tai läpinäkyviä kappaleita erityisen hyviltä, jos heijastuva ympäristö on yksivärinen tai muuten tylsä (Kuvio 5). Luonnollisissa ympäristöissä esimerkiksi metallikappaleilla on yleensä monipuolisia heijastuksia, joten ihmiset ovat tottuneet tunnistamaan metallikappaleet niistä. Ympäristöistä voi tehdä monipuolisempia yksityiskohtaisilla objekteilla tai monipuolisilla tekstuureilla. Parhaan tuloksen saa kuitenkin yleensä käyttämällä ympäristönä HDR-kuvaa.



Kuvio 5. Heijastuvan ympäristön vaikutus pallon ulkonäköön.

3.2.3 Valaistus

Jotta realistiseksi tarkoitettu materiaali näyttäisi realistiselta, täytyy myös valaistuksen olla luonnollinen. Erityisen tärkeää tämä on läpinäkyvien kappaleiden kohdalla, koska vaikkapa lasin näyttäminen aidolta johtuu suureksi osaksi valon realistisesta taitumisesta, ja tämä voi olla merkitykseltä, jos valaistus ei ole luotu hyvin.

Materiaalien lisäksi mental ray tarjoaa myös erityisiä mental ray -valoja, joista luonnonvalon luovia mr Sun ja mr Sky -valotyyppejä käyttämällä voidaan ylittää parempaan lopputulokseen valaistuksen kannalta ja siten myös parempiin olosuhteisiin materiaalien näyttävyyden kannalta. Nämä ovat käytännössä mental rayta varten suunniteltuja monipuolisempia vaihtoehtoja 3ds Maxin perusvaloille.

Monet edistyneimmät materiaalit, kuten esimerkiksi fysikaalisesti tarkka mental rayn Arch & Design, on suunniteltu käytettäväksi mahdollisimman luonnollisessa valaistuksessa, jotta niiden realistisuuteen pyrkivät ominaisuudet pystyttäisiin hyödyntämään täysin. On siis käytettävä tarkkuuden säilyttämiseksi fotometrisiä valoja, joissa valovoimakkuus heikkenee realistisesti etäisyyden kasvaessa.

3.2.4 Renderöinti

Sopivien valojen ja niiden asetusten lisäksi usein yhtä tärkeässä roolissa on epäsuora valaistus, joka luodaan renderöintiasetuksia määrittämällä. Suora valaistus tarkoittaa käytännössä suoraan valonlähteestä tulleita valonsäteitä, kun taas epäsuora valaistus on muilta pinnoilta heijastunutta valoa (Kuvio 6). Reaalimaailmassa valonsäde heijastuu pinnalta toiselle niin monta kertaa, kunnes se on absorboitunut kokonaan, mutta mental ray antaa mahdollisuuden säätää heijastusten maksimimäärän. Tällä tavalla lopputuloksen kannalta merkityksettömien huomaamattomien heijastusten laskenta ei turhaan kasvata renderöintiäikää. Absorboitumisen määrä riippuu pinnan väristä ja on sitä suurempi, mitä vaaleampi pinta on.



Kuvio 6. Vasemmallä huonetta on valaistu ainoastaan auringon ja taivaan suoralla valolla. Oikealla on otettu käyttöön epäsuora valaistus Final gather ja Global illumination -tekniikoilla.

Mental ray käyttää epäsuoran valaistuksen laskemiseksi Final gather ja Global illumination -säteenseurantamalleja, joita voi käyttää yhdessä tai erikseen. Global illumination -termillä tarkoitetaan yleisesti realistisen valaistuksen luomista epäsuoraa valaistusta käyttäen, mutta mental ray käyttää sitä myös fotoneihin perustuvan renderöintitekniikkansa nimenä. Siinä lähetetään fotoneita valonlähteistä sekä tarkastellaan niiden käyttäytymistä ja vaikutusta valaistukseen niiden heijastuessa tai taittuessa pinnasta toiseen. Final gather taas ei käytä valonlähteistä lähetettyjä fotoneita, vaan se lähettää kuvassa näkyvillä pinnoilla olevilta pisteiltä säteitä ympäristöön ja laskee valon vaikutuksen niissä pisteissä ympäröivien objektien perusteella. Tämä mahdollistaa tarkemman valon peitealueiden laskennan. Final gather -tekniikan avulla voidaan käyttää epäsuoran valaistuksen luonnissa myös itsevalaisevaa materiaalia, koska se ottaa huomioon kaikki mallin väriarvot riippumatta siitä, että mistä värierot johtuvat. Tällöin materiaali siis toimii sekä pinnan ulkonäön määrittäjänä että valonlähteenä. (Livny 2007, 549-552.)

Näitä tekniikoita yhdessä käytettäessä hyödytään kummankin vahvuuksista. Global illuminationin ansiosta saadaan helposti monen heijastuksen aiheuttama tasainen valaistus, mutta korkealaatuiset yksityiskohtaiset renderöintitulokset edellyttäisivät valtavaa määrää fotoneita, mikä kasvattaisi renderöintiäikää suuresti. Final gather laskee siis nopeammin tarkemmat yksityiskohdat. Usein näiden kanssa yhdessä käytetään lisäksi ambient occlusion -varjostusta laskemaan kaikkein tarkimmat yksityiskohdat. Se on nopea, ja sen ansiosta säästetään renderöintiäikää, koska Final gatherin ei tarvitse laskea yksityiskohtia kovin tarkasti.

Kaustiikka on erityistapaus, jolla simuloidaan läpinäkyvän pinnan läpi kulkeeneen valon vääristymistä. Heijastuessaan tai taittuessaan pintojen läpi valoisuus tyypillisesti vahvistuu kohdistuessaan tietylle alueelle (Kuvio 7). Säteenseurannan tarkkuus ei riitä tällaisten ilmiöiden laskemiseen, joten ne lasketaan objektiokohtaisesti käyttäen Caustics-tekniikkaa, joka hyödyntää fotoneita. Caustics toimii siis esimerkiksi mental ray -materiaaleilla luodun realistisen lasin apuna, jotta materiaalin ominaisuudet näkyisivät täydellisesti.



Kuvio 7. Kaustiikan ilmiöitä.

4 MENTAL RAY -MATERIAALIT

4.1 Materiaalijärjestelmä

Mental rayn mukana tulee materiaalityyppejä, jotka saadaan käyttöön, kun mental ray asetetaan renderöintiohjelmaksi. Useat niistä löytyvät sekä materiaali- että shadertasolta. Tämä tarkoittaa, että niitä voidaan käyttää itsenäisinä kokonaisuuksinaan tai liittää ne osaksi muita, jolloin vaikutus kohdistuu vain ominaisuuteen, jonka muokkaajaksi shader on asetettu. Itsenäisinä toimivia useista shadereista koottuja materiaalityyppejä eli shaderpuita kutsutaan nimellä phenomenon. Niiden tarkoitus on helpottaa materiaalin luomista, jotta käyttäjän ei tarvitsisi koota sitä komponentti kerrallaan, vaan kaikki asetukset löytyisivät yhden käyttöliittymän alta. Mental rayn materiaalityyppejä ovat:

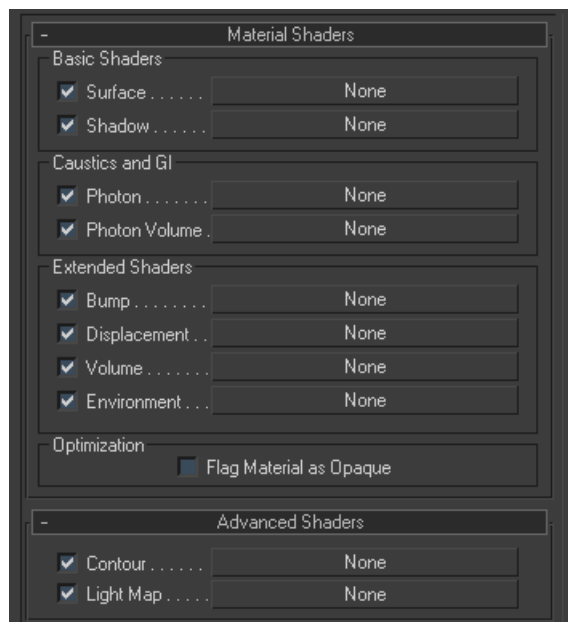
- Arch & Design
- Car Paint Material
- DGS Material
- Glass Material
- mental ray
- SSS Fast Material
- SSS Fast Skin Material
- SSS Fast Skin Material+Displacement
- SSS Physical Material

Näistä DGS ja Glass -materiaalit ovat nykyään käytännössä merkityksettömiä uudemman etenkin arkkitehti- ja tuotesuunnitteluun suunnatun Arch & Design -materiaalin vuoksi, joka on huomattavasti monipuolisempi ja nopeammin renderöitävissä. Glass on tarkoitettu fysikaalisesti tarkan lasimateriaalin luomiseen ja DGS kovien pintojen luomiseen, jotka määrittelevät yksinkertaisia diffuusi-, heijastus-, kiilto- ja läpinäkyvyysasetuksia säätämällä. Car Paint Material on suunniteltu realistisen auton maalipinnan luomiseen. SSS-materiaalit simuloivat pinnan alla tapahtuvaa sironnata, jonka huomioiminen on tietyissä tapauksissa tarpeellista. Mental ray -materiaalityyppi on yhdistelmäateriaali, joka luodaan komponentti kerrallaan shadereista kasaamalla. Näiden lisäksi mental rayn materiaaliominaisuuksia voi käyttää myös esimerkiksi yksinkertaisimmassa 3ds Maxin

standard-materiaalissa, josta useimpien muiden materiaalityyppien tavoin löytyy mental ray connection -osio, mikä mahdollistaa komponenttishadereiden lisäämisen mental ray -materiaalityypin tavoin.

4.2 Mental ray -materiaalityyppi ja shaderit

Mental ray -materiaalityyppi on pitkään ollut tärkeässä roolissa mental ray:lle erityisiä materiaaleja luotaessa, mutta on vähitellen alkanut muuttua merkityksettömämmäksi, koska uudet materiaalityypit ovat monipuolisempia ja paljon helpokäyttöisempiä. Sen vaikea ymmärrettävyys onkin ollut yksi syy siihen, miksi monet pitävät mental rayta hankalasti opittavana renderöintiohjelmanä. Mental ray -materiaali ei itsessään sisällä mitään ominaisuuksia, vaan siinä valitaan shadereita huolehtimaan materiaalin eri ominaisuuksista (Kuvio 8). Valitut shaderit siis toimivat komponentteina, joiden perusteella tämä yhdistelmä-materiaali muodostuu kokonaisuudeksi. Uudemmat ja helpokäyttöisemmät materiaalityypit toimivat oikeastaan samalla tavalla, mutta niissä komponentit ovat valmiina ja selkeästi esillä yhdessä käyttöliittymässä. (Steen 2007.)



Kuvio 8. Mental ray -materiaalin shader-rakenne.

Mental ray -materiaalityypin asetetaan ominaisuuksia, jotka vaikuttavat esimerkiksi itse materiaalin ulkonäköön tai renderöintiasetuksiin materiaallikohtaisesti. Surface-komponentti on ainut välttämätön, koska se määrit-

tää pinnan ulkonäön suorassa valossa, eikä objektia näkyisi lainkaan ilman sitä. Toisaalta esimerkiksi Contours-shader ei liity pinnan ulkonäköön, vaan vaikuttaa materiaalikohtaisesti siihen, kuinka kappaleille ääriviivat piirtävä renderöintiefekti käyttäytyy. Muista komponenteista Caustics and GI -ryhmän Photon ja Photon Volume määrittävät fotonien käyttäytymisen materiaaliin törmätessään ja sen sisään tunkeutuessaan. Objektin pinnan muotoon voidaan vaikuttaa joko bump map -varjostusefektillä tai geometriaa muokkaavalla displacement-komponentilla, jotka ovat samoja kuin 3ds Maxin perusmateriaaleissa. Volume ei muokkaa objektin pintaa, vaan sen kolmiulotteista aluetta mahdollistaen esimerkiksi savun luonnin. Environmentilla asetetaan esimerkiksi bittikarttakuva toimimaan ympäristönä, jonka materiaali näkee muodostaessaan heijastusta. Light Map säilöo tietoa objektin valaistuksesta. Kaikki nämä asiat voidaan toteuttaa hyvin myös esimerkiksi Arch & Design -materiaalissa, josta löytyy mental ray -materiaalia vastaava mental ray Connection -osio shaderille, jotka eivät materiaalin perusominaisuuksiin kuulu. (Steen 2007, 169-171.)

Komponenteiksi voidaan asettaa monenlaisia shadereita, olivat ne sitten mental rayn mahdollistamia tai 3ds Maxissa vakiona olevia. Useimmat mental rayn mahdollistamat materiaaleihin liittyvät shaderit ovat samoja, jotka löytyvät myös omina materiaalityypeinä, ja niiden asetuksetkin vastaavat toisiaan täydellisesti. Muut sopivat lähinnä esimerkiksi yksinkertaisten, mutta fysikaalisesti tarkkojen materiaalien luontiin, johon Arch & Design on tässäkin tapauksessa parempi vaihtoehto. Mental rayn shaderit ovat C tai C++ -ohjelmointikielellä kirjoitettuja koodinpätkiä, joten niitä pystyy ohjelmoimaan itse tai voi käyttää kolmansien osapuolien tekemiä shadereita. Shaderin esittelytiedosto sisältää muun muassa tiedot shaderin nimestä, parametreista ja oletusarvoista. (Driemeyer & Herken 2005, 60.)

4.3 Subsurface scattering -materiaalit

4.3.1 Materiaalivalikoima

SSS- eli Subsurface scattering -materiaalit ovat mental rayn tapa simuloida BSSRDF-mallin mukaista valon sirontaa materiaalin sisällä, jotta tietyt pinnat saataisiin näyttämään luonnollisilta (Kuvio 9). Mental ray tarjoaa neljä SSS-materiaalityyppiä käytettäväksi 3ds Maxissa: SSS Fast Material,

SSS Fast Skin Material, SSS Fast Skin Material+Displace ja SSS Physical Material. Mental ray käyttää ilmiön simulointiin kahta eri tapaa, joista toinen luo vain vaikutelman sironnasta ja toinen laskee sen fysikaalisesti. Listan kolme ensimmäistä kuuluvat fysikaalisesti epätarkkoihin shadereihin kun taas Physical material on nimensä mukaisesti fysikaalisesti tarkka. Niiden asetukset ja laskentatavat poikkeavat toisistaan merkittävästi, mikä vaikuttaa samalla siihen, kumpaa tyyppiä on eri tapauksissa suositeltavampaa käyttää. (Livny 2007, 634.)



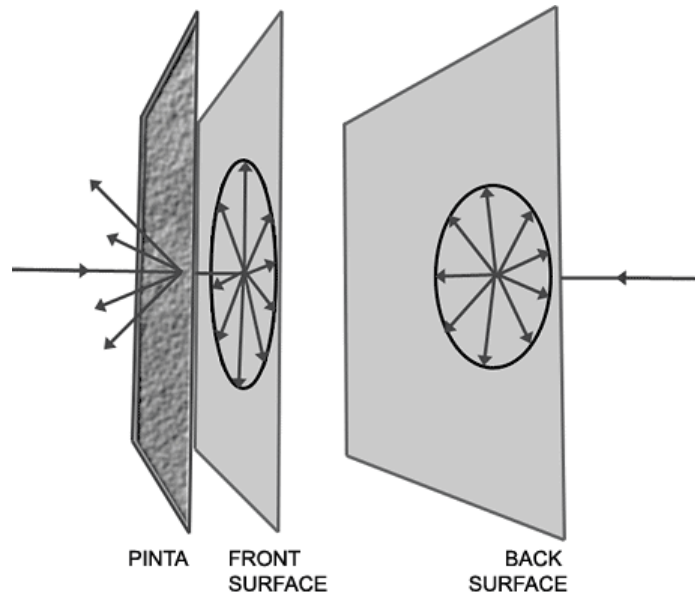
Kuvio 9. Subsurface scattering -ominaisuuksia esille tuova kynttilämateriaali.

4.3.2 SSS Fast Material

Fast Material sopii käytettäväksi tapauksiin, jossa valon sirontaa tapahtuu pinnan alla jossain määrin, mutta valo ei kulje kovin syvälle paksun objektin sisään. Tämä rajoittaa sen käyttöä, koska joissakin tapauksissa valo kulkee pitkällekin aineen läpi. Sen sijaan esimerkiksi ihomateriaalin luomiseen se sopii erittäin hyvin, koska valo ei kulje syvälle, ja läpikuultavuutta esiintyy vain ohuimmissa kohdissa kuten kämmenessä ja korvanlehdissä. Muita Fast materialin etuja ovat etenkin luovemmat ratkaisut mahdollistava helpompi käytettävyys ja kevyempi laskenta, mikä tarkoittaa käytännössä nopeampaa renderöintiä. (Livny 2007, 638-639.)

Subsurface scattering simuloidaan käyttämällä kerroksia, joilla on omat tehtävänsä (Kuvio 10). Jokainen kerros tuo esille tietyn ominaisuuden, ja kun niiden vaikutukset renderöitäessä yhdistetään, syntyy vaikutelma materiaalin sisäisestä sironnasta. Valon käyttäytyminen materiaalissa on eri-

tyisen tärkeässä osassa, joten itse materiaaliasetusten lisäksi valaistus, sen voimakkuus ja epäsuora valaistus vaikuttavat merkittävästi lopputulokseen. Mallin koko ja muoto ovat lisäksi tärkeitä jo sironta-asetuksien pituusmittayksiköiden vuoksi, mutta myös siksi, koska läpikuultavuus riippuu objektin paksuudesta.



Kuvio 10. Fast Materialin kerrosrakenne.

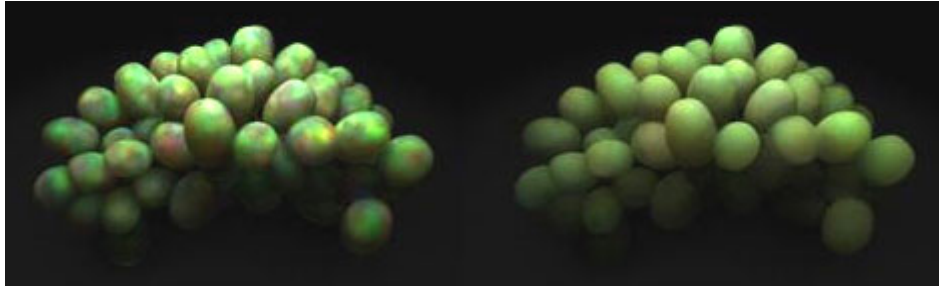
Heijastukset jakautuvat ulkoisesti ja sisäisesti tapahtuviin heijastuksiin. Materiaalin perusväri ja pinnan spekulaariheijastukset määritetään ulkoisesti pinnalla, kuten luonnollisesti myös pinnan kuormaisuus bump mapia käyttäen. Pinnan läpi tunkeutuva valo otetaan huomioon sisäisessä sironnassa, joka simuloidaan käyttämällä kuvitteellisia objektin sisällä olevia front surface ja back surface -nimisiä kerroksia. Front surface on nimensä mukaisesti kameran kuvakulmasta katsottuna edessä oleva kerros, joka ottaa laskee sirontan objektin etupuolella vaikuttavan valaistuksen perusteella. Back surface toimii vastaavasti huomioiden objektin takana vaikuttavan valon eli muodostaen vaikutelman läpikuultavuudesta. Tämän kerroksen vaikutus ei luonnollisesti ole suuri, jos objekti ei ole erityisen ohut eli takana oleva valo ei näy objektin läpi. Kerroksista tallennetaan valokartat, joiden perusteella lopputulos renderöidään, ja pinnalla nähdään pinnan alta tulevat heijastukset. Mental ray ei siis missään vaiheessa laske todellista sirontaa pinnan sisällä, vaan pintamateriaali muodostetaan kerrosten valokarttojen perusteella. (Livny 2007, 656-657.)

Fast Material on tarkoitettu yleiskäyttöön, mutta ihon luontiin on myös omat materiaalityypinsä, jotka iholle erityisiä ominaisuuksia lukuun ottamatta eivät eroa mitenkään yleiskäyttöisestä vastineestaan. Fast Skin Material matkii paremmin iholle tyypillistä kiiltoa ja tarjoaa yhden ylimääräisen kerroksen simuloidakseen ihon kerrosrakennetta. Yhden front surfacen sijaan objektin edessä olevan valon huomioi kaksi kerrosta, epidermal layer ja subdermal layer, jotka toimivat orvasketenä ja verinahkana. Esimerkiksi vaaleaihoisella ihmisellä epidermal layer on tyypillisesti lähellä beigeä ja subdermal layer värikylläisempi oranssi. Fast Skin Material+Displacement eroaa tästä vain mahdollisuudella pinnan muodon muokkaamiseen. (Livny 2007, 664.)

4.3.3 SSS Physical Material

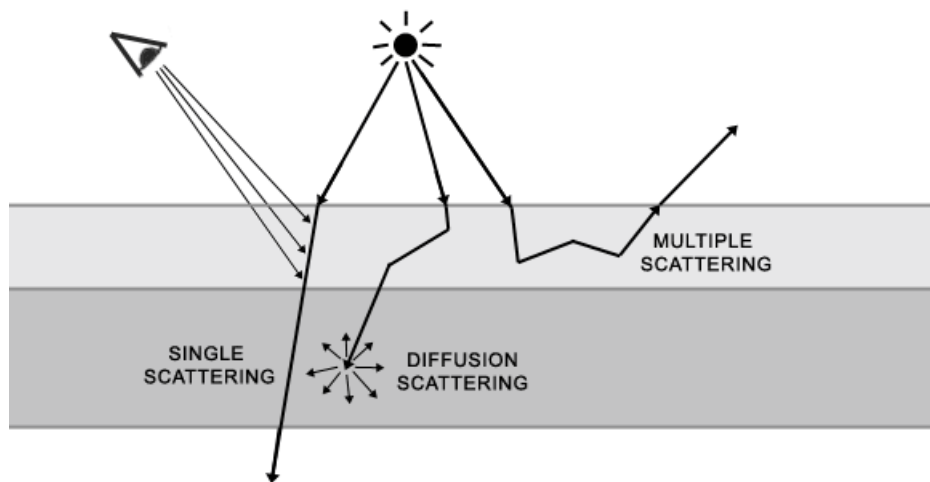
Physical Material on tarkoin pinnanalaisen sironnan mahdollistava materiaalityyppi mahdollisimman realistiseen tulokseen pyrkiessä, mutta sitä suositellaan käytettäväksi vain silloin, kun tarvitaan sen syvällä pinnan sisällä tapahtuvan sironnan ominaisuuksia. Sen laskenta ja asetukset pohjautuvat fysikaalisiin ilmiöihin, jotka eivät ole useimmille kovin helposti ymmärrettävissä. On tiedettävä tarkasti, kuinka sironta tapahtuu kunkin aineen sisällä, eivätkä sopivat asetukset ole yhtä helposti arvioitavissa kuin Fast Materialin tapauksessa. Sirontaominaisuuksista on kuitenkin saatavissa empiirisesti tutkittua tietoa, jota voidaan hyödyntää materiaalia luotaessa, koska shaderin asetuksissa käytetään samoja reaali maailman arvoja. (Livny 2007, 635.)

Laskenta suoritetaan pinnan alla kulkevien fotoneiden perusteella, joten renderöitäessä on käytettävä jotain fotoneita tuottavaa tekniikkaa eli Global illuminationia tai Causticsia. Fotoneiden suurempi määrä vaikuttaa parantavasti sironnan simuloinnin laatuun, mutta samalla se myös kasvattaa renderöintiäikää (Kuvio 11). Siksi SSS Physical Materialia käyttävää objektia valaisevan valonlähteen on hyvä olla objektiin kohdistettu rajallista aluetta valaiseva kohdevalo, jotta kaikkialle ympäristöön ei turhaan lähetettäisi valtavaa määrää fotoneita, kuten kävisi kolmiulotteista pistevaloa käytettäessä. Laskennassa käytettävän valon tai valot voi valita materiaalikohteisesti. (Los Angeles mental ray User Group 2006.)



Kuvio 11. Oikeanpuoleisessa rypälenipussa fotoneita käytetty kymmenkertainen määrä vasemmanpuoleiseen verrattuna tasaisemman jäljen saavuttamiseksi.

Laskenta koostuu kolmesta osasta, joista jokainen simuloi erilaista valon kulkua objektin sisällä (Kuvio 12). Niiden painoarvot vaihtelevat riippuen aineen ominaisuuksista. Single scattering -approksimaatiossa valo muuttaa suuntaansa vain kerran, mikä tapahtuu silloin kun se osuu pintaan. Muuten se kulkee suoraa reittiä, eli tekniikka toimii siltä osin kuin tavallinen taittumisen säteen tunkeutuessa syvemmälle aineen sisään. Säte kulkee objektin läpi, joten single scattering ottaa huomioon objektin takana olevan valon, ja sitä painotetaan vahvemmin materiaaleissa, joissa läpikuultavuus on selkeämmin havaittavissa. Single scattering ei käytä fotoneita, mutta kaksi muuta laskentatapaa, eli multiple scattering ja diffusion approximation, hyödyntävät niitä materiaalin sisällä tapahtuvan sironnan laskennassa. Fotonit kimpoilevat materiaalin sisällä kunnes ne ovat absorboituneet kokonaan, poistuneet objektista takaisin ympäristöön tai tunkeutuneet maksimisyvyyteen, joka on määriteltävissä materiaalin ominaisuuksissa. (Livny 2007, 685-687.)



Kuvio 12. Säteiden kulku laskentatavoissa.

Materiaalin luonteen kannalta tärkeimmistä asetuksista Index of refraction on materiaalin taitekerroin, Absorption coefficient vaikuttaa absorptioon voimakkuuteen, ja Scattering coefficient määrittää siroamistiheyden. Pienemmillä kerroinarvoilla valon energia siis säilyy pidempään sen kulkiessa materiaalissa, ja se siroutuu harvemmin, kun taas korkeammilla arvoilla energia heikkenee nopeammin ja siroaminen on tiheämpää. Käytännössä arvot vaikuttavat esimerkiksi objektin läpikuultavuuteen ja materiaalin pintavärin voimakkuuteen riippuen siitä, tunkeutuuko valo syvälle vai kulkeeko se lähinnä pinnan läheisyydessä. Arvot määritetään erikseen punaiselle, vihreälle ja siniselle värille tässä järjestyksessä, ja niistä on olemassa tutkittuna tietona niin tarkkoja arvioita, että hankaluudesta johtuen niitä ei kannata yrittää päätellä itse. (Livny 2007, 705-709.)

Taulukko 1: Joidenkin materiaalien sironta-arvoja (Autodesk 3ds Max help 2007).

Materiaali	Scattering coefficient	Absorption coefficient	IOR
Jade	0,657; 0,786; 0,9	0,00053; 0,00123; 0,00213	1,30
Ketsuppi	0,18; 0,07; 0,03	0,061; 0,97; 1,45	1,30
Marmori	2,19; 2,62; 3,00	0,0021; 0,0041; 0,0071	1,55
Rasvaton maito	0,70; 1,22; 1,90	0,0014; 0,0025; 0,0142	1,30
Täysmaito	2,55; 3,21; 3,77	0,0011; 0,0024; 0,014	1,30

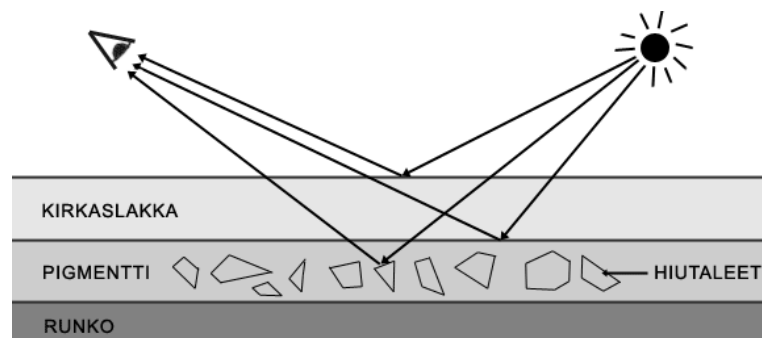
4.4 Car Paint Material

Autojen maalaus on vuosikymmenten aikana kehittynyt muotoon, jossa tyypillisten maalipintojen ominaisuudet poikkeavat suuresti muista esineistä (Kuvio 13). Pinnat koostuvat kerroksista, joista jokainen vaikuttaa omalla tavallaan pinnan ulkonäköön, joka vaihtelee esimerkiksi olosuhteista ja katselukulmasta riippuen. (DetailingWiki 2009.)



Kuvio 13. Sävyerot ja hiutaleet selvästi esillä oikeassa autossa.

Car paintia voidaan toki käyttää minkä tahansa kappaleen materiaalina, vaikka nimensä mukaisesti se on luotu helpottamaan autojen monimutkaisten maalipintojen luontia. Shader ottaa huomioon, kuinka mikäkin kerros vaikuttaa maalin ulkonäköön ja antaa mahdollisuuden säätää monipuolisesti kyseisiä ominaisuuksia (Kuvio 14). Pigmenttikerroksen tärkein ominaisuus on pinnan värisävy ja sen vaihtelu katselukulmasta sekä valon suunnasta riippuen, minkä määrittäminen on yksinkertaisimmillaan perusvärin, valoa kohti olevan värin ja reuna-alueiden värin asettamista. Lisäksi voidaan kuitenkin määrittää, kuinka nämä värit sekoittuvat, eli kuinka pienet vaihtelut pinnan suunnassa alkavat vaikuttaa värisävyn muutokseen. Pigmenttikerrokseen kuuluvat lisäksi metallihiutaleet, jotka heijastavat valoa ja näkyvät siksi sitä voimakkaammin, mitä voimakkaampi valaistus on. Kirkaslakkakerros määrittää pinnan heijastuvuuden ja valonlähteiden spekulariheijastusten voimakkuuden katselukulmasta riippuen BRDF-mallin mukaisesti. Kerrosten päälle voidaan vielä lisätä Dirty Layer eli auton lika-kerros. (Steen 2007, 161-163.)



Kuvio 14. Car Paintin kerrosrakenne ja heijastavat kohdat.

4.5 Arch & Design

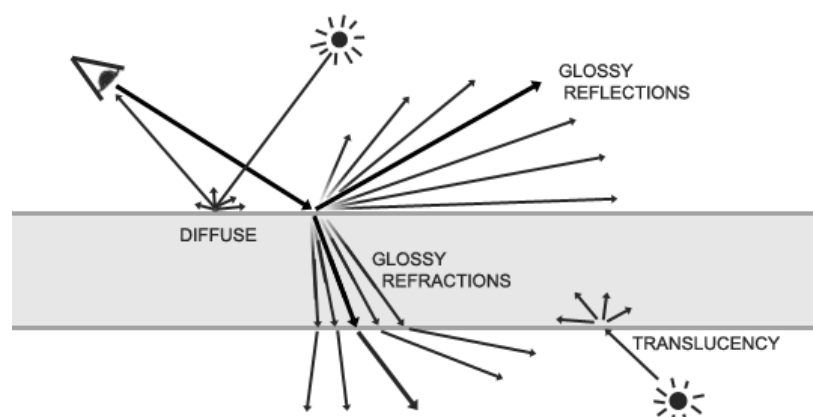
4.5.1 Edistynyt materiaalityyppi

Mental rayn materiaalijärjestelmä koettiin pitkään monimutkaiseksi ja aloituskynnys liian korkeaksi. Tästä johtuen mental images loi mental images architectural -materiaalityypin, joka on sisällöltään valmis kokoelma shade-reita, joiden käyttöä on helppo hallita yhdellä selkeällä käyttöliittymällä. Tämä materiaali on sisällytetty 3ds Maxiin vuonna 2006 ilmestyneestä ohjelman yhdeksännestä versiosta alkaen esiintyen nimellä Arch & Design,

ja onkin saanut kiitosta helppokäyttöisyydestään. Samalla se on mahdollisuuksiltaan paljon monipuolisempi ja renderöintiajaltaan nopeampi kuin esimerkiksi vastaavaan tarkoitukseen soveltuvat 3ds Maxin omat Architectural, Raytrace tai DGS -materiaalit, joten sen käyttöä pidetään erittäin suositeltavana. Se käyttää korkealaatuisia varjostusmalleja ja antaa mahdollisuuden hallita asetuksia, joista on hyötyä fotorealistisessa arkkitehtuuri-renderöinnissä. Alkuun pääsyn helpottamiseksi se sisältää erilaisia asetuksiltaan valmiiksi määriteltyjä mallipohjia lähinnä tuote- ja arkkitehtuuri-suunnittelun käyttöön materiaaleista kuten muovi, metallit, puu ja lasi.

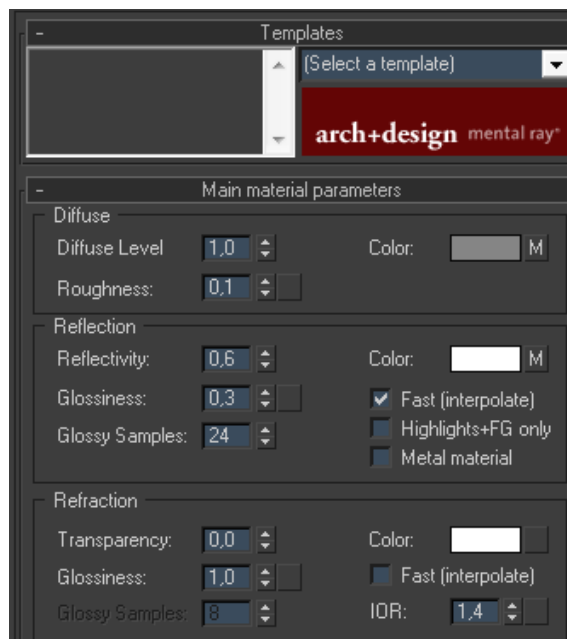
4.5.2 Perusominaisuudet

Arch & Design -materiaalin ominaisuuksia voidaan säätää erittäin monipuolisesti, mutta perusasetukset koostuvat melko yksinkertaisesta pinnan värin (diffuse), heijastus- (reflection) ja läpinäkyvyysominaisuuksien (refraction) määrittelystä (Kuvio 15). Jo näiden asetusten avulla pystytään luomaan tunnistettavan näköisiksi tai jopa realistisiksi lähes kaikenlaisia Arch & Designille sopivia materiaaleja puusta muoveihin ja metalleihin. Käytettävissä on myös lista, josta voi valita tyypillisimpiä arkkitehti- ja tuotesuunnittelun pintamateriaaleja. Niistä on tallennettuna kullekin materiaalille tyypilliset asetukset, jolloin esimerkiksi valitsemalla jonkin lasimateriaalin ohjelma asettaa materiaaliin valmiiksi lasille ominaiset arvot, joiden avulla voidaan päästä jo näyttävään jälkeeseen. Useista materiaalityypin eduista hyödytään kuitenkin vasta kun osataan käyttää hyväksi materiaalin optimointia, efektejä ja muita lisäasetuksia.



Kuvio 15. Valonsäteiden käyttäytyminen Arch & Design -materiaalissa heijastusten ja taittumisen ollessa sumeita.

Arch & Design -materiaalin eri perusominaisuuksien asetuksille on yhteistä asteikolla nollasta yhteen määritettävä ilmiön voimakkuuden arvo (Kuvio 16). Diffuse, reflection ja refraction -komponenteilla tämä toimii kerroinarvona, ja voimakkuus on sen tulo samalla asteikolla määritettävän väriarvon vaaleuden kanssa. Eli esimerkiksi heijastuksesta tulee täysin identtinen, jos asettaa 0,25:n kertoimella väriksi arvoa 1,00 vastaavan valkoisen tai 0,50:n kertoimella väriksi arvoa 0,50 vastaavan keskiharmaan sävyn, koska kummassakin tapauksessa tulo on 0,25, eli heijastuksen voimakkuus on 25 prosenttia. Yleensä ominaisuuden voimakkuus säädetään kuitenkin kerroinarvolla, ja väriarvoa käytetään vain värisävyn muokkaamiseen. Väriasteikko on siis täysin lineaarinen toisin kuin RGB-arvoille yleisempi asteikko 0-255, joka on suunniteltu näyttämään lineaariselta ihmisen epälineaarisesti näkevälle silmälle. Sen tapauksessa väriarvo 200 ei ole kaksi kertaa niin kirkas kuin 100. (Mental images 2007.)



Kuvio 16. Arch & Designin perusominaisuudet materiaaleditorissa.

Materiaalin perusväri eli väri hyvässä valkoisessa valossa asetetaan diffuse-väriä säätämällä tai asettamalla sille joku map eli shader tai tekstuuri, kuten esimerkiksi bittikarttakuva. Sen sijaan Oren-nayar-shaderin mukaisesti toimiva roughness-arvo on edistyneempi ominaisuus, jolla saadaan materiaaliin karkeutta, mikä aiheuttaa pinnan jauhomaisuuden tai mattapintaisuuden. (Steen 2007, 146.)

Heijastusominaisuuksien säätö toimii vastaavalla tavalla, mutta koska heijastuksen voimakkuus voidaan asettaa kerroinarvolla, väriarvon säätö on yleensä tarpeellista vain, jos kyseisen materiaalin heijastuksiin halutaan jotain värisävyä. Metallien heijastukset tyypillisesti värittyvät niiden pintaväriin mukaisesti, mikä on helpoiten havaittavissa värikkäämmissä metalleissa kuten kupari ja kulta. Sen sijaan tekstuurin asettaminen reflection color -kohtaan on usein tarpeellista, koska sillä voidaan määrittää kuinka heijastuksien voimakkuus vaihtelee pinnan eri kohdissa esimerkiksi aineissa olevien vaihteluiden vuoksi. Heijastuksien tarkkuus määritetään glossiness-arvolla, kun heijastuksista halutaan tehdä karkeammille pinnoille tyypillisesti sumeampia. Tämä voi hidastaa renderöintiä huomattavasti, koska säteenseurannassa yhden sijaan pitää lähettää useita säteitä, mutta näyttöiden eli säteiden määrän optimointi antaa mahdollisuuden ajan säästöön. Näyttöiden määrän heikentäminen liikaa aiheuttaa tosin rumaa kohinaa. Anisotrooppisuuteen voidaan vaikuttaa säätämällä sen voimakkuutta ja kulmaa.

Läpinäkyvyys- ja taittumisominaisuudet säädetään refraction-asetuksista, joissa suurempi arvo tarkoittaa läpinäkyvyyden kasvamista. Myös läpinäkyvyys voi olla sumentunutta, ja se määritetään heijastusten tavoin glossiness-arvolla. Taittuminen voidaan määritellä yksinkertaisesti syöttämällä taitekerroin IOR eli Index of Reflection -kenttään. Vain valoa läpi päästävän läpikuultavuuden voimakkuutta eli osuutta läpinäkyvyydestä on mahdollista säätää translucency-arvon asteikolla nollasta yhteen.

4.5.3 Fysikaalinen tarkkuus

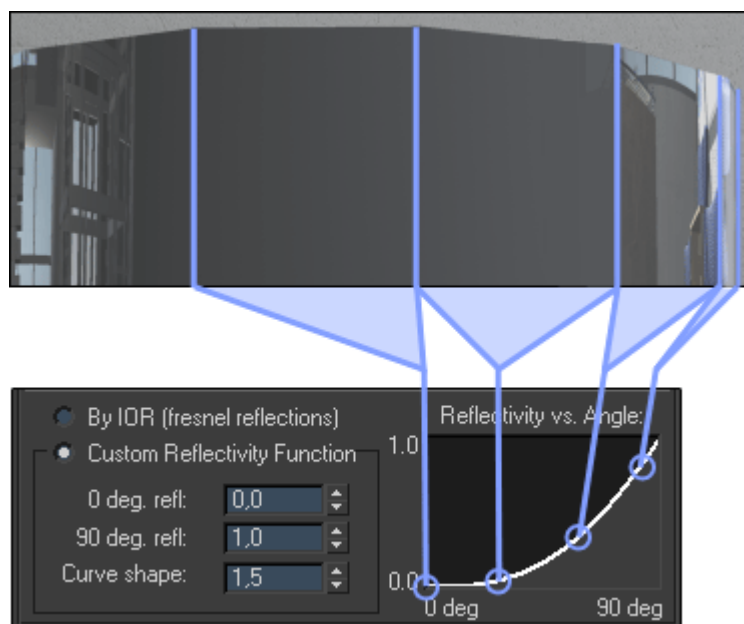
Arch & Design noudattaa energian säilymislakia varmistaen, että diffuse + reflection + refraction ≤ 1 . Tämä tarkoittaa, että energiaa ei synny tyhjästä, vaan vastaanotettu valo jakautuu oikein diffusen, reflectionin ja refractionin välillä. Käyttäjän ei siis tarvitse huolehtia tarkkojen arvojen määrittelemisestä, vaan ohjelma laskee oikean suhteen syötettyjen arvojen perusteella. (Mental images 2007.)

Käytännössä laskutoimitus toimii siten, että lisättäessä heijastuvuutta pintaväriin näkyminen ja läpinäkyvyys vähenevät, kun taas läpinäkyvyyttä lisättäessä luonnollisesti pintaväriin näkyminen heikentyy. Tämä on helppo

ymmärtää siten, että täysin heijastavalla tai läpinäkyvällä kappaleella ei ole pinnan väriä, koska esimerkiksi peilin pinnalla näkyy pinnan värin sijaan vain heijastus ympäristöstä ja puhtaan tasaisen lasinlevyn pintaa ei näe, vaan ainoastaan näkee sen läpi ja pinnalla olevat heijastukset. Reaalimaailmassa mikään pinta ei kuitenkaan ole täydellisen heijastuva tai läpinäkyvä.

4.5.4 BRDF-heijastukset

BRDF-ominaisuus Arch & Designissa tarkoittaa BRDF-mallin mukaisia heijastuksia, joissa heijastuvuus riippuu pinnan normaalin ja kameran välisestä kulmasta, eli heijastukset voimistuvat mitä enemmän pinnan suuntaisesti katsotaan. Kyseessä on reaalimaailman ilmiö, jota esiintyy lähes kaikissa materiaaleissa. Sen vaikutus vaihtelee materiaalin luonteesta riippuen runsaastikin. Esimerkiksi monilla metalleilla kulmasta riippuva ero on pieni heijastuvuuden ollessa runsasta jo hyvin pienillä eroilla kulmassa. Heijastuserojen arviointi reaalimaailman kappaleista on helpointa kappaletta kääntelemällä. Kovin tarkkojen arvojen päättely on erittäin hankalaa, mutta suurpiirteinen arviointi onnistuu melko helposti, ja arvot voi päätellä ilman erityisiä laskelmia helposti ymmärrettävästä kuvaajasta johtuen (Kuvio 17). Manuaalisesti syötettyjen arvojen sijaan voidaan vaihtoehtoisesti käyttää taitekerrointa, jonka perusteella luodaan fresnel-heijastukset.



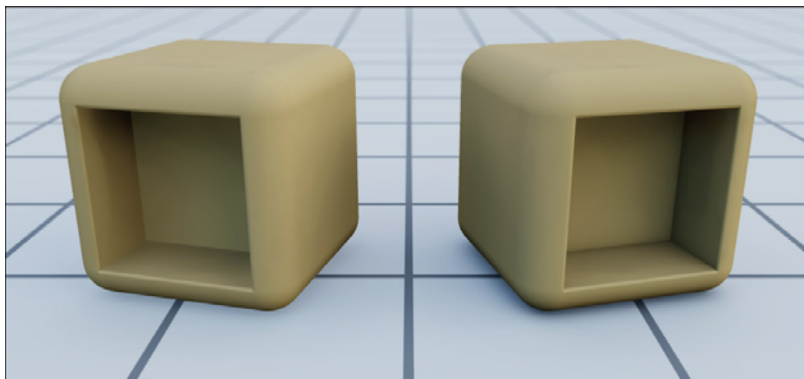
Kuvio 17. Heijastuserot ja voimakkuuksien sijainti kuvaajassa.

BRDF-ominaisuutta käytettäessä on syytä kiinnittää huomiota objektien aseteltuun ja kameran sijoitteluun. Tämä voi vaikuttaa merkittävästi siihen kuinka hyvin näyttävät heijastukset tulevat esiin renderöidyssä kuvassa. Heijastuksia on helppo tuoda paremmin esiin kasvattamalla kameran ja pinnan normaalin välistä kulmaa.

4.5.5 Ambient occlusion

Ambient occlusion on tapa luoda kuvaan vaikutelma siitä, että lähekkäin olevien pintojen väliin pääsee vähemmän valoa. Sillä ei itsessään ole varsinaisesti tekemistä materiaalien kanssa, mutta Arch & Design mahdollistaa sen renderöinnin suoraan kyseistä materiaalityyppiä käyttäviin objekteihin sen sijaan, että se pitäisi välttämättä lisätä kuvaan jälkikäsitteilyssä.

Ambient occlusion ei ole fyysikaalisesti tarkka, eikä se riitä korvaamaan realistista epäsuoraa valaistusta vähänkään vaativammassa tapauksissa, mutta siitä on nopeutensa ansiosta hyötyä muiden tekniikoiden kanssa käytettynä. Final gatherin ja Global illuminationin tarkkuudet eivät kohtuullisen renderöintiajan mahdollistavilla asetuksilla usein riitä tarkkojen yksityiskohtien valoisuuden laskemiseen, jolloin ambient occlusion auttaa ongelmassa. Usein sitä käytetään kahteen kertaan siten, että epäsuoran valaistuksen suurempien varjokohtien tehostajana käytetään jälkikäsitteilyssä lisättävää ambient occlusionia ja erityisen tarkat yksityiskohdat tummenneetaan tällä Arch & Designin ominaisuudella. Esimerkiksi tasaisella pinnalla olevat kappaleet näyttävät monesti leijuvan pinnan päällä, mutta ambient occlusion luo kappaleen ja tason lähelle tumman alueen eli kontaktivarjon, joka korjaa ongelman (Kuvio 18).

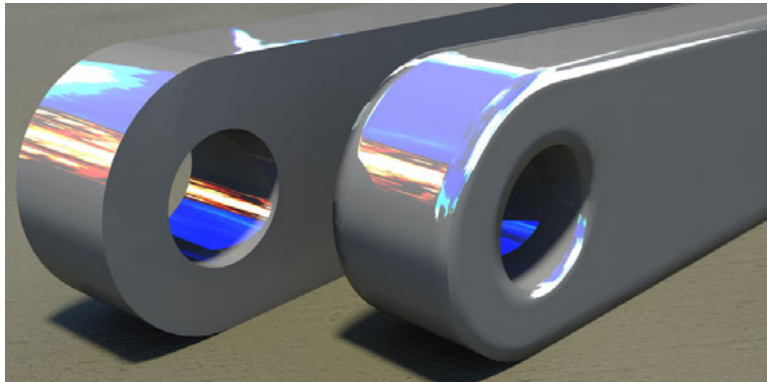


Kuvio 18. Vasemmalla kappale ilman ambient occlusionia ja oikealla sen kanssa.

Ohjelma laskee Ambient occlusionin lähettämällä pinnalta säteitä tiettyyn etäisyyteen asti. Säteen osuessaan toiseen pintaan sen lähettänyt piste tummenee, ja jos se ei matkallaan kohtaa pintaa, piste vaalenee. Arch & Design tarjoaa yksinkertaiset tavat määrittää ambient occlusionin asetuksia. Käyttäjä voi määrittää kuinka pitkän matkan säde kulkee ja kuinka paljon säteitä lähetetään. Lyhyempi pituus nopeuttaa renderöintiä ja antaa suurempikontrastisen kuvan. Säteiden määrän kasvattaminen hidastaa renderöintiä, mutta antaa parempilaatuisen tuloksen vähentämällä kohinaa.

4.5.6 Round corners

Round corners on toinen erikoisefekti, joka ei ole tavanomainen materiaalin ominaisuus. Sitä käytetään terävien kulmien pyöristämiseen vaikuttamatta objektin geometriaan (Kuvio 19). Se siis toimii kuten bump map luoden renderöintivaiheessa efektin, joka näyttää kappaleen muodon muutokselta. Reaalimaailmassa useimmat kulmat ovat ainakin jossain määrin pyöristyneitä, ja niiden korostama heijastus voi olla tärkeä osa kappaleen luonnetta.



Kuvio 19. Geometrialtaan samanlaiset kappaleet, joista oikealla olevan materiaalis- sa käytetty round corners -pyöristystä.

Kulmat voi pyöristää käyttämällä esimerkiksi chamfer-työkalua, mutta se lisää turhaan objektin polygonien määrää. Kaikissa tapauksissa Round cornersia ei kuitenkaan voi käyttää ongelmitta, vaan se on tarkoitettu lähinnä suorille reunoille, jotka eivät ole erityisen merkittävässä roolissa kuvassa.

4.5.7 Optimointimahdollisuudet

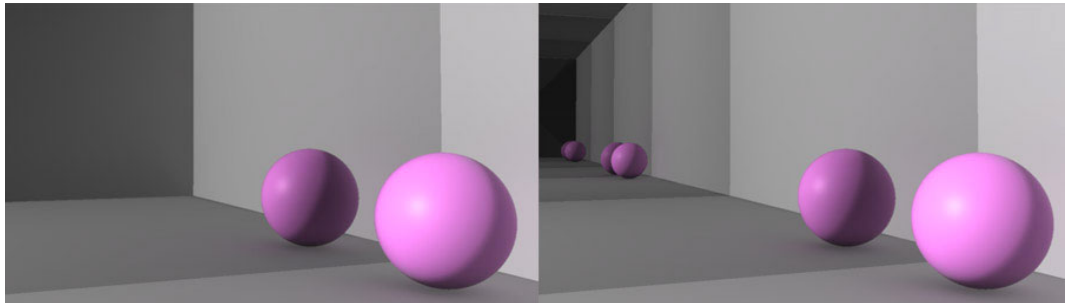
Arch & Designilla on mahdollista luoda yksityiskohtaisesti monenlaisia ilmiöitä, jotka kuitenkin säteenseurannasta johtuen hidastavat renderöintiä merkittävästi, joten materiaalin optimointi voi olla yhtä tärkeää kuin geometrian ja renderöintiasetustenkin. Optimointiin tarjotaankin erilaisia mahdollisuuksia eniten hidastusta aiheuttavien ominaisuuksien kohdalla ilman, että lopputulos heikkenee juurikaan. Optimointi ei yleensä auta tekemään renderöinnistä suhteellisesti paljon nopeampaa, mutta monimutkaisempia malleja tai animaatioita renderöidessä aikaa voidaan säästää merkittävästi.

Interpolointi on sekä heijastus- että läpinäkyvyysasetuksilla käytössä oleva tapa lyhentää sumeiden heijastusten renderöintiä aikaa tarkkuutta karsimalla. Melko tarkoilta heijastuksille tämä aiheuttaa liiallisen sumentumisen, mutta tätä epätarkkuutta ei kuitenkaan huomaa silloin kun heijastuksista on haluttu muutenkin hyvin sumeita matalaa glossiness-arvoa käyttämällä. Toinen keino sumeiden heijastusten optimointiin on samples-arvon jättäminen nollassa, jolloin hidasta säteenseurannalla luotujen heijastusten summasta ei lasketa, mutta glossiness-arvo määrittää kuitenkin highlight-alueiden sumeuden. (Autodesk 2007.)

Highlights+FG only aiheuttaa sen, että materiaali ei näytä renderöintiä hidastavia säteenseurannalla laskettuja heijastuksia ympäristöstään vaan heijastaa ainoastaan valonlähteet ja muut Final gather -tekniikalla havaitut kirkkaammat kohdat. Tällainen valonlähteiden heijastaminen on tyypillistä yksinkertaisemmille shadereille, jotka eivät mahdollista realistista heijastumista mutta yrittävät simuloida sen yksinkertaistetusti. Tämän ominaisuuden käyttö ei tietenkään sovi materiaaleille, joiden pitää heijastaa ympäristöään, mutta kun aidot heijastukset eivät ole tärkeitä, se toimii hyvin olematta paljonkaan hitaampi heijastamattomaan materiaaliin verrattuna. (Autodesk 2007.)

Heijastuksien laskenta-ajassa voi säästää myös vähentämällä heijastuvien esineiden määrää. Maksimietäisyyden määrittämällä renderöidessä ei turhaan etsitä ja piirretä kuvaan epäolennaisia kaukana olevia esineitä, jos sellaiseen ei ole tarvetta. Tästä on siis hyötyä etenkin monimutkaisemmissa ja laajemmissa malleissa. Objektiin heijastuksen voimakkuus vähenee asteittain sitä enemmän, mitä kauempana heijastavasta pinnasta se on, ja

määritetyn etäisyyden takana olevia objekteja ei enää oteta huomioon lainkaan. Vastaava asetus on myös läpinäkyvyydelle, mutta sen tarkoituksena on lähinnä realistinen lasin värjääminen, jossa lasi näkyy sitä enemmän valitun värin värisenä, mitä kauempana lasin pinnasta kyseinen kohta on. Heijastettavien objektien määrää voi myös karsia asettamalla raja-arvon, jolloin objektia ei heijasteta, jos heijastuksen vaikutus renderöitävän pikselin ulkonäköön on raja-arvoa vastaavaa prosenttiosuutta vähäisempi. Myös heijastus- ja taittumiskertojen määrän vähentäminen onnistuu lisäasetuksista materiaalikohtaisesti, kun syötetään renderöintiasetusten globaalia arvoa pienempi luku (Kuvio 20). (Steen 2007, 150-151.)



Kuvio 20. Vasemmassa esimerkissä kameran edessä ja takana olevien vastakkaisen peilin välissä olevan pallon heijastus näkyy vain kerran, koska peilimateriaalin heijastuskertojen määrä on yksi. Oikealla on käytetty viittä heijastuskertaa.

5 CASE: REALISTISESTI KÄYTTÄYTYVIEN PINTOJEN LUONTI MENTAL RAYN AVULLA

5.1 Lähtökohdat

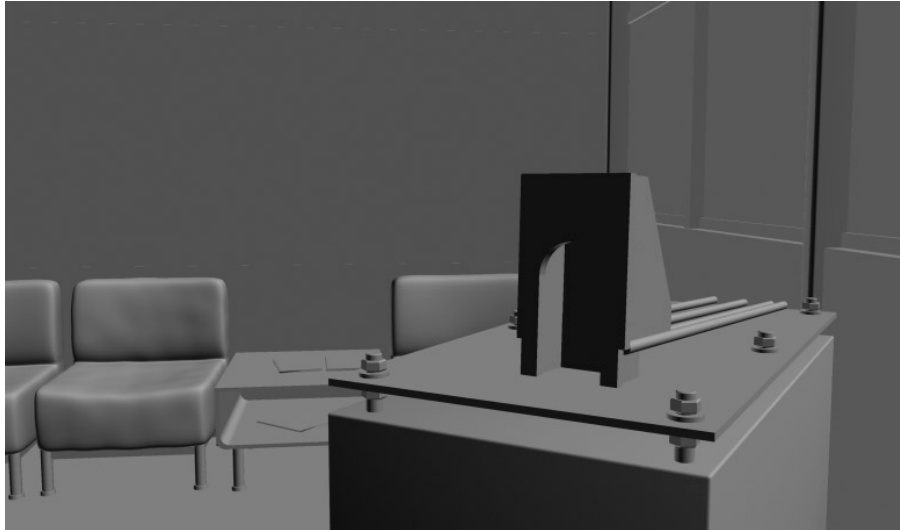
Opinnäytetyön käytännön osassa pyritään tuomaan esille erilaisille materiaaleille tyypillisiä realistisia piirteitä käyttämällä hyväksi mental rayn tarjoamia mahdollisuuksia. Useimmat teoriaosassa esiteltyt pintojen ominaisuudet esiintyvät esimerkkitapauksissa, joten tutkitaan ja selvitetään millä keinoin nämä ominaisuudet toteutetaan mental ray -materiaaleissa käytännössä. Kyseessä on arkkitehtuurimalli, joten käytetään hyväksi Arch & Design -materiaalityyppiä. Vertailukohtaan saamiseksi tutkitaan vastaavien kuvien luomista 3ds Maxin vakiomateriaaleihin kuuluvaa yksinkertaisempaa Architecturalia käyttämällä, ja verrataan lopputuloksia keskenään.

Arch & Design -materiaaleilla luotu kuva muokataan lopulta valmiiksi asti, mikä tarkoittaa käytännössä lähes aina pakollista jälkikäsittelyä. Vertailuvaiheessa taas ei jälkikäsittelyä kuitenkaan käytetä, koska tarkoituksena on verrata nimenomaan materiaaleja, eikä niiden teennäisellä parantelemisella jälkikäteen ole tekemistä itse materiaalien kanssa.

5.2 Valmisteluvaiheet

5.2.1 Malli

3ds Maxilla luotu malli esittää toimistorakennuksen valoisa aulatilaa, jossa on oleskelumahdollisuudet, ja lisäksi esillä on yrityksen tuotteita (Kuvio 21). Kuvassa on pääosassa näyttelypöytä, jossa on kannatinpulttien varassa lasitaso. Tasolla on esillä talon rakenteissa käytettävä palkkikenkä. Vasemmalla taustalla näkyy seinällä oleva juliste, joka heijastuu lasipinnalle. Oikealla on ikkuna, josta näkee ulos rakennuksen takana olevalle pelolalle ja metsään. Taustalla näkyy pehmustettuja tuoleja, joiden välissä on puinen pöytä, jonka päällä on lehtiä. Alareunassa näkyy hyvin myös laatoitettua lattiaa.



Kuvio 21. Mallin objektit ilman luotua valaistusta ja materiaaleja.

5.2.2 Valaistus

Valaistuksessa käytettiin sisätilojen lamppuja ja ikkunoista tulevaa luonnonvaloa (Kuvio 22). Niiden kohdalla päädyttiin fotometriisiin valotyyppeihin, jotta valaistus olisi realistisempi ja sopisi siten ihanteellisesti Arch & Designille. Sisätilojen valonlähteinä käytettiin Free Area -tyyppisiä aluevaloja, joiden heittovarjoista tulee realistisen pehmeitä. Valon kanssa käytettiin IES-valoprofiilitiedostoa, joka sisältää lampunvalmistajan tallentamat tiedot valon voimakkuudesta ja siitä, kuinka valo leviää ympäristöön vastaavassa oikeassa lampussa.

Luonnonvalo luotiin lisäämällä malliin auringonvalon ja taivaanvalon yhdistävä Daylight system, jonka komponentteina käytettiin mental rayn omia mr Sun ja mr Sky -valo-objekteja. Taivaan sinertävä valo on oikeasti ilmakehässä sironnutta auringonvaloa, mutta mallinnusohjelmissa se mielletään selkeyden vuoksi erilliseksi valoksi. Ikkunoiden kohdalla käytettiin lisäksi mr Sky Portal -objekteja, jotka mahdollistavat taivaan valon kokoamisen laadukkaampana alueille, joista se oikeasti huoneen sisälle pääsee. Näin muualla mallissa ei turhaan kulje miljoonia fotoneita renderöintiä hidastamassa.



Kuvio 22. Malliin lisätty suoran valon lähteet.

5.2.3 Renderöintiasetukset

Sekä mental rayn materiaaleilla että 3ds Maxin vakiomateriaaleilla luotavat vertailukuvat renderöitiin mental raylla samoilla renderöintiasetuksilla, koska mental ray osaa hyödyntää myös 3ds Maxin omat Architectural-materiaalit. Näin materiaalien vertailu onnistuu tasapuolisesti kun kummassakin tapauksessa muut tulokseen vaikuttavat tekijät ovat identtiset.

Koska pyritään realistisempaan lopputulokseen, käytettiin valonlähteiden jatkeena epäsuoraa valaistusta (Kuvio 23). Paras tulos saadaan yhdistämällä Final gather ja Global illumination, joissa käytettiin aluksi maltillisia nopeamman renderöintiajan mahdollistavia asetuksia. Vasta kun kappaleiden materiaalit oli saatu valmiiksi, renderöitiin lopulliset kuvat paremmilla asetuksilla. Ajan säästämiseksi materiaaleja luodessa käytettiin myös heikompaa renderöintilaatua, ja kuvat renderöitiin pienempikokoisina tai niistä renderöitiin vain tarvittava osa.



Kuvio 23. Suoran ja epäsuoran valon yhteisvaikutuksen havainnollistava renderöinti, kun mallin kaikilla objekteilla sama keskiharmaan värinen perusmateriaali.

5.3 Materiaalien luonti

5.3.1 Yhteiset työskentelytavat

Arch & Design -materiaalilla luotiin vain kuvassa suoraan näkyvät materiaalit, koska ympäristöstä heijastuvien kappaleiden ominaisuuksilla on erittäin vähän merkitystä ja tiedetään, että kuvia ei tarvitse renderöidä rakennuksen muista osista. 3ds Maxin standardimateriaali on nimittäin hieman nopeammin renderöitävissä kuin mahdollisimman yksinkertaistettu Arch & Design -materiaali, joten tarpeettomista edistyksellisistä ominaisuuksista olisi oikeastaan vain haittaa. Heijastusten voimakkuuden vaihtelut pinnan ja kuvakulman suhteesta riippuen otettiin jokaisen Arch & Design -materiaalin kohdalla huomioon automaattisesti käytössä olevan BRDF-asetuksen avulla.

Ambient Occlusion ja Round Corners -efektejä käytettiin lähes kaikissa Arch & Designilla luoduissa materiaaleissa yksityiskohtien parantamiseksi. Materiaalin optimoinnissa hyödynnettiin heijastuskertojen määrän rajoittamista, koska useimmiten yksi tai kaksi heijastusta riittää. Muun optimoinnin tarve harkittiin materiaalienkohtaisesti.

5.3.2 Metallit

Tilassa on heijastusominaisuuksiltaan monenlaisia metalleja, kuten tuolien jalat, näyttelypöydän lasin kannatinpultit ja näyttelypöydällä oleva kahdesta eri metallista koostuva palkkikenkä. Vahvasti heijastavina niiden kohdalla tulee kiinnittää huomiota erityisesti heijastusominaisuuksiin.

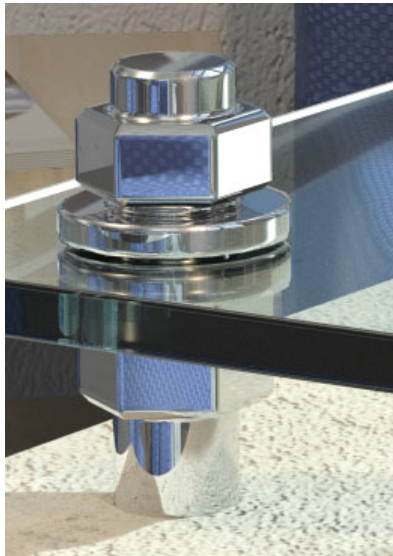
Tärkein metalliesine on heti etualalla näkyvä palkkikenkä, jossa päässä olevan osan ja harjaterästankojen asetukset voitiin luoda aika lähelle toisiinsa (Kuvio 24). Kummassakin on vahvahkot, mutta sumeat heijastukset pinnan karkeudesta johtuen. Ympäristö näkyy tangoissa heikosti, joten aikaa voitiin säästää sumentamalla ainoastaan valonlähteiden heijastukset asettamalla näytteiden määräksi arvon nolla. Halutun ulkonäön saamiseksi tarvittiin tekstuureja reflection ja bump map -komponentteihin pintaa pitkin vaihtelevan heijastuvuuden ja töyssyisyyden asettamiseksi. Harjaterästangolla tämä on erityisen tärkeää, koska se on geometrialtaan lieriö, jonka tarkempi muoto luodaan pelkästään bump mapilla. Päätyosa näyttää taysaisena ja harmaana helposti tylsältä, joten luotiin vielä heijastava pinnoite metallin päälle, aivan kuten tehdään näytteillä oleville osille niiden ulkonäön parantamiseksi oikeastikin. Tämä onnistuu 3ds Maxin omalla Blend-materiaalilla, jolla yhdistettiin metallimateriaali ja lasin kaltainen heijastava läpinäkyvä materiaali.



Kuvio 24. Palkkikenkä.

Näyttelypöydän kannatinpulteissa näkyy selkeimmin ympäristön heijastukset, ja ne ovat varsin tarkkoja (Kuvio 25). Renderöintiäikaa kasvattavaa pientä sumeutta ei luotu, koska sitä ei renderöidyssä kuvassa huomattaisi

kappaleen pienen koon vuoksi ja tarvittaessa se olisi voitu luoda jälkikäsitelyllä.

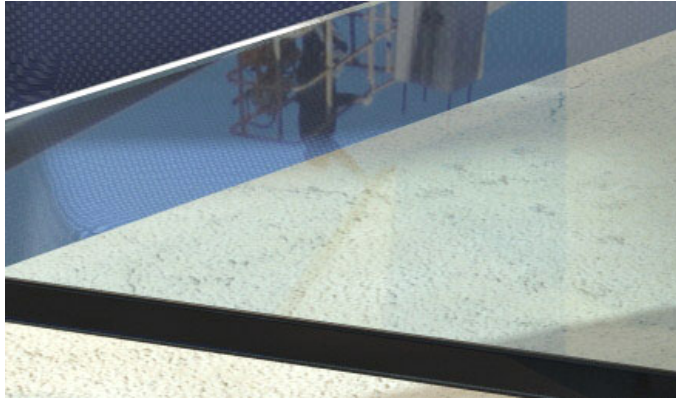


Kuvio 25. Kannatinpultti.

Tuolien ja puupöydän jalat sekä ikkunoiden karmit ovat ominaisuuksiltaan keskenään lähes samanlaisia heijastaen kohtalaisesti ja epätarkasti. Heijastusten laadukkuudesta voitiin tinkiä ajan säästämiseksi, joten käytettiin Highlights+FG -asetusta.

5.3.3 Lasit

Lasia on kuvassa ainoastaan näyttelypöydän tasossa ja ikkunassa. Hyvä lähtökohta lasin hienosäätöön saatiin valmiiden esiasetusten listasta löytyvästä Glass (solid geometry) -vaihtoehdosta. Lasin ominaisuuksia ei olisi ollut muutenkaan hankalaa miettiä, koska tiedettiin lasipinnan olevan kohtisuoraan katsottuna täysin läpinäkyvä ja pinnan suuntaisesti katsottuna täysin heijastava, ja näiden vaihtelusuhde saadaan BRDF-käyrään automaattisesti taitekertoimen perusteella. Pientä hienosäätöä tekemällä siitä voitiin saada hieman näyttävämpää erikoislasia, kun muutettiin väritysasetuksia. Tärkeämpää oli kuitenkin hyötyä hyvistä heijastuksista varmistamalla, että taustan juliste heijastuu lasista kameraan (Kuvio 26). Ikkunalaasiin ei mitään muutoksia tarvinnut tehdä, koska sen oli muutenkin tarkoitus olla lähinnä vain läpinäkyvä osa, jotta nähdään ulos ja saadaan tilaan luonnonvaloa.



Kuvio 26. Lasitaso.

5.3.4 Muut pinnat

Tuolin pehmuste on selkeimmin muista poikkeava materiaali mallissa (Kuvio 27). Arch & Design sopii parhaiten koville pinnoille, joten pehmeään ulkonäköön pääseminen on haaste. Pehmeys ei tarkoita automaattisesti heijastuvuuden puuttumista, mutta se on tavallista vähäisempää ja säädetty tarkasti bittikarttakuvalla tekstiilinpinnan mukaiseksi. Vastaavaa bittikarttakuvaa käytettiin myös diffuse ja bump mapeina. Lisäksi tekstiili on hyvin karkeaa, joten diffusen roughness-arvo säädettiin korkeaksi.



Kuvio 27. Tuolin pehmuste.

Betoniseinälle mahdollistaa kiiltävyyden sen maalipinta. Monet muut materiaalit ovat kuitenkin jo hyvin heijastavia, joten materiaalivalikoiman monipuolisuuteen pyrkiessä seinästä oli hyvä tehdä mattapintaisempi etenkin kameraa kohti olevilla pinnoilla. Aitojen heijastusten laskenta ei ollut vähäisestä merkityksestä johtuen tarpeellista, joten tyydyttiin Highlights+FG

only -asetuksen antamaan vaikutelmaan. Ominaisuuksiltaan tylsähköön seinämateriaaliin tuotiin eloa diffusena ja bump mapina käytettävällä betonipintaa kuvaavalla tekstuurilla.

Sileän puupöydän pinta heijastaa kohtalaisesti, mutta BRDF-säätimellä oli asetettava heijastuvuus sellaiseksi vain jyrkissä katselukulmissa, koska kohtisuoraan pintaa katsottuna heijastuksia ei juuri näy. Tässä tapauksessa pöydässä ei olisi näkynyt lähes ollenkaan heijastuksia, joten päädyttiin taas ajan säästöön Highlights+FG:n avulla (Kuvio 28). Puupinnan värityksen, heijastusten ja hyvin lievän kumuruaisuuden määrittelemiseksi käytettiin bittikarttakuvia.



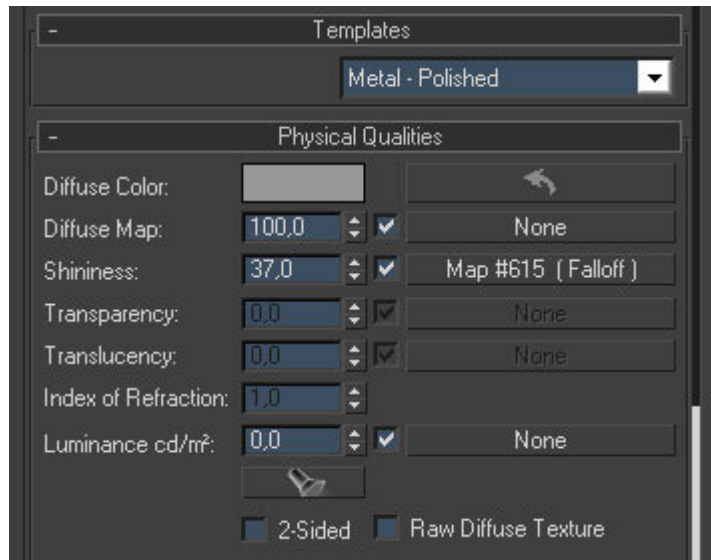
Kuvio 28. Puupöytä.

Taustalla oleva juliste on kiiltävä ja hieman läpikuultava, mutta läpikuultavuus ei ole havaittavissa, koska julisteen taakse ei pääse valoa objektin ollessa seinää vasten ja kiiltävyyttä ei kunnolla huomaa, koska kiiltävyys on voimakasta vasta paljon jyrkemmissä katselukulmissa. Läpikuultavuutta ei renderöintiajan säästämiseksi siis kannattanut ottaa materiaalin asetuksissa huomioon. Kiiltävyys ei renderöintiä juurikaan hidasta kun Highlights+FG only -asetuksella määrää mental rayn luomaan vain valonlähteistä tulevat heijastukset. Vaisummin esille tulevista ominaisuuksista huolimatta juliste pysyy kuitenkin kiinnostavana, koska sen diffuse-tekstuuriksi asetettiin valokuvista koostuva bittikartta.

5.4 Architectural-materiaalin erot työskentelyssä

Architectural on kuin huomattavasti yksinkertaistettu versio Arch & Designista, joten se asettaa monia rajoituksia materiaalin luonnin suhteen. Jot-

kut ilmiöt voidaan kuitenkin luoda hankalammilla keinoilla, jolloin päästää lähes vastaavaan lopputulokseen. Tällöin kyse ei kuitenkaan ole enää niinkään Architectural-materiaalin ominaisuuksien, vaan 3ds Maxin materiaalijärjestelmän venymiskyvyn tarkastelusta. Käytön helpottamiseksi Architecturalissakin on valmiina esiasetuksia useille arkkitehtuurissa tyypillisille materiaaleille (Kuvio 29).



Kuvio 29. Architectural-materiaalin fysikaaliset ominaisuudet käyttöliittymässä.

Suurimmat puutteet ovat heijastuksissa, joiden luonnetta ja riippuvaisuutta katselukulmasta ei voi kunnolla määrittää. Jälkimmäinen asia on kuitenkin aina ennenkin määritetty useimmilla materiaaleilla Falloff mapin avulla, joka luo heijastuvuuden vaihtelun määrittävän liukuväriin pinnan ja kuvakulman suhteen perusteella. Heijastukset lasketaan aina säteenseurannalla, eikä optimointimahdollisuuksia ole.

Lasimateriaaleihin löytyy Arch & Designin tavoin melko hyvä valmis esiasetus. Lasi näytti kuitenkin hieman liian tummalta ja sen säätömahdollisuudet olivat lähes olemattomat, joten värin muokkaaminen realistisesti ei onnistunut.

Yksinkertaisempien mattapintaisempien materiaalien luontiin Architectural tarjoaa usein riittävät perusasetukset, koska siinä voi luonnollisesti säätää esimerkiksi perusväriä ja kuhmuruaisuutta, eikä kiilto-ominaisuuksien yksinkertaisuutta huomaa. Hyvin pitkälti näillä perusasetuksilla useimmat materiaalit lasia ja metalleja lukuun ottamatta luodaankin.

5.5 Arch & Designin ja Architecturalin vertailu

Renderöidyistä kuvista havaitaan, että suurimmat erot tulevat esiin monimutkaisempia ilmiöitä esittävässä materiaaleissa (Kuvio 30 ja 31). Tällaisia ovat etenkin näyttelypöydän lasi ja metallikappaleet, mikä on ongelmallista, koska ne ovat etualalla ja siten tärkeässä roolissa. Lähinnä pintavärisä näyttävät yksinkertaisimpienkin varjostusmallien mahdollistamat materiaalit sen sijaan näyttävät pienissä kuvissa lähes samoilta. Tilanne voisi kuitenkin muuttua, jos kuva renderöitäisiin ja sitä tarkasteltaisiin suurempana, tai jos kameran paikkaa vaihdettaisiin näyttämään nämä kappaleet lähempää tai eri kulmissa. Etenkin Arch & Design -materiaalin mahdollistamat pyöristykset kulmissa ja muut yksityiskohdat voisivat tulla tällöin paremmin esille.

Renderöintiajoissa huomattiin ero Architecturalin hyväksi. Ero kuitenkin johtuu lähes pelkästään metallista ja lasista, joita Architectural ei osaa luoda yhtä realistisesti eli yhtä monimutkaista laskentatapaa käyttämällä. Sen sijaan esimerkiksi yksinkertaisemman betonimateriaalin renderöinti näytti sujuvan tapauksissa lähes yhtä nopeasti.

Architectural pystyy siis yllättävänkin hyviin tuloksiin. Sen käyttö on helppoa, ja vaikka Arch & Designin käyttö ei ole juurikaan vaikeampaa, saattaa ominaisuuksien valtava määrä kauhistuttaa joitakin. Architectural on siis ihan hyvä vaihtoehto aloittelijoille, mutta käyttäjän taitotason ja renderöintijäljen vaatimustason kasvaessa Arch & Design käy koko ajan suositeltavammaksi.



Kuvio 30. Architectural-materiaaleilla luotu kuva.



Kuvio 31. Arch & Design -materiaaleilla luotu kuva.

5.6 Arch & Design -kuvan jälkikäsittely

Vaikka mental ray mahdollistaisi kuinka laadukkaan lopputuloksen, on jälkikäsittely aina tarpeellista. Arch & Designilla luodulle kuvalle tehtiinkin tarvittavia muutoksia jälkikäteen Adobe Photoshop -ohjelmassa. Haluttui-

hin kohtiin on helppo luoda esimerkiksi kiiltoa tai muuttaa värejä ilman, että tarvitsee muuttaa materiaaliasetuksia ja renderöidä kuvaa uudestaan.

Renderöidyssä kuvassa huomattiin joitakin ongelmia, kuten kontrastin ja värikylläisyyden puutteesta johtuva latteus etenkin taka-alalla ja palkkikengän osittain samasta syystä johtuva vaisuus sen alla olevaan lasilevyyn ja kannatinpultteihin verrattuna. Näitä ongelmia voidaan korjata 3ds Maxin ominaisuuksien avulla ja puhtaasti kuvankäsittelyn keinoin.

Ehkä tärkein lopputulosta parantava tekijä oli 3ds Maxilla luotavan ambient occlusion -renderöintitason liittäminen kuvan päälle, jotta saatiin esiin yksityiskohtaisemmat varjot ilman, että tarvitaan renderöintiäikää liikaa kasvattavia korkeita Final gather -asetuksia. Ambient occlusionia käytettiin myös Arch & Design -materiaalien yhteydessä, mutta sen tarkoitus oli etenkin tällä kertaa yleisen varjostuksen sijaan tarkimpien yksityiskohtien löytämisessä. Taso luotiin renderöimällä kuva, jossa kaikissa materiaaleissa oli käytössä Ambient occlusion -shader (Kuvio 32). Näyttelypöydän lasitasoa ei renderöidä läpinäkyvyyden vuoksi, koska Ambient occlusion ei ymmärrä sen läpinäkyvyyttä. Photoshopissa taso sijoitettiin päällimmäiseksi käyttäen multiply-sekoitustilaa.



Kuvio 32. Ambient occlusion -taso.

Realistisuutta tuova syvyysterävyyssefekt eli depth of field lisättiin myös kuvaan vasta jälkikäsittelyvaiheessa renderöimällä harmaasävyinen kuva, jossa kameraa lähimpänä olevat alueet näkyvät vaaleimpana ja kauimpa-

na ovat tummimpina (Kuvio 33). Kun Photoshopissa määritetään mille etäisyydelle eli minkä värisävyn kohdalle kuvitteellinen kamera on tarkennettu, Lens Blur -filteri osaa sumentaa lähempänä ja kauempana olevat kohdat (Kuvio 34).



Kuvio 33. Depth of field –taso.



Kuvio 34. Valmis jälkikäsitelty kuva, jossa tarkennus kohdistettu palkkikenkään.

6 YHTEENVETO

Materiaaleilla on tärkeä rooli lopullisen renderöintijäljen näyttävyydessä siinä missä mallinnetulla geometrialla, valaistuksella ja renderöntikeinoilakin. Aina ei tavoitella fotorealistisuutta, mutta pyrkimyksistä riippumatta materiaaleja luodessa on ymmärrettävä kokonaisuus, eli kuinka nämä muut tekijät vaikuttavat materiaalin ulkonäköön. Monenlaisten pintojen tunnistettavat ominaisuudet, kuten heijastuvuus ja läpinäkyvyys, näyttävät realistisilta, vasta kun niihin vaikuttaa sellainen ympäristö ja valaistus, johon katsoja on reaalimaailmassa tottunut.

Mental ray on tullut suositeltavaksi renderöintimoottoriksi ammattilaisten lisäksi myös aloittelijoille, koska sen oppimiskynnystä on onnistuneesti madallettu. Renderöintiominaisuuksien lisäksi tärkeä syy sen sopivuuteen monentasoisille käyttäjille on etenkin sen tarjoamissa Arch & Design ja SSS -materiaaleissa, joista etenkin Arch & Design on helppo erilaisten pintojen esiasetusten vuoksi, mutta toisaalta monipuolisuutensa vuoksi loistava korkealaatuista lopputulosta tavoitellessa.

Oikeaoppisesti luodut ja laadukkaat materiaalit eivät kuitenkaan synny itsestään. Vaikka aloituskynnys on matala, asettaa materiaalin monipuolisuus erilaisia vaatimuksia sekä yksityiskohtaisten asetusten että optimoinnin kannalta. Tärkeintä optimointi on yleensä renderöintiasetuksissa, mutta joissakin tapauksissa materiaaleja optimoimalla saavutettu säästö renderöintiajassa voi olla huomattava. Mental ray -materiaalien ongelmana on nimittäin monimutkaisesta laskennasta johtuva hidas renderöinti, ja useimmat optimointikeinot vaikuttavat renderöintiä eniten hidastavaan säteenseurantaan. Koska mental rayn materiaaleista on jo tullut sekä monipuolisia että helppokäyttöisiä, on tulevaisuudessa tärkein kehityksen kohde nimenomaan entistä nopeampien laskentatapojen löytäminen.

Materiaalien luonti ei siis tarkoita vain oikeiden asetusten syöttämistä ohjelman käytettäväksi, vaan on ymmärrettävä kaikki materiaaliin vaikuttavat asiat ja materiaalin vaikutus renderöintiin. Mental ray tarjoaa oikeastaan vain mahdollisuuksia, jotka ovat sinänsä erinomaiset, mutta on käyttäjästä kiinni, kuinka hyvin hän ymmärtää kokonaisuuden ja käyttää mahdollisuudet hyväkseen.

LÄHTEET

Painetut lähteet

Birn, J. 2006. Digital Lighting and Rendering. 2. uudistettu painos. USA: New Riders Press.

Driemeyer, T. & Herken, R. 2005. Programming mental ray. 3. uudistettu painos. Itävalta: Springer.

Livny, B. 2007. Mental ray for Maya, 3ds Max, and XSI: A 3D Artist's Guide to Rendering. USA: Sybex.

Matossian, M. 1999. 3D Studio MAX. Jyväskylä: Edita.

Steen, J. 2007. Rendering with mental ray & 3ds Max. USA: Focal Press.

Sähköiset lähteet

Autodesk 2007. Using 3ds Max and mental ray for Architectural Visualization. [Viitattu 19.1.2009] Saatavilla:

http://images.autodesk.com/adsk/files/mental_ray_white_paper.pdf

DetailingWiki 2009. A Brief History of Automotive Detailing. [Viitattu 20.3.2009] Saatavilla:

http://detailingwiki.com/index.php5?title=A_Brief_History_of_Automotive_Detailing

Jensen, H., Marschner, S., Levoy, M. & Hanharan, P. 2001. A Practical Model for Subsurface Light Transport. [Viitattu 20.1.2009] Saatavilla:

<http://www-graphics.stanford.edu/papers/bssrdf/bssrdf.pdf>

Jensen, H. 2008. Bio for Henrik Wann Jensen. [Viitattu 7.2.2009] Saatavilla: <http://graphics.ucsd.edu/~henrik/bio.html>

Los Angeles mental ray User Group 2006. Physical SSS for mental ray.
[Viitattu 2.3.2009] Saatavilla:

<http://www.lamrug.org/resources/physstips.html>

Mental images 2007. Mental ray Architectural and Design Visualization
Shader Library. [Viitattu 13.1.2009] Saatavilla:

http://www.mentalimages.com/fileadmin/user_upload/PDF/arch_and_design.pdf

Mental images 2009. About mental ray. [Viitattu 12.3.2009] Saatavilla:

<http://www.mentalimages.com/products/mental-ray.html>

Wikipedia 2008. Sironta. [Viitattu 25.3.2009] Saatavilla:

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

Wikipedia 2009. Mental ray. [Viitattu 25.3.2009] Saatavilla:

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

Kuvalähteet

Kuvio 1-3: Enqvist, J. 2009.

Kuvio 4: Patton, J. Saatavilla:

http://www.mrmaterials.com/components/com_remository_files/file_image_435/img_435_01.jpg

Kuvio 5-6: Enqvist, J. 2009.

Kuvio 7: Tangient LLC 2009. Saatavilla:

<http://www.duarte.cl/blog/monosblog/caustics.jpg>

Kuvio 8: Enqvist, J. 2009.

Kuvio 9: Modo 2006. Saatavilla: <http://www.kxcad.net/modo/imgs/SSS-candles.png>

Kuvio 10: Enqvist, J. 2009.

Kuvio 11: Waclawiak, D. 2006. Saatavilla:

<http://www.lamrug.org/resources/images/sss/grapes0100.jpg> ja

<http://www.lamrug.org/resources/images/sss/grapes1000.jpg>

Kuvio 12: Enqvist, J. 2009.

Kuvio 13: Chevrolet Impalas. Saatavilla:

<http://www.chevroletimpalas.com/greensboro0215fv.jpg>

Kuvio 14-34: Enqvist, J. 2009.

LIITTEET

CD-levy, jossa renderöidyt kuvat, max-tiedostot, abstraktit rtf-muodossa, lähteinä käytetyt www-sivut tallennettuna ja opinnäytetyö pdf-muodossa.