



## TEKNIikka JA LIIKENNE

Tietotekniikka

Tietoverkot

## INSINÖÖRITYÖ

### VIRTUALISOINTITYÖKALUJEN KÄYTTÖKELPOISUUDEN ANALYSOINTI VAATIVASSA PALVELINYMPÄRISTÖSSÄ

**Työn tekijä:** Konstantin Chistyakov

**Työn ohjaaja:** Marko Uusitalo

**Työn ohjaaja:** Kirmo Uusitalo

Työ hyväksytty: \_\_\_\_. \_\_\_\_. 2010

**Marko Uusitalo**  
lehtori



## **ALKULAUSE**

Tämä insinööriyö tehtiin Oy Keypro Ab:n Vantaan yksikölle. Kiitän lämpimästi yliopettaja Marko Uusitaloa rakentavasta ja kriittisestä ohjauksesta ja asiantuntevasta avusta. Kiitän myös Keypro Oy:n edustaja Kirmo Uusitaloa hyvistä huomioista, joiden avulla pystyin tarkentamaan työtäni. Esitän kiitokset myös lehtori Jussi Alhorinneelle hänen korjausesityksistään kieliasun suhteen.

Helsingissä 20.6.2010

Konstantin Chistyakov

## TIIVISTELMÄ

|   |   |
|---|---|
| <b>Työn tekijä:</b> Konstantin Chistyakov   |   |
| <b>Työn nimi:</b> Virtualisointityökalujen käyttökelpoisuuden analysointi vaativassa palvelinympäristössä   |   |
| <b>Päivämäärä:</b> 20.6.2010  | <b>Sivumäärä:</b> 43 s. + 8 liitettä          |
| <b>Koulutusohjelma:</b><br>Tietotekniikka   | <b>Suuntautumisvaihtoehto:</b><br>Tietoverkot |
| <b>Työn ohjaaja:</b> lehtori Marko Uusitalo   |   |
| <b>Työn ohjaaja:</b> Kirmo Uusitalo, Myyntijohtaja  |   |
| <p>Tämä insinöörityö tehtiin Keypro Oy:n Vantaan yksikölle. Työssä selvitettiin, miten avoimen lähdekoodin Kernel based Virtual Machine (KVM) -virtualisointitekniikkaa voidaan hyödyntää yrityksen palvelinympäristössä.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä virtualisointitekniikoihin ja KVM-hypervisorin arkkitehtuuriin. Sen jälkeen asennettiin KVM-hypervisor <i>Ubuntu Server 9.10</i> -käyttöjärjestelmään ja tutkittiin sen ominaisuuksia. Työssä testattiin erilaiset asennus- ja konfigurointivaihtoehdot KVM-hypervisorille. Lopuksi KVM-virtualisointia verrattiin muihin virtualisointiratkaisuihin. Virtualisointityökalujen testauksiin käytettiin Phoronix Test Suite -testaustyökalua.</p> <p>Työn tuloksena saatiin asennus- ja testausraportti, jota voidaan käyttää KVM-virtualisointityökalun käyttöönotossa. Saaduista testaustuloksista voidaan päätellä, että KVM-hypervisoria voidaan käyttää tuotannossa. KVM-hypervisorin suorituskyky on hieman huonompi verrattuna VMware ESXi -palvelimen suorituskykyyn, mutta KVM-virtualisointityökalu skaalautuu hyvin, on yhteensopiva VMware ESX -tuoteperheen kanssa ja täysin ilmainen.</p> |   |
| <b>Avainsanat:</b> virtualisointi, KVM-virtualisointi, palvelinklusteri, Ubuntu-linux   |   |



## ABSTRACT

**Name:** Konstantin Chistyakov

**Title:** Feasibility analysis of the virtualisation tools in a quality conscious server environment

**Date:** 20.6.2010

**Number of pages:** 43

**Department:**  
Information Technology

**Study Programme:**  
Data Networks

**Instructor:** Marko Uusitalo, Senior Lecturer

**Supervisor:** Kirmo Uusitalo, Sales Director

This study was commissioned by the branch office of the Keypro Oy in Vantaa. The objective of this study was to find out how Kernel based Virtual Machine (KVM) virtualisation technique could be utilized in the server environment of the company.

The study was begun by getting acquainted with common virtualisation techniques and architecture of the KVM hypervisor. After that the KVM kernel module was installed on the Ubuntu Server 9.10 operating system and its features were examined. Different assembly and configuration approaches for the hypervisor were tested. Finally, KVM virtualisation was compared to other virtualisation solutions. Phoronix Test Suite utility was used for performance and scalability testing of the virtualisation platforms.

Installation and testing report was produced as a result of this study. This report can be used during KVM virtualisation deployment. According to results of the testing, it appears that KVM virtualisation is ready for the production deployment. The performance of the VMware ESXi Server is slightly better than the performance of the KVM hypervisor. Nevertheless, the KVM kernel module is scaling linearly, compatible with VMware product family and it is completely free of charge.

**Keywords:** virtualisation, KVM virtualisation, virtualisation cluster, Ubuntu-linux

## **SISÄLLYS**

### **ALKULAUSE**

### **TIIVISTELMÄ**

### **ABSTRACT**

### **LYHENNELUETTELO**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>JOHDANTO</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>YLEISET PALVELINYMPÄRISTÖN VIRTUALISOINTITEKNIIKAT</b> | <b>3</b>  |
| 2.1      | Virtualisoinnin määritelmä                                | 3         |
| 2.2      | Virtualisoinnin lähestymistavat.                          | 5         |
| 2.3      | Virtualisointityökalun ominaisuudet                       | 9         |
| 2.4      | Virtualisointiratkaisujen yleiskatsaus                    | 14        |
| <b>3</b> | <b>VIRTUALISOINTIYMPÄRISTÖJEN VERTAILU</b>                | <b>16</b> |
| 3.1      | Vertailuperiaatteet                                       | 16        |
| 3.2      | Testiverkon kuvaus  | 17        |
| 3.3      | Testaustyökalut   | 17        |
| <b>4</b> | <b>KVM-VIRTUALISOINTI</b>                                 | <b>19</b> |
| 4.1      | KVM-arkkitehtuuri   | 19        |
| 4.2      | KVM Ubuntu Server 9.10 käyttöjärjestelmässä               | 20        |
| 4.2.1    | KVM-moduulin asennus ja konfigurointi                     | 20        |
| 4.2.2    | Convirt-hallintaohjelma                                   | 22        |
| 4.2.3    | Virtual Machine Manager -hallintaohjelma                  | 26        |
| 4.3      | Proxmox Virtual Environment                               | 33        |
| <b>5</b> | <b>KAUPALLISET VIRTUALISOINTIRATKAISUT</b>                | <b>33</b> |
| 5.1      | WMware ESXi Server ja vSphere Client 4.0                  | 33        |
| 5.2      | KVM Red Hat Enterprise Linux 5 -käyttöjärjestelmässä      | 35        |
| 5.3      | Citrix XenServer ja Citrix XenCenter 5.5                  | 37        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>6</b>   | <b>TULOSTEN ANALYYSI</b>   | <b>37</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Testaustulosten katsaus</b>   | <b>38</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Ubuntu Server 10.04 LTS</b>   | <b>39</b> |
| <b>6.3</b> | <b>KVM-virtualisoinnin käyttöönottosuunnitelma</b>                               | <b>40</b> |
| <b>7</b>   | <b>YHTEENVETO</b>  | <b>41</b> |
|            | <b>VIITELUETTELO</b>   | <b>43</b> |
|            | <b>LIITE 1 – VIRTUAALIKONEEN KONFIGURAATIOTIEDOSTO XML-MUODOSSA</b>              | <b>45</b> |
|            | <b>LIITE 2 – KONVERTOIDUN VIRTUAALIKONEEN KONFIGURAATIOTIEDOSTO XML-MUODOSSA</b> | <b>46</b> |
|            | <b>LIITE 3 – METROPOLIAN TESTIVERKOSSA TEHTYJEN TESTIEN TULOKSET</b>             | <b>47</b> |
|            | <b>LIITE 4 – RHEV-HYPERVISORIN SUORITUSKYKYTESTIEN TULOKSET</b>                  | <b>51</b> |

## **LYHENNELUETTELO**

API – Application Programming Interface  
BIOS – Basic Input Output System  
BPM – Business Process Management  
CLI – Command Line Interface  
CPU – Central Processing Unit  
DHCP – Dynamic Host Configuration Protocol  
DNS – Domain Name System  
GNOME – GNU Object Model Environment  
GUI – Graphical User Interface  
I/O – Input/Output  
IP – Internet Protocol  
iSCSI – Internet Small Computer System Interface  
ITIL – Information Technology Infrastructure Library  
KDE – K Desktop Environment  
KVM – Kernel based Virtual Machine  
LAMP – Linux Apache MySQL PHP  
LTS – Long Term Support  
MAC – Mandatory Access Control  
NAS – Network Attached Storage  
NAT – Network Address Translation  
NFS – Network File System  
P2V – Physical to Virtual  
RAID – Redundant Array of Independent Disks  
RAM – Random Access Memory  
RHEL – Red Hat Enterprise Linux  
RHEV – Red Hat Enterprise Virtualisation  
SAN – Storage Area Network  
SQL – Structured Query Language  
SSH – Secure Shell  
STP – Spanning Tree Protocol  
UML – User Mode Linux  
URI – Uniform Resource Identifier  
V2V – Virtual to Virtual  
VLAN – Virtual Local Area Network  
VM – Virtual Machine

VMFS – Virtual Machine File System

VMM – Virtual Machine Monitor

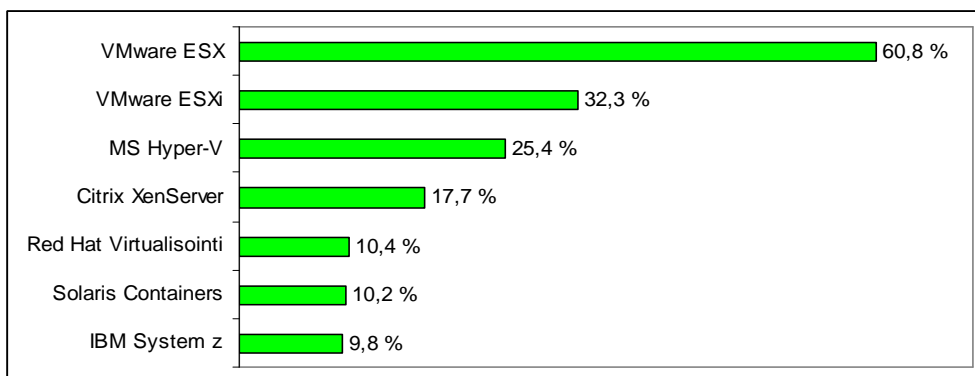
VNC – Virtual Network Computing

XML – eXtensible Markup Language



## 1 JOHDANTO

Palvelinvirtualisoinnin käyttö on kasvanut Suomessa huomattavasti viimeisen kahden vuoden aikana. Tietoviikko-verkkolehden mukaan vuonna 2007 vain 41 prosenttia suomalaisista yrityksistä ilmoitti käyttävän palvelinvirtualisointia. Vuonna 2009 vastaava luku oli 75 prosenttia [1]. Suurin osa yrityksistä käyttää VMware ESX-tekniikkaa ( 80 % ), mutta avoimen lähdekoodin ratkaisujen käyttö on myös nousussa. Esimerkiksi Xen-hypervisor kasvatti markkinaosuuttaan kymmenellä prosenttiyksiköllä. Xenia käyttää nyt 13 % suomalaisista yrityksistä [1]. VMware on suurin pelaaja virtualisointimarkkinoilla myös maailmanlaajuisesti. Centrifry-konsulttiyrityksen tutkimuksen mukaan sen markkinaosuudet vuonna 2009 olivat 61 prosenttia maksullisella VMware ESX-ratkaisulla ja 32 prosenttia ilmaisella VMware ESXi-tuotteella. Yrityksistä 38 prosenttia virtualisoi yhdellä työkalulla, 29 prosenttia käyttää tuotantoverkossa kahta virtualisointityökalua ja 33 prosenttia käyttää kolmea tai useampaa virtualisointityökalua [2].



Kuva 1. Virtualisointityökalujen markkinaosuudet vuonna 2009.

Palvelinvirtualisoinnin kehittyessä moni yritys päivittää vanhan työkalunsa uudempaan ja tehokkaampaan versioon. Päivittäminen kannattaa, sillä uudet virtualisointityökalut tarjoavat parempaa suorituskykyä ja hallittavuutta. Keypro Oy:n virtualisointi-infrastruktuurin kasvaessa yrityksessä syntyi tarve tutkia eri virtualisointityökaluja ja virtualisointiympäristön toiminnan tehostamismahdollisuuksia.

## *Yritysesittely*

Keypro Oy on vuonna 1995 perustettu tietotekniikka-alan yritys. Yrityksessä työskentelee noin 60 järjestelmäasiantuntijaa Joensuun ja Vantaan toimipisteissä. Keypro Oy:n erikoisosaaminen löytyy seuraavista alueista:

- paikka- ja verkkotietojärjestelmien kehitys ja käyttöönotto
- käytössä olevien verkkotietojärjestelmien tehostaminen
- verkkotietoaineistopalvelut.

Yrityksen asiakkaat ovat tele- ja tietoliikenneoperaattorit, vesi- ja sähkölaitokset, kunnat ja kaupungit. Asiakkaat sijaitsevat eri puolilla Suomea.

Osa yrityksen liikevaihdosta muodostuu kehitys- ja ylläpitopalveluista selainpohjaisille paikkatietojärjestelmille (Geographic Information System), kuten MapServerille. MapServer on avoimeen lähdekoodiin perustuva laajennus Apache ja IIS (Internet Information Services) -web-palvelinohjelmille, joka jakaa verkossa dynaamisia spatiaalisia karttoja. Yrityksen infrastruktuuri sisältää Windows- ja Linux-virtuaalipalvelimilla. Virtualisointiratkaisuna käytetään VMwaren tuotteita. Yksi niistä on ilmainen VMware ESXi Server 4.0. VMware ESXi -työkalu pohjautuu VMware ESX kaupallisen tuotteeseen, mutta tarjoaa huomattavasti vähemmän ominaisuuksia kuin kaupallinen versio. Yksi ominaisuuksista, joita kaivataan, on isäntäpalvelimien keskitetty etähallinta. Vaihtoehtona maksullisille ratkaisulle ehdotettiin kokeilla KVM-alustaa (Kernel based Virtual Machine) ja Convirt-hallintaohjelmaa.

KVM-virtualisointi on osa Linux-kerneliä versiosta 2.6.20 lähtien (tammikuu 2007). KVM on myös Ubuntu-yhteisön ensisijainen virtualisointityökalu versiosta 8.04 LTS (Hardy Heron) lähtien. Siitä johtuen päätettiin käyttää isäntäkoneen käyttöjärjestelmänä Ubuntu Server 9.10:tä (Karmic Koala), joka on työn kirjoittamishetkellä uusimman Ubuntu-käyttöjärjestelmän versio. Seuraava LTS (Long Term Support) Ubuntu-käyttöjärjestelmän 10.04 versio ilmestyy tämän vuoden huhtikuussa. Vuodesta 2008 lähtien KVM on Red Hatin tukema virtualisointiratkaisu, jota yritys käyttää myös omissa käyttöjärjestelmätuotteissa.

## *Tavoitteet ja menetelmät*

Tämän työn tavoite on selvittää avoimen lähdekoodin KVM (Kernel based Virtual Machine) -virtualisointityökalun sopivuutta Keypro Oy:n kehitys- ja

tuotantokäyttöön. Uuden virtualisointityökalun uskotaan lisäävään hallittavuutta ja tehokkuutta virtualisointiympäristöön. Työssä myös verrataan KVM-virtualisointia muihin virtualisointiratkaisuihin, kuten VMware ESXi- ja Citrix XenServer -hypervisoreihin.

Tässä työssä virtualisointityökalun käyttökelpoisuutta analysoidaan BPM (Business Process Management) -mallin mukaan. *Suunnitteluvaiheessa* perehdytään virtualisointiin ja virtualisointityökalujen testausmenetelmiin. *Malintamisivaiheessa* tutkitaan ja suunnitellaan virtuaalisointityökalujen käyttöönottoa Metropolian testiverkossa ja luodaan testausmenetelmiä. *Suoritusvaiheessa* toteutetaan aikaisemmin luotua testaus suunnitelmaa. *Optimointivaiheessa* pohditaan virtualisointityökalun suoritustehon parantamismahdollisuuksia. Testausten päättyessä analysoidaan uuden virtualisointityökalun käyttöönoton kannattavuutta tuotannossa.

## 2 YLEISET PALVELINYMPÄRISTÖN VIRTUALISOINTITEKNIIKAT

### 2.1 Virtualisoinnin määritelmä

Virtualisointi on tekniikka, jonka avulla fyysisen laitteiston resurssit abstrahoidaan ja luodaan virtuaalilaitteet: virtuaalilevyt, virtuaalimuistit ja virtuaalisuorittimet, jotka muodostavat yhdessä virtuaalikoneen. Virtuaalilaitteet on linkitetty fyysiseen laitteistoon ja ne voivat käyttää sen resursseja. Fyysinen host-palvelin näkee virtuaalilaitteet sovelluksina, joille resurssit on jaettu. [3, s. 4]. Virtualisoinnissa hyödynnetään muun muassa laitteistojen ja ohjelmistojen jakotekniikkoja, osituskäyttöä, osittaista tai täydellistä laitteiston emulointia. Virtualisointityökalun suoritusteho riippuu näiden tekniikoiden tehokkuudesta.

#### *Historia*

Virtualisointi sai alkunsa vuonna 1959, kun Oxfordin yliopiston laskentatieteen professori Christopher Strachey esitteli omassa tutkielmassaan termiä *osituskäyttö* (time sharing). Termi kuvasi samanaikaista resurssien käyttöä supertietokonejärjestelmissä. *Virtuaalikone*-termi tuli käyttöön ensimmäisen kerran IBM:n M44/44X-arkkitehtuurissa vuonna 1965. Host-palvelimenä kyseisessä arkkitehtuurissa toimii IBM 7044/M44 -suurtietokone, jolla pyörii muutama osittain simuloitu 7044-mallin tietokone. Seuraava IBM:n CP-40-mallin suurtietokone sisälsi täysin simuloituja tietokoneita 1967. Järjestelmän

rakennetta parannettiin ottamalla käyttöön keskitettyä virtuaalikoneiden hallintaa (Virtual Machine Monitor). [4 s. 4-5.] Parannettua arkkitehtuuria käytettiin IBM System 370-järjestelmässä 1973.

Tavalliselle työasemille virtualisointi tuli vuonna 1988, jolloin SoftPC-ohjelmalla emuloitiin MS-DOS-käyttöjärjestelmää Unix-käyttöjärjestelmissä. VMware toi markkinoille oman virtualisointiratkaisunsa työasemille vuonna 1999 ja palvelimille vuoden 2000 lopussa. Neljä vuotta myöhemmin (2003) julkaistiin Xen-hypervisor, joka on ensimmäinen avoimeen lähdekoodiin pohjautuva palvelinvirtualisointityökalu.

### *Palvelinvirtualisointi*

Palvelinvirtualisointi on tekniikka, jonka avulla fyysinen palvelinlaitteisto jaetaan virtuaalisiin laskentaympäristöihin, joissa ajetaan käyttöjärjestelmiä ja näiden päällä haluttuja sovelluksia. Toisin sanoen yksi tai useampi fyysinen host-palvelin isännöi useita virtuaalikoneita virtualisointityökalun avulla. Virtuaalikonetta kutsutaan usein myös guest-käyttöjärjestelmäksi.

Palvelinvirtualisoinnilla voidaan pienentää yrityksen IT-infrastruktuurin kokonaiskustannuksia. Kirjallisuudesta löytyy paljon laskelmia siitä, miten virtualisointi auttaisi säästämään. Oletetaan, että yrityksellä X on viisi fyysistä palvelinta, joiden käyttöaste olisi 15 prosenttia. Jos siirretään kaikki palvelimet virtuaalialustalle (samankaltainen palvelin), fyysisen laitteen käyttöaste kasvaa 75 prosenttiin ja samalla laite- ja huoltokustannuksia saadaan vähennettyä. [4, s. 10-12]. Käytännössä palvelin kannattaa virtualisoida, jos sen käyttöaste on alle 40 %. Lähteissä ei kuitenkaan lasketa mukaan virtualisointityökalun lisenssihintaa.

Taulukkoon 1 koottiin tietoja VMwaren tuotteiden lisenssinnoista. Hinnat on laskettu niin, että tarvitaan tukea enintään 30 virtuaalikoneelle. Yhdellä virtualisointipalvelimella on kaksi Dual Core -suoritinta ja 16 Gt muistia [5]. Laskelmissa oletettiin, että virtuaaliympäristön hallinta toteutetaan virtuaalikoneella (VM) ja tuotteella on 2 vuoden *platinum*-tason tuki (24/7).

Taulukko 1. VMware-virtualisointiympäristön hinnat

| Tuoteperhe               | VMware vSphere 4.0 |            |           |           |
|--------------------------|--------------------|------------|-----------|-----------|
|                          | Enterprise+        | Enterprise | Advanced  | Standard  |
| Alusta                   | 31                 | 31         | 31        | 31        |
| VM määrä                 | 9                  | 9          | 9         | 9         |
| VM per palvelin          | 4                  | 4          | 4         | 4         |
| Host-palvelinten määrä   | 38 669 \$          | 33 699 \$  | 26 308 \$ | 11 166 \$ |
| Virtualisoinnin hinta    | 1 499 \$           | 8 817 \$   | 8 817 \$  | 8 817 \$  |
| Hallintatyökalujen hinta | 1 296 \$           | 1 372 \$   | 1 133 \$  | 645 \$    |
| Hinta per VM             |                    |            |           |           |

Virtualisointiympäristö hallitaan VMwaren omalla vCenter 4 Standard (enintään 300 hallittavaa virtuaalikonetta) -työkalulla. Esimerkki näyttää, että vaikka käytössä olisi vain 4 host-palvelinta, virtualisoinnin lisenssikustannukset ovat isoja.

Työkalujen valmistajat yleensä jakavat tuotteitaan hintaluokkiin ja tarjoavat joustavaa hinnoittelua. Lähes kaikki kaupallisten virtualisointityökalujen valmistajat tarjoavat ilmaisia versioita tuotteistaan. Tämä johtuu siitä, että avoimen lähdekoodin ratkaisuja otetaan käyttöön yhä enemmän kaupallisten tuotteiden rinnalle. Ilmainen virtualisointityökalun versio pohjautuu samaan tekniikkaan ja tarjoaa samaa suorituskykyluokkaa kuin kaupallinen versio. Ilmaiselta tuotteelta puuttuu osa kaupallisen version ominaisuuksista. Versioiden ero riippuu valmistajan markkinointipolitiikasta. Esimerkiksi VMwaren Free ESXi Server -tuotteen tarkoitus on vain tutustuttaa tuoteperheeseen. Citrix taas tarjoaa ilmaiseksi ominaisuuksiltaan rikkaan XenServerin hallintatyökaluineen ja myy vain korkeamman tason laajennuksia, kuten korkeaa käytettävyyttä ja työkaluun sulautettuja varmistusratkaisuja. Avoimen lähdekoodin Xen ja KVM (Kernel based Virtual Machine) tarjoavat täysin ilmaista virtualisointia, mutta niitä on vaikea konfiguroida ja hallita.

## 2.2 Virtualisoinnin lähestymistavat

Ideaalinen laitteistoarkkitehtuuri on se, jolla laitteisto ja käyttöjärjestelmä on suunniteltu toinen toista varten [4, s. 20]. x86-tietokonearkkitehtuurissa laitteiston suorittimen käyttöä määritellään suojaustasoilla (CPU privilege rings). Suorittimen käskyjä jaetaan neljään suojaustasoihin, joista yksi on etuoikeutettu. Kun suoritin hakee käskyjä muistista, se tarkistaa suojaustasoa. Jos

käskyllä on väärä suojaustaso, suoritin keskeyttää käskyn suorittaminen ja palauttaa virheilmoituksen. Suojaustasot määräytyvät seuraavasti:

- ring0 – käyttöjärjestelmän ydin (kernel)
- ring1 – laitteistoajurit
- ring2 – laitteistoajurit
- ring3 – sovellukset.

Suorittimen hallinta tehdään vain etuoikeuskäskyillä. Suojaustasojen tarkoitus on estää konflikteja resursseista sovellusten ja käyttöjärjestelmän välillä. Suojaustasojen käskyt myös eroavat toisistaan.

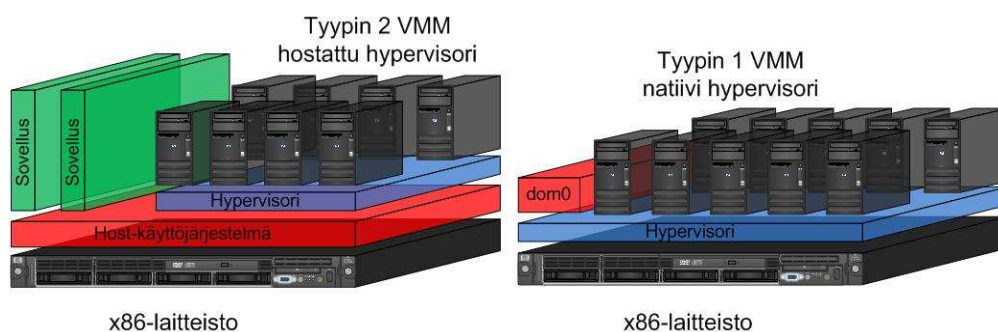
Virtuaalikoneiden sisällä ajetaan käyttöjärjestelmiä, joiden käskyistä osa on etuoikeuskäskyjä. Kaikki virtuaalikoneet eivät kuitenkaan voi käyttää laitteistoa ring0-tasolla, koska suoritin ei pysty erottamaan niitä toisistaan. Tätä konfliktia ei voida estää muuttamatta virtuaalikoneen käyttöjärjestelmää tai laitteistoa. Käyttöjärjestelmä kaatuu, jos saa ilmoituksen etuoikeuskäskyn keskeyttämisestä. Jotta virtuaalikoneiden toiminta onnistuu, laitteistolle täytyy luoda ohut sovelluskerros: *Virtual Machine Monitor* (VMM), jonka tehtävä on kääntää virtuaalikoneiden etuoikeuskäskyt laitteistolle sopivaan muotoon. Keskeiset VMM-sovelluksen tehtävät ovat

- virtuaalilaitteiden emulointi
- virtuaalikoneiden eristys toisistaan
- isäntäkoneen resurssien hallinta ja jako
- virtuaalikoneiden enkapsulointi. [4, s. 21-25].

Gerald J. Popek ja Robert P. Goldberg kuvasivat vuonna 1974 työssään ”Formal Requirements for Virtualizable Third Generation Architectures” kolme ensimmäistä näistä ohjelmistovaatimuksista. Nykyään VMM-sovellusta kutsutaan hypervisoriksi.

Hypervisoreita on kahta tyyppiä. Tyypin 1 hypervisorina (natiivi hypervisor) asennetaan suoraan palvelinlaitteistolle. Natiivi hypervisor muistuttaa rakenteeltaan Linux-käyttöjärjestelmän ydintä. Hypervisor ei sisällä käyttöliittymää. Hypervisoria hallitaan niin sanotun *domain 0* -virtuaalikoneen kautta. Dom0-virtuaalikone on tavallaan modifioitu kevyt Linux-käyttöjärjestelmä, jo-

ka käynnistyy aina hypervisorin käynnistyessä ja toimii ring0-suojaustasolla.



Kuva 2. Hypervisorien arkkitehtuurit.

Tyyppin 2 hypervisoria (hostattu hypervisor) asennetaan sovelluksena laitteen käyttöjärjestelmään. Hypervisorin kääntää virtuaalikoneiden koodia ja välittää sen host-palvelimen käyttöjärjestelmälle.

Virtuaalikoneen enkapsuloinnilla tarkoitetaan hypervisorin tapaa käsitellä virtuaalikonetta. Virtuaalikoneelle täytyy määrittää ensin virtuaalilaitteisto. Toiseksi täytyy huomioida virtuaalikoneen käyttämä levy, eli mihin ja missä muodossa virtuaalikone sijoittaa tiedostojärjestelmään. Virtualisointityökalu luo yhden tai useamman konfiguraatitiedoston, joilla kuvataan laitteisto. Sen lisäksi luodaan yksi tai useampi levykuva, joille tallennetaan virtuaalikoneen tiedostojärjestelmä. Virtuaalikonetta käynnistäessä hypervisorin lukee ensin virtuaalikoneen konfiguraatitiedostot, rakentaa virtuaalilaitteiston emulaattorilla ja liittää virtuaalikoneen levykuvat virtuaalilaitteistoon. Sen jälkeen virtuaalikone käynnistetään levykuvan käynnistysosiolta samalla tavalla kuin käynnistettiin fyysinen kone. Jos hypervisorin tukee virtuaalikoneiden migraatiota, nämä tiedostot voidaan myös siirtää isäntäkoneelta toiselle (VM migration) ja jopa toiselle alustallekin (VM conversion). Jos virtuaalikoneen levykuva on jaettu useamman host-palvelimen välillä, virtuaalikonetta voidaan siirtää palvelimelta toiselle keskeyttämättä sen toimintaa (*live-motion* tai *live-migration*). Virtuaalilaitteiston simuloinnissa käytetään erilaisia tekniikoita, joista riippuu loppujen lopuksi virtualisointityökalun tehokkuus.

### Emulation

Emuloinnilla tarkoitetaan laitteen tai järjestelmän toiminnan jäljittelyä sovelluksella siten, että sovellus suorittaa samat toimenpiteet ja tuottaa samat suoritukset kuin jäljitelty laite tai järjestelmä [6, s. 29]. Emuloinnissa VMM-ohjelmisto toimii usein isäntäkoneen käyttöjärjestelmässä. VMM-sovellus

emuloi virtuaalisuoritinta guest-käyttöjärjestelmälle. Virtuaalisuoritin ottaa guest-käyttöjärjestelmän koodia, muuttaa sen sopivaan muotoon ja välittää isäntäkoneen käyttöjärjestelmälle, joka suorittaa muutettua koodia fyysisellä suorittimella.

Emuloinnin suorituskyky on matala ja resurssien käyttöaste on korkea. Suorituskykyä nostetaan kehittämällä tehokkaampia emulaattorihjelmia. Esimerkiksi *QEMU-emulaattori* voi suorittaa virtuaalisuorittimen käskyjä isäntäkoneen suorittimella kääntämättä niitä. Tekniikan suurin etu on se, että sillä voidaan emuloida myös isäntäkoneelle täysin vieras tietokonearkkitehtuuri, esimerkiksi PowerPC-arkkitehtuuri pystytään emuloimaan x86-laitteistolla.

### *Binary translation*

Binary translation -tekniikassa virtuaalikoneiden koodia ajetaan suoraan isäntäkoneen suorittimella. Hypervisor tarkkailee virtuaalikoneen toimintaa dynaamisesti ja hallitsee keskeytettyjä käskyjä. On olemassa myös käskyjä, joiden keskeyttäminen on mahdotonta. Hypervisor etsii kyseiset käskyt virtuaalikoneen muistissa ja vaihtaa ne sopivaan koodiin ennen kuin koodia ehditään suorittaa. Tekniikka tarjoaa huomattavasti parempaa suorituskykyä verrattuna emulointiin. Sitä käytetään esimerkiksi VMwaren tuotteissa.

### *Paravirtualization*

Kaikissa yllä mainituissa tekniikoissa virtuaalikoneen käyttöjärjestelmälle ei tehdä mitään muutoksia. Paravirtualisoinnissa virtuaalikoneen käyttöjärjestelmälle asennetaan virtualisointiajurit, jotka muuttavat käyttöjärjestelmän ydintä. Kaikki etuoikeuskäskyt vaihdetaan hypervisor-kutsuilla. Virtuaalikoneen koodia voi sitten turvallisesti suorittaa host-palvelimen suorittimella.

Paravirtualisointi tarjoaa parasta suorituskykyä, mutta tukee huomattavasti suppeampaa valikoimaa käyttöjärjestelmiä. Sen lisäksi vaikka virtualisointiajuri tukee linux-kernelin 2.4 versiota, se ei automaattisesti tue kernelin 2.6 versiota [4, s. 57]. Paravirtualisointi on myös muita tekniikoita huomattavasti monimutkaisempi.

### *Hardware assisted virtualization*

Virtualisoinnin suorituskykyä voidaan nostaa myös lisäämällä laitteistoon virtualisointitukea. Tämä idea toteutettiin ensimmäisen IBM:ssä vuonna 1972



esitellyssä System/370 -suurtietokoneessa. Vuonna 2005 Intel ja AMD kehittivät toisistaan riippumatta virtualisointituen x86-arkkitehtuurille. Virtualisointituen idea on etuoikeuskäskeyn keskeytys ja emulointi suorittimessa eikä hypervisorissa.

Intelin teknologia sai nimen *Intel VT* (Virtualization Technology). AMD antoi omalle teknologialleen nimen *AMD-V* (Virtualization). Ensimmäiset Intelin virtualisointia tukevat suorittimet olivat *Intel Pentium 4 662* ja *Intel Pentium 4 672*. Nämä tuotteet ilmestyivät markkinoille marraskuussa 2005. Vastaavat AMD:n suorittimet julkaistiin vasta toukokuussa 2006. Molemmat laitevalmistajat käyttävät samaa ideaa, mutta molemmilla on oma toteutustapansa.

### 2.3 Virtualisointityökalun ominaisuudet

Virtualisointityökalu tarjoaa virtuaalikoneille rajapinnan, jonka avulla virtuaalikoneet voivat jakaa host-palvelinlaitteen resurssit. Toiset työkalut toteuttavat rajapinnan vaihtamalla alkuperäiset käyttöjärjestelmän ohjelmistokirjastot laajennetuihin virtualisointikirjastoihin, joilla on samanlainen toiminnallisuus. Toiset taas muodostavat virtuaalilaitteistoa niin, että sen käyttäytyminen on identtinen fyysiselle laitteistolle. [4, s. 46]. Toteutustavasta riippumatta virtualisointityökalun pitää täyttää tietyt kriteerit, jotta sillä pystyy virtualisoimaan tehokkaasti ja luotettavasti.

#### *Suorituskyky*

Virtualisointijärjestelmän suorituskyvyllä tarkoitetaan järjestelmän tuottamien suoritteiden määrä aikayksikössä [6, 174]. Virtualisointialustan suorituskyky riippuu isäntäjärjestelmän laitteiston ominaisuuksista, virtualisointityökalusta ja virtuaalikoneiden määrästä. Suorituskykyä mitataan tavallaan verrattuna joko toisen virtualisointityökaluun tai vastaavan fyysisen palvelimen tehokkuuteen. Sovellusten suorituskyky riippuu virtuaalikoneen ominaisuuksista (suorittimien ja muistin määrä) ja sovelluksen tyypistä. Esimerkiksi Red Hatin KVM-hypervisorin suoritus verrataan *"bare-metal"*-asennuksen suoritukseen, eli verrataan palvelinlaitteen suoritus ilman virtualisointia ja virtualisoidulla. Testit antavat tuloksiksi

- 95 % natiivin järjestelmän suorituksesta ja lineaarinen skaalautuvuus SAP-järjestelmille

- 93 % natiivin järjestelmän suorituksesta ja hyvä skaalautuvuus Oracle-tietokannoille
- 139 % natiivin järjestelmän suorituksesta ja hyvä skaalautuvuus LAMP (Linux Apache MySQL PHP)-palvelimille
- 92 % natiivin järjestelmän suorituksesta ja lähes lineaarinen skaalautuvuus Java-palvelimille. [7].

Tuloksista näkyy, että jotkut sovellukset toimivat paremmin siinä missä toisten suorituskyky huononee (ks liite 4).

Virtualisointityökalun suorituskyvyn testaus tehdään kuormittamalla virtuaalikoneita. Kuormitus suoritetaan simuloimalla laitteistoa kuormittavia prosesseja virtuaalikoneen käyttöjärjestelmässä. Testauksessa mitataan aikaa, jota virtuaalikone tarvitsee suorittaakseen prosessin loppuun asti tai suoritettujen prosessien määrä valitussa ajanjaksossa. Suorituskyky on tärkein päätöskynnys virtualisointityökalua valittaessa, muttei ole ainoa, mikä pitää huomioida.

### *Skaalautuvuus*

Skaalautuvuudella tarkoitetaan järjestelmän muokattavuus kuorman ja resurssien määrän muutoksiin [6, s. 168]. Lineaarinen skaalautuvuus tarkoittaa lineaarista suhdetta virtuaalikoneen suorituskyvyn ja resurssien/kuorman määrän välillä. Lineaarista huonompaa skaalautuvuutta kutsutaan sublineaarisella skaalautuvuudella.

Yksi virtualisointityökalun skaalautuvuuden piirteistä on resurssien ja virtuaalikoneiden määrä, jota työkalu pystyy hallitsemaan yhdessä host-palvelimessa. Esimerkiksi VMware ESXi Server tukee enintään 64 fyysisten suorittimien ydintä, 256 virtuaalisuoritinta ja 1 Tt muistia yhdessä host-palvelinlaitteessa [8]. Nämä tiedot löytyvät yleensä spesifikaatioista. Toisaalta pitää osata ennustaa, miten virtuaalikoneen suorituskyky muuttuu, kun sille jaetaan lisää resursseja tai lisätään ympäristöön toinen virtuaalikone. Nämä ominaisuudet saadaan selville ajamalla suorituskykytestit useammassa virtuaalikoneessa samaan aikaan. Testien avulla määritellään optimaalinen konfiguraatio host-palvelimelle, jotta voidaan taata tiettyä palvelutasoa.

Virtualisointityökalun skaalautuvuus riippuu sen toteutustavasta. KVM-virtuaalikoneen tärkeimmät komponentit ovat

- KVM-moduuli
- QEMU-laiteiston emulaattori
- virtuaalikoneen BIOS (Basic Input Output System).

Jokaisella komponentilla on omat skaalautuvuuden rajansa, jotka johtuvat ohjelmiston puskureiden ja taulukkojen kooista. KVM-virtualisoinnin tukema virtuaalikoneiden maksimimäärä on kahdeksan kertaa isäntäkoneen suorittimien ytimien määrä, esimerkiksi yhdellä neliytimisellä prosessorilla voidaan ajaa maksimissaan 32 virtuaalikonetta [9, s. 13]. Alustan kyky määrittää virtuaaliresursseja enemmän kuin fyysisesti on saatavilla kutsutaan *resource over commitmentilla* [10]. Ominaisuudesta kerrotaan yleensä virtualisointityökalun spesifikaatiossa. *Over commitment* ei toimi, kun kaikkien virtuaalikoneiden käyttöaste on korkea. Siinä tapauksessa virtualisointityökalun on pystyttävä taakaamaan tietty suorituskykytaso valituille virtuaalikoneille tai siirtää virtuaalikoneita toiselle host-palvelimelle.

#### *Hallittavuus*

Virtualisointityökalun hallittavuudella tarkoitetaan työkalun kyky organisoida virtuaalikoneiden hallintaprosesseja. Yleisimmät hallintaprosessit ovat:

- hypervisorin asennus ja konfigurointi
- virtuaalikoneen elinkaarin hallinta
- verkkoresurssien hallinta
- virtualisointiympäristön monitorointi
- hallintaprosessien automatisointi.

Uuden host-palvelinlaitteen lisääminen verkkoon ei saa olla liian haastavaa ja hidasta. Toisaalta palvelimen konfiguraation pitää olla riittävän joustava, jotta erilaisten verkkoarkkitehtuurien käyttöönotto olisi mahdollista. Esimerkiksi host-palvelimen verkkokortti voidaan jakaa virtuaalikoneiden kesken eri tavoin. Yksi tapa on konfiguroida NAT (Network Address Translation) -osoitemuunnos, jolloin virtuaalikoneet ovat eri aliverkossa kuin isäntälaitte. Toinen tapa on rakentaa verkkokortin päälle virtuaalisilta, jolloin virtuaaliverkkokortit ja fyysiset rajapinnat konfiguroidaan virtuaalisillan porteiksi. Virtualisointityökalu voi myös tukea VLAN (Virtual Local Area Network) -

verkkoja. Host-palvelimen peruskonfiguroinnin täytyy olla mahdollisimman yksinkertaista.

Virtualisointityökalun täytyy hallita koko virtuaalikoneen elinkaarta. Virtuaalikoneen elinkaari sisältää tavallaan

- virtuaalikoneen provisiointi ja tallennus
- virtuaalikoneen pohjan (*appliance*) luonti ja varastointi
- virtuaalikoneen konvertio ja kloonaus
- virtuaalikoneen varmistus ja palautus
- virtuaalikoneen migraatiot.

Virtuaalikoneen provisiointi merkitsee konfiguraatiodietoista ja levykuvista muodostettavan virtuaalikoneen valmistelua ennalta niin pitkälle, että uusi virtuaalikone saadaan käyttöön automatisoitujen rutiinien kautta eikä järjestelmäasiantuntijan tarvitse osallistua prosessin hallintaan [11]. Esimerkiksi uuden virtuaalikoneen luodessa ei tarvitse määritellä jokaista virtuaalikoneen laitetta sekä laitteiston kokoonpanoa erikseen vaan se tehdään oletuskonfiguraation avulla. Oletuskonfiguraatiota voidaan muokata jälkeenpäin.

Virtuaalikoneita voidaan provisioida asennusmedian (CD/DVD -levy tai ISO-levytiedosto), esiasennetun levykuvan, konvertion tai kloonauksen kautta. Esiasennetut levykuvat voidaan luoda tarpeen mukaan nopeuttaakseen virtuaalikoneiden provisiointia. Ne ovat saatavilla myös virtualisointityökalun valmistajalta. Virtuaalikoneeksi voidaan konvertoida sekä fyysistä palvelinta (*P2V-conversion*) että toisen alustan virtuaalikonetta (*V2V-conversion*). Valmis virtuaalikone voidaan kloonata, jolloin saadaan täysin identtinen virtuaalikone.

### *Tietoturva*

Virtuaalikoneella on samat tietoturvauhat kuin fyysisellä palvelimelläkin. VMM-sovelluksen tietoturva riippuu käytetyistä tekniikoista ja työkalun sisäisestä arkkitehtuurista. Jotta virtualisointialustan käyttö olisi turvallista, VMM-sovelluksen täytyy

- estää virtuaalikoneiden kommunikaatiota muuten kun virtuaaliverkkokortin kautta.
- estää virtuaalikonetta käyttämästä resursseja, jotka eivät ole varattu kyseiselle virtuaalikoneelle.

- estää virtuaalikonetta ottamasta host-palvelinlaitteen haltuun.

Kehittyneet virtualisointityökalut tarjoavat mahdollisuutta konfiguroida tietoturvapoliitikoita. Virtualisointityökalun tietoturvaominaisuuksista kerrotaan tavallaan spesifikaatiossa.

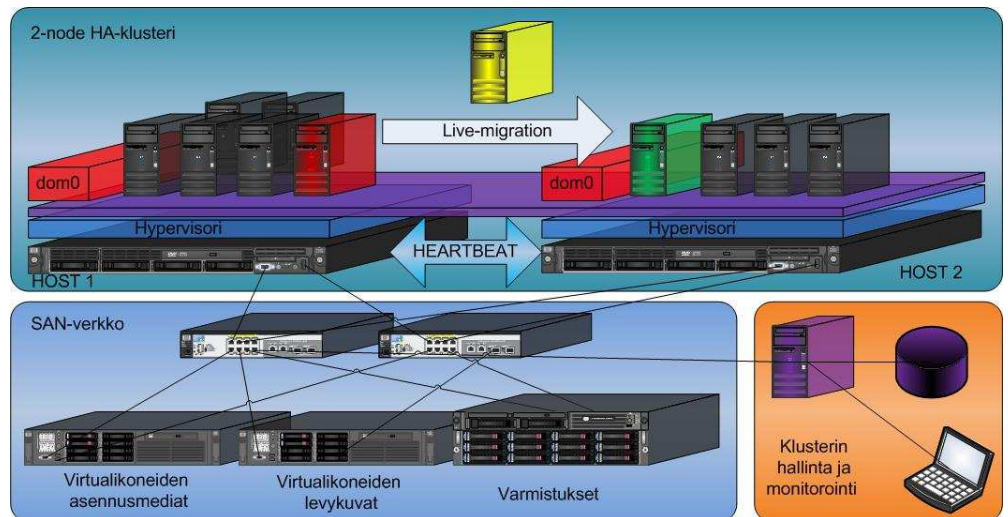
#### *Varmistus, vikasietoisuus ja korkea käytettävyys*

Virtualisointiympäristön toimintaa pitää varmistaa samalla tavalla kuin varmistetaan fyysisten palvelinten toimintaa. Virtuaalikoneen varmistus voidaan toteuttaa

- agenttipohjaisella varmistusohjelmalla
- käyttöjärjestelmätyökaluilla
- *flat file* –varmistuksella. [12, s. 223].

Varmistuksen verkkoarkkitehtuuri suunnitellaan erikseen. Varmuuskopiot voidaan tallentaa isäntälaitteen paikalliselle levyille tai verkkotallennuspaikalle. Virtualisointityökalut tarjoavat varmistusratkaisut virtuaalikoneille ja rajapinnat yleisimmälle tiedostonjakotekniikoille. Oletuksena monissa virtualisointityökaluissa on *snapshot*-varmistus. Snapshot-varmistuksen ei saa olla ainoa varmistusratkaisu, koska se ei tallenna muistissa olevaa tietoa. Virtuaalikoneen täysvarmistus voidaan tehdä myös kloonamalla tai kopioimalla virtuaalikoneen levykuvaa.

Virtualisointi pohjautuu laitteisto- ja ohjelmistoalustoihin. Hinnasta ja konfiguraatiosta riippumatta kaikki alustat joskus rikkoutuvat. Siinä tapauksessa palveluiden (usein myös liiketoiminnan) jatkuvuutta varmistetaan palvelinklustereilla. Palvelinklusteri on joukko samaa tehtävää suorittavia palvelimia, jotka näkyvät käyttäjille päin yhtenä palvelimena [12, s. 309]. Yleisimmät virtualisointiklusterin tehtävät ovat kuorman jako ja vikasietoisuus. Host-palvelinta voidaan konfiguroida jakamaan kuormaa tehokkaasti virtuaalikoneiden välillä. Käyttöasteen kasvaessa virtuaalikoneiden suorituskyky huononee. Jotta suorituskyky kasvaisi, osa virtuaalikoneista voidaan siirtää toiselle isäntäpalvelimelle. Siirto onnistuu vain siinä tapauksessa, jos virtuaalikoneen levytiedosto sijaitsee jaetulla verkkolevyllä. Host-palvelinten välillä voidaan konfiguroida *heartbeat*-palvelua. *Heartbeat* on työkalu, jonka avulla palvelin voi varmistaa toisen palvelimen toimintaa. *Heartbeat*-työkalu lähettää säännöllisin välein kevyen tarkistuspaketin etäpalvelimelle.



Kuva 3. Virtualisointiklusteri

Jos etäpalvelin ei vastaa tietyn ajan kuluessa, etäpalvelimen oletetaan olevan rikki ja sen suorittamia tehtäviä siirretään toiselle vapaalle palvelimelle tai jaetaan palvelinten kesken. Klusterointiratkaisu voi olla sulautettu virtualisointityökaluun tai sen voidaan konfiguroida toimimaan virtualisointiratkaisun rinnalla.

## 2.4 Virtualisointiratkaisujen yleiskatsaus

### VMware-tuoteperheet

VMware tarjoaa laajan valikoiman erilaisia tuotteita palvelinvirtualisoinnille. VMwaren ilmainen paketti sisältää VMware Server, joka on tyypin 2 hypervisor, ja VMware Free ESXi Server, joka on tyypin 1 hypervisor. Hypervisorin kanssa tulee ilmainen perusversio hallintaohjelmasta. Uusin hallintaohjelma on VMware vSphere. Hallintaohjelman avulla voi hallita ja monitoroida vain yhtä isäntäpalvelinta kerrallaan. Hallintatyökalun avulla voi myös luoda ja poistaa virtuaalikoneita ja ottaa virtuaalikoneista snapshot-kopioita.

### Xen ja Citrix XenServer 5.5

Sekä Xen että XenServer ovat tyypin yksi hypervisoreita. Molemmat tuotteet tukevat paravirtualisointia. Hypervisorien suorituskyky on enintään 97 % verrattuna tavalliseen asennukseen, jos käytetään paravirtualisointiajureita. Emulointimuodossa tuotteiden suorituskyky on huomattavasti huonompi. XenServeria voi hallita joko komentorivin kautta tai ilmaisella Citrix XenCenter 5.5 -työkalulla. asennuspaketissa ovat mukana myös paravirtualisoin-

tiajurit ja monitorointiskriptit. XenServerille myydään Citrix Essentials-laajennuspaketti, joka sisältää klusterointityökaluja. XenServeria käytetään muun muassa Amazon's Elastic Compute Cloud (EC2)-pilvipalvelualustassa [3, s. 67].

#### *Microsoftin virtualisointiratkaisut*

Microsoftin ilmaiset tuotteet ovat Microsoft Virtual Server 2005 R2 Enterprise ja Hyper-V Server 2008 R2. Hyper-V on tehokkaampi kuin vanha (2003) MS Virtual Server. Microsoftin ratkaisut sopivat parhaiten Windows-palvelinympäristöön. Hyper-V tukee kuitenkin SUSE Enterprise Linux Server- ja Red Hat Enterprise Linux -käyttöjärjestelmiä. Microsoftin Azure-pilvipalvelualusta pohjautuu Hyper-V-virtualisointiin.

#### *VirtualBox*

Ensimmäiset Sunin virtualisointiratkaisut, jotka olivat Solaris Containers (Zones), tulivat markkinoille vuonna 2005. Nykyään Oraclen omistamalla yhtiöllä on neljä x86-arkkitehtuuriin pohjautuva virtualisointiratkaisua. Oracle VM VirtualBox-tuotteella on myös ilmainen versio, jonka nimi on Oracle VirtualBox. VirtualBox on tyypin 2 hypervisor ja edellyttää käyttöjärjestelmän asennusta host-palvelimelle.

#### *Shared kernel ja kernel-level -virtualisointi*

Linux-käyttöjärjestelmän ydin on sama lähes kaikissa Linux-distribuutioissa. Sitä ominaisuutta voidaan hyödyntää myös virtualisoidessa. Yksi tapa virtualisoida Linux-käyttöjärjestelmiä on jakaa host-käyttöjärjestelmän ydin useammalle virtuaalikoneille. Tätä lähestymistapaa käytetään esimerkiksi *OpenVZ- ja Solaris Containers* -virtualisointityökaluissa.

Toinen tapa on modifioida käyttöjärjestelmän ydintä tukemaan virtualisointia. Virtuaalikoneet käynnistyvät oman kernelin avulla, mutta käyttävät modifioitua kernelia resurssijakoon. User Mode Linux (UML) ja Kernel based Virtual Machine (KVM) käyttävät modifioitua linux-kerneliä. Molemmat tekniikat ovat osa mainstream kerneliä.

### *Red Hat Enterprise Virtualization*

Red Hatin virtualisointiratkaisu pohjautuu KVM-virtualisointiin. Yhtiön virtualisointituotteet ovat RHEL 5.5 (Red Hat Enterprise Linux) ja RHEV (Red Hat Enterprise Virtualization) Server. RHEL-käyttöjärjestelmä tukee sekä KVM-että Xen-virtualisointia. RHEV tukee vain KVM-virtualisointia, joka on tällä hetkellä Red Hatin päävirtualisointiratkaisu. Red Hat käyttää virtualisointiympäristössä Red Hat Cluster Suite -klusterointiratkaisua. Molemmat tuotteet ovat kaupallisia, mutta Red Hat sponsoroi noin puolet KVM-virtualisoinnin avoimen lähdekoodin projekteista. IBM-yhtiön uusi pilvipalvelu pohjautuu Red Hatin KVM-tekniikan [13].

## **3 VIRTUALISOINTIYMPÄRISTÖJEN VERTAILU**

### **3.1 Vertailuperiaatteet**

Virtualisointijärjestelmää päivittäessä pitää analysoida olemassa olevan virtualisointiratkaisun kapasiteettia ja yhteensopivuutta muiden virtualisointityökalujen kanssa. Sitten pitää analysoida, millä tavoin toteutetaan vertailua ja millä ehdoilla päivitys on kannattava. Tärkeimmät vertailuperiaatteet ovat suorituskyky, skaalautuvuus ja hallittavuus. Järjestelmän hallittavuutta testataan asentamalla virtualisointityökalu testipalvelimelle ja tutkimalla sen ominaisuuksia. Suorituskykyä ja skaalautuvuutta mitataan suorituskykytesteillä.

Virtualisointityökalun asennuksen jälkeen luodaan Ubuntu-virtuaalikoneet ja asennetaan niihin testaustyökalut. Suorituskykytestissä virtuaalikoneelle varataan 8 Gt levytilaa ja 512 Mt muistia. Suorituskykytestit tehdään ensin yhdellä ja sen jälkeen kahdella suorittimilla. Suorituskykytestien päätyttyä aloitetaan skaalautuvuustestit. Lisätään toinen samanlainen virtuaalikone ja ajetaan virtuaalikoneissa testit samaan aikaan. Uusia virtuaalikoneita lisätään niin kauan, kuin virtuaalikoneet pystyvät suorittamaan testit loppuun asti. Kun virtualisointityökalun skaalautuvuuden raja on saatu selville, ajetaan suorituskykytestit yhdessä virtuaalikoneessa muiden virtuaalikoneiden ollessa joutokäynnillä. Lopuksi testitulosten avulla analysoidaan työkalun skaalautuvuutta. Sen jälkeen asennetaan ja testataan seuraava työkalu.



### 3.2 Testiverkon kuvaus

Virtuaalikone toimii aina hitaammin kuin vastaava fyysinen palvelin. Virtualisointityökalun suorituskyky voi olla yli 90 % verrattuna fyysiseen työaseman suorituskykyyn. Virtualisointia varten suunniteltu palvelinlaitteisto toimii virtualisoidessa tehokkaammin kuin tavallinen työasema. Testeissä verrataan vain virtualisointityökaluja, eikä verrata niiden suorituskykyä fyysisen palvelimen suorituskykyyn.

Testiverkko koostuu kahdesta työasemasta. Jokaisella työasemalla otettiin käyttöön suorittimen virtualisointituki (hardware assisted virtualisation). Koneet yhdistetään toisiinsa ja Metropolian verkkoon kytkimen avulla.

Verkkoasetukset konfiguroidaan sekä manuaalisesti että DHCP-palvelimen avulla. DNS-asetukset ja yhdyskäytävää Internetiin saadaan Metropolian verkosta. Tiedot työasemista koottiin taulukkoon 2.

*Taulukko 2. Testityöasemat.*

| Työasema A           |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| <i>Suoritin</i>      | Intel Core 2 Duo E8400 3.00 GHz |
| <i>Muistin määrä</i> | 4 Gt                            |
| <i>Levyn koko</i>    | 250 Gt                          |
| <i>Verkkokortti</i>  | 1 × 1 Intel GigabitEthernet     |
| Työasema B           |                                 |
| <i>Suoritin</i>      | Intel Core 2 Duo E6750 2.66 GHz |
| <i>Muistin määrä</i> | 4 Gt                            |
| <i>Levyn koko</i>    | 80 Gt                           |
| <i>Verkkokortti</i>  | 2 × 1 Intel GigabitEthernet     |

Työasemalla A suoritettiin KVM-virtualisoinnin suorituskyky- ja skaalautuvuustestejä. Työasema B toimii NFS-palvelimena ja hallittavana etäpalvelimena.

### 3.3 Testaustyökalut

Suorituskykytesteissä pitää tarkistaa virtualisointityökalun kykyä varata ja jakaa host-palvelimen resursseja virtuaalikoneille. Testeissä täytyy testata virtuaalisuorittimen, muistin ja kiintolevyn suorituskykyä. Testaustyökaluna päätettiin käyttää Phoronix Test Suite -testausalustaa.

Phoronix Test Suite on Phoronix Media -yrityksen kehittämä ja ylläpitämä Linux-käyttöjärjestelmien testaustyökalu. Työkalun kehitys on alkanut vuon-

na 2004. Testaustyökalu sisältää noin 130 testiä, joista suurin osa on ilmaisia. Tärkeimmät työkalun ominaisuudet ovat automatisoitu testien asennus ja riippuvuuksien hallinta. Testaustyökalu löytyy Ubuntu-yhteisön ohjelmavarastosta käyttöjärjestelmän 9.04 (Jantty Jackalope) versiosta lähtien. Ubuntu 9.10 (Karmic Koala) -käyttöjärjestelmän ohjelmavarasto sisältää työkalun 2.0.0 version.

Testien joukosta valittiin viisi tehtävään sopivaa ilmaista testiä. Testien tiedot on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Valitut testit.

| Testin nimi         | Testin kuvaus  |
|---------------------|--|
| <i>build-apache</i> | Ajastettu Apache-ohjelman käännös. Mittaa käännösprosessin nopeutta sekunneissa, kuormittaa sekä suorittamista että muistia. Pienempi tulos on parempi.  |
| <i>iozone</i>       | I/O-laitteiden testi. Mittaa tiedostojärjestelmän luku- ja kirjoitusnopeutta Megatavuina sekunnissa. Isompi tulos on parempi. Ellei käytetä RAID-tekniikka, testi riippuu virtuaalikoneen levykuvan sijainnista host-palvelimen kiintolevyssä. |
| <i>c-ray</i>        | Mittaa liukulukulaskennan suorituskykyä. Tulos saadaan sekunteina. Pienempi tulos on parempi   |
| <i>openssl</i>      | Mittaa salauksen suorituskykyä merkkeinä sekunnissa. Isompi tulos on parempi.  |
| <i>ramspeed</i>     | Mittaa järjestelmän muistin (RAM) nopeutta megatavuina sekunnissa. Isompi tulos on parempi.  |

Testien asennus Ubuntu-käyttöjärjestelmässä onnistuu apt-get-työkalun avulla. Ennen testien asennusta suositellaan gcc-paketin asennusta. Testaustyökalua asennetaan joko komentoriviohjelmana tai GUI-sovelluksena. Työkalun asennusskripti on listattu kuvassa 4.

```

sudo -i
apt-get install gcc
apt-get install phoronix-test-suite
proronix-test-suite list tests
proronix-test-suite install <testin nimi>
exit
sudo proronix-test-suite run <testin nimi>

```

Kuva 4. Testityökalun asennusskripti.

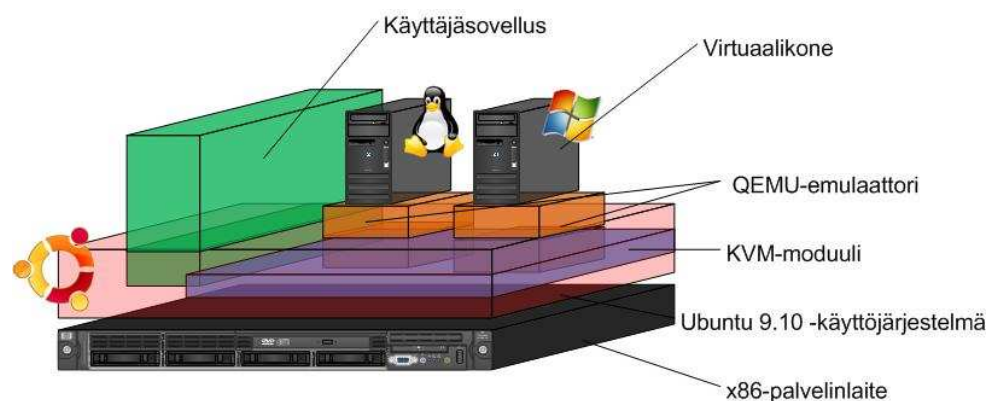
Skaalautuvuustestauksessa ei suoriteta näitä kaikkia testejä, koska testien suoritusajat stressitestauksessa kasvavat nopeasti. Esimerkiksi yhden virtu-

aalikoneen *build-apache* -testi kestää noin 12 minuuttia, mutta sama testi kymmenessä virtuaalikoneessa kestää noin tunnin. Prosessorin testien suorittaessa virtuaalisuorittimen käyttöaste on lähellä 100 %. Saatuja testituloksia voi vertailla muiden Linux-testaajien suorituksiin kansainvälisessä Phoronix Global -yhteisössä [14].

## 4 KVM-VIRTUALISOINTI

### 4.1 KVM-arkkitehtuuri

KVM (Kernel based Virtual Machine) on Linux-käyttöjärjestelmän moduuli, joka muodostaa hypervisorin host-palvelinlaitteen käyttöjärjestelmästä. KVM-moduuli ei ole täysvirtualisointiratkaisu, vaan osa isompaa virtualisointimenetelmää [15]. KVM-virtualisointiratkaisua alun perin kehitettiin israelilaisessa *Qumranet*-nimisessä yrityksessä, joka perustettiin vuonna 2005. Qumranet julkaisi oman virtualisointimoduulinsa koodin *Linux-kernel* sähköpostilistalle ja sponsoroi *linux-kvm* avoimen lähdekoodin projektia. KVM-moduuli sai huomiota Linux-yhteisöissä ja vuonna 2007 siitä tuli osa linux-kernelia. Vuonna 2008 Red Hat Inc. osti Qumranet:in. Red Hat -yhtiön aikaisemmat virtualisointiratkaisut toteutettiin Xen-hypervisorilla. Red Hat kehitti ja sponsoroi useita virtualisointia koskevia avoimen lähdekoodin projekteja kuten *libvirt* ja *Virtual Machine Manager*. *Libvirt* on sovellusliittymä, joka on yhteensopiva useiden avoimen lähdekoodin virtualisointiratkaisujen kanssa ja tarjoa kaikille työkaluille yhteisen virtualisointirajapinnan.



Kuva 5. QEMU-KVM-arkkitehtuuri

Virtual Machine Manager on graafinen hallintotyökalu, joka kehitettiin alun perin Xen-hypervisorille. Työkalu tukee edelleen Xen-hypervisorilla. Asennuksen jälkeen KVM-moduuli käynnistää *kvm-ajuri* /dev/kvm-kansiosta. Aju-

rin avulla host-käyttöjärjestelmän kerneli tukee guest-käyttöjärjestelmää. Jokaiselle virtuaalikoneelle varataan oma muistialue, joka on eristetty sekä toisten virtuaalikoneiden muistialueista että hypervisorin muistialueesta. Myös `/dev/kvm`-kansion polut ovat yksilöllisiä jokaiselle prosessille. Tämä eristää virtuaalikoneet toisistaan ja hypervisorista. KVM-moduuli käyttää Linux-kernelin työkaluja jakaessaan host-palvelimen resursseja virtuaalikoneille.

Virtuaalikone näkyy host-palvelinlaitteen käyttöjärjestelmälle tavallisena Linux-prosessina. Virtuaalikoneen koodia ajetaan suoraan host-palvelimen suorittimella, eikä virtuaalisuoritinta tarvitse emuloida. Koodin ajaminen keskeytetään, kun virtuaalikone käyttää muistia tai I/O (Input/Output) -laitteita. Muistinhallinta tehdään `kvm`-ajurin kautta ja I/O-laitteet emuloidaan modifioidun QEMU-emulaattorin avulla. Suorituskykyä nostetaan muun muassa poistamalla käyttämättömät laitteet virtuaalikoneen konfiguraatitiedostosta. Nämä parannukset joudutaan tekemään käsin. KVM-virtualisoinnin peruspaketti sisältää KVM-moduulin, QEMU-emulaattorin ja `kvm` ja `qemu` -komentorivityökalut. KVM-asennuspaketti löytyy `./linux/drivers/kvm`-kansiossa kernelin 2.6.20 versiosta alkaen. Asennuspaketti voi olla myös Linux-distribuution ohjelmavarastossa.

## 4.2 KVM Ubuntu Server 9.10 käyttöjärjestelmässä

### 4.2.1 KVM-moduulin asennus ja konfigurointi

KVM-hypervisorina voi toimia mikä tahansa linux-kerneliin pohjautuva käyttöjärjestelmä. Testiverkossa päätettiin käyttää hypervisorina 64-bittistä *Ubuntu Server 9.10* -käyttöjärjestelmää. KVM-moduuli asennetaan Ubuntu-yhteisön ohjelmavarastosta.

Ubuntu Server 9.10 asennettiin kaikille testiverkon tietokoneelle. Oletuksena palvelinkäyttöjärjestelmää asennetaan ilman työpöytäympäristöä. Ubuntu-distribuutio tukee kolme työpöytäympäristöä: GNOME (GNU Object Model Environment), KDE (K Desktop Environment) ja Xfce. Xfce on muita kevyempi ratkaisu ja sopii paremmin palvelinkäyttöön, mutta sillä on huonompi oikeudenhallinta. Jotta testiympäristön hallinta onnistuisi paremmin, testihypervisorille päätettiin asentaa työpöytäympäristö.

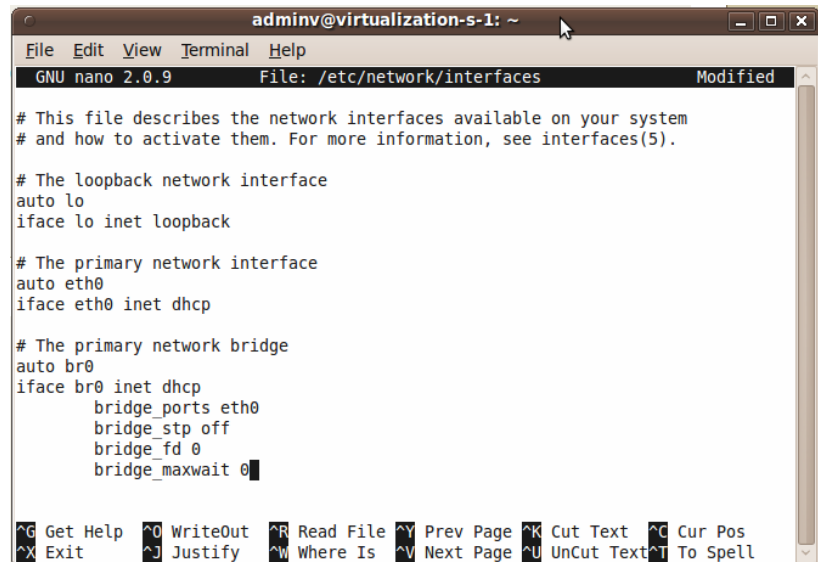
Testauksessa todettiin, että KVM-hallintaohjelmat (Convirt ja VirtManager) eivät toimi KDE-työpöytäympäristössä ilman, että asennetaan lisää sovelluskirjastoja (GTK-moduuli). Ongelma johtuu siitä, että GNOME- ja Xfce-työpöytäympäristöt käyttävät GTK+-käyttöliittymäkirjastoa, mutta KDE käyttää Qt-käyttöliittymäkirjastoa. Myös Xfce-ympäristössä todettiin ongelma hallintaohjelmien oikeuksien kanssa.

KVM-moduuli ei vaadi graafista käyttöliittymää. Siitä johtuen etäyhteyden avulla hallittavat palvelimet eivät tarvitse työpöytäympäristöä eikä graafista hallintaohjelmaa. KVM-asennus onnistuu Linux-terminaalissa komennolla `sudo apt-get install kvm ubuntu-vm-builder bridge-utils` [16]. Komennolla asennetaan seuraavat ohjelmistopakettit:

- *kvm* – (pakollinen) KVM-moduuli linux-kerneliin
- *libvirt-bin* – (suositeltava) virtualisoinnin API (Application Programming Interface)
- *ubuntu-vm-builder* – (valinnainen) komentorivipohjainen Ubuntu-yhteisön hallintatyökalu virtuaalikoneille
- *bridge-utils* – (pakollinen) paketti, jonka avulla rakennetaan virtuaalisilta hypervisorille.

Ubuntun 9.10 -versio lisää automaattisesti käyttäjän libvirt-hallintaryhmään, mutta se voidaan varmistaa komennolla `sudo adduser 'id -un' libvirt`. Tässä vaiheessa käyttöjärjestelmässä on vain KVM-moduuli ja *virsh*-komentoriviohjelma, jolla voidaan luoda ja hallita virtuaalikoneita. Virsh-ohjelman avulla testataan yhteys hypervisorin. Testaus tehdään komennolla `sudo virsh -c qemu:///system list`. Virsh-ohjelman "-c" valitsin tarkoittaa "connect", "list"-valitsin listaa järjestelmän virtuaalikoneet ja "qemu:///system" on libvirt-kirjastossa käytetty hypervisorin osoite (URI) [17]. Ellei tullut virheilmoitusta, asennus on onnistunut.

Jotta virtuaalikoneet pääsevät verkkoon, täytyy konfiguroida virtuaalisilta. Virtuaalisillan avulla jaetaan palvelinlaitteen fyysistä verkkokorttia. Kun virtuaalisillan ajuri on asennettu (*bridge-utils*), se voidaan konfiguroida ensisijaiseksi host-palvelimen verkkorajapinnaksi. Ubuntu-käyttöjärjestelmän verkkoasetukset määritellään *interfaces*-konfiguraatitiedostossa, joka sijaitsee `/etc/network/`-kansiossa (`sudo nano /etc/network/interfaces`).



```

adminv@virtualization-s-1: ~
File Edit View Terminal Help
GNU nano 2.0.9 File: /etc/network/interfaces Modified

# This file describes the network interfaces available on your system
# and how to activate them. For more information, see interfaces(5).

# The loopback network interface
auto lo
iface lo inet loopback

# The primary network interface
auto eth0
iface eth0 inet dhcp

# The primary network bridge
auto br0
iface br0 inet dhcp
    bridge_ports eth0
    bridge_stp off
    bridge_fd 0
    bridge_maxwait 0
  
```

Kuva 6. Sillan konfiguraatio.

Avattuun konfigurointitiedostoon lisätään br0-rajapinta ja sen konfigurointi-tiedot:

- *auto br0* – tarvitaan, jotta rajapinta käynnistyy automaattisesti
- *iface br0 inet dhcp* – pakotetaan siltä käyttää ulkoista DHCP-palvelinta
- *bridge\_ports eth0* – rajapinnat, jotka ovat sillassa mukana
- *bridge\_stp off* – poistetaan STP (Spanning Tree Protocol) - verkkoprotokolla käytöstä
- *bridge\_fd 0* – aika, jonka jälkeen eth0 liittyy siltaan
- *bridge\_maxwait 0* – odotusaika, jonka jälkeen eth0 siirtyy lähetystilaan [18].

Jotta muutokset astuvat voimaan, käynnistetään verkko uudelleen: *sudo /etc/init.d/networking restart*. Ubuntu-käyttöjärjestelmän silta tukee fyysisten verkkokorttien yhdistämistä (Network Interface Card teaming).

Virtualisointiympäristö on nyt asennettu. Virtuaalikoneita voidaan hallita virsh-komentorivityökalulla myös etäpalvelimilla ssh-yhteyden kautta. Ison virtualisointiklusterin hallinta komentorivityökalujen avulla on kuitenkin erittäin vaikea. Seuraavaksi käsitellään graafiset käyttöliittymälajennukset KVM-hypervisorille.

#### 4.2.2 Convirt-hallintaohjelma

Convirt on XenMan avoimen koodin projektissa syntynyt intuitiivinen GUI (Graphical User Interface) Xen ja KVM -virtualisointialustoille. Convirt-

ohjelmaa kehittää ja sponsoroi Convirture IT -yritys. Convirture IT perustettiin vuonna 2006. Convirt-ohjelmasta on sekä ilmainen (Convirt 2.0 Open Source) että kaupallinen (Convirt 2.0 Enterprise) versio. Enterprise-versio oli työn kirjoittamisen hetkellä vielä kehitysvaiheessa.

Convirt-ohjelma kommunikoi KVM:n kanssa oman API(Application Programming Interface) -kirjastonsa kautta. Ohjelmasta on kaksi versiota: työpöytäsovellus (Convirt 1.1) ja web-sovellus (Convirt 2.0). Convirt 2.0 edellyttää Convirt 1.1 -ohjelman asennusta.

### Asennus

Convirt-ohjelma vaatii seuraavat paketit käyttöliittymää varten:

- *python-gtk2* – python API GTK+-ohjelmakirjastolle
- *python-glade2* – python API Glade-ohjelmakirjastolle
- *python-vte* – python API pseudo-termiinalille.

Nämä paketit tulee asentaa ennen Convirt-hallintaohjelman asentamista. Asennus tehdään hypervisorin komentoriviä käyttäen seuraavasti:

```
sudo -i
cd /tmp
wget --no-cache http://www.convirture.com/repos/convirture\_packaging\_pub\_key
apt-key add convirture_packaging_key
cd /etc/apt/sources.list.d
wget --no-cache http://www.convirture.com/repos/definitions/ubuntu/9.x/convirt.list
apt-get update
apt-get build-dep convirt
apt-get -b source convirt
apt-get install convirt
/usr/share/convirt/install/managed_server/scripts/convirt-tool setup
exit
sudo convirt
```

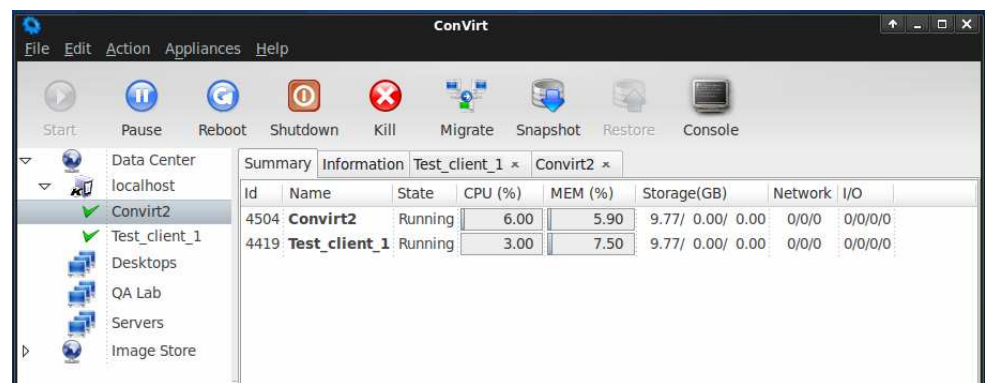
Kuva 7. Convirt 1.1 -ohjelman asennusskripti.

Ensin rekisteroidaan Convirturen ohjelmavarasto (repository) Ubuntu *apt-get*-asennusohjelmassa. Sitten rakennetaan pakettiriippuvuudet, käännetään koodia ja asennetaan ohjelmaa [19]. Asennusta valmistellaan convirt-tool-työkalun avulla.

Asennuksen jälkeen voidaan provisioida virtuaalikoneita ja lisätä hallittavia palvelimia. Virtuaalikoneen provisiointi tehdään valitsemalla levykuvaryhmä

(esimerkiksi *Common*) ja levykuvan tyyppi (esimerkiksi *Linux\_CD\_Install*). Sen jälkeen valitaan uuden virtuaalikoneen sijainti ja provisioidaan se joko isäntäkoneen DVD-asemalta tai levykuvalta.

Convirt 2.0 on virtuaalikone, jossa on Ubuntu-käyttöjärjestelmä, web-palvelin ja AJAX-käyttöliitymä Convirt-ympäristölle. Virtuaalikone asennetaan Convirt 1.1 -ohjelman avulla. Ylävalikosta valitaan *Appliances* -> *Import*, jonka jälkeen virtuaalikonelistalta valitaan *Convirt 2.0*. Sen jälkeen Convirt 1.1- alusta lataa virtuaalikoneen esiasennettua levykuvaa. Testiympäristössä latauksessa tapahtui virhe, jonka ratkaistiin lataamalla levykuvaa uudelleen. Kun levykuva on ladattu, se ilmestyy valitun levykuvien ryhmän alla (testiympäristössä se oli *Common*-ryhmä).



Kuva 8. Convirt 1.1 -hallintaohjelma Xfce-työpöytäympäristössä.

Provisiionin jälkeen käynnistetään virtuaalikone. Virtuaalikoneella ei ole graafista työpöytäympäristöä. Virtuaalikoneen käyttäjätunnus on convirt ja salasana on convirt. Kirjaudutaan sisään virtuaalikoneelle ja tarkistetaan sen IP-osoitetta *ifconfig*-komennolla (esimerkiksi 10.95.1.22). Virtuaalikoneen pitäisi saada IP-osoite DHCP-palvelun kautta. Tarvittaessa voidaan myös konfiguroida virtuaalikoneeseen kiinteä IP-osoite. Sen jälkeen mennään *convirt*-kansioon (*cd ~/convirt*) ja käynnistetään web-rajapintaa (*./convirt-ctl start*). Hallintakoneessa avataan selain ja mennään osoitteeseen <http://10.95.1.22:8081> [20].

#### Palvelinten etähallinta

Etäpalvelimelle asennetaan ensin kvm-alusta. KVM-moduulin lisäksi asennetaan seuraavat paketit:

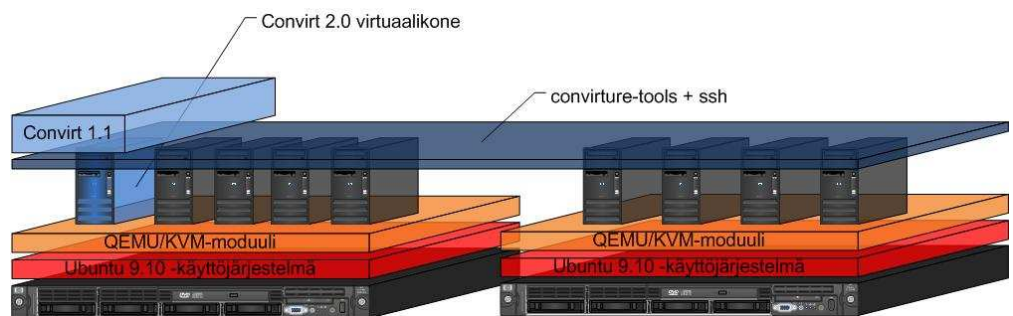
- *ssh* – SSH-protokollan tuki



- *socat* – CLI-työkalu (SOcket CAT), joka muodostaa verkkoyhteys laitteiden välillä
- *dnsmasq* – DNS- ja DHCP-työkalu, jolla etsitään etälaite verkossa.
- *uml-utilities* – *user-mode linux* virtualisointi API
- *lvm2* – tiedostojärjestelmän työkalu.

SSH-paketti yleensä sisältyy jo käyttöjärjestelmään. Socat- ja dnsmasq-paketit ovat pakollisia. Seuraavaksi ladataan *convirture-tools*-työkalupaketti (<http://www.convirture.com/downloads/convirture-tools/1.1> tai <http://www.convirture.com/downloads/convirture-tools/2.0>, riippuen tavasta, jolla hallitaan ympäristöä jatkossa) ja puretaan se sopivaan paikkaan tiedostojärjestelmässä. Sen jälkeen mennään `/convirture-tools/install/managed_server/scripts`-kansioon ja suoritetaan `sudo convirture-tools setup` -komento. Ellei tule virheilmoituksia, palvelin on valmis käytettäväksi.

Ennen kuin lisätään palvelin Convirt-ympäristöön, täytyy testata ssh-yhteys etäpalvelimelle. Jos etäpalvelimen IP-osoite on esimerkiksi `10.95.1.25`, ja käyttäjätunnus on `admin`, ssh-yhteys otetaan komennolla `sudo ssh -l admin 10.95.1.25`. Convirt-ohjelmat toimivat pääkäyttäjän oikeuksilla, muuten etäyhteys ei onnistuu (`errno 13: Permission denied`). Ubuntu-käyttöjärjestelmässä oletuksena pääkäyttäjän tiliä ei ole. Pääkäyttäjän (root) tili otetaan käyttöön `sudo passwd root` -komennolla. Sen jälkeen uuden käyttäjätilin toimivuutta tarkistetaan uudelleen (`sudo ssh -l root 10.95.1.25`). Jatkossa käytetään tätä käyttäjätiliä vain etähallintaa varten.



Kuva 9. Convirt-ympäristön arkkitehtuuri.

Uuden palvelimen asennus on helppo. Ensin valitaan ryhmä (*Desktops*, *QA Labs*, *Servers*), jonka alle lisätään palvelin. Sitten painetaan oikea hiiren nappulaa ja annetaan uuden palvelimen tiedot. Virtuaalikoneen lisääminen etäpalvelimella onnistuu samalla tavalla kuin isäntäkoneellakin.

Convirt-hallintaohjelma tukee sekä NAS (Network Attached Storage) että SAN (Storage Area Network) verkkotallennusta. Työkalun avulla voidaan tehdä monipuollista virtualisointiympäristön monitorointia. Convirt 2.0 -hallintaohjelman ansiosta ympäristön hallinta onnistuu mistä tahansa työasemasta. Ympäristön suurin ongelma on se, että Convirt 1.1 -ohjelmalla luotuja virtuaalikoneita ja etäpalvelimia ei näy heti Convirt 2.0 -ohjelmassa. Virtuaalikoneet ja etäpalvelimet täytyy ensin konvertoida sopivaan muotoon. Virtuaalikoneiden hallinta työkalussa ei ole läpinäkyvää eikä konfiguraatio-tiedostoista löydy riittävästi tietoja. Convirt-tuoteperhe ei tue virtuaalikoneiden migraatiota virtualisointialustojen välillä.

#### 4.2.3 *Virtual Machine Manager -hallintaohjelma*

*Virtual Machine Manager* (VirtManager) on Red Hatin tukema avoimen lähdekoodin projekti, jonka tarkoitus on tarjota graafinen käyttöliittymä Xen- ja KVM-virtualisointialustoille. VirtManager tukee KVM-virtualisointia versiosta 0.3.1 (21.2.2007) lähtien. Uusin ohjelman versio on 0.8.4 (24.3.2010). Ohjelman logiikka on toteutettu Python-ohjelmointikielellä, käyttöliittymä on rakennettu GTK+-käyttöliittymäkirjastolla. Virt-Manager sisältää VNC-asiakassovelluksen, jolla tehdään yhteys virtuaalikoneen käyttöjärjestelmään. VirtManager kommunikoi virtualisointialustan kanssa *libvirt*-sovellusliittymän kautta. Ohjelmaa pidetään vielä eksperimentaalisena.

Libvirt on työkalupakki, jonka avulla voidaan kommunikoida Linux-virtualisointialustojen kanssa (Xen, KVM, UML jne.). Libvirt-sovellusliittymä on toteutettu C-ohjelmointikielellä. Työkalu tukee yleisimpiä ohjelmointikieliä. Libvirt-sovellusliittymän tarkoitus on tarjota yhteinen standardi avoimen lähdekoodin virtualisointityökaluille. Kaikki libvirt-kirjastoa tukevat virtualisointityökalut ovat yhteensopivia keskenään. Projektin sponsori on Red Hat Inc. Libvirt enkapsuloi virtuaalikoneen asetukset XML (eXtensible Markup Language) -konfiguraatitiedoston avulla (ks. liite 1). Konfiguraatitiedosto sisältää tiedot virtuaalikoneen asetuksista ja laitteistosta (ks. liite 1). Konfiguraatitiedosto löytyy */etc/libvirt/qemu*-kansioista. Tiedostoa voidaan muokata esimerkiksi virsh-työkalun avulla. Virtuaalikoneen kiintolevy enkapsuloidaan QEMU-emulaattorin levytiedostoon. QEMU tukee useita tiedostojen muotoja. Taulukkoon 4 koottiin kaikki QEMU-emulaattorin tukemat levytiedostotyytit.

Taulukko 4. QEMU-emulaattorin levytiedostotyypit.

| Tiedostotyyppi                        | Tiedoston kuvaus   |
|---------------------------------------|--|
| .vmdk                                 | VMwaren virtuaalikoneen levytiedosto   |
| .raw                                  | Oletustyyppi kaikille levytiedostolle  |
| .bochs                                | Bochs-emulaattorin levytiedosto  |
| .qcow, .qcow2<br>(QEMU Copy on Write) | QEMU-emulaattorin levytiedosto. Tukee dynaamista kasvattamista ja snapshot-varmistusta |
| .dmg                                  | Macintosh-levytiedosto   |
| .cloop                                | Linux compressed loop  |
| .vpc                                  | MS Virtual PC  |
| .iso                                  | CD/DVD-levykuva  |

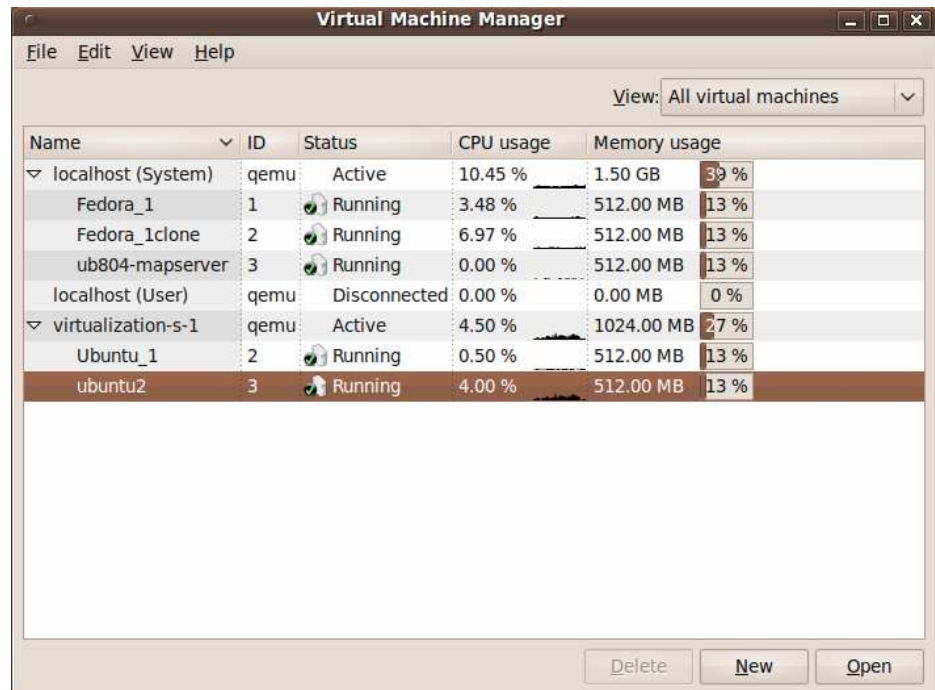
Oletustallennuspaikka levytiedostoille on `/var/lib/libvirt/images`. Libvirt tukee myös NFS (Network File System) ja iSCSI (Internet Small Computer System Interface) -tallennukset. Hypervisorille pystyy konfiguroimaan useampi tallennuspaikka.

Oletuksena kvm-hypervisorin käyttää tietoturvaratkaisuna Security Enhanced Linux (SELinux) -moduulia. SELinux on tietoturvalaajennus Linux-käyttöjärjestelmien ytimelle, joka hallitsee järjestelmän oikeuksia *Mandatory Access Control* (MAC) -mallin mukaisesti. MAC-malli tarjoa muun muassa paremman eristyksen prosessien välillä. Toinen tapa parantaa hypervisorin tietoturvaa on ottaa käyttöön libvirt-sovellusliittymää. Sovellusliittymän sVirt-paketti muokkaa SELinuxia sopimaan virtualisoinnin tarpeisiin. Paketti parantaa muun muassa virtuaalikoneiden eristystä toisistaan.

#### *Asennus ja kokoonpano*

*Virt-manager* -asennuspakettia voidaan ladata sekä Ubuntu-yhteisön sivulta (0.7.0 versio) että ohjelman omalta kotisivulta (0.8.4 versio). Kummassakin tapauksessa ohjelmaa täytyy asentaa ja ajaa pääkäyttäjän oikeuksilla. Seuraavaksi asennetaan *virtinst*-paketti. Paketti sisältää *virt-clone*, *virt-install* ja *virt-convert* -työkalut. Ubuntu-yhteisöllä on myös oma paketti, joka helpottaa virtualisoidun ympäristön hallinnan. Paketin nimi on *virt-goodies*. Paketti sisältää skriptin, jonka avulla tehdään virtuaalikoneen konfigurointitiedoston konvertointi. Paketin asennus Ubuntu-yhteisön pakettivarastosta tehdään komennolla `sudo apt-get install virt-manager virtinst virt-goodies`.

Mikäli asennus tehtiin Ubuntuun pakettivarastossa, Virt-Manager-ohjelma käynnistetään *Applications > System Tools > Virtual Machine Manager* -valikon kautta.



Kuva 10. Virt-Manager-ohjelman pääikkuna GNOME-ympäristössä.

Ohjelman pääikkunassa listataan yhteydet hypervisoriiin. Kuvassa 10 niitä on kolme: *localhost(System)* on QEMU-KVM-yhteys paikallisella koneella, *localhost(User)* on QEMU-UML (User Mode Linux) -yhteys paikallisella koneella ja *virtualization-s-1* on QEMU-KVM-yhteys hypervisoriiin, joka sijaitsee toisella KVM-isäntäkoneella. Uusi virtuaalikone provisoidaan painamalla "New"-painiketta. Virtuaalikoneen ikkunassa määritetään virtuaalikoneen konfiguraatiot, jotka ovat virtuaalikoneen

- asennusmedia (levykuvan sijainti tai isäntäkoneen levyasema)
- käyttöjärjestelmän tyyppi
- suorittimien määrä (rajoitettu, ei salli enemmän suorittimia, kuin isäntäkoneella on)
- muistin määrä
- levykuvan koko
- levykuvan sijainti.

Sen jälkeen asennetaan virtuaalikoneen käyttöjärjestelmä normaalisti. Etäpalvelinten hallinta onnistuu libvirt-ympäristössä helpommin kuin Convirt-

ympäristössä. Etäpalvelimelle asennetaan vain kvm, ssh ja libvirt-paketit ja luodaan pääkäyttäjän tili samalla tavalla kuin tehtiin aikaisemminkin Convirt-ympäristössä. Kone lisätään verkkoon joko libvirt-demonin avulla (tunnistaa automaattisesti kaikki libvirt-koneet verkossa) tai IP-osoitteen kautta.

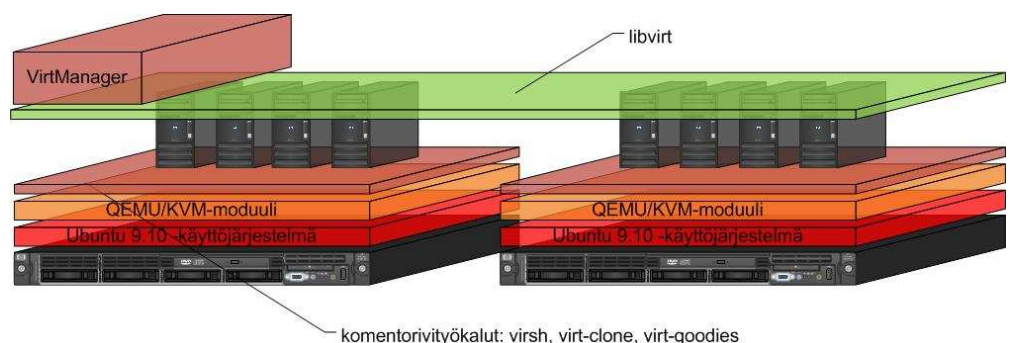
### *Virtuaalikoneiden kloonaukseen ja konvertointiin*

Virtinst-pakettiin sisältyy *virt-clone*-komentorivityökalu. Työkalu on yhteensopiva libvirt-kirjaston kanssa eikä vaadi mitään konfigurointia. Työkalun käyttö on helppo. Host-palvelimen komentorivissä kirjoitetaan *virt-clone* ja painetaan *Enter*-näppäintä.

```
adminv@virtualization-s-main:~$ sudo virt-clone
What is the name of the original virtual machine? ubuntu-testipalvelin-1
What is the name for the cloned virtual machine? ubuntu-testipalvelin-15
What would you like to use as the cloned disk (file path) for '/var/lib/libvirt
/images/ubuntu-testipalvelin-1.img'? /var/lib/libvirt/images/ubuntu-testipalvelin-15.img
Cloning /var/lib/libvirt/ 100% |=====| 8.0 GB    01:31
Clone 'ubuntu-testipalvelin-15' created successfully.
```

*Kuva 11. Virtuaalikoneen kloonaukseen virt-clone -ohjelman avulla*

Työkalu kysyy mikä virtuaalikone halutaan kloonata, mikä on uuden virtuaalikoneen nimi ja mihin ja millä nimellä tallennetaan uuden virtuaalikoneen levytiedosto (ks. kuva 11). Ennen kloonaukseen virtuaalikone pitää sammuttaa. Virt-clone luo täysin identtinen virtuaalikone, jonka asetukset (staattinen ip-osoite, dns-nimi jne.) täytyy korjata jälkepäin.



*Kuva 12. Libvirt-ympäristön arkkitehtuuri.*

QEMU-emulaattori tukee lähes kaikkia mahdollisia levytiedostotyyppisiä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että KVM-hypervisor pystyy ajamaan toisen alustan virtuaalikoneita, jos sillä on yksi levytiedosto ja virtuaalikoneen käyttöjärjestelmän käynnistysosio löytyy samalta levytiedostolta. Konfiguraatiotiedosto joudutaan konvertoimaan. Esimerkiksi VMwaren virtuaalikoneen

konvertointi tehdään Ubuntu-hypervisorissa *virt-goodies*-paketin avulla. Konvertointi edellyttää VMwaren *vmx*-konfiguraatitiedostoa ja *vmdk*-levytiedostoa. Vmx-tiedosto kopioidaan */etc/libvirt/qemu*-kansioon ja vmdk-tiedosto kopioidaan kansioon, jossa jatkossa varastoidaan virtuaalikoneen levytiedosto. Sen jälkeen konvertoidaan tiedostot. Konvertoinnin jälkeen avataan uuden virtuaalikoneen xml-tiedosto ja tarkistetaan virtuaalikoneen asetuksia. Konvertointityökalu seuraa libvirtin *xml-schemaa* ja siirtää kaikki asetukset mitkä pystyy. Jos pakollisia asetuksia ei voida siirtää, ne luodaan oletuskonfiguraatiosta (*default.xml*).

```
sudo -i
vmware2libvirt -f ./tiedosto.vmx > tiedosto.xml
qemu-convert levynnimi.vmdk -O qcow2 levynnimi.img
vi tiedosto.xml
virsh -c qemu:///system define tiedosto.xml
exit
```

Kuva 13. Konvertointiskripti.

Käytännössä korjataan verkkoasetukset ja levykuvan polku (ks. liite 2). Korjauksien jälkeen uusi virtuaalikone rekisteroidaan hypervisorissa, jonka jälkeen uusi virtuaalikone on valmis.

#### *NFS-palvelimen konfigurointi*

Yksinkertaisin tapa helpottaa virtualikoneiden hallintaa ja provisiointia on jaettu verkkolevy. Ubuntu-käyttöjärjestelmässä paikallista palvelimen kansiota voidaan jakaa NFS (Network File System)-palvelun kautta. NFS-palvelu edellyttää NFS-palvelinohjelman ja NFS-asiakasohjelman. Esimerkki NFS-palvelun asennuksessa ja konfiguroinnissa Ubuntu-käyttöjärjestelmässä on kuvassa 14.

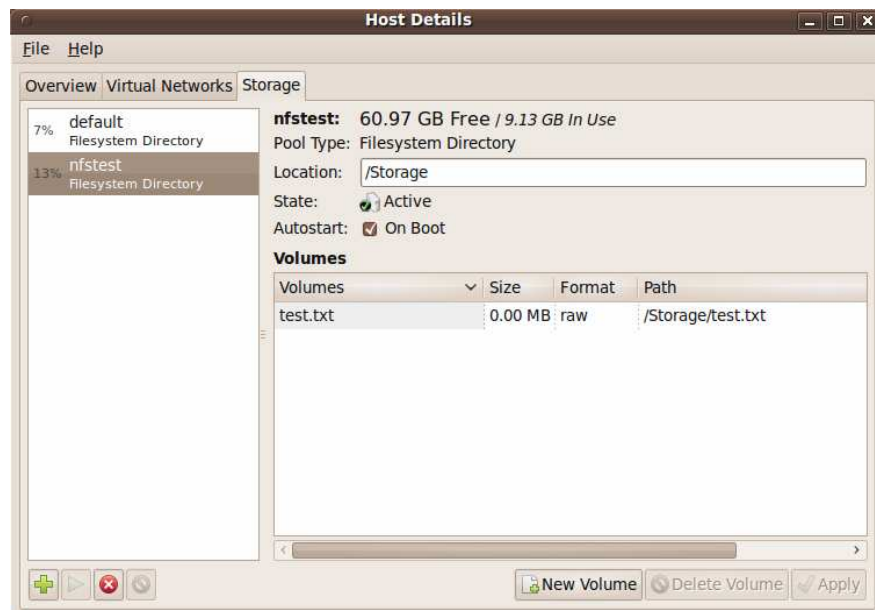
```

**palvelimen asennus ja konfigurointi**
sudo -i
apt-get install nfs-kernel-server
nano /etc/exports
        /STORAGE * (rw, sync, no_subtree_check)
/etc/init.d/nfs-kernel-server start
exit
**asiakkaan asennus ja konfigurointi**
sudo -i
apt-get install nfs-common
mount <NFS-palvelimen ip>:/STORAGE /Storage
exit

```

Kuva 14. NFS-palvelun asennus ja konfigurointi

Kun NFS-palvelu on asennettu, uusi resurssi voidaan rekisteröidä Virt-Manager-hallintaohjelmassa. Rekisteröintiä voidaan tehdä kahdella tavalla. Toinen tapa on rekisteröidä liitetty kansio, mikä on tässä esimerkissä `/Storage`-kansio asiakas-palvelimessa. Toinen tapa on rekisteröidä NFS-palvelimella jaettu kansio, mikä on tässä esimerkissä `/STORAGE`-kansio NFS-palvelimessa.



Kuva 15. NFS-palvelun liittäminen virtualisointityökaluun

Jaettu kansio liitetään *Host Details* -ikkunan kautta, jossa valitaan *Storage*-välilehti. Sitten painetaan *New Volume* -painiketta ja uudessa ikkunassa tarkennetaan uuden tallennuspaikan asetukset. Samalla tavalla voidaan yhdistää virtualisointityökalu ja verkkolevy *iSCSI (Internet Small Computer System Interface)* tai (Fibre Channel) -tekniikan avulla.

### *Klusterointi ja monitorointi*

Convirt-työkalun hyvät puolet ovat monitorointi ja web-rajapinta, jonka ansiosta virtualisointialustaa voidaan hallita mistä tahansa työasemalta. Työkalulla on kaksi versiota. Open Source -versio oli käsitelty aikaisemmin. Convirt Enterprise 2.0 Beta -versiosta tulee aikanaan kaupallinen versio. Kaupallisen version tärkeämmät ominaisuudet ovat

- dynaaminen resurssien jakaminen (kuorman jako host-palvelimien välillä)
- korkea käytettävyys sekä host-palvelimelle että virtuaalikoneille
- työkaluun sulautettu varmistus ja palautus (ajastettu varmistus)
- automatisointi ja VLAN (Virtual Local Area Network) -tuki
- hälytykset ja tiedotteet. [21].

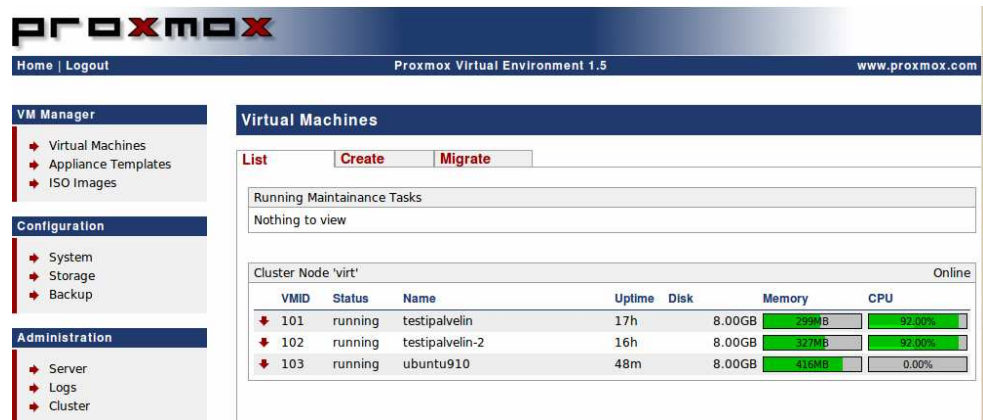
Tuotteen mahdollisesta hinnasta ei ole vielä mitään tietoa.

Avoimen lähdekoodin VirtManager on aivan sama kuin kaupallisessa Red Hat Enterprise Linux -käyttöjärjestelmässä, mutta VirtManager-tuotteella ei ole web-rajapintaa eikä sisään rakennettua monitorointityökalua. VirtManager tarjoaa huomattavasti enemmän ominaisuuksia libvirt-sovellusliittymän kautta kuin Convirt-hallintaohjelma. VirtManager virtualisointityökalun rinnalla voidaan käyttää muita avoimen lähdekoodin projekteja. Esimerkiksi monitorointiin voidaan käyttää *Nagios3*-verkonvalvontajärjestelmää [22, s. 273]. Korkeaa saatavuutta taataan *Beowulf*-klusterilla [22, s. 6] ja varmistukset tehdään *Amanda*-varmistustyökalua [22, s. 338]. Virtualisointiympäristön automatisointia toteutetaan *Cfengine*-työkalulla, joka on yhteensopiva *Amanda* ja *Beowulf* -työkalujen kanssa. Klusterin työkaluja ei tarvitse aina konfiguroida erikseen, vain yhä useammin ne tulevat yhdessä paketissa. Avoimen lähdekoodin puolelta löytyy paljon valmiita verkonhallintatyökaluja. KVM-virtualisointityökalun kanssa voidaan käyttää *OpenQRM* ja *AbiCloud* -ohjelmia. Työkaluihin voi lisätä esimerkiksi *Nagios*-tukea tarvittaessa. Molemmat työkalut tukevat KVM-virtualisointia, mutta *AbiCloud*-työkalu tukee myös libvirt-sovellusliittymää. Työkalujen asennus edellyttää avoimen lähdekoodin relaatiotietokannan asennusta (esimerkiksi *MySQL*).



### 4.3 Proxmox Virtual Environment

Proxmox VE on avoimen lähdekoodin projekti, joka kehittää ja ylläpitää saksalainen Proxmox Server Solutions -yhtiö. Virtualisointityökalu toimitetaan natiivi hypervisorina. Proxmox-hypervisor sisältää tukea Open VZ ja KVM -virtualisoinnille. Dom0-konsoli on modifioitu 64-bittinen Debian Lenny -käyttöjärjestelmä. Dom0-käyttöjärjestelmässä on web-sovellus, jonka avulla host-palvelinta voidaan hallita työasemalla. Proxmox-ympäristöä voidaan hallita Linux- ja Windows-työasemilla. Ainoa edellytys hallintatyöasemalle on selainohjelma ja sun-java6-plugin asennettuina. Työkalu tukee *raw* ja *vmdk* virtuaalikoneiden levykuvien muodot. Dom0-käyttöjärjestelmää ylläpidetään samalla tavalla kuin tavallista Linux-palvelinta.



Kuva 16. Ubuntu-testipalvelimet Proxmox-ympäristössä.

Proxmox VE:n asennus on helppo eikä vaati erillistä verkkoasetusten konfigurointia. Työkalu sisältää varmistus- ja klusterointiratkaisut, jotka hallitaan dom0-käyttöjärjestelman komentorivin kautta. Host-palvelinten klusteria voi hallita vain ottamalla klusterointityökalu käyttöön. Vaikka työkalun kokoonpano ja käyttöliittymä ovat hyvät verrattuna muiden avoimen lähdekoodin työkaluihin, sen suorituskyky on huomattavasti huonompi.

## 5 KAUPALLISET VIRTUALISOINTIRATKAISUT

### 5.1 VMware ESXi Server ja vSphere Client 4.0

VMwaren ESX-tuoteperhe on suhteellisen vanha. Ensimmäinen versio ESX-virtualisointipalvelimesta julkaistiin maaliskuussa 2001 [23, s. 16]. ESX Server koostuu VMKernelista, Console Operating System (COS)-järjestelmästä ja VMFS (Virtual Machine File System) -tiedostojärjestelmästä. VMKernel

on VMM-sovellus, joka hallitsee isäntäkoneen laitteistoa. VMKernelilla on modulaarinen rakenne. VMKernel sisältää myös sovellusliittymät, joiden avulla muut ohjelmistovalmistajat voivat kehittää laajennuksia ESX-ympäristölle. COS on modifioitu RHEL 3 –käyttöjärjestelmä, jonka tarkoitus on hallita ja monitoroida virtuaalikoneita. [23, s. 17]. ESX-palvelimen virtuaalikone koostuu useammasta tiedostosta. Virtuaalikoneella voi olla useampi levykuva.

Taulukkoon 5 on koottu yleisimmät virtuaalikoneen tiedostotyypit VMware-virtualisointiympäristössä .

*Taulukko 5. VMware-virtuaalikoneen tiedostotyypit.*

| Tiedostotyyppi | Tiedoston tarkoitus                               |
|----------------|---|
| flat.vmdk      | yhdistetty levykuva                               |
| vmdk           | levykuva tai tiedot virtuaalikoneen kiintolevystä |
| nvram          | virtuaalikoneen BIOS                              |
| vmsd           | snapshot-varmistusten tietokanta                  |
| vmx            | konfiguraatitiedosto                              |
| log            | virtuaalikoneen lokitiedosto                      |
| delta.vmdk     | levykuvan snapshot                                |
| vmsn           | virtuaalikoneen tila (snapshot-varmistus)         |

Virtuaalikoneen konfiguraatitiedoston nimi on yleensä tyyppiä <virtuaalikoneen nimi>.vmx. Muut tiedostot noudattavat samaa periaatetta.

VMware ESXi on kevennetty ESX-virtualisointipalvelin. Sen hypervisorin (Vmkernel tai VMvisor) koko on vain 32 Mt. ESXi-palvelin käyttää dom0-järjestelmänä BusyBox-Linuksia, joka on huomattavasti kevyempi, kuin RHEL. ESXi-hypervisor on kevyempi ja nopeampi kuin vanha ESX-palvelin. ESXi-hypervisorilla on ilmainen lisenssi, joka vaatii kuitenkin tuotteen rekisteröintiä. Hypervisorin kanssa tulee myös ilmainen vSphere ESXi -etähallintaohjelma. vSphere Client edellyttää Windows-työasemaa. Työkalun avulla pystyy hallitsemaan vain yhden ESXi-palvelimen kerrallaan. Työkalulla on myös muita rajoituksia, esimerkiksi se näyttää monitorointitiedot vain viimeisestä tunnista.

VMwarella on laaja tuotevalikoima. VMware-hallintaympäristö sisältää vSphere ja vCenter Server -tuotteet. Tuotteista on olemassa useita eri versioita. ESXi-palvelimen lisenssejä voi ostaa vSphere-tuotteen kanssa. vSphere sisältää erilaisia työkaluja. Esimerkiksi VMSafe-työkalun avulla saadaan parannettua virtualisointityökalun tietoturva.

Talulukkaan 6 koottiin VMware vSphere 4.0 hallintatyökalun versiot ominaisuuksineen. HA (High Availability) -työkalun avulla konfiguroidaan korkeaa käytettävyyttä, VMotion-työkalulla siirretään virtuaalikoneet host-palvelinlaitteiden välillä ja DRS (Distributed Resource Scheduler) -työkalun avulla automatisoidaan virtualisointiklusterin toimintaa.

Taulukko 6. VMware vSphere –hallintatyökalun versiot.

| Lisenssityyppi          | vCenter<br>lisenssi | VMSafe | Ominaisuudet |         |     |
|-------------------------|---------------------|--------|--------------|---------|-----|
|                         |                     |        | HA           | VMotion | DRS |
| ESXi                    | -                   | -      | -            | -       | -   |
| vSphere Essentials      | <i>sisältyy</i>     | +      | -            | -       |     |
| vSphere Essentials Plus | <i>sisältyy</i>     | +      | +            | -       | -   |
| vSphere Standard        | <i>ei sisälly</i>   | +      | +            | -       | -   |
| vSphere Advanced        | <i>ei sisälly</i>   | +      | +            | +       | -   |
| vSphere Enterprise      | <i>ei sisälly</i>   | +      | +            | +       | +   |
| vSphere Enterprise Plus | <i>ei sisälly</i>   | +      | +            | +       | +   |

vSphere Essentials -tuotteella voidaan hallita enintään kolmea host-palvelinta. Jokaisella palvelimella voi olla korkeintaan kaksi fyysistä suorittinta (sokettia) ja yhdellä suorittimella korkeintaan kuusi ydintä. vCenter Server Foundation -versiolla on samat rajoitukset. Tuotteet eroavat huomattavasti ominaisuuksillaan. Esimerkiksi korkeaa saattavuutta tuetaan Essential Plus -versiosta alkaen ja VMotion-työkalu (live-migration) on käytettävissä Advanced-versiosta alkaen.

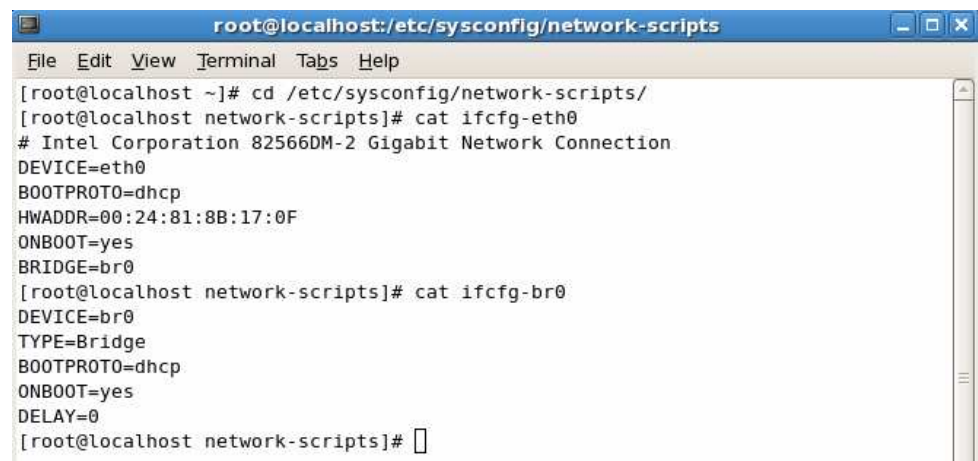
VMwaren tuotteille on tarjolla paljon laajennuksia kumppaneilta. Laajennukset parantavat joitakin ESX-tuoteperheen ominaisuuksista. Esimerkiksi Veeam Software tarjoaa Veeam Monitor ja Veeam Backup & Replication tuotteita. Veeam Monitor on monipuolinen monitorointityökalu, jonka avulla kerätään tiedot host-palvelinten, virtuaalikoneiden ja tallennuspaikkojen käyttöasteesta ja suorituskyvystä. Työkalun avulla konfiguroidaan hälytykset ja seurataan palvelutasosopimukset. Tuotteesta on myös ilmainen versio. Veeam lisenssi ostetaan jokaiselle host-palvelimen fyysiselle suorittimelle. VMware Consolidated Backup -työkalu sisältyy Essential Plus, Advanced, Enterprise ja Enterprise Plus vSphere-versioihin. Ellei osteta kyseisiä versioita, joutuu turvautumaan toisen valmistajan varmistusratkaisuun.

## 5.2 KVM Red Hat Enterprise Linux 5 -käyttöjärjestelmässä

Red Hat -käyttöjärjestelmät tukevat Xen- ja KVM-virtualisointitekniikkaa. Red Hat Enterprise Linux -palvelinkäyttöjärjestelmää asennettaessa valitaan pal-

velimen rooli ja asennettavat ohjelmistopakettit. Valitaan virtualisointi-rooli ja tarkennetaan, että kyseessä on KVM-virtualisointi. Asennusohjelma tarjoaa 18 pakettia asennettavaksi, joista neljä ovat pakollisia. Kun palvelimen rooli on valittu, voidaan jatkaa asennusta. KVM-moduulia voidaan asentaa myös käyttöjärjestelmän asennuksen jälkeen. Red Hat tarjoaa myös pelkän hypervisorin asennettavaksi host-palvelimelle. tuotteen nimi on Red Hat Enterprise Virtualisation Hypervisor (RHEV).

Samalla tavalla kuin Ubuntu-käyttöjärjestelmässäkin, RHEL edellyttää virtuaalisillan konfigurointia. Konfigurointi menee eri tavoin. RHEL-käyttöjärjestelmässä jokaisella verkkorajapinnalla on oma konfiguraatitiedosto. Ennen kuin käyttöjärjestelmää pystyy konfiguroimaan, sen täytyy rekisteröidä Red Hat -verkossa, jotta palvelin pystyy saamaan päivityksiä. Ilman rekisteröintiä käyttöjärjestelmässä ei voida tehdä juuri mitään.



```

root@localhost:/etc/sysconfig/network-scripts
File Edit View Terminal Tabs Help
[root@localhost ~]# cd /etc/sysconfig/network-scripts/
[root@localhost network-scripts]# cat ifcfg-eth0
# Intel Corporation 82566DM-2 Gigabit Network Connection
DEVICE=eth0
BOOTPROTO=dhcp
HWADDR=00:24:81:8B:17:0F
ONBOOT=yes
BRIDGE=br0
[root@localhost network-scripts]# cat ifcfg-br0
DEVICE=br0
TYPE=Bridge
BOOTPROTO=dhcp
ONBOOT=yes
DELAY=0
[root@localhost network-scripts]#

```

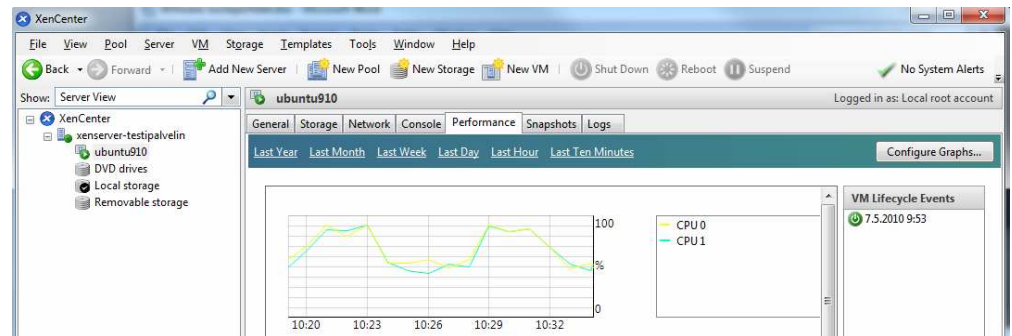
Kuva 17. Sillan konfigurointi RHEL 5 -käyttöjärjestelmässä.

Virtuaalisillan konfigurointi aloitetaan luomalla *ifcfg-br0*-konfiguraatitiedosto. Sitten rekisteröidään uusi silta aktiivin verkkorajapinnan konfiguraatitiedostossa, jonka nimi on *ifcfg-eth0*. Lopuksi käynnistetään verkko uudelleen komennolla *service networking restart*. RHEL-virtualisointipalvelin käyttää *libvirt*-kirjastoa ja Virtual Machine Manager -ohjelmaa. Virtuaalikoneiden luonti ja asennus menee samalla tavoin kuin Ubuntu-käyttöjärjestelmässä. Virtualisointipalvelimelle voidaan asentaa Red Hat Cluster Suite -työkalua, jonka avulla rakennetaan virtualisointiklusteri. Host-palvelimia voidaan hallita myös Red Hat Enterprise Virtualization Manager for Servers (RHEM) -hallintaohjelmalla. Ohjelma hallitsee RHEL ja RHEV-host-palvelimia.

KVM-hypervisorin asennus RHEL-käyttöjärjestelmään on kannattava ainoastaan jos yrityksessä on käytössä RHEL-lisenssejä. Muuten Red Hatia valittaessa kannattaa ostaa RHEV ja RHEM -tuotteet, koska ne tarjoavat parempaa suorituskykyä.

### 5.3 Citrix XenServer ja Citrix XenCenter 5.5

Citrixin versio XEN-virtualisointityökalusta on käyttäjäystävällisempi. Citrix käyttää XENia hypervisorina ja modifioitua CentOS-käyttöjärjestelmän versiota dom0-virtuaalikoneena. Citrixin dom0-konsolin toimintaa on vaikea räätälöidä omiin tarpeisiin. Linux-käyttöjärjestelmiä virtualisoidessa käytetään paravirtualisointiajuria ja Windows-guestit virtualisoidaan laitteiston tuen avulla. Täydessä virtualisoinnissa käytetään modifioitua QEMU-emulaattorin versiota. Linux-virtuaalikoneille asennetaan myös monitorointityökaluja.



Kuva 18. Citrix XenCenter 5.5

Virtualisointiympäristön hallinta tehdään Citrix XenCenter 5.5 -hallintaohjelman kautta. Hallintaohjelma asennetaan Windows-työasemalle ja hallittavia host-palvelimia lisätään joko IP-osoitteen tai DNS-nimen avulla. XenCenterin toiminta ei rajoitu vain yhden host-palvelimen hallintaan. Ilmaisen XenServerin avulla pystyy hallitsemaan tallennuspaikkoja, siirtää virtuaalikoneita host-palvelimelta toiseen ja monitoroida host-palvelinten klustereita. Citrix tarjoaa kolme XenServerin kaupallista versiota. Advanced-versio sisältää korkeaa käytettävyyttä ja kehittyneempää monitorointityökalua. Enterprise- ja Platinum-versiot tarjoavat automatisointia ja korkeamman tason hallittavuutta.

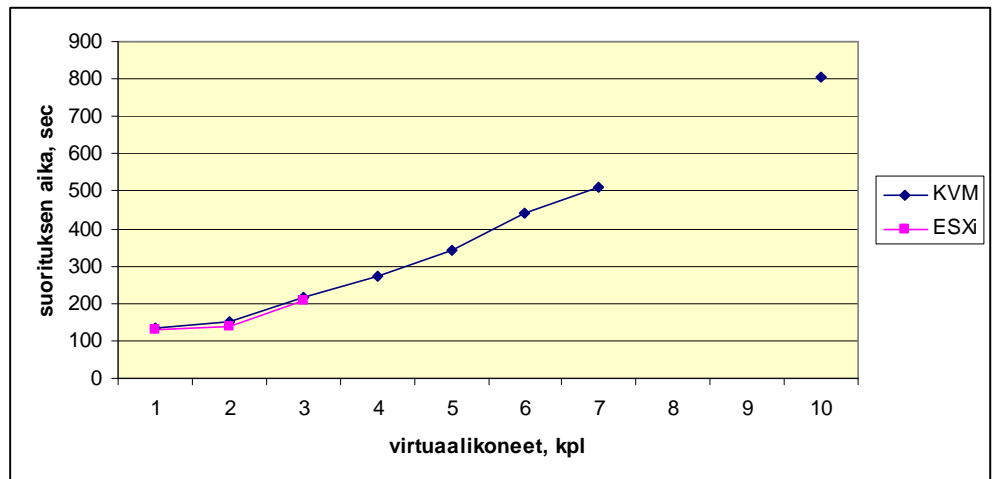
## 6 TULOSTEN ANALYYSI

Avoimen lähdekoodin virtualisointityökalujen käyttökelpoisuudesta käydään parhaillaan vilkasta keskustelua. Vielä kaksi vuotta sitten KVM skaalautui

huomattavasti huonommin muiden avoimen lähdekoodin virtualisointiratkaisuihin verrattuna. Virtualisointityökalu on kuitenkin kehittynyt nopeasti ominaisuuksiltaan ja suorituskyvyltään. Tällä hetkellä KVM-virtuaalikoneen suorituskyky on lähellä vastaavan fyysisen palvelimen suorituskykyä (ks. liite 4). KVM:n varjopuoli on laaja valikoima hallintaohjelmia, jotka eivät aina ole yhteensopivia toistensa kanssa.

## 6.1 Testaustulosten katsaus

KVM-hypervisorin suorituskyky oli testeissä hieman huonompi verrattuna VMwaren ESXi palvelimen suorituskykyyn. Virtualisointityökalulla on kuitenkin hyvä suorituskyky muiden virtualisointityökalujen verrattuna ja lähes lineaarinen skaalautuvuus.

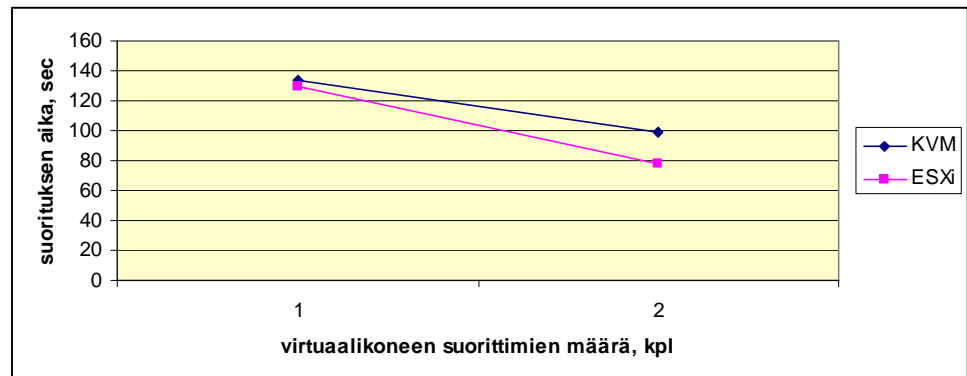


Kuva 19. KVM-virtualisointityökalun skaalautuvuus.

Testikoneella oli käytettävissä kaksi loogista suoritinta. Virtualisointityökalun luvattiin skaalautuvaan kahdeksan kertaa enemmän virtuaalisuorittimia, eli 16 virtuaalikoneeseen. Järjestelmässä voi todellakin käynnistää 16 virtuaalikonetta. Hypervisorilla on myös hyvä muistinhallinta. Viimeisessä onnistuneessa skaalautuvuustestissä virtuaalikoneille oli varattu  $10 \times 512 \text{ Mt} \approx 5 \text{ Gt}$  muistia. Vaikka fyysisesti oli saatavilla vain 4 Gt muistia, hypervisor pystyi jakamaan muistia tehokkaasti. Yksi virtuaalikoneista oli saanut hypervisorilta kolme virheilmoitusta, mutta suoritti kuitenkin kaikki testit loppuun asti (ks. liite 3).

Viimeisessä epäonnistuneessa testissä käynnistettiin 12 virtuaalikonetta (6 Gt muistia). Virtuaalikoneet toimivat normaalisti joutokäynnillä, mutta testauksen alkaessa hypervisor kaatui. Testien aikana hypervisor joutui vara-

maan noin 1 Gt muistia kiintolevyllä. Tämä hidasti hypervisorin toimintaa roimasti eikä sitä voinut enää hallita.



Kuva 20. Resurssienhallinnan skaalautuvuus

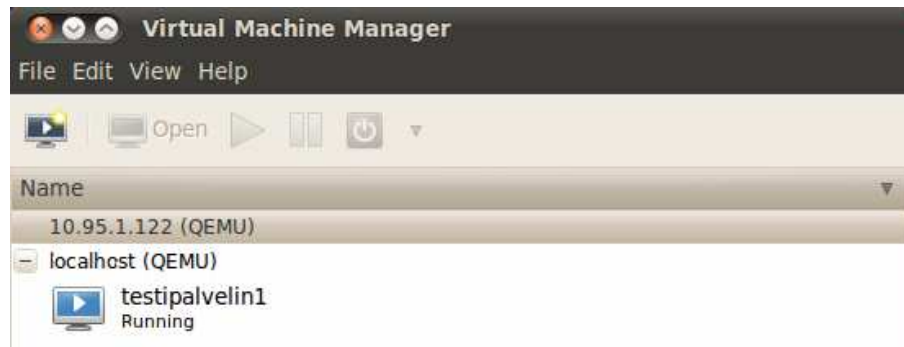
Korkean kuorman kannalta optimaalinen konfiguraatio kyseiselle host-palvelimelle on 6-9 virtuaalikonetta. Muiden virtuaalikoneiden joutokäynti ei vaikuta testiä suorittavan virtuaalikoneen suorituskykyyn. ESXi-palvelin skaalautuu huomattavasti paremmin tehokkaiden virtuaalikoneiden suorituskykytesteissä (ks. kuva 20).

KVM-virtualisointityökalun asennus on pidempi ja monimutkaisempi prosessi verrattuna ESXi palvelimen provisiointiin. Mutta se on kuitenkin helpompi, kuin esimerkiksi avoimen lähdekoodin Xen-virtualisointityökalun asennus ja konfigurointi. KVM-virtualisoinnin hallintatyökalujen kehitys on vielä alkuvaiheessa, mutta kaikki host-palvelimen verkkorajapinnat ovat käytettävissä, mikä mahdollistaa muiden avoimen lähdekoodin työkalujen käytön. Avoimen lähdekoodin KVM-työkalut eivät edellytä lisensointia tai rekisteröintiä.

Tärkein KVM-virtuaalisoinnin ominaisuus on täydellinen yhteensopivuus Vmware-virtualisointiympäristön kanssa. Testitulosten ja asennuskokemuksen pohjalta voidaan todeta virtualisointityökalun toimivan vakaasti.

## 6.2 Ubuntu Server 10.04 LTS

Testaukset tuotannossa tehdään todennäköisesti Ubuntu Server 10.04 LTS (Long Term Support) -käyttöjärjestelmässä. Käyttöjärjestelmä käyttää uudempaa Linux-kernelin versiota (2.6.32) kuin Ubuntu Server 9.10 (2.6.31).



Kuva 21. VirtManager-hallintaohjelman käyttöliittymä Ubuntu Server 10.04 -käyttöjärjestelmässä.

Uusi käyttöjärjestelmä on myös parempi virtualisoinnin hallittavuuden kannalta. Käyttöjärjestelmän ohjelmavarastoon sisältyy Convirt 1.1 -hallintaohjelma ja uudempi versio VirtManager-ohjelman versio (0.8.2). Hallintaohjelman ominaisuuksia on parannettu ja laajennettu. Uusi VirtManager-hallintaohjelman versio tukee esimerkiksi virtuaalikoneiden kloonausta.

KVM-hypervisorin konfigurointia tehdään samalla tavalla kuin käyttöjärjestelmän edellisessä versiossa. Työkalun suorituskyky on lievästi huonompi, kuin Ubuntu Server 9.10 -käyttöjärjestelmässä. Ubuntu 10.04 -guest-käyttöjärjestelmä suorittaa Apache-ohjelman käännöksen testilaitteistolla noin 150 sekunnissa yhdellä virtuaalisuorittimella. Ubuntu 9.10 suorittaa saman testin samalla laitteella noin 135 sekunnissa. Kahdella virtuaalisuorittimella varustettu virtuaalikone suorittaa käännöksen noin 98 sekunnissa, eli tulos on sama kuin käyttöjärjestelmän edellisellä versiolla.

### 6.3 KVM-virtualisoinnin käyttöönottosuunnitelma

Avoimen lähdekoodin KVM-hypervisorin käyttöönotto ei maksa yritykselle mitään. Työkalun hallintaprosessit kuluttavat kuitenkin enemmän henkilöstötunteja varsinkin alkuvaiheessa. Myös työkalun toiminnan automatisointi voi olla vaikeaa. KVM-virtualisointi voi tarjota kuitenkin enemmän hyödyllisiä ominaisuuksia kuin esimerkiksi *VMware Essentials Plus* -virtualisointipaketti.

KVM-virtualisointityökalujen käyttöönotto voidaan aloittaa testaamalla KVM-moduulia uudessa palvelimessa. Jos alustan suorituskyky on riittävän hyvä verrattuna vanhaan järjestelmään, voidaan käynnistää KVM-virtualisoinnin laajempi käyttöönotto. Jatkossa KVM-virtualisointia voidaan käyttää VMwaren-työkalujen rinnalla myös tuotantoverkossa. Testausvaiheessa kannattaa



ottaa huomion työkalujen nopea kehitys. Käynnistääkseen testausprojektin tuotantoverkossa selvitetään ensin nykyisen ympäristön suoritustehoa.

Testausprojektin kulkua voidaan suunnitella esimerkiksi ITIL v3 (Information Technology Infrastructure Library) -prosessikehyksen mukaisesti. Palvelun siirtoa (Service transition) toteutetaan vaiheittain. Ensin hankitaan sopiva palvelin, valitaan host-palvelinlaitteen käyttöjärjestelmää ja päätetään mitä virtuaalikoneet voidaan siirtää tai luoda uudelle alustalle. Kun työkaluista on päätetty, suunnitellaan uuden palvelimen käyttöönottoa ja testausta. Käyttöönoton projektinhallinnassa huomioidaan projektin aikatauluja, testaustapoja ja testauksen pituutta. Testausvaiheen päätyä käydään tuloksia läpi ja pohditaan järjestelmän muokkausta ja automatisointia. Tämän jälkeen valitaan paras konfiguraatio ja dokumentoidaan se. Mikäli virtualisointityökalun käyttöönotto osoittautuu kannattavaksi, alustalle voidaan siirtää enemmän virtuaalikoneita. Virheen tai ongelman sattuessa testipalvelimella, virtuaalikoneet voidaan siirtää käsin ESXi-palvelimelle. Tämä onnistuu helpommin, jos käytössä on jaettu verkkotallennus. Riskin pienentämiseksi voidaan käyttää vmdk-levytiedostoja.

## 7 YHTEENVETO

Työn aihe oli haastava ja mielenkiintoinen. Virtualisoinnin suorituskyky ja skaalautuvuus on yhtä ajankohtainen aihe kuin myös avoimen lähdekoodin työkalujen vertailu vastaaviin kauppallisiin ratkaisuihin. KVM-virtualisoinnin suorituskyky on osoittautunut yllättävän hyväksi. Työkalun käyttöönotossa kannattaa kuitenkin ottaa huomioon se, että säästetyt lisensikustannukset voivat olla pienempiä kuin investoinnit henkilöstöön ja laitteistoon.

Tämän työn tavoitteena oli analysoida KVM-virtualisointityökalujen käyttökelpoisuutta. Työssä käsiteltiin laaja joukko virtualisointimenetelmiä ja perehdyttiin virtualisointityökalun eri käyttötarkoituksiin. Aiheeseen liittyvän kirjallisuuden ja verkkomanuaalien tutkimuksen avulla rakennettiin testausmenetelmän, jonka avulla toteutettiin virtualisointityökalujen vertailu testiverkossa. Testien kautta todettiin KVM-virtualisoinnin toimivan ja skaalautuvan riittävän hyvin. Testien tulosten perustella annettiin suosituksia virtualisointien kokoonpanosta ja verkon arkkitehtuurista. Työn alkuvaiheessa asetetut tavoitteet saavutettiin.

Työtä voidaan hyödyntää KVM-virtualisointityökalun käyttöönotossa ja kehityksessä. Työssä saatuja tuloksia voidaan myös vertailla kansainvälisesti esimerkiksi Phoronix Global -tietokannassa.

## VIITELUETTELO

- [1] Mäkinen Ville, *Virtualisointi teki murron* [verkkodokumentti, viitattu 30.3.2010]. Saatavissa: [http://www.tietoviikko.fi/kaikki\\_uutiset/article285493.ece](http://www.tietoviikko.fi/kaikki_uutiset/article285493.ece).
- [2] *Virtual Data Centers: Market Dynamics and Security Issues* [verkkodokumentti, viitattu 1.5.2010]. Saatavissa: [http://www.centrify.com/downloads/public/centrify\\_ss050\\_market\\_dynamics\\_and\\_security\\_issues.pdf](http://www.centrify.com/downloads/public/centrify_ss050_market_dynamics_and_security_issues.pdf).
- [3] Hess Kenneth, Newman Amy, *Practical Virtualization Solutions: virtualization from the trenches*. Prentice Hall. Boston. 2010.
- [4] Hoopes John, *Virtualization for Security Including Sandboxing, Disaster Recovery, High Availability, Forensic Analysis, and Honeypotting*. Elsevier. Burlington. 2009.
- [5] *VMware Cost-Per-Application Calculator* [verkkodokumentti, viitattu 1.4.2010]. Saatavissa: <http://www.vmware.com/technology/whyvmware/calculator/>.
- [6] *Tietotekniikan liiton ATK-sanakirja*. RT-Print Oy. Pieksämäki. 2001
- [7] Red Hat Enterprise Virtualization for Servers: Performance and Scalability. [verkkodokumentti, viitattu 20.4.2010]. Saatavissa: <http://www.redhat.com/virtualization/rhev/server/performance>.
- [8] VMware ESXi Features. [verkkodokumentti, viitattu 1.4.2010]. Saatavissa: <http://www.vmware.com/products/esxi/features.html>.
- [9] Thomas Korber, Bruce Rogers. Virtualization with KVM. [verkkodokumentti, viitattu 1.5.2010]. Saatavissa: <http://www.slideshare.net/NOVL/virtualization-with-kvm-kernelbased-virtual-machine>.
- [10] *Summary for the z/VM and Xen Virtualization performance tests*. [verkkodokumentti, viitattu 20.2.2010]. Saatavissa: <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/lnxinfo/v3r0m0/index.jsp?topic=/liaoq/zvmxen/pubzvmxensummary.htm>.
- [11] Pertti Hämäläinen, Provisiointi vauhdittaa käyttöönottoa. *Tietokone 9/2004 s. 43*.
- [12] Wolf Chris, Eric M. Halter, *Virtualization: From the Desktop to the Enterprise*. Apress. New York, 2005.
- [13] Jen Knecht. IBM Extends Development and Test to the IBM Cloud. [verkkodokumentti, luettu 1.5.2010]. Saatavissa: <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/29685.wss>.
- [14] Phoronix Global. [verkkodokumentti, viitattu 14.5.2010]. Saatavissa: <http://global.phoronix-test-suite.com/>.

- [15] Tim Jones. Discover the Linux Kernel Virtual Machine. [verkkodokumentti, viitattu 30.3.2010]. Saatavissa: <http://www.ibm.com/developerworks/linux/library/l-linux-kvm/>.
- [16] *Ubuntu Documentation - KVM* [verkkodokumentti, viitattu 30.3.2010]. Saatavissa: <https://help.ubuntu.com/community/KVM>.
- [17] *Libvirt Virtualization API – Documentation* [verkkodokumentti, viitattu 30.3.2010]. Saatavissa: <http://libvirt.org/docs.html>.
- [18] Ubuntu Manuals: Bridge-utils-interfaces. Karmic Koala. [verkkodokumentti, viitattu 2.2.2010]. Saatavissa: <http://manpages.ubuntu.com/manpages/karmic/man5/bridge-utils-interfaces.5.html>.
- [19] ConVirt 1.1 wiki. [verkkodokumentti, viitattu 2.3.2010]. Saatavissa: <http://www.convirture.com/wiki/index.php?title=Installation>.
- [20] Convirt 2.0 wiki. [verkkodokumentti, viitattu 10.3.2010]. Saatavissa: [http://www.convirture.com/wiki/index.php?title=Convirt2\\_Installation](http://www.convirture.com/wiki/index.php?title=Convirt2_Installation).
- [21] Products: ConVirt 2.0 Enterprise. [verkkodokumentti, viitattu 1.5.2010]. Saatavissa: [http://www.convirture.com/products\\_enterprise.html](http://www.convirture.com/products_enterprise.html).
- [22] Campi Nate, Bauer Kirk. *Automating Linux and Unix System Administration*. Apress. New York. 2009.
- [23] Marshall David, ym. *VMware ESX Essentials in the Virtual Data Center*. CRC Press. New York. 2009.

## LIITE 1 – VIRTUAALIKONEEN KONFIGURAATIOTIEDOSTO XML-MUODOSSA

```

<domain type='kvm'>
  <name>Fedora_1clone</name>
  <uuid>b9625ea6-4ea3-cb41-7704-bb0fd43c23a1</uuid>
  <memory>524288</memory>
  <currentMemory>524288</currentMemory>
  <vcpu>1</vcpu>
  <os>
    <type arch='x86_64' machine='pc-0.11'>hvm</type>
    <boot dev='hd' />
  </os>
  <features>
    <acpi />
    <apic />
    <pae />
  </features>
  <clock offset='utc' />
  <on_poweroff>destroy</on_poweroff>
  <on_reboot>restart</on_reboot>
  <on_crash>restart</on_crash>
  <devices>
    <emulator>/usr/bin/kvm</emulator>
    <disk type='file' device='cdrom'>
      <target dev='hdc' bus='ide' />
      <readonly />
    </disk>
    <disk type='file' device='disk'>
      <source file='/var/lib/libvirt/images/Fedora_1clone.img' />
      <target dev='vda' bus='virtio' />
    </disk>
    <interface type='bridge'>
      <mac address='00:16:36:0c:fb:39' />
      <source bridge='br0' />
      <model type='virtio' />
    </interface>
    <serial type='pty'>
      <source path='/dev/pts/2' />
      <target port='0' />
    </serial>
    <console type='pty' tty='/dev/pts/2'>
      <source path='/dev/pts/2' />
      <target port='0' />
    </console>
    <input type='tablet' bus='usb' />
    <input type='mouse' bus='ps2' />
    <graphics type='vnc' port='-1' autoport='yes' keymap='fi' />
    <sound model='es1370' />
    <video>
      <model type='cirrus' vram='9216' heads='1' />
    </video>
  </devices>
</domain>

```

**LIITE 2 – KONVERTOIDUN VIRTUAALIKONEEN KONFIGURAATIOTIEDOSTO XML-MUODOSSA**

```
<domain type='kvm'>
  <name>ub804-mapserver</name>
  <uuid>3335b79b-22d3-4593-9857-2826f3bc8d8b</uuid>
  <memory>524288</memory>
  <currentMemory>524288</currentMemory>
  <vcpu>1</vcpu>
  <os>
    <type arch='i686' machine='pc'>hvm</type>
    <boot dev='hd' />
  </os>
  <features>
    <acpi />
  </features>
  <clock offset='utc' />
  <on_poweroff>destroy</on_poweroff>
  <on_reboot>restart</on_reboot>
  <on_crash>destroy</on_crash>
  <devices>
    <emulator>/usr/bin/kvm</emulator>
    <disk type='file' device='disk'>
      <source file='/home/adminv/Virtuaaikoneet/ub804-mapserver/ub804-
mapserver.vmdk' />
      <target dev='hda' />
    </disk>
    <interface type='network'>
      <mac address='00:0c:29:91:8a:21' />
      <source network='default' />
    </interface>
    <input type='mouse' bus='ps2' />
    <graphics type='vnc' port='-1' listen='127.0.0.1' />
  </devices>
</domain>
```

## LIITE 3 – METROPOLIAN TESTIVERKOSSA TEHTYJEN TESTIEN TULOKSET

| <i>KVM-virtualisointi, Ubuntu-host, GNOME, libvirt, VirtManager. Suorituskykytestit.</i> |         |         |         |       |         |                       |                       |
|--|---------|---------|---------|-------|---------|-----------------------|-----------------------|
|  | 1 × VMS | 2 × VMS |         |       | 1 × VMD | 1 × VMS + 5 käynnissä | 1 × VMS + 8 käynnissä |
|  |         | VM1     | VM2     | ka    |         |                       |                       |
| Build-apache, s  | 133,82  | 152,16  | 149,64  | 150,9 | 98,07   | 132,45                | 135,51                |
| Iozone, tiedoston koko 512 Mt  |         |         |         |       |         |                       |                       |
| Read, Mt/s   | 142,12  | 119,72  | 134,12  |       | 138,26  | 134,87                | 135,05                |
| Write, Mt/s  | 70,69   | 39,30   | 44,78   |       | 70,61   | 71,31                 | 71,51                 |
| C-ray, s   | 339,05  | 358,88  | 362,38  |       | 176,44  | 339,70                | 339                   |
| Openssl, merkkiä/s   | 42,80   | 42,20   | 42,45   |       | 82,85   | 43,25                 | -                     |
| Ramspeed   |         |         |         |       |         |                       |                       |
| Integer/average, Mt/s  | 3750,38 | 2085,36 | 2103,56 |       | 3785,32 | 3686,26               | -                     |
| Floating point/average, Mt/s   | 3740,52 | 2063,75 | 2072,67 |       | 3795,31 | 3739,11               | -                     |

\* VMS – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 1 vCPU

\*\* VMD – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 2 vCPU

\*\*\*ka – keskiarvo

| <b><i>KVM-virtualisointi, Ubuntu-host, GNOME, libvirt, VirtManager. Skaalautuvuustesti.</i></b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | VMS1   | VMS2   | VMS3   | VMS4   | VMS5   | VMS6   | VMS7   | VMS8   | VMS9   | VMS10  | ka     |
| Build-apache, s, 3 × VMS  | 202,86 | 215,25 | 227,27 |        |        |        |        |        |        |        | 215,13 |
| Build-apache, s, 4 × VMS  | 282,59 | 264,60 | 268,84 | 281,85 |        |        |        |        |        |        | 271,76 |
| Build-apache, s, 5 × VMS  | 349,91 | 364,93 | 355,38 | 317,09 | 321,60 |        |        |        |        |        | 341,78 |
| Build-apache, s, 6 × VMS  | 445,51 | 456,07 | 438,15 | 425,53 | 460,42 | 426,08 |        |        |        |        | 441,96 |
| Build-apache, s, 7 × VMS  | 505,84 | 499,01 | 461,50 | 524,20 | 517,74 | 533,79 | 541,99 |        |        |        | 512,01 |
| Build-apache, s, 10 × VMS***  | 785,82 | 814,35 | 847,95 | 824,69 | 722,35 | 810,34 | 815,18 | 803,32 | 794,73 | 836,10 | 805,48 |
| Build-apache, s, 12 × VMS****   | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |

\* VMS – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 1 vCPU

\*\*ka – keskiarvo

\*\*\* virheilmoitukset virtuaalikoneessa: *soft lockup cpu#0 stuck for 61s!* ja *soft lockup cpu#1 stuck for 61s!*

\*\*\*\* host-palvelin kaatui, ei riittänyt muistia virtuaalikoneiden hallintaan.



| <i>VMware ESXi . Suorituskykytestit.</i> |         |         |        |        |         |         |        |        |         |        |
|--|---------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|
|  | 1 × VMS | 2 × VMS |        |        | 1 × VMD | 3 × VMS |        |        | 2 × VMD |        |
|  |         | VM1     | VM2    | ka     |         | VM1     | VM2    | VM3    | VM1     | VM2    |
| Build-apache, s                          | 129,57  | 139,89  | 135,62 | 137,76 | 78,30   | 204,49  | 206,86 | 207,51 | 147,00  | 136,58 |
| Iozone, tiedoston koko 512 Mt            |         |         |        |        |         |         |        |        |         |        |
| Read, Mt/s                               | 97,83   | -       | -      | -      | -       | -       | -      | -      | -       | -      |
| Write, Mt/s                              | 41,92   |         |        |        |         |         |        |        |         |        |
| C-ray, s                                 | 336,13  | -       | -      | -      | -       | -       | -      | -      | -       | -      |
| Openssl, merkkiä/s                       | -       | -       | -      | -      | -       | -       | -      | -      | -       | -      |
| Ramspeed                                 |         |         |        |        |         |         |        |        |         |        |
| Integer/average, Mt/s                    | 4046    | -       | -      | -      | -       | -       | -      | -      | -       | -      |
| Floating point/average, Mt/s             | 4005,30 |         |        |        |         |         |        |        |         |        |

\* VMS – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 1 vCPU

\*\* VMD – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 2 vCPU

|                                | VMS1   | VMS2   | VMD    |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| <b><i>Proxmox VE</i></b>       |        |        |        |
| Build-apache, s, 1 × VMS       | 168,45 | -      | -      |
| Build-apache, s, 2 × VMS       | 199,9  | 204,65 | -      |
| Build-apache, s, 1 × VMD       | -      | -      | 107,45 |
| <b><i>Citrix XenServer</i></b> |        |        |        |
| Build-apache, s, 7 × VMS       | 228,66 | -      | -      |

\* VMS – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 1 vCPU

\*\* VMD – Ubuntu 9.10 -virtuaalikone, muistia 512 Mt, 2 vCPU

**LIITE 4 – RHEV-HYPERVISORIN SUORITUSKYKYTESTIEN TULOKSET**

