

Niko Liikka

**Grafiikkaprosessorien käyttö digitaalisen
musiikintuotannon tukena**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

28. huhtikuuta 2023

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Niko Liikka

Yhteystiedot: niko.a.liikka@student.jyu.fi

Ohjaaja: Tuomo Rossi

Työn nimi: Grafiikkaprosessorien käyttö digitaalisen musiikintuotannon tukena

Title in English: Usage of graphics processors to aid digital music production

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 17+0

Tiivistelmä: Tämä kandidaatintutkielma on kirjallisuuskatsaus, jonka tarkoituksena on tarkastella ja arvioida grafiikkaprosessorien käyttömahdollisuuksia osana nykyaikaista digitaalista musiikintuotantoa, sekä koota yhteen aiheeseen liittyviä tieteellisiä julkaisuja.

Tätä tutkimusta varten tarkasteltujen julkaisujen mukaan grafiikkaprosessorin käyttö äänenkäsittelyyn liittyvien prosessien laskennassa voi johtaa laskentanopeuksien moninkertaistumiseen. Tutkimuksen ja artikkelien ulkopuolella konkreettisia esimerkkejä grafiikkaprosessorien käytöstä musiikin tuotannon apuna on kuitenkin vain vähän.

Avainsanat: Musiikintuotanto, Elektroninen musiikki, GPGPU, Kirjallisuuskatsaus

Abstract: This paper is a literature review, the purpose of which is to review and evaluate the possibilities of using graphics processors as part of modern digital music production, and to bring together scientific publications on the subject.

According to the publications reviewed for this paper, the use of a graphics processor to calculate processes related to audio processing can lead to a multifold increase in the computing speeds. However, outside of research and articles, there are few concrete examples of graphics processors being used in music production.

Keywords: Music production, Electronic music, GPGPU, Literature review

Kuviot

Kuvio 1. Yksinkertaistettu kuva VSTi:n toiminnasta Home music creator 2013 mukaisesti esitettynä.	3
Kuvio 2. Yksinkertaistettu kuva VSTe:n toiminnasta Home music creator 2013 mukaisesti esitettynä.....	3
Kuvio 3. Ytimien määrä ja kellotaajuus suosituissa prosessoreissa vuonna 2023.....	5
Kuvio 4. Ytimien määrä ja kellotaajuus suosituissa näytönohjaimissa vuonna 2023	5
Kuvio 5. Mikseri FL-Studio äänityöasemassa. 1. Efektiraita, 2. Efektipaikka (kuvassa tyhjä), 3. Manuaalisesti asetettava PDC	9

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	MUSIIKIN TUOTTAMINEN DIGITAALISESTI.....	2
3	GPGPU	5
4	KIRJALLISUUSKATSAUS.....	7
5	YHTEENVETO.....	11
	LÄHTEET	12

1 Johdanto

Tutkielman tarkoituksena on kartoittaa grafiikkaprosessorien käyttöä osana musiikintuotantoa tarkastelemalla sekä keskusyksiköiden että grafiikkaprosessorien yhteyttä musiikintuotannossa käytettäviin ohjelmistoihin ja sovelluksiin, sekä selvittää millaisiin tehtäviin musiikintuotannossa grafiikkaprosessorit sopivat ja millaisiin eivät. Tässä tutkielmassa ei käydä musiikkiteknologiaa läpi kuin vain pintapuolisesti ja keskittyen grafiikkaprosessorin käytön kannalta olennaisiin aiheisiin. Mikäli haluaa tutustua syvällisemmin digitaaliseen musiikintuotantoon sekä siinä käytettäviin laitteistoihin ja ohjelmistoihin voisinkin suositella tutustumaan *The Oxford Handbook of Computer Music* (Dean ja Dean 2009), *The Dance Music Manual: Tools, Toys and Techniques* (Snoman 2012) ja *Introduction to Computer Music* (Jeffrey Hass) teoksiin.

Nykyaikainen musiikintuotanto on suurelta osin tietokoneiden varassa. Pelkkä digitaalinen äänityöasema mahdollistaa äänen tallentamisen sekä toistamisen ja sen ominaisuuksia voidaan laajentaa liitännäisillä (engl. plugin). Nämä liitännäiset tarjoavat äänityöaseman käyttäjälle useita eri tapoja sekä muokata että tuottaa ääntä reaaliajassa.

General-purpose computing on graphics processing units (GPGPU) on tekniikka, joka mahdollistaa tiettyjen prosessien laskennan siirtämisen keskusyksiköltä grafiikkaprosessorille. Laskentaprosessista riippuen grafiikkaprosessori kykenee moninkertaisiin laskentanopeuksiin keskusyksikköön verrattuna johtuen ytimien moninkertaisesta määrästä. Grafiikkaprosessorit voivat sisältää jopa useita tuhansia pienempiä ytimiä, jotka suorittavat laskentaprosesseja rinnakkain ja siten antavat parhaan mahdollisen hyödyn rinnakkaisuus sisältävien tehtävien ratkaisuun (Ghorpade 2012).

Luvussa 2 avataan nykyaikaista musiikintuotantoprosessia pintapuolisesti, sekä käydään läpi siihen liittyviä käsitteitä. Luvussa 3 avataan GPGPU:n toimintaa pintapuolisesti. Luvussa 4 perehdytään kirjallisuuskatsaukseen.

2 Musiikin tuottaminen digitaalisesti

Nykyaikaisen musiikintuotannon keskeisessä asemassa on tietokone. Tietokone ja sillä käytettävät digitaaliset äänityöasemat (engl. Digital Audio Workstation, DAW) ovat kehittyneet pisteeseen, jossa ne kykenevät sekä aktiivisesti tukemaan musiikintuotantoa, että osittain jopa korvaamaan perinteistä studioteknologiaa. Tämä on elintärkeää moderneille musiikintuottajille, sillä nykyaikana heidän tuloistaan suurin osa tulee live-esiintymisistä levymyyntien sijaan (Mortimer, Nosko ja Sorensen 2012). Koska tuottajien on samaan aikaan sekä kyettävä tekemään uutta musiikkia että kiertämään esiintymässä on tarvittavien laitteiden liikuteltavuudesta vuosien saatossa tullut elinehto artisteille.

Olellaisena osana digitaalista musiikintuotantoa ovat erilaiset ääniliitännäiset, kuten VST, AU ja AAX. Ääniliitännäisillä tarkoitetaan ohjelmistoja, joilla digitaalisille äänityöasemille voidaan lisätä uusia ominaisuuksia ja joilla niiden jo ennestään olemassa olevia ominaisuuksia voidaan laajentaa. Käytännössä ne tarjoavat käyttäjälle graafisen käyttöliittymän jonka kautta musiikintuotanto-ohjelmiston ääniliitännäisten parametrejä pystytään sekä muuttamaan että automatisoimaan.

Seuraavissa esimerkeissä käytetään VST-formaattia avaamaan ääniliitännäisten toimintaa yksinkertaisilla esimerkeillä, sillä se on paitsi vanhin, myös yleisimmin käytetty ääniliitännäisten tiedostoformaatti. Koska edellä mainitut liitännäisten formaatit ovat kuitenkin sekä toimintaperiaatteiltaan että toteuttamiltaan toiminnoilta hyvin samankaltaisia pätevät esimerkit myös muille mainituille liitännäisformaateille (Pirkle 2019). Alunperin ääniliitännäisten tarkoituksena oli tarjota musiikintuottajille tapoja muokata tallennettua ääntä digitaalisesti. VST 2.0 version julkaisu kuluttajamarkkinoille toi mukanaan kuitenkin sen, että VST-liitännäiset voidaan nykyään jakaa kahteen eri joukkoon, VSTi ja VSTe, niiden toiminnan perusteella (White 2001). VSTi-liitännäisiin kuuluvat erilaiset digitaaliset instrumentit, kuten samplerit ja syntetisaattorit, joilla DAW:n käyttäjä voi tuottaa erilaisia äänisignaaleja midi-syötteen avulla (kts. Kuvio 1). VSTe-liitännäiset sen sijaan vastaavat perinteisiä efektejä joiden tarkoituksena on muokata jo olemassa olevia äänisignaaleja (kts. Kuvio 2).



Kuvio 1. Yksinkertaistettu kuva VSTi:n toiminnasta Home music creator 2013 mukaisesti esitettynä.



Kuvio 2. Yksinkertaistettu kuva VSTe:n toiminnasta Home music creator 2013 mukaisesti esitettynä.

Tutkijoiden (Bianchi ym. 2022) mukaan äänen käsittely digitaalisen äänityöaseman näkökulmasta voidaan yksinkertaistaa kolmeen päätehtävään: 1) tiedoston avaamiseen, 2) äänitapahtumien muokaamiseen ja 3) reaaliaikaiseen miksaamiseen. Ensimmäisessä vaiheessa äänityöaseman tulee lukea levyltä jokaiseen käytettävään äänitapahtumaan liittyvää raakadataa. Toisessa vaiheessa suoritetaan käyttäjän haluamat muokkausoperaatiot äänitapahtumille, kuten keston ja äänenkorkeuden muokkaamiset tai häivytykset. Tämän jälkeen kolmannessa ja viimeisessä vaiheessa äänityöaseman tulee prosessoida reaaliaikaiset efektit, esimerkiksi mikserin efektiraidoille asetetut (kts. Kuvio 5), sekä miksata ulostulo. Varsinkin viimeisessä vaiheessa suoritettavissa operaatioissa on otettava huomioon reaaliaikaiset rajoitteet, sillä niiden on tultava suoritetuiksi mahdollisimman lähellä toistoa. Reaaliaikaisen äänen suorittamiseksi äänityöaseman on kyettävä prosessoimaan jatkuvasti sama määrä ääntä annetun aikarajan sisällä, sillä pienetkin äänentoistossa esiintyvät viiveet tai puutteet aiheuttavat helposti huomattavia häiriöitä tuotetussa ulostulossa (Renney, Gaster ja Mitchell 2020).

Lähes jokainen saatavilla olevista ääniliitännäisistä on ohjelmoitu hyödyntämään vain prosessorin laskentatehoa äänisignaalien prosessointiin. Tästä johtuen tämänhetkiset pullonkaulat digitaalisessa musiikintuotannossa ovat keskittyneet juuri prosessorin sekä ohjelmistojen käytössä olevan muistin ympärille. Sen sijaan grafiikkaprosessorien hyödyntäminen on tois-
taiseksi keskittynyt digitaalisen äänityöaseman graafisten elementtien, kuten animaatioiden, tuottamiseen.

3 GPGPU

General-purpose computing on graphics processing units, eli GPGPU-laskenta, tarkoittaa teknologiaa, jossa tavallisesti graafisten elementtien laskentaan tarkoitettun grafiikkaprosessorin suoritettavaksi annetaan laskentatehtäviä, jotka tyypillisesti ovat olleet keskusyksikön suorittamia. Tämän laskennan siirtämisen tarkoituksena on kyetä nostamaan tietokoneen yleistä prosessointinopeutta, sillä grafiikkaprosessoreilla on käytössään moninkertainen määrä ytimiä keskusyksikköön verrattuna (kts. Kuviot 3 ja 4). Vaikka nämä grafiikkaprosessorin ytimet toimivat huomattavasti matalemmilla taajuuksilla yleisesti käytössä oleviin nykyaikaisiin prosessoreihin verrattuna, niiden silkkä määrä mahdollistaa huomattavan laskentakapasiteetin lisäyksen niitä hyödynnettäessä rinnakkaislaskentaan. Yleisen laskentakapasiteetin lisääntymisen grafiikkaprosessorien laskentakapasiteetin lisääntyessä uskotaan toimivan ikään kuin jatkona Mooren laille, jonka paikkansapitävyys on vähentynyt ajan kuluessa ja fyysisten rajoitteiden tullessa vastaan (Perry 2018; Lu 2010).

Proessori	Ytimien määrä	Proessorin kellotaajuus
AMD Ryzen 7 5800X3D	8	3,4 - 4,5 GHz
Intel Core i5-13400F	10	2,5 - 4,6 GHz
AMD Ryzen 9 5950X	16	3,4 - 4,9 GHz
Intel Core i9 12900KF	16	3,2 - 5,2 GHz

Kuvio 3. Ytimien määrä ja kellotaajuus suosituissa prosessoreissa vuonna 2023

Näytönohjain	Ytimien määrä	Proessorin kellotaajuus
Asus GeForce TUF-RTX3060-O12G-V2-GAMING	3584	1882 - 1852 MHz
MSI GeForce RTX 3060 VENTUS 2X 12G OC	3584	1807 MHz
GeForce RTX 3070 Phoenix	5888	1500 - 1725 MHz
AMD Radeon RX 6650 XT	2048	2055 - 2635 MHz

Kuvio 4. Ytimien määrä ja kellotaajuus suosituissa näytönohjaimissa vuonna 2023

Tärkeimpiä esimerkkejä tämänhetkisistä GPGPU ohjelmistokehyksistä ovat NVIDIA:n CUDA (Compute Unified Device Architecture), joka on kehitetty toimimaan nimenomaan NVIDIA:n omilla näytönohjaimilla (NVIDIA; Garland ym. 2008), sekä OpenCL, joka on avoimen standardin versio ja jonka implementaatioita on saatavilla useiden eri valmistajien näytönohjaimille (Stone, Gohara ja Shi 2010; Khronos Group). Lisäksi voidaan mainita vielä AMD:n ROCm-ohjelmistopino, joka mahdollistaa GPGPU-ohjelmoinnin AMD:n omille näytönohjaimille, sekä sisältää muunnostyökalun jonka avulla on mahdollista kääntää CUDA:lle kirjoitettuja GPGPU-ohjelmistoja AMD:n näytönohjaimille sopivaan Open source HIP muotoon.

Grafiikkaprosessorien tarjoamaa laskentakapasiteettin lisäystä voidaan musiikintuotannon näkökulmasta hyödyntää esimerkiksi vähentämään ääniliitännäisten laskennasta johtuvaa overheadia keskusyksiköltä reaaliaikaisessa äänentuotannossa sekä nopeuttamaan äänen renderöintiä omaksi tiedostokseen.

4 Kirjallisuuskatsaus

Aiheen parissa työskennelleiden tutkijoiden suorittamissa kokeissa on havaittu selkeitä nopeutuksia grafiikkaprosessoria käytettäessä laskennassa keskusyksikön sijaan. Esimerkiksi yksinkertaisten ääniaaltojen renderöintiä varten suoritettussa laskennassa grafiikkaprosessori kykeni tuottamaan käytetyille algoritmile noin 30-60 kertaisen nopeutuksen verrattuna suoritukseen keskusyksiköllä (Trebien 2006). Jotkin tutkimukset ovat tuottaneet tuloksia, joiden mukaan keskusyksikön korvaaminen grafiikkaprosessorilla on tuottanut huomattavia, 100-ellei jopa 1000-kertaisia, nopeutuksia laskennan suorittamiseen. Näitä tuloksia tarkastellessa on kuitenkin huomattava että keskusyksiköiden ja grafiikkaprosessorien mallit sekä niillä suoritettavien algoritmien optimointi voivat aiheuttaa tarpeettoman suuria vaihteluita raportoitujen nopeutusten välillä, sekä yliarvioituja kertoimia nopeutuksissa (Lee ym. 2010; Nickolls ja Dally 2010). GPGPU-laskennan tuottamien nopeutusten mittaamiseen ei ole käytössä standardoitua tapaa tai laitteistoa mistä johtuen eri tutkimusten tulokset saattavat vaihdella suurestikin keskenään.

Grafiikkaprosessorin ja keskusyksikön välisen kommunikaation nopeutusta varten GPGPU:n avulla tiedonsiirto suoritetaan puskuroimalla lähetettävä data paloissa. Täten on mahdollista vähentää äänitapahtuman tiedonsiirron aiheuttamia laskentatehon kustannuksia. Kuitenkin datan lukeminen sekä siirtäminen grafiikkaprosessorin käytössä olevalle muistille ja vastaavasti prosessoinnin jälkeinen siirto grafiikkaprosessorilta takaisin keskusyksikön luettavaksi vie aikaa. Itse prosessoriin integroidut grafiikkapiirit, kuten Intelin Intel Graphics Technology, mahdollistavat selkeästi nopeimman tiedonsiirron johtuen siitä, että sekä grafiikkapiiri että prosessori jakavat muistialueensa. Vaikka tiedonsiirto tässä tapauksessa toimii nopeiten on myös huomattava, että prosessoriin integroidut grafiikkapiirit omaavat selkeästi heikomman kokonaislaskentakapasiteetin verrattuna ulkoisiin näytönohjaimiin. Tutkijoiden (Renney, Gaster ja Mitchell 2020) suorittamissa testeissä huomattiin myös, että annetun aikarajoituksen puitteissa nopeimmat suoritukset saatiin aikaan 2048 ja 4096 näytteen (engl. sample) mittaisilla puskureilla. Kuitenkin näin suurilla näytteillä kokeessa suositeltu 10 millisekunnin viive ylittyi. Nopein suoritus, joka alittaa halutun viiveen saatiin laskemalla puskurin kokoa 512 ja 1024 näytteeseen. Tämä kuitenkin aiheuttaa yhä yli 1 millisekunnin vaih-

telua grafiikkaprosessorille lähetettyjen peräkkäisten puskureiden viiveissä. Puskurin kokoa voidaan yhä laskea 32 näytteen mittaiseksi, jolloin yhden puskurin prosessointiin kuluva aika, sen aiheuttama viive ja puskureiden välinen viive ovat hyväksyttäviä molemmilla kohteissa käytetyillä näytönohjaimilla.

Nykyään jokainen kaupallisessa käytössä oleva digitaalinen äänityöasema sisältää tavan kompensoida liitännäisistä johtuvan laskentaviiveen aiheuttamaa vaikutusta. Esimerkiksi FL Studio tarjoaa käyttäjälle sekä automaattisen että manuaalisesti asetettavan Plugin Delay Compensationin (PDC). PDC toimii laskemalla yksittäisestä mikseriraidasta syntyvän viiveen ja lisäämälle yhtäkestoisen viiveen muihin mikseriraitoihin. Täten jokainen ääniraita pysyy synkronoituna toisiinsa nähden, mutta on äänityöaseman visuaalista edustusta jäljessä. FL Studion PDC (kts. Kuvio 5) sekä muiden digitaalisten äänityöasemien vastaavat menetelmät vähentävät siis entisestään grafiikkaprosessorin suorittaman laskennan merkitystä reaaliaikaisen äänentoiston, sekä -muokkauksen näkökulmasta niin pitkään kun sen käyttö on rajoittunut helpottamaan verrattaen yksinkertaisia äänentuotannon prosesseja.



Kuvio 5. Mikseri FL-Studio äänityöasemassa. 1. Efektiraita, 2. Efektipaikka (kuvassa tyhjä), 3. Manuaalisesti asetettava PDC

Tämän lisäksi grafiikkaprosessoripohjaisten ääniliitännäisten kehittämiseksi ongelmia aiheuttaa muunmuassa uusien ääniliitännäisten luomisesta. Koska jo olemassa olevat liitännäiset on kehitetty huomioimatta grafiikkaprosessoreja mahdollisina laskentayksikköinä täytyisi GPGPU:ta hyväksikäyttävät liitännäiset luoda alusta alkaen. Lisäksi musiikkialan standardiksi noussut ohjelmointirajapinta, myöskin Steinbergin kehittämä, Audio Stream Input/Output (ASIO) on huomattavasti monimutkaisempi ja vaikeakäyttöisempi kuin esimerkiksi windowsin tarjoama Microsoft Multimedia Environment (MME) (Trebien 2006). Myös GPGPU-tekniikan uutuus estää yksinkertaisesti adaptoimasta aiemmin kehitettyjä liitännäisiä keskusyksikköpohjaisista toteutuksista grafiikkaprosessoripohjaisiksi versioiksi; pelkästään liitännäisten ohjelmointi hyödyntämään grafiikkaprosessorin laskentakapasiteettia ei riitä vaan äänityöaseman tulee myös kyetä tukemaan GPGPU-tekniikkaa, jotta sen käytössä olevat liitännäiset voivat hyödyntää grafiikkaprosessorin tarjoamia ominaisuuksia.

Kuluttajamarkkinoilla ei toistaiseksi ole vielä huomattavia konkreettisia esimerkkejä musiikintuotantoon soveltuvista virtuaalisista instrumenteista tai efekteistä, jotka hyödyntäisivät GPGPU:n tarjoamaa laskentakyvyn lisäystä. Toistaiseksi on vain yksi yritys, GPU Audio, joka on aktiivisesti kehittämässä grafiikkaprosessoria hyödyntäviä ohjelmistoja musiikintuotantoon, sekä niiden kehitykseen tarvittavaa ohjelmistokehityspakettia (SDK). Tällä hetkellä kuitenkin sekä liitännäiset että kehitystuotteet ovat vasta testauksen asteella. Lisäksi musiikintuotannossa käytettävien ohjelmistojen kehityksen parissa työskennelleet ovat toisinaan ilmaisseet epäilyksiään GPGPU-konseptin todellisista mahdollisuuksista sekä niiden implementoinnista jo olemassa oleviin ohjelmistoihin.

5 Yhteenveto

Tällä hetkellä suurin osa GPGPU:n ympärille kehitetyistä, valmiista tuotteista muistuttaa lähinnä yksinkertaisia tekniikkademoja. Aihetta käsittelevissä artikkeleissa käytetään usein esimerkkeinä joko yksinkertaisia filttäreitä ja kaikuefektejä, tai pelkästään perusäänialtoja tuottavia algoritmeja, joiden osuus musiikintuotannossa tarvittavaan laskentatehoon on usein huomattavan vähäinen. Varsinkin kun ottaa huomioon kuinka suurin osa tämän hetken käytetyimmistä, ei sample- tai soundbank-pohjaisista, ohjelmistosyntetisaattoreista käyttää huomattavasti monimutkaisempia filteri- ja efektiketjuja muokatakseen ja syntetisoidakseen käytettävää ääntä, on tässä vaiheessa vielä vaikea arvoida GPGPU-laskentaa prosessoinnissaan hyödyntävien VST-liitännäisten lopullista vaikutusta musiikintuotannossa käytettävään laskentatehoon. Yksinkertaistetusti tehdyistä tutkimuksista voidaan sanoa, että vaativimpien operaatioiden suorittamisella grafiikkaprosessorin avulla voidaan saavuttaa huomattavaa nopeutusta pelkkään keskusyksiköllä suoritettuun laskentaan verrattuna, mutta pienemmillä ja yksinkertaisemmilla operaatioilla pelkkä datan lukemiseen ja siirtoon kuluva aika voi syödä hyödyn joka grafiikkaprosessorilla suoritettavalla laskennalla voitaisiin saada aikaan. Lisäksi mitä korkealuokkaisempi näytönohjain on käytössä, sitä suurempi nopeutus on mahdollista saavuttaa johtuen yksinkertaisesti laskentaa suorittavien ydinten määrästä ja taajuudesta.

Vaikka yksittäisten liitännäisten vaikutuksista on jo tehty jonkin verran akateemista tutkimusta, ei niiden skaalautuvuudesta, esimerkiksi edellä mainittujen ohjelmistosyntetisaattoreiden osaksi, ole juurikaan luotettavaa kirjallisuutta. Lisäksi musiikkiteknologian parissa työskennelleet ovat kuvanneet GPU-pohjaisten ääniliitännäisten kehittämisen olevan tois- taiseksi vielä kannattamattomatonta. Kuitenkin jo saatavilla olevat tutkimukset, sekä GPGPU:sta että sen vaikutuksesta musiikintuotantoon, sekä niiden tuotteena syntyneet liitännäiset osoittavat selkeästi lupausta.

Lähteet

Bianchi, Daniele, Federico Avanzini, Adriano Baratè, Luca A. Ludovico ja Giorgio Presti. 2022. “A GPU-Oriented Application Programming Interface for Digital Audio Workstations”. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 33 (8). <https://doi.org/10.1109/TPDS.2021.3131659>.

Dean, Roger T, ja Roger T Dean. 2009. *The Oxford handbook of computer music*. OUP USA.

Garland, Michael, Scott Le Grand, John Nickolls, Joshua Anderson, Jim Hardwick, Scott Morton, Everett Phillips, Yao Zhang ja Vasily Volkov. 2008. “Parallel computing experiences with CUDA”. *IEEE micro* 28 (4): 13–27.

Ghorpade, Jayshree. 2012. “GPGPU Processing in CUDA Architecture”. *Advanced Computing: An International Journal* 3, numero 1 (tammikuu): 105–120. <https://doi.org/10.5121/acij.2012.3109>.

Home music creator. 2013. *What is the difference between VST and VSTi?* Saatavilla WWW-muodossa, <https://homemusiccreator.com/difference-between-vst-and-vsti/>, viitattu 8.3.2023.

Jeffrey Hass. *Introduction to Computer Music*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://cmtext.indiana.edu/toc.php>. Viitattu 7.4.2023.

Khronos Group. *API-adopters*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://www.khronos.org/conformance/adopters/conformant-companies/>. Viitattu 9.3.2023.

Lee, Victor W, Changkyu Kim, Jatin Chhugani, Michael Deisher, Daehyun Kim, Anthony D Nguyen, Nadathur Satish, Mikhail Smelyanskiy, Srinivas Chennupati, Per Hammarlund ym. 2010. “Debunking the 100X GPU vs. CPU myth: an evaluation of throughput computing on CPU and GPU”. Teoksessa *Proceedings of the 37th annual international symposium on Computer architecture*, 451–460.

Lu, Chien-Ping. 2010. “K3 Moore’s Law in the Era of GPU Computing”. Teoksessa *Proceedings of 2010 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test*, 5–5. <https://doi.org/10.1109/VDAT.2010.5496638>.

- Mortimer, Julie Holland, Chris Nosko ja Alan Sorensen. 2012. “Supply responses to digital distribution: Recorded music and live performances”. *Information Economics and Policy* 24 (1): 3–14.
- Nickolls, John, ja William J Dally. 2010. “The GPU computing era”. *IEEE micro* 30 (2): 56–69.
- NVIDIA. *CUDA-Enabled Products*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://developer.nvidia.com/cuda-gpus/>. Viitattu 9.3.2023.
- Perry, Tekla S. 2018. “Move over, Moore’s law. Make way for Huang’s law [Spectral Lines]”. *IEEE Spectrum* 55 (5): 7–7.
- Pirkle, Will C. 2019. *Designing audio effect plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP theory*. Routledge.
- Renney, Harri, Benedict Gaster ja Thomas Mitchell. 2020. “There and Back Again: The Practicality of GPU Accelerated Digital Audio”. Heinäkuu.
- Snoman, Rick. 2012. *The dance music manual: Tools, toys and techniques*. CRC Press.
- Stone, John E., David Gohara ja Guochun Shi. 2010. “OpenCL: A Parallel Programming Standard for Heterogeneous Computing Systems”. *Computing in Science & Engineering* 12, numero 3 (toukokuu): 66–73. <https://doi.org/10.1109/mcse.2010.69>.
- Trebien, Fernando. 2006. “A GPU-based Real-Time Modular Audio Processing System”. Bachelor’s Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. https://www.inf.ufrgs.br/~oliveira/students_dissertations/Undergraduate/Fernando_Trebien_Undergraduate_thesis_UFRGS_2006.pdf.
- White, Paul. 2001. *Basic VST effects*. Sanctuary house, 45-53 Sinclair Road, London: Sanctuary Publishing Limited.