10. Foliensatz Betriebssysteme

Prof. Dr. Christian Baun

Frankfurt University of Applied Sciences
(1971–2014: Fachhochschule Frankfurt am Main)
Fachbereich Informatik und Ingenieurwissenschaften
christianbaun@fb2.fra-uas.de

Lernziele dieses Foliensatzes

- Am Ende dieses Foliensatzes kennen/verstehen Sie...
  - was **Virtualisierung** ist, ihre Vorteile, Nachteile und Grenzen
  - den Unterschied zwischen **Hardware-Emulation** und **Virtualisierung**
  - verschiedene **Virtualisierungskonzepte**:
    - **Partitionierung**
    - **Anwendungsvirtualisierung**
    - **Vollständige Virtualisierung** (Virtueller Maschinen-Monitor)
    - **Paravirtualisierung** (Hypervisor)
    - **Hardware-Virtualisierung**
    - **Betriebssystem-Virtualisierung bzw. Container bzw. Jails**
    - **Speichervirtualisierung (SAN)**
    - **Netzwerkvirtualisierung (VLAN)**

Übungsblatt 10 wiederholt die für die Lernziele relevanten Inhalte dieses Foliensatzes

Virtualisierung – Grundlagen

- Durch **Virtualisierung** werden die Ressourcen eines Rechnersystems aufgeteilt und von mehreren unabhängigen Betriebssystem-Instanzen genutzt
- Virtualisierung ist stellvertretend für mehrere grundsätzlich verschiedene Konzepte und Technologien
- Jede **Virtuelle Maschine** (VM)...
  - verhält sich wie ein vollwertiger Computer mit eigenen Komponenten
  - läuft in einer abgeschotteten Umgebung auf einer physischen Maschine
- In einer VM kann ein Betriebssystem mit Anwendungen genau wie auf einem realen Computer installiert werden
  - Die Anwendungen merken nicht, dass sie sich in einer VM befinden
- Anforderungen der Betriebssystem-Instanzen werden von der Virtualisierungssoftware abgefangen und auf die real vorhandene oder emulierte Hardware umgesetzt
  - Die VM selbst bekommt davon auch nichts mit

Ursprung der Virtualisierung

- Virtualisierung ist kein neues Konzept
  - Einführung in den 1960er-Jahren bei Großrechnern
- 1970/71: IBM stellt die Virtual Machine Facility/370, kurz VM/370 vor
  - Auf dieser Plattform wurde Mehrbenutzerbetrieb realisiert, indem mehrere Einzelbenutzerbetriebinstanzen in virtuellen Maschinen ausführt wurden
  - Jede VM stellte eine vollständige Nachbildung der darunter liegenden, physischen Hardware dar

Quellen

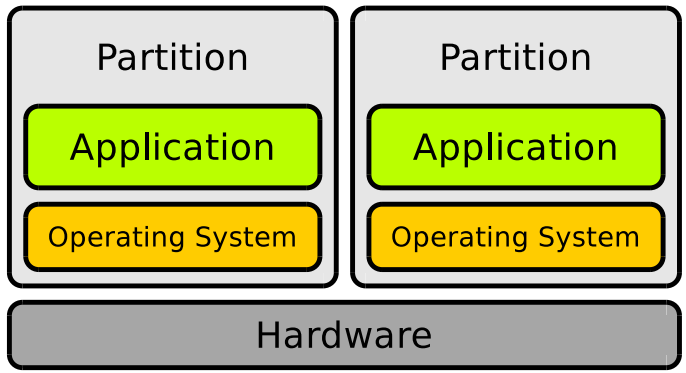
- Creasy RJ. **The origin of the VM/370 time-sharing system**. IBM Journal of Research and Development 25 (1981), No. 5, 483–490
- Amit Singh. **An Introduction to Virtualization**. 2004 `http://www.kernelthread.com/publications/virtualization/`

Virtualisierungskonzepte

- Es existieren Unterschiedliche Virtualisierungskonzepte:
  - Partitionierung
  - Hardware-Emulation
  - Anwendungsvirtualisierung
  - Vollständige Virtualisierung (Virtueller Maschinen-Monitor)
  - Paravirtualisierung (Hypervisor)
  - Hardware-Virtualisierung
  - Betriebssystem-Virtualisierung bzw. Container bzw. Jails
  - Speichervirtualisierung (SAN)
  - Netzwerkvirtualisierung (VLAN)
  - ...

Partitionierung

- Bei Partitionierung können auf den Gesamtressourcen eines Computersystems Teilsysteme definiert werden
  - Jedes Teilsystem kann eine lauffähige Betriebssysteminstanz enthalten
  - Jedes Teilsystem ist wie ein eigenständiges Computersystem verwendbar



- Die Ressourcen (Prozessor, Hauptspeicher, Datenspeicher. . .) werden über die **Firmware** des Rechners verwaltet und den VMs zugeteilt
- Partitionierung kommt z.B. bei IBM Großrechnern (zSerie) oder Midrange-Systemen (pSerie) mit Power5/6/7 Prozessoren zum Einsatz
  - Ressourcenzuteilung ist im laufenden Betrieb ohne Neustart möglich
  - Auf einem aktuellen Großrechner können mehrere hundert bis tausend Linux-Instanzen gleichzeitig laufen
- Aktuelle CPUs unterstützen lediglich die Partitionierung der CPU selbst und nicht des Gesamtsystems (Intel Vanderpool, AMD Pacifica)
  - Partitionierung spielt im Desktop-Umfeld keine Rolle

Beispiel für Partitionierung – Watson (1/2)

- Sieger beim US-Quiz *Jeopardy Challenge* im Februar 2011 war *Watson*
  - Watson ist ein Cluster aus 90 IBM Power 750 Servern mit 2.880 Power7 CPU-Kernen (je 8 Kerne pro CPU) und 16 TB RAM

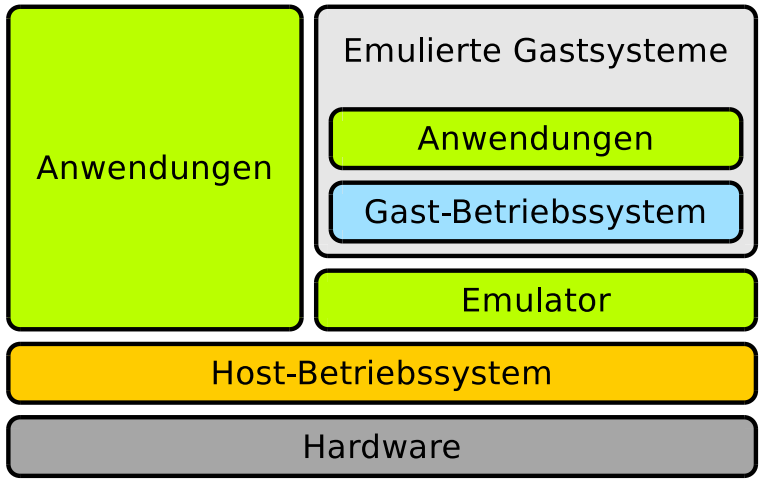
Bildquelle (Watson stage replica in Jeopardy! contest, Mountain View, California): Atomic Taco. `flickr.com` (CC-BY-SA-2.0)
Bildquelle (Interns demonstrating Watson capabilities in Jeopardy! exhibition match): Rosemaryetoufee. Wikimedia (CC-BY-SA-4.0)

Beispiel für Partitionierung – Watson (2/2)

- Auf den 90 Knoten können Partitionen erstellt werden
  - In jeder Partition kann ein AIX, Linux oder IBM i (früher OS/400) laufen
  - Die Partitionen sind unabhängige Installationen
    - In jeder Partition kann ein unterschiedliches Betriebssystem laufen
- Auf jedem Knoten läuft ein *POWER Hypervisor*
  - Er regelt den Hardwarezugriff
- Seit Power6 kann man laufende Partitionen ohne Unterbrechung auf andere physische Server umziehen ($\Longrightarrow$ Live Partition Mobility)
- Man kann Partitionen auch erlauben, dass sie sich Hauptspeicher teilen ($\Longrightarrow$ Active Memory Sharing)
  - Active Memory Expansion kann Speicherseiten komprimieren
    - Je nach Anwendung geht das schneller als Verschieben oder Auslagern

Hardware-Emulation

- Emulation bildet die **komplette Hardware** eines Rechnersystems nach, um ein **unverändertes Betriebssystem**, das für eine **andere Hardwarearchitektur** (CPU) ausgelegt ist, zu betreiben
  - Ausnahme: Wine
    - Wine emuliert keine Hardware, sondern nur die Schnittstellen des Betriebssystems Windows



- Nachteile der Emulation:
  - Entwicklung ist sehr aufwendig
  - Ausführungsgeschwindigkeit ist geringer als bei Virtualisierung
- Wichtige Unterscheidung: **Emulation** $\neq$ **Virtualisierung**
- Einige Emulatoren: Bochs, QEMU, PearPC, Wabi, DOSBox, Microsoft Virtual PC (ist in der Version für MacOS X/PowerPC ein x86-Emulator)

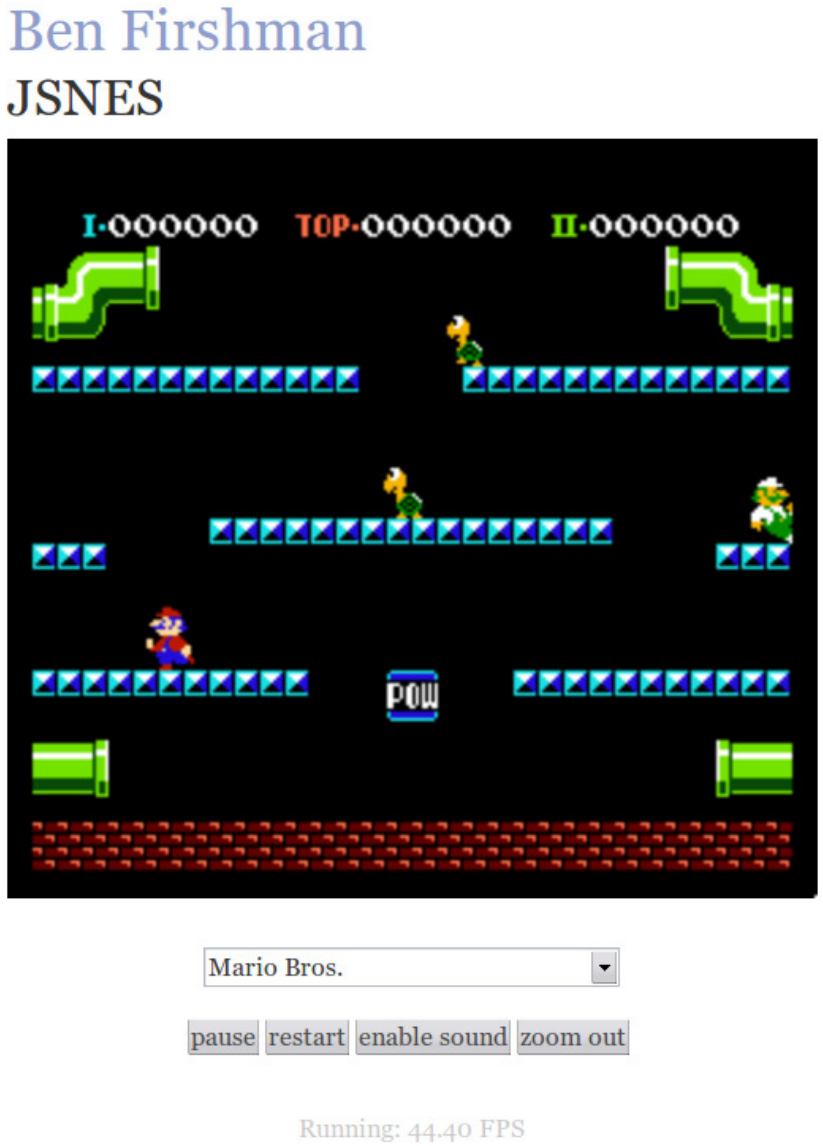
Auswahl an Emulatoren

Name	Lizenz	Host	Emulierte Architektur	Gast-System
Bochs v2.3.6	LGPL	Linux, Solaris, MacOS, Windows, IRIX, BeOS	x86, AMD64	Linux, DOS, BSD, Windows, BeOS
QEMU v0.9.0	GPL	Linux, BSD, Solaris, BeOS, MacOS-X	x86, AMD64, PowerPC, ARM, MIPS, Sparc	Linux, MacOS-X, Windows, BSD
DOSBox v0.72	GPL	Linux, Windows, OS/2, BSD, BeOS, MacOS-X	x86	DOS
DOSEMU v1.4.0	GPL	Linux	x86	DOS, Windows bis 3.11
PearPC v0.4.0	GPL	Linux, MacOS-X Windows	PowerPC	Linux, MacOS-X, BSD
Basilisk II v0.9-1	GPL	Linux, diverse UNIX, Windows NT4, BeOS, Mac OS, Amiga OS	680x0	MacOS $\leq$ 8.1
Wabi v2.2	proprietär	Linux, Solaris	x86	Windows 3.x
MS Virtual PC v7	proprietär	MacOS-X	x86	Windows, (Linux)
M.A.M.E. v0.137	MAME-Lizenz	Linux, Windows, DOS, BeOS, BSD, OS/2	diverse Arcade	diverse Arcade
SheepShaver	GPL	Linux, MacOS-X, BSD Windows, BeOS	PowerPC, 680x0	MacOS 7.5.2 bis MacOS 9.0.4
Hercules 3.07	QPL	Linux, MacOS-X, BSD Solaris, Windows	IBM-Großrechner	IBM System/360, 370, 390

- Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit!

Beispiel für einen aktuellen Emulator – JSNES

- JSNES emuliert das Nintendo Entertainment System (NES)
- Der Emulator ist in JavaScript implementiert und läuft im Browser
- `http://fir.sh/projects/jsnes/`
- `github.com/bfirsh/jsnes`
- Freie Software (GPLv3)



Aktuellste Entwicklung: Browser emuliert PC – jslinux

c't 13/2011

Der PC-Emulator von Fabrice Bellard läuft dank vollständiger Umsetzung in JavaScript in Web-Browsern wie Firefox 4 und Chrome 11. Während des erstaunlich flotten Bootvorgangs startet die Software ein eigens abgespecktes Linux (JS/Linux mit Kernel 2.6.20). (...)

Da das Linux im Emulator in einer RAM-Disk startet, lässt sich auch ausprobieren, was passiert, wenn man beispielsweise das gesamte Dateisystem via `rm -Rv /` löscht. Ein Reload der Webseite startet den Emulator anschließend neu und stellt den Ursprungszustand wieder her.

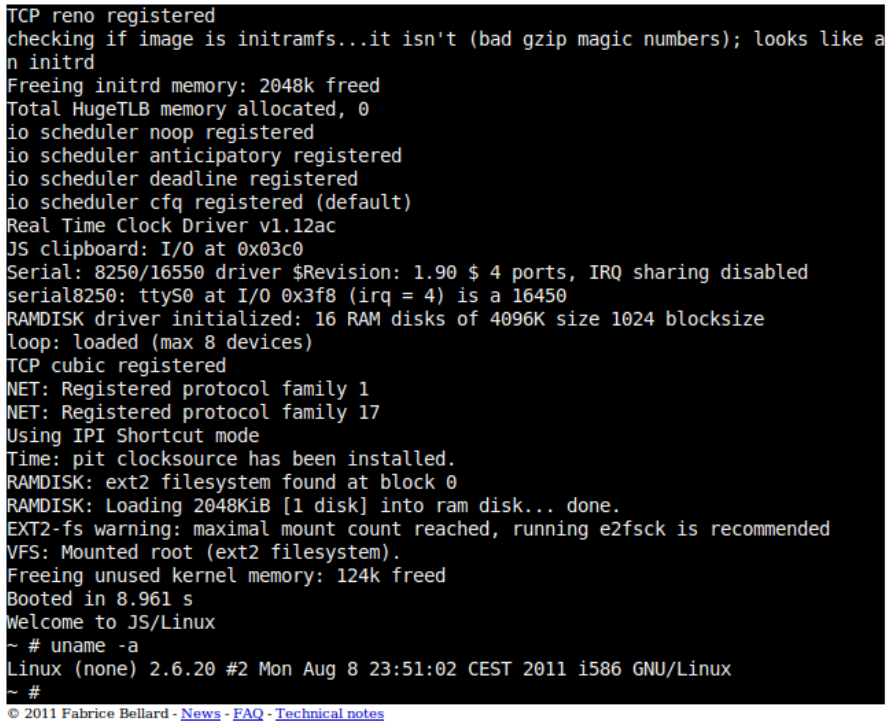


Image Source: `http://bellard.org/jslinux/`

Die als private Studie entstandene Java-Script-Software emuliert weitgehend einen 486er 32-Bit-Prozessor ohne FPU (Floating Point Unit), einen Interrupt-Controller 8259, einen Interrupt-Timer 8254 und eine ungebufferte serielle Schnittstelle vom Typ 16450. Die fehlende FPU kompensiert Linux durch seinen eingebauten FPU-Emulator. Für die Umsetzung in JavaScript nutzt Bellard Typed Arrays, die die JavaScript-Engines von Firefox 4 und Chrome 11 beherrschen. (rek)

bellard.org/jslinux/

JSLinux

Run Linux or other Operating Systems in your browser!

The following emulated systems are available:

CPU	OS	User Interface	VFsync access	Startup Link	TEMU Config	Comment
x86	Alpine Linux 3.12.0	Console	Yes	click here	url	
x86	Alpine Linux 3.12.0	X Window	Yes	click here	url	Right mouse button for the menu.
x86	Windows 2000	Graphical	No	click here	url	Disclaimer.
x86	FreeDOS	VGA Text	No	click here	url	
riscv64	Buildroot (Linux)	Console	Yes	click here	url	
riscv64	Buildroot (Linux)	X Window	Yes	click here	url	Right mouse button for the menu.
riscv64	Fedora 29 (Linux)	Console	Yes	click here	url	Warning: longer boot time.
riscv64	Fedora 29 (Linux)	X Window	Yes	click here	url	Warning: longer boot time. Right mouse button for the menu.

bellard.org/jslinux/vm.html?url=freedos.cfg&mem=64&graphic=1&w=720&h=400

```
Type HELP to get support on commands and navigation.

Welcome to the FreeDOS 1.2 operating system (http://www.freedos.org)

Use KEYB to set the keyboard mapping (e.g. KEYB FR for a French keyboard)

C:\>mem

Memory Type        Total       Used       Free
----------------  --------   --------   --------
Conventional         639K        33K       606K
Upper                  0K         0K         0K
Reserved             385K       385K         0K
Extended (XMS)    64,512K       328K    64,184K
----------------  --------   --------   --------
Total memory      65,536K       746K    64,790K

Total under 1 MB     639K        33K       606K

Total Expanded (EMS)               8,688K (8,896,512 bytes)
Free Expanded (EMS)                8,192K (8,388,608 bytes)

Largest executable program size       606K (620,080 bytes)
FreeDOS is resident in the high memory area.
C:\>_
```

bellard.org/jslinux/vm.html?url=alpine-x86.cfg&mem=192

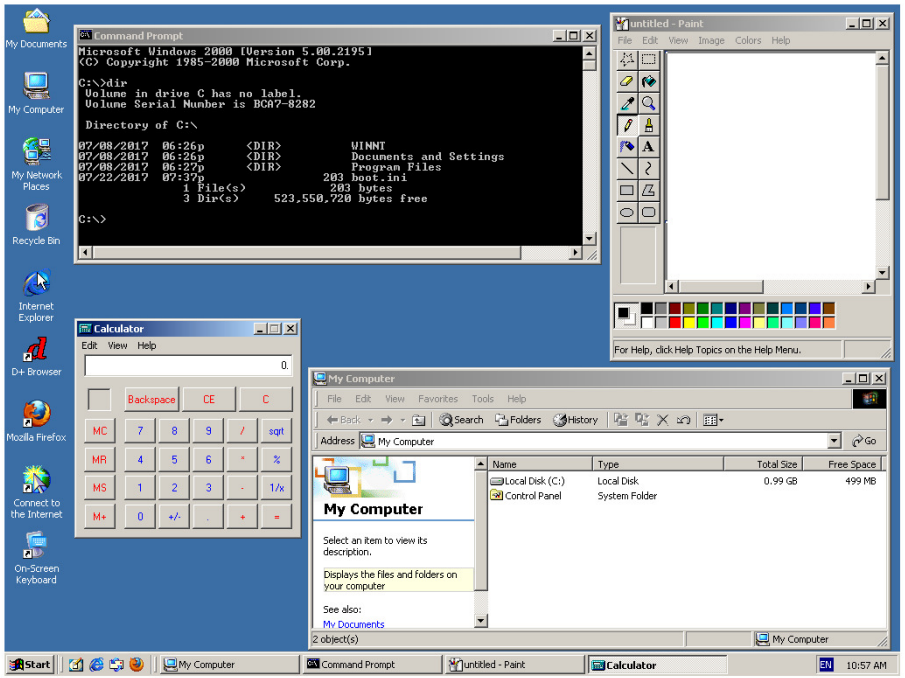
```
Loading...

Welcome to JS/Linux (i586)

Use 'vflogin username' to connect to your account.
You can create a new account at https://vfsync.org/signup .
Use 'export file filename' to export a file to your computer.
Imported files are written to the home directory.

localhost:~# uname -a
Linux localhost 4.12.0-rc6-g48ec1f0-dirty #21 Fri Aug 4 21:02:28 CEST 2017 i586
Linux
localhost:~#
```

bellard.org/jslinux/vm.html?url=win2k.cfg&mem=192&graphic=1&w=1024&h=768



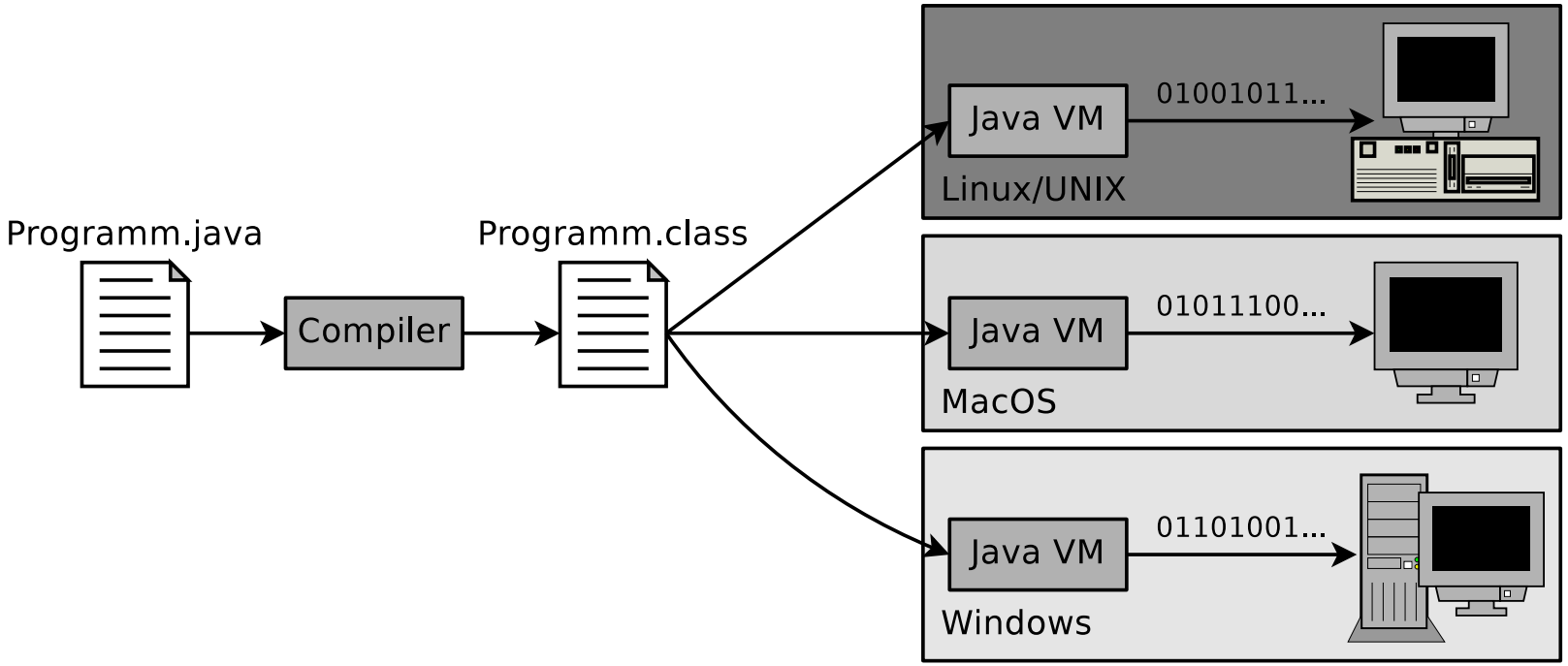
- Seit 2011 hat der Autor von JSLinux den Funktionsumfang stark erweitert

Bild oben rechts: FreeDOS 1.2 (x86)
Bild unten links: Alpine Linux 3.12.0 (x86)
Bild unten rechts: Windows 2000 (x86)

Anwendungsvirtualisierung

- Anwendungen werden unter Verwendung lokaler Ressourcen in einer virtuellen Umgebung ausgeführt, die alle Komponenten bereitstellt, die die Anwendung benötigt
  - VM befindet sich zwischen der auszuführenden Anwendung und dem Betriebssystem
- Populäres Beispiel: Java Virtual Machine (JVM)
  - Die JVM ist der Teil der Java-Laufzeitumgebung (JRE), der für die Ausführung des Java-Bytecodes verantwortlich ist
  - Die JVM ist für Java-Programme die Schnittstelle zum Rechnersystem und dessen Betriebssystem
- Vorteil: Plattformunabhängigkeit
- Nachteil: Geringere Ausführungsgeschwindigkeit gegenüber nativer Programmausführung

Prinzip der Java Virtual Machine (JVM)



- Der Compiler `javac` übersetzt Quellcode in architektur-unabhängige `.class`-Dateien, die Bytecode enthalten, der in der Java VM lauffähig ist
- Das `java`-Programm startet eine Java-Anwendung in einer Instanz der Java VM

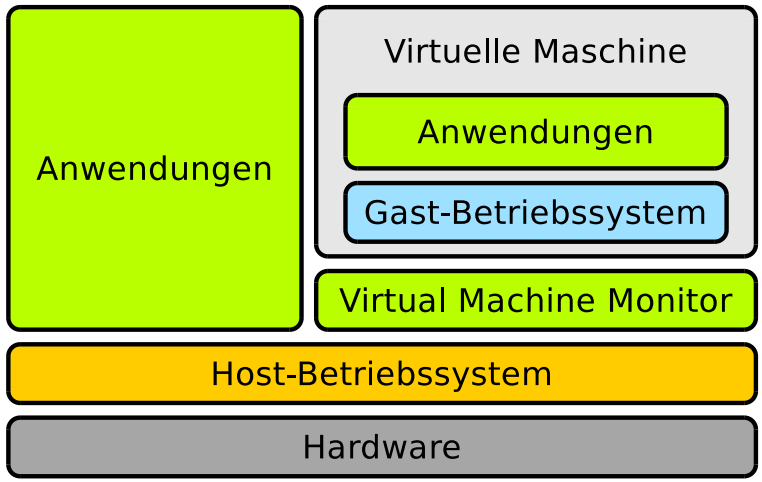
VMware ThinApp

http://www.vmware.com/products/thinapp/

- Weiteres Beispiel für Anwendungsvirtualisierung: VMware ThinApp
  - Bis 2008 unter dem Namen Thinstall bekannt
- Eine Windows-Anwendung wird in eine einzelne `.exe`-Datei gepackt
- Die Anwendung wird dadurch portabel und kann ohne lokale Installation verwendet werden
  - Die Anwendung kann u.a. auf einem USB-Stick ausgeführt werden
- Es erfolgen keine Einträge in der Windows Registry. Es werden auch keine Umgebungsvariablen und DLL-Dateien auf dem System erstellt
- Benutzereinstellungen und erstellte Dokumente werden in einer eigenen Sandbox gespeichert
- Nachteil: Funktioniert ausschließlich mit Microsoft Windows

Vollständige Virtualisierung (1/3)

- Vollständige Virtualisierungslösungen bieten einer VM eine vollständige, virtuelle PC-Umgebung inklusive eigenem BIOS
  - Jedes Gastbetriebssystem erhält eine eigene VM mit virtuellen Ressourcen (u.a. CPU, Hauptspeicher, Laufwerken, Netzwerkkarten)
- Es kommt ein **Virtueller Maschinen-Monitor** (VMM) zum Einsatz
  - Der VMM heißt auch **Typ-2-Hypervisor**
  - Der VMM läuft *hosted* als Anwendung im Host-Betriebssystem
  - Der VMM verteilt Hardwareressourcen an VMs
- Teilweise emuliert der VMM Hardware, die nicht für den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Betriebssysteme ausgelegt ist
  - Ein Beispiel sind Netzwerkkarten
  - Die Emulation populärer Hardware vermeidet Treiberprobleme



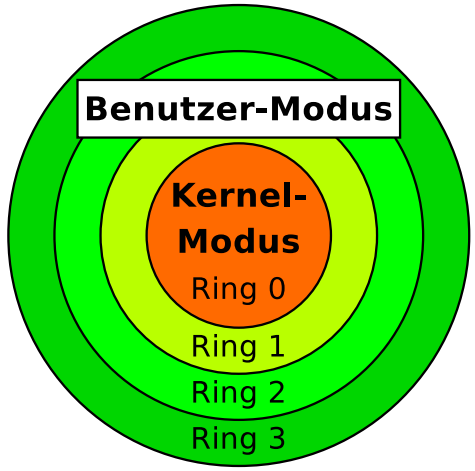
Virtualisierungsgrundlagen der x86-Architektur (1/2)

- x86-kompatible CPUs enthalten 4 Privilegienstufen
  - Ziel: Stabilität und Sicherheit verbessern
  - Jeder Prozess wird in einem Ring ausgeführt und kann sich nicht selbstständig aus diesem befreien

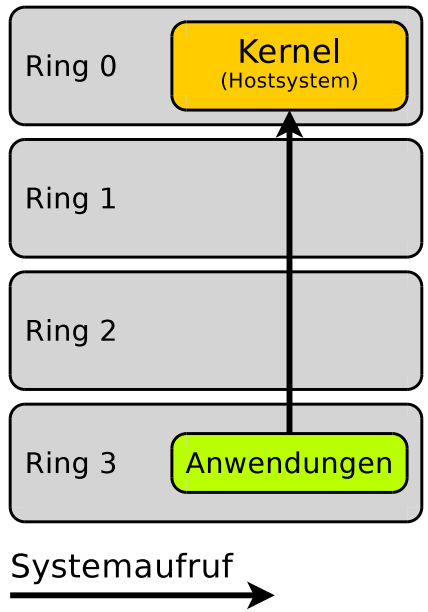
Realisierung der Privilegienstufen

- Das Register CPL (Current Privilege Level) speichert die aktuelle Privilegienstufe
- Quelle: Intel 80386 Programmer's Reference Manual 1986
  `http://css.csail.mit.edu/6.858/2012/readings/i386.pdf`

- In Ring 0 (= **Kernelmodus**) läuft der Betriebssystemkern
  - Hier haben Prozesse vollen Hardwarezugriff
  - Der Kern kann physischen Speicher ($\Longrightarrow$ Real Mode) adressieren
- In Ring 3 (= **Benutzermodus**) laufen die Anwendungen
  - Hier arbeiten Prozesse nur mit virtuellem Speicher



Keine Virtualisierung

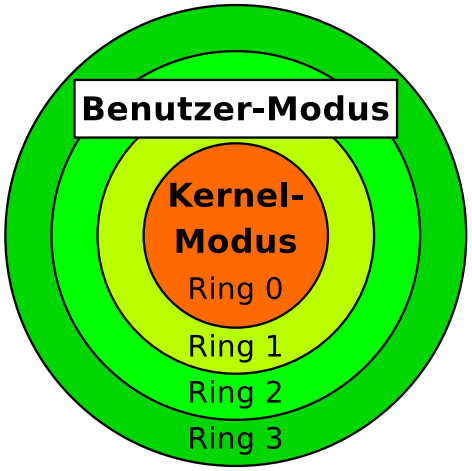


Virtualisierungsgrundlagen der x86-Architektur (2/2)

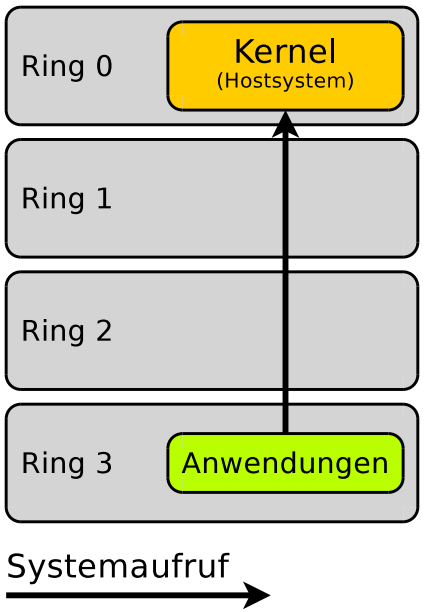
Moderne Betriebssysteme verwenden nur 2 Privilegienstufen (Ringe)

- Grund: Einige Hardware-Architekturen (z.B: Alpha, PowerPC, MIPS) unterstützen nur 2 Stufen
- Ausnahme: OS/2 nutzt Ring 2 für Anwendungen, die auf Hardware und Eingabe-/Ausgabeschnittstellen zugreifen dürfen (z.B. Grafiktreiber)

- Muss ein Prozess im Benutzermodus eine höher privilegierte Aufgabe erfüllen (z.B. Zugriff auf Hardware), kann er das dem Kernel durch einen **Systemaufruf** ($\Longrightarrow$ Foliensatz 7) mitteilen
  - Der Prozess im Benutzermodus erzeugt eine Exception, die in Ring 1 abgefangen und dort behandelt wird

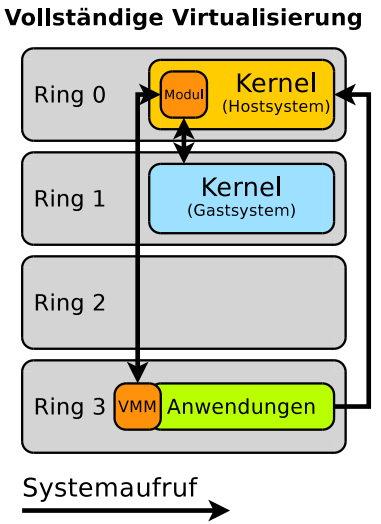


Keine Virtualisierung

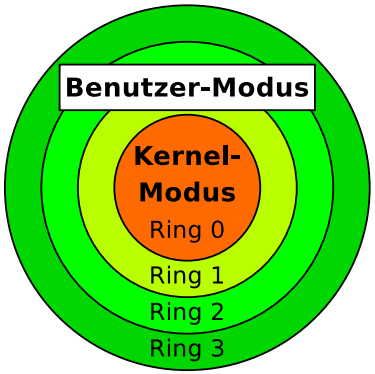


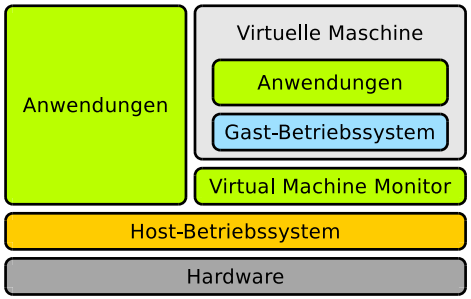
Vollständige Virtualisierung (2/3)

- Vollständige Virtualisierung nutzt die Tatsache, dass x86-Systeme meist nur 2 Privilegienstufen verwenden
  - Der VMM läuft wie die Anwendungen in Ring 3
  - VMs befinden sich im weniger privilegierten Ring 1



- Der VMM enthält für jede Ausnahme eine Behandlung, die privilegierte Operationen der Gastbetriebssysteme abfängt, interpretiert und ausführt





- VMs erhalten nur über den VMM Zugriff auf die Hardware
  - Garantiert kontrollierten Zugriff auf gemeinsam genutzte Systemressourcen

Vollständige Virtualisierung (3/3)

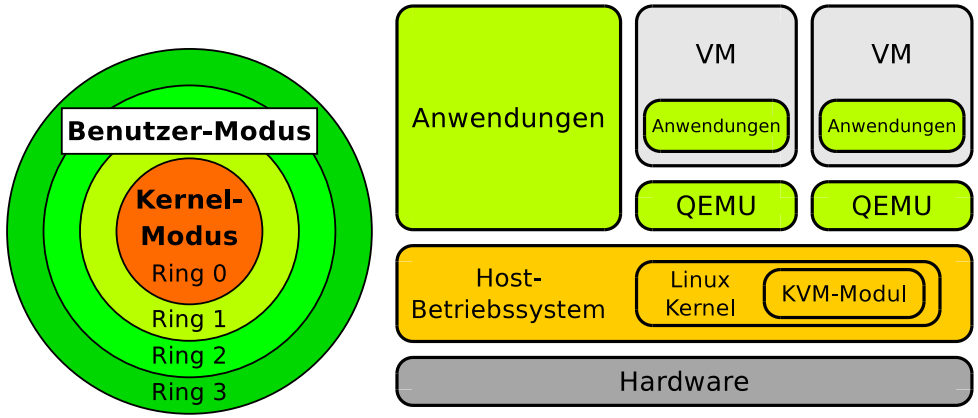
- Vorteile:
  - Kaum Änderungen an Host- und Gast-Betriebssystemen erforderlich
  - Zugriff auf die wichtigsten Ressourcen wird nur durchgereicht
    $\Longrightarrow$ Fast native Verarbeitungsgeschwindigkeit der Gast-Betriebssysteme
  - Jedes Gast-Betriebssystem hat seinen eigenen Kernel
    $\Longrightarrow$ Hohe Flexibilität
- Nachteile:
  - Wechsel zwischen den Ringen erfordern einen Prozesswechsel
    $\Longrightarrow$ Jeder Prozesswechsel verbraucht Rechenzeit
  - Fordert eine Anwendung im Gast-Betriebssystem die Ausführung eines privilegierten Befehls an, liefert der VMM eine Ersatzfunktion und diese weist die Ausführung des Befehls über die Kernel-API des Host-Betriebssystems an
    $\Longrightarrow$ Geschwindigkeitseinbußen

Beispiele für Vollständige Virtualisierung

- Beispiele für Virtualisierungslösungen, die auf dem Konzept des VMM basieren:
  - VMware Server, VMware Workstation und VMware Fusion
  - Microsoft Virtual PC (in der Version für x86)
  - Parallels Desktop und Parallels Workstation
  - VirtualBox
  - Kernel-based Virtual Machine (KVM)
  - Mac-on-Linux (MoL)

Kernel-based Virtual Machine (KVM)

- KVM ist als Modul direkt im Linux-Kernel integriert
  - KVM-Basismodul: `kvm.ko`
  - Hardwarespezifische Module: `kvm-intel.ko` und `kvm-amd.ko`



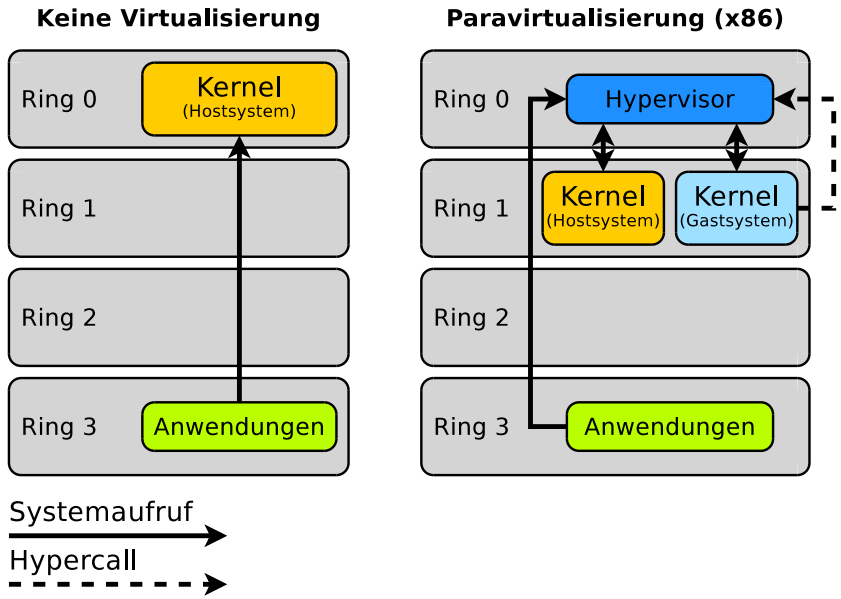
- Nach dem Laden der Module arbeitet der Kernel selbst als Hypervisor
- KVM kann nur mit CPUs mit Hardwarevirtualisierung arbeiten
  - Dadurch braucht KVM weniger Quellcode als z.B. Xen
- Neben den Kernelmodulen enthält KVM den Emulator QEMU
  - KVM stellt keine virtuelle Hardware zur Verfügung. Das macht QEMU
    - CPU-Virtualisierung stellt der Prozessor bereit (Intel VT oder AMD-V)
    - Hauptspeicher und Blockspeicher wird durch KVM virtualisiert
    - E/A wird durch einen QEMU-Prozess pro Gastsystem virtualisiert

Paravirtualisierung (1/4)

- Es wird keine Hardware virtualisiert oder emuliert
  - Gast-Betriebssystemen steht keine emulierte Hardwareebene, sondern eine API zur Verfügung
- Gast-Betriebssysteme verwenden eine abstrakte Verwaltungsschicht ($\Longrightarrow$ **Hypervisor**), um auf physische Ressourcen zuzugreifen
  - Hypervisor ist ein auf ein Minimum reduziertes **Metabetriebssystem**
    - Der Hypervisor verteilt Hardwareressourcen unter den Gastsystemen, so wie ein Betriebssystem dieses unter den laufenden Prozessen tut
    - Der Hypervisor ist ein **Typ-1-Hypervisor** und läuft *bare metal*
  - Ein Metabetriebssystem ermöglicht den unabhängigen Betrieb unterschiedlicher Anwendungen und Betriebssysteme auf einer CPU
- Der Hypervisor läuft im privilegierten Ring 0
  - Das Host-Betriebssystem läuft im weniger privilegierten Ring 1
    - Ein Host-Betriebssystem ist wegen der Gerätetreiber nötig

Paravirtualisierung (2/4)

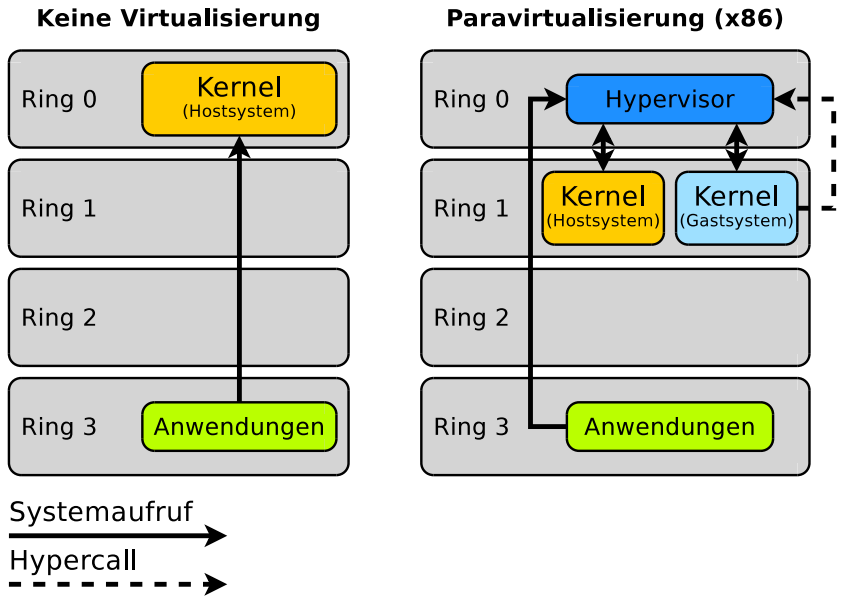
- Das Host-Betriebssystem läuft nicht mehr in Ring 0, sondern in Ring 1
  - Darum kann der Kernel keine privilegierten Anweisungen ausführen
  - Lösung: Der Hypervisor stellt **Hypercalls** zur Verfügung



- Hypercalls sind vergleichbar mit Systemaufrufen (System Calls)
  - Die Interrupt-Nummern sind verschieden
  - Fordert eine Anwendung die Ausführung eines Systemaufrufs an, wird eine Ersatzfunktion im Hypervisor aufgerufen
  - Der Hypervisor weist die Ausführung des Systemaufrufs über die Kernel-API des Betriebssystems an

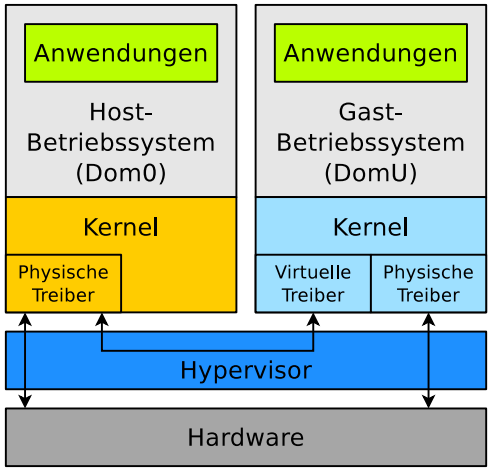
Paravirtualisierung (3/4)

- In den Betriebssystemkernen der Gast-Betriebssysteme müssen alle Systemaufrufe für Hardware-Zugriffe durch die entsprechenden Hypercall-Aufrufe ersetzt werden
- Das Abfangen und Prüfen der Systemaufrufe durch den Hypervisor führt nur zu geringen Geschwindigkeitseinbußen



- Beispiele: Xen, Citrix Xenserver, Virtual Iron, VMware ESX Server

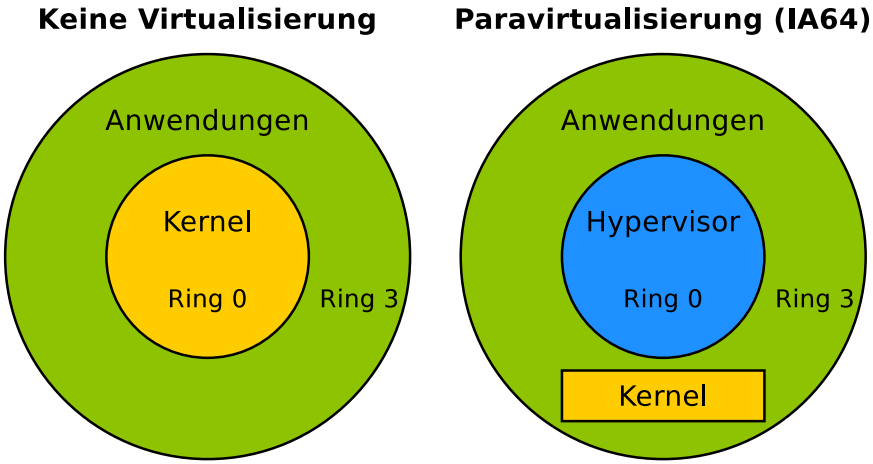
Paravirtualisierung (4/4)



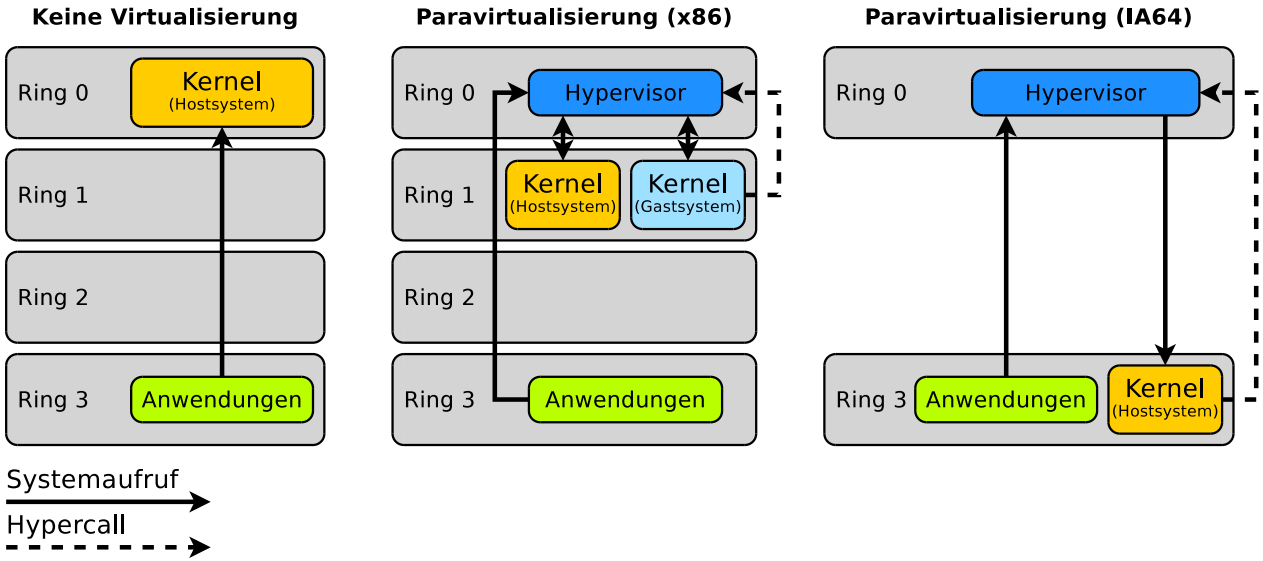
- VMs heißen **unprivilegierte Domain** (DomU)
- Der Hypervisor ersetzt das Host-Betriebssystem
  - Die Entwickler können aber nicht alle Treiber selbst schreiben und pflegen
    - Darum startet der Hypervisor eine (Linux-)Instanz mit ihren Treibern und leiht sich diese Treiber
    - Diese spezielle Instanz heißt Domain0 (Dom0)
- Nachteile:
  - Kernel der Gast-Betriebssysteme müssen für den Betrieb im paravirtualisierten Kontext angepasst sein
    - Rechteinhaber proprietärer Betriebssysteme lehnen eine Anpassung aus strategischen Gründen häufig ab
      $\Longrightarrow$ Funktioniert häufig nur mit OpenSource-Betriebssystemen
- Vorteil:
  - Geschwindigkeitseinbußen, die beim VMM entstehen, werden vermieden

Problem: x86-64-Architektur

- Die x86-64-Architektur (z.B. IA64) verzichtet auf die Ringe 1 und 2



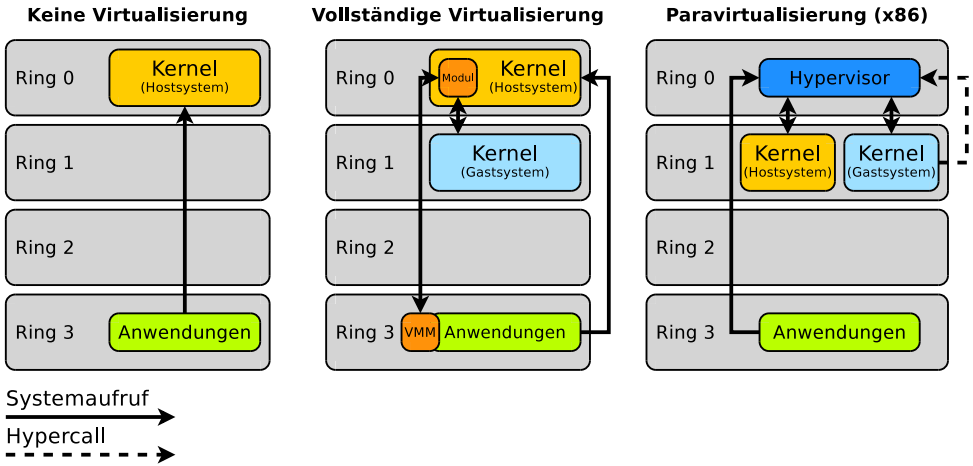
- Der Hypervisor befindet sich wie bei der x86-32-Architektur in Ring 0
- Der Betriebssystemkern wird bei der der x86-64-Architektur in Ring 3 zu den Anwendungen verschoben



- Der Betrieb der Hardwaretreiber und Anwendungen in einem Ring ist tendenziell unsicher

Zusammenfassung: Voll- vs. Paravirtualisierung

- **Paravirtualisierung** erfordert angepasste Gastsysteme
  - Typ-1-Hypervisor läuft *bare metal* (= ersetzt das Host-Betriebssystem)
  - Hypervisor läuft in Ring 0 und hat vollen Zugriff auf die Hardware
  - Beispiele: VMware ESX(i), Xen, Microsoft Hyper-V
- **Vollvirtualisierung** ermöglicht unveränderte Gastsysteme
  - VMM (Typ-2-Hypervisor) läuft *hosted* als Anwendung im Host-Betriebssystem
  - VMM läuft in Ring 3 auf der Ebene der Anwendungen
  - Beispiele: VMware Workstation, KVM, Oracle VirtualBox, Parallels



Hardware-Virtualisierung (1/2)

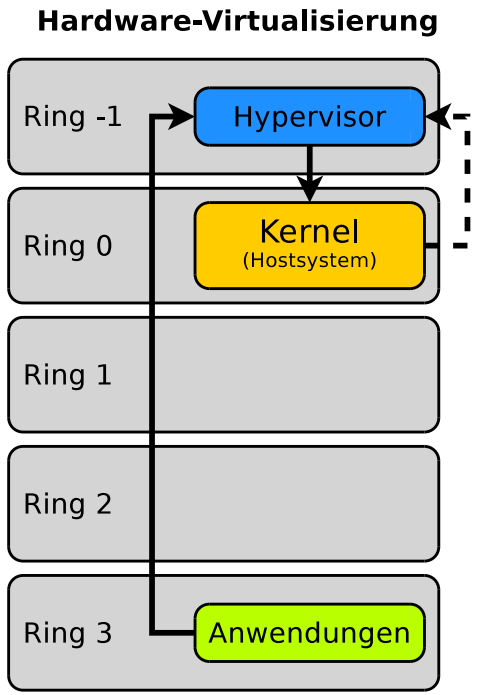
- Aktuelle Prozessoren von Intel und AMD enthalten Erweiterungen um Hardware-Virtualisierung zu ermöglichen
  - Vorteil: Unveränderte Betriebssysteme können als Gast-Systeme ausgeführt werden
  - Die Lösungen von Intel und AMD sind ähnlich aber inkompatibel
- Seit 2006 enthalten AMD64 CPUs den Secure-Virtual-Machine-Befehlssatz (**SVM**)
  - Die Lösung heißt **AMD-V** und war vorher als **Pacifica** bekannt
- Die Lösung von Intel heißt **VT-x** für IA32-CPUs und **VT-i** für Itanium
  - Intels Lösung lief vormals unter dem Stichwort **Vanderpool**

- Xen unterstützt ab Version 3 Hardware-Virtualisierung
- Auch Windows Server 2008 (Hyper-V) nutzt Hardwarevirtualisierung
- VirtualBox unterstützt Hardware-Virtualisierung
- KVM kann nur mit CPUs mit Hardwarevirtualisierung arbeiten

Hardware-Virtualisierung (2/2)

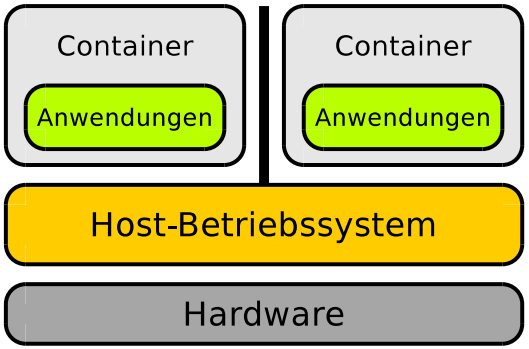
- Kern der Neuerung ist eine Überarbeitung der Privilegienstruktur
- Ein neuer Ring ($\Longrightarrow$ Ring -1) für den Hypervisor ist hinzugefügt
  - Der Hypervisor bzw. VMM läuft im Ring -1 und besitzt jederzeit die volle Kontrolle über die CPU und die Ressourcen, da damit ein höheres Privileg als Ring 0 implementiert ist

- VMs laufen in Ring 0 und heißen HVM
  - HVM = Hardware Virtual Machine
- Vorteile:
  - Gastbetriebssysteme müssen nicht angepasst sein
    - Auch proprietäre Betriebssysteme (z.B. Windows) laufen als Gastsysteme
  - Der Kernel läuft nicht wie bei Paravirtualisierung (IA64) auf der Privilegienstufe der Anwendungen



Betriebssystem-Virtualisierung / Container / Jails (1/2)

- Unter ein und demselben Kernel laufen mehrere voneinander abgeschottete identische Systemumgebungen
  - Es wird kein zusätzliches Betriebssystem gestartet
    - Es wird eine isolierte Laufzeitumgebung erzeugt
  - Alle laufenden Anwendungen verwenden denselben Kernel
    - Betriebssystem-Virtualisierung heißt **Container** in SUN/Oracle Solaris
    - Betriebssystem-Virtualisierung heißt **Jails** in BSD



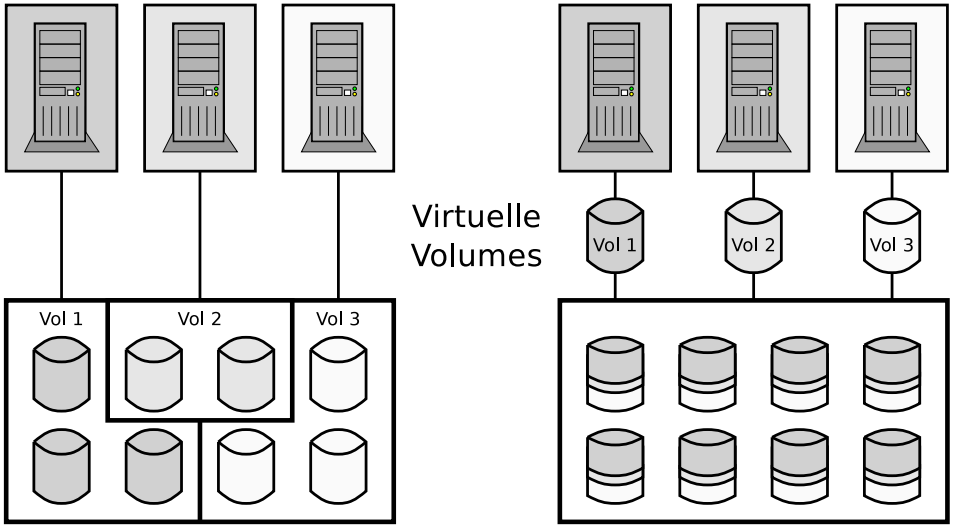
- Anwendungen sehen nur Anwendungen in der gleichen virtuellen Umgebung
- Ein Vorteil ist der geringe Overhead, da der Kernel in gewohnter Weise die Hardware verwaltet

- Nachteil: Alle virtuellen Umgebungen nutzen den gleichen Kernel
  - Es werden nur unabhängige Instanzen eines Betriebssystemes gestartet
  - Verschiedene Betriebssysteme können nicht gleichzeitig verwendet werden

Betriebssystem-Virtualisierung / Container / Jails (2/2)

- Diese Art der Virtualisierung nutzt man, um Anwendungen in isolierten Umgebungen mit hoher Sicherheit zu betreiben
- Besonders Internet-Service-Provider, die (virtuelle) Root-Server oder Webdienste auf Mehrkernprozessorarchitekturen anbieten, nutzen diese Form der Virtualisierung
  - Wenig Performance-Verlust, hoher Grad an Sicherheit
- Beispiele:
  - SUN/Oracle Solaris (2005)
  - OpenVZ für Linux (2005)
  - Linux-VServer (2001)
  - FreeBSD Jails (1998)
  - Parallels Virtuozzo (2001, kommerzielle Variante von OpenVZ)
  - FreeVPS
  - Docker (2013)
  - chroot (1982)

Speichervirtualisierung



- Speicher wird in Form virtueller Laufwerke (*Volumes*) den Benutzern zur Verfügung gestellt
- Logischer Speicher wird vom physischen Speicher getrennt

- Vorteile:
  - Nutzer sind nicht an die physischen Grenzen der Laufwerke gebunden
  - Physischen Speicher umstrukturieren/erweitern stört die Nutzer nicht
  - Redundantes Vorhalten erfolgt transparent im Hintergrund
  - Besserer Auslastungsgrad, da der physische Speicher effektiver auf die Benutzer aufgeteilt werden kann
- Nachteil: Professionelle Lösungen sind teuer
- Bekannte Anbieter: EMC, HP, IBM, LSI und SUN/Oracle

Netzwerkvirtualisierung via Virtual Local Area Networks

- Verteilt aufgestellte Geräte können via VLAN in einem einzigen virtuellen (logischen) Netzwerk zusammengefasst werden
  - VLANs trennen physische Netze in logische Teilnetze (Overlay-Netze)
    - VLAN-fähige Switches leiten Pakete eines VLAN nicht in andere VLANs weiter
    - Ein VLAN ist ein nach außen isoliertes Netz über bestehende Netze
  - Zusammengehörende Geräte und Dienste in eigenen VLANs konsolidieren
    - Vorteil: Andere Netze werden nicht beeinflusst
      $\Longrightarrow$ Höhere Sicherheit

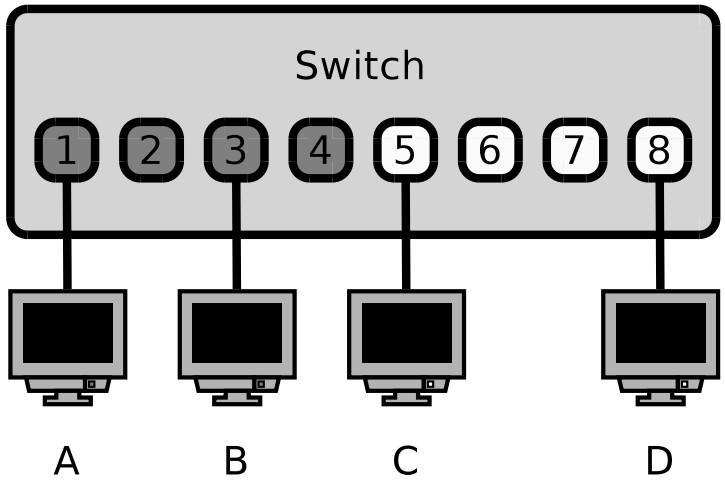
Gute einführende Quellen

Benjamin Benz, Lars Reimann. *Netze schützen mit VLANs*. 11.9.2006
`http://www.heise.de/netze/artikel/VLAN-Virtuelles-LAN-221621.html`
Stephan Mayer, Ernst Ahlers. *Netzsegmentierung per VLAN*. c't 24/2010. S.176-179

Typen von VLANs

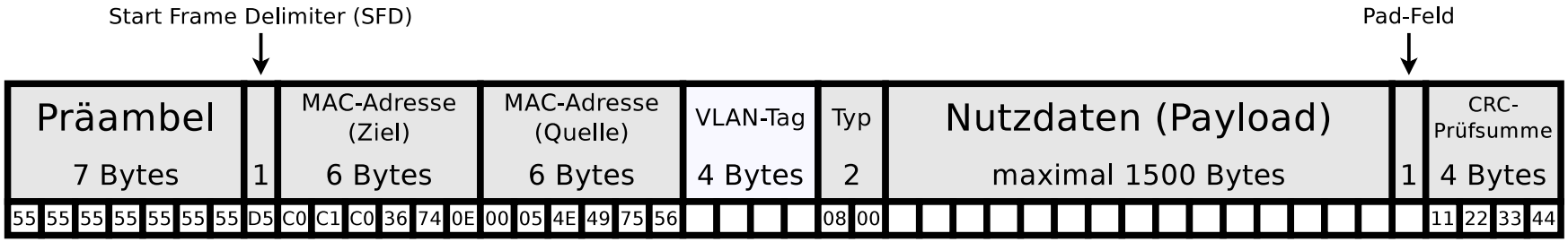
1. Ältester Standard: **Statisches VLAN**
   - Die Anschlüsse eines Switches werden in logische Switches unterteilt
   - Jeder Anschluss ist fest einem VLAN zugeordnet oder verbindet unterschiedliche VLANs
   - Schlecht automatisierbar

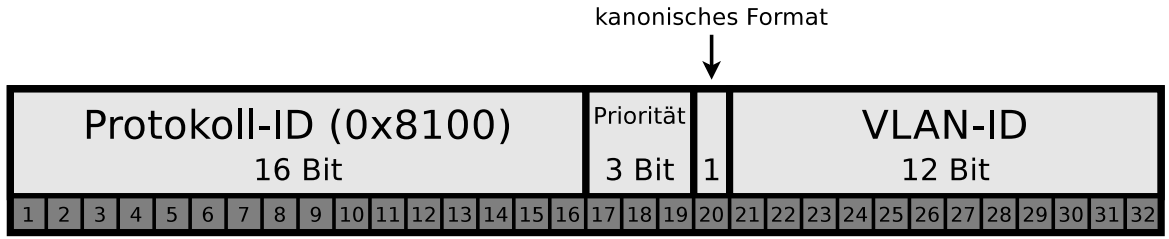
Nur Knoten A und B sowie Knoten C und D können miteinander kommunizieren, obwohl Sie mit dem gleichen Switch verbunden sind



2. Aktuell: **Paketbasiertes, dynamisches VLAN** nach IEEE 802.1Q
   - Pakete der Vermittlungsschicht enthalten eine spezielle VLAN-Markierung (*Tag*)
   - Dynamische VLANs können mit Hilfe von Skripten rein softwaremäßig erzeugt, verändert und entfernt werden

Ethernet-Rahmen mit VLAN-Tag nach IEEE 802.1Q





- Länge der VLAN-Markierung: 32 Bits
- Die Protokoll-ID (16 Bits) hat immer den Wert 0x8100 für IPv4
- 3 Bits repräsentieren die Priorität (QoS)
  - 0 steht für die niedrigste und 7 für die höchste Priorität
  - Damit können bestimmte Daten (z.B. VoIP) priorisiert werden
- Kanonisches Format (1 Bit) $\Longrightarrow$ höchstwertiges Bit der MAC-Adressen
  - 0 = Ethernet, 1 = Token Ring
- 12 Bits enthalten die ID des VLAN, zu dem das Paket im Rahmen gehört

Beispiele sinnvoller Einsatzgebiete von VLANs

- **Telekom Entertain**
  - DSL-Anschluss mit Festnetzanschluss und IPTV ($\Longrightarrow$ *Triple Play*)
  - Verwendet 2 VLANs, um den IPTV-Datenverkehr zu bevorzugen
    - „Normales“ Internet via PPPoE über VLAN ID 7
    - IPTV ohne Einwahl via VLAN ID 8
- **Eucalyptus**
  - Private Cloud Infrastrukturdienst (IaaS)
  - Jede Virtuelle Maschine (Instanz) ist einer Sicherheitsgruppe zugeordnet
    - Jede Sicherheitsgruppe hat eigene Firewall-Regeln
  - Eucalyptus kann für jede Sicherheitsgruppe ein eigenes VLAN anlegen
    - Isolation des Datenverkehrs der Instanzen anhand der Sicherheitsgruppen
- **Rechenzentren** oder auch **Büro zuhause**
  - Trennung des Datenverkehrs nach ökonomischen Gesichtspunkten
  - Ziel: Absicherung vor Bedienfehlern und fehlerhafter Software
    - Ein VLAN als „Produktionsnetz“ mit den wichtigen Diensten
    - Zusätzliche VLANs für Experimente, Projektarbeit oder Spiele der Kinder

Gründe für Virtualisierung (1/2)

- Bessere Ausnutzung der Hardware
  - Serverkonsolidierung: Zusammenlegen vieler (virtueller) Server auf weniger physischen Servern
    - Kostensenkung bei Hardware, Verbrauchskosten (Strom, Kühlung), Stellplätze, Administration, usw.
- Vereinfachte Administration
  - Anzahl physischer Server wird reduziert
  - Ausgereifte Managementwerkzeuge existieren
  - VMs können im laufenden Betrieb verschoben werden (Live Migration)
- Vereinfachte Bereitstellung
  - Neue Infrastrukturen und Server können innerhalb von Minuten manuell oder automatisch erzeugt werden

Gründe für Virtualisierung (2/2)

- Maximale Flexibilität
  - VMs können leicht vervielfältigt und gesichert werden
  - Snapshots vom aktuellen Zustand einer VM können erzeugt und wieder hergestellt werden
- Höhere Sicherheit
  - VMs sind gegenüber anderen VMs und dem Host-System isoliert
  - Unternehmenskritische Anwendungen können in einer VM gekapselt und so in einer sicheren Umgebung laufen
  - Ausfall einer VM tangiert keine anderen VMs oder den Host
- Optimierung von Software-Tests und Software-Entwicklung
  - Gleichzeitiger Betrieb mehrerer Betriebssysteme
  - Testumgebungen können schnell aufgesetzt werden
- Unterstützung alter Anwendungen
  - Legacy-Betriebssysteme oder Legacy-Anwendungen, für die keine Hardware mehr zu bekommen ist, können reanimiert werden

Nachteile und Grenzen der Virtualisierung

- Leistungsverlust
  - Aktuelle Virtualisierungstechnologien sind so ausgereift, dass sich der Leistungsverlust mit 5-10% nicht sonderlich auswirkt
  - Seit aktuelle Computer-Systeme Mehrkernprozessoren mit Unterstützung für Hardware-Virtualisierung (Intel VT/VT-x und AMD-V) enthalten, spielt der Leistungsverlust eine zunehmend untergeordnete Rolle
- Nicht jede Hardware kann angesprochen oder emuliert werden
  - Kopierschutzstecker (Hardwaredongles) sind ein Problem
  - Beschleunigte Grafik kann nicht immer realisiert werden
- Beim Ausfall eines Hosts würden mehrere virtuelle Server ausfallen
  - Ausfallkonzepte und redundante Installationen sind notwendig
- Virtualisierung ist komplex
  - Zusätzliches Know-how ist notwendig

Virtualisierung im Cloud Computing

- **Anwendungsvirtualisierung** (JVM) in Plattformen wie der GAE
- **Partitionierung** spielt wegen der hohen Anschaffungskosten nur in Bereichen wie Cloud Gaming eine Rolle
- **Vollständige Virtualisierung** spielt im Dienstangebot von Cloud-Anbietern mit Ausnahme von KVM zurzeit kaum eine Rolle
  - KVM kann von einigen Private Cloud-Lösungen verwendet werden
- Xen (**Paravirtualisierung**) ist die Basis der AWS
  - Viele Private Cloud-Lösungen verwenden Xen
- **Betriebssystem-Virtualisierung** kann in Cloud-Umgebungen helfen, die Hardware effizienter auszunutzen
- **Speichervirtualisierung** ermöglicht in Cloud-Rechenzentren den Speicher zu konsolidieren und besser auszunutzen
- Einige öffentlich zugängliche und private Cloud-Dienste nutzen **VLANs**, um die Netzwerkkommunikation der Instanzen vom Produktionsnetzwerk der physischen Infrastruktur zu trennen