

HOCHSCHULE DER MEDIEN

BACHELORTHESES

**Sicherheitsbetrachtungen von  
Applikations-  
Containersystemen in  
Cloud-Infrastrukturen am  
Beispiel Docker**

*Moritz Hoffmann*

Studiengang: Mobile Medien

Matrikelnummer: 26135

E-Mail: [mh203@hdm-stuttgart.de](mailto:mh203@hdm-stuttgart.de)

21. Januar 2016

*Erstbetreuer:*

Prof. Dr. Joachim Charzinski  
Hochschule der Medien

*Zweitbetreuer:*

Patrick Fröger  
ITI/GN, Daimler AG

# Eidesstattliche Erklärung

*„Hiermit versichere ich, Moritz Hoffmann, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Sicherheitsbetrachtungen von Applikations-Containersystemen in Cloud-Infrastrukturen am Beispiel Docker“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden. Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“*

---

Unterschrift

---

Datum

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Überblick</b>	<b>1</b>
1.1	Struktur der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Virtualisierung . . . . .	5
2.1.1	Hypervisor-basierte Virtualisierung . . . . .	6
2.1.2	Container-basierte Virtualisierung . . . . .	7
2.1.3	Einordnung Docker . . . . .	9
2.2	Sicherheitsziele in der IT . . . . .	10
2.2.1	Vertraulichkeit . . . . .	10
2.2.2	Integrität . . . . .	10
2.2.3	Authentizität . . . . .	10
2.2.4	Verfügbarkeit . . . . .	10
2.2.5	Verbindlichkeit . . . . .	11
2.2.6	Privatheit, Anonymität . . . . .	11
2.2.7	Authorisierung . . . . .	11
2.3	Einführung in Docker . . . . .	11
2.3.1	Docker Architektur . . . . .	13
2.3.2	Dockerfile . . . . .	14
2.3.3	Containerformate LXC, libcontainer, runC und OCF . . . . .	15
2.3.4	Images . . . . .	16
2.3.5	Container . . . . .	19
2.3.6	Registries . . . . .	19

<b>3</b>	<b>Ziel der Arbeit</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Security aus Linux Kernel-Features</b>	<b>23</b>
4.1	Isolierung durch <b>namespaces</b> . . . . .	24
4.1.1	Prozessisolierung (process namespace) . . . . .	24
4.1.2	Dateisystemisolierung (filesystem namespace) . . . . .	24
4.1.3	Geräteisolierung (device namespace) . . . . .	24
4.1.4	IPC-Isolierung (ipc namespace) . . . . .	24
4.1.5	UTS-Isolierung (uts namespace) . . . . .	24
4.1.6	Netzwerkisolierung (network namespace) . . . . .	24
4.1.7	Userisolierung (user namespace) . . . . .	24
4.2	Ressourcenverwaltung / Limitierung von Ressourcen durch <b>control groups</b> . . . . .	24
4.3	Einschränkungen von Zugriffsrechten . . . . .	24
4.3.1	<b>capabilities</b> . . . . .	24
4.3.1.1	Beispiele, <b>/proc</b> -Verzeichnis, (Un-)Mounten des Host-Filesystems . . . . .	24
4.3.2	Linux Security Module (LSM) und Mandatory Access Control (MAC) . . . . .	24
4.3.2.1	SELinux . . . . .	24
4.3.2.2	AppArmor . . . . .	24
4.3.2.3	Seccomp . . . . .	24
4.4	Docker im Vergleich zu anderen Containerlösungen . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Security im Docker-Ökosystem</b>	<b>25</b>
5.1	Docker Images und Registries . . . . .	26
5.1.1	neues Signierungs-Feature . . . . .	26
5.2	Docker Daemon . . . . .	26
5.2.1	REST-API . . . . .	26
5.2.2	Support von Zertifikaten . . . . .	26
5.3	Containerprozesse . . . . .	26
5.4	Docker Cache . . . . .	26
5.5	<b>privileged Container</b> . . . . .	26

5.6	Networking . . . . .	26
5.6.1	bridge Netzwerk . . . . .	26
5.6.2	overlay Netzwerk . . . . .	26
5.6.3	DNS . . . . .	26
5.6.4	Portmapping . . . . .	26
5.7	Daten-Container . . . . .	26
5.8	Docker mit VMs . . . . .	26
5.9	Sicherheitskontrollen für Docker . . . . .	26
5.10	Tools rund um Docker . . . . .	26
5.10.1	Docker-Erweiterungen . . . . .	26
5.10.1.1	Docker Swarm . . . . .	26
5.10.1.2	Docker Compose . . . . .	26
5.10.1.3	Nautilus Project . . . . .	26
5.10.2	Third-Party Tools . . . . .	26
5.10.3	Vagrant . . . . .	26
5.10.4	Kubernetes . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Docker in Unternehmen/Cloud-Infrastrukturen</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>29</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Google Trends der Suchbegriffe „Virtualization“ (rot), „Docker“ (blau) und „LXC“ (gelb) von Januar 2006 bis Januar 2016[15]. . . . .	2
2	Die Client-Server-Architektur von Docker [6]. . . . .	14
3	Aufbau eines Docker-Hosts, wenn dieser unter einem Linux-Betriebssystem betrieben wird, das direkt auf der Serverhardware läuft. [38, S.3]. . . . .	15
4	Dateien im Ordner eines Images (eigene Abbildung). . . . .	16
5	Visualisierung eines Vergleichs von Images von <i>Redis</i> , <i>Nginx</i> und <i>CentOS</i> auf Schichtebene [21]. . . . .	18
6	Screenshot von der Ausführung des Befehls <code>docker pull centos:7.2.1511</code> (eigene Abbildung). . . . .	18
7	Screenshot von der Ausführung des Befehls <code>docker images</code> (eigene Abbildung). . . . .	18
8	Web-UI des Docker Hubs mit den beliebtesten Repositories [9].	20

# Tabellenverzeichnis



# Kapitel 1

## Überblick

Virtualisierung entwickelte sich in den letzten Jahren zu einem allgegenwärtigen Thema in der IT-Industrie. Unter ihr versteht man die Nachahmung und Abstraktion von physischen Ressourcen, z.B. der CPU oder des Speichers, die in einem virtuellen Kontext von Softwareprogrammen genutzt wird.

Die Vorteile von Virtualisierung umfassen Hardwareunabhängigkeit, Verfügbarkeit, Isolierung und Sicherheit, welche die Erfolgsgrundlage der Virtualisierung in heutigen Cloud-Infrastrukturen bilden [43, S.1]. Vor allem in Rechenzentren bieten sich Virtualisierungen an, um die Serverressourcen effizienter zu nutzen [37, S.1]. Letztendlich haben es Virtualisierungen ermöglicht, Serverressourcen in der Form von Clouds wie z.B. den *Amazon Web Services*[2] und auf Basis eines Subskriptionsmodells nutzen zu können [37, S.1].

Heutzutage existieren mehrere serverseitige Virtualisierungstechniken, wovon die Hypervisor-gestützten Methoden mit den etablierten Vertretern *Xen*[18], *KVM*[16], *VMware ESXi*[17] und *Hyper-V*[33] die meistverbreitesten sind [43, S.2]. Die alternative containerbasierte Virtualisierung erlebt mit dem Erfolg von Docker seit dessen Release im März 2013 einen Aufschwung [11]. Wie die Google Trends in Abb.1 zeigen, stieg das Interesse an Docker seit dessen Release kontinuierlich an, während das Suchwort „virtualization“ im Jahr 2010 seinen Höhepunkt hatte und seitdem an Popularität verlor. Auch

das Interesse an der Container-Technologie *LXC*, aus der Docker entstand, bleibt weit hinter der von Docker zurück [15].

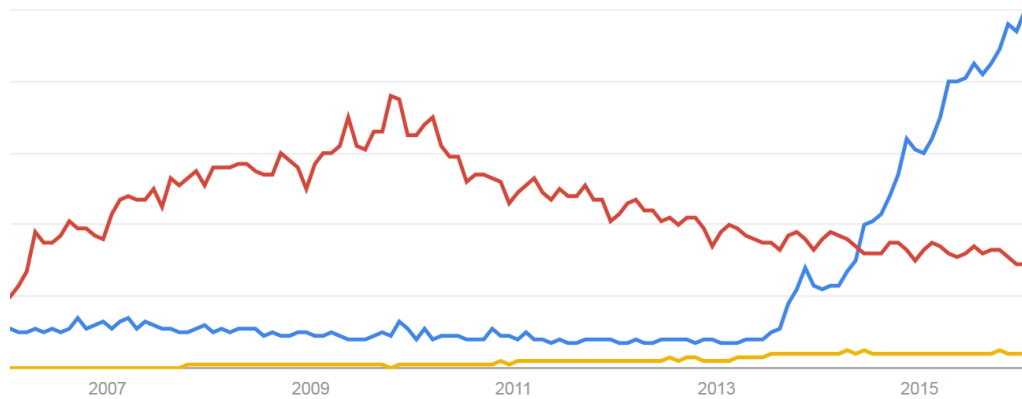


Abbildung 1: Google Trends der Suchbegriffe „Virtualization“ (rot), „Docker“ (blau) und „LXC“ (gelb) von Januar 2006 bis Januar 2016[15].

Obwohl das Konzept von Containern bereits im Jahr 2000 als *Jails* in dem Betriebssystem *FreeBSD* und seit 2004 als *Zones* unter *Solaris* verwendet wurde [28][27], gelang keiner dieser Technologien vor Docker der medienwirksame Durchbruch. Wie Docker den bis 2013 vorherrschenden Ruf von Container-Technologien, dass Container noch nicht ausgereift seien [43, S.8], nachhaltig verändern konnte, ist in der Einführung zu Docker in Kapitel 2.3 beschreiben.

Heute sind Container in vielen Szenarien, v.a. skalierbaren Infrastrukturen, trotz intrinsischer Sicherheitsschwächen gegenüber Hypervisor-gestützten Virtualisierungsarten beliebt. Vor allem Multi-Tenant-Services werden gerne mit Docker umgesetzt [42, S.6][6].

## 1.1 Struktur der Arbeit

Zu Beginn wird im Grundlagenkapitel 2.1 die Virtualisierung beschrieben. Dabei werden die zwei prominentesten Virtualisierungstechniken, Hypervisor-

basierte (Sektion 2.1.1) und Container-basierte (Sektion 2.1.2) Virtualisierung, gegenübergestellt. In diesem Kapitel werden nur die für diese Arbeit relevante Techniken der Systemvirtualisierung beschrieben, also solche, in denen Funktionen von kompletten Betriebssystemen abstrahiert werden. Die Anwendungs-, Storage- oder Netzwerkvirtualisierung wird nicht behandelt. Anschließend werden die allgemeinen Sicherheitsziele in der IT erklärt, auf die in der Untersuchung Bezug genommen wird. Abgeschlossen wird das Grundlagenkapitel mit einer Einführung in Docker, in der die Terminologie sowie Funktionsweise dieser Plattform erläutert wird.

Die genannten Grundlagen sind sehr weitreichende Themengebiete. Um in den einleitenden Kapiteln nicht ausführlich zu werden, sind Eckdaten einiger am Rande auftretender Begriffe im angehängten Glossar zusammengefasst.

Der Hauptteil untergliedert sich in mehrere Sicherheitsgebiete, in die die Arbeit eingeteilt ist:

1. **Sicherheitsfunktionen, die der Linux-Kernel anbietet** und teils obligatorisch von Docker eingesetzt werden. Darunter fallen Techniken zur Isolierung, Ressourcen- und Rechteverwaltung von Containern sowie Methoden, um das Hostsystem mit zusätzlichen Linux Sicherheitsfeatures abzusichern.
2. **Sicherheit im Docker-Ökosystem**, also z.B.
  - Integrität von Images
  - Absicherung der Kommunikation zwischen dem Docker-Client und dem Docker-Host
  - Best-Practices im Umgang mit Docker-Komponenten sowie Sicherheitsrichtlinien.
  - Verwendung von Third-Party Tools, wie *Kubernetes*
3. **Sicherheit von Docker in Cloud-Infrastrukturen**

Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Aus-

blick auf die Zukunft von Docker und der containerbasierter Virtualisierung.

In der Arbeit vorkommende Produkt-, Technologie- oder Unternehmensnamen sind durchgehend *kursiv* gedruckt. Eine Ausnahme bildet Docker, in der die reguläre Schreibweise für die Plattform Docker vorgesehen ist, während die kursive Variante das Unternehmen *Docker* meint.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Virtualisierung

Bei der Virtualisierung werden ein oder mehrere virtuelle IT-Systeme auf einem physischen Computer betrieben. Mehrere solcher Computer können eine virtuelle Infrastruktur bilden, in der physische und virtuelle Maschinen gemeinsam verwaltet werden können.

Virtualisierte Komponenten nutzen im Vergleich zu nativen (physischen) Systemen eine zusätzliche Softwareschicht, die den virtualisierten Komponenten, üblicherweise als virtuelle Maschinen (VMs) oder Container bezeichnet, mehrere Abstraktionen anbietet, um Funktionen des Hosts zu nutzen [43, S.2]. Das Betriebssystem, das direkt auf der Hardware läuft, wird als Host bezeichnet. Solche, die virtualisiert auf dem Host laufen, werden als Gastsysteme bezeichnet.

Der Einsatz von Virtualisierung bietet vielfältige Vorteile für IT-Unternehmen. Sie können Kosten für Hardwarebeschaffung, Strom und Klimatisierung einsparen, wenn die Computerressourcen effizienter genutzt werden. Durch die damit verbundene Zentralisierung und Konsolidierung können auch in der Administration Ausgaben reduziert werden [40, S.1].

Sowohl Hypervisor-gestützte VMs als auch Container erwecken aus Sicht des Gasts den Eindruck, dass ein alleinstehendes Betriebssystem ausgeführt wird (QUELLE: “OpenVZ,” 2012. [Online]. Available: <http://www.openvz.org>). Um diese Illusion zu schaffen, wird jedoch wie beschrieben jeweils ein anderer Ansatz eingesetzt.

### 2.1.1 Hypervisor-basierte Virtualisierung

Im Kontext von einer Hypervisor-basierten Virtualisierung, wird die virtuelle Umgebung eine VM genannt. Die VMs enthalten jeweils eine Umgebung, die Abstraktionen eines sogenannten Hypervisors nutzt, um Hardwareressourcen des Hosts zu verwenden. Der Hypervisor, auch seltener *Virtual Machine Monitor* (*VMM*) genannt, ist Software, die zwischen einem Host und einem Gast (der VM) vermittelt [42, S.6][43, S.2][37, S.2].

Durch diese Technik läuft in jeder VM ein eigenes Betriebssystem, das von solchen anderer VMs komplett isoliert läuft. Durch die Abstraktion des zwischenliegenden Hypervisors ist es möglich, mehrere unterschiedliche Gastbetriebssysteme auf einem physikalischen Host auszuführen [43, S.2].

Der größte Kritikpunkt dieser Art von Virtualisierung ist deren hoher Bedarf an Hostressourcen, da diese für jede gestartete VM komplett virtualisiert werden müssen, sodass innerhalb der VM ein Gast-OS ausgeführt werden kann [35, S.1][36, S.3].

Hypervisor-technologien werden unter sich in solche von Typ 1 und Typ 2 unterschieden. Typ 1 Hypervisor operieren direkt auf der Hardware des Hosts, während Typ 2 auf einem Host-OS agiert, welches selbst direkt Hardware nutzt. Durch die Trennung von Hypervisor und Host-OS in der Architektur des Typs 2, ist dieser aus Sicht der Performance dem Typ 1 unterlegen [37, S.2].

Bekannte Vertreter von Hypervisoren sind die kommerziellen *ESXi* der Firma *VMware* und *Hyper-V* von *Mircosoft*, sowie die ebenfalls namhaften Open-Source Hypervisor *Xen* und *KVM* [36, S.1].

### 2.1.2 Container-basierte Virtualisierung

Container-basierte Virtualisierung wird vorrangig als leichtgewichtige Alternative zu Hypervisor-basierten Virtualisierungen gesehen [43, S.2], die den Hostkernel nutzt, um virtuelle Umgebungen zu schaffen. Einen Hypervisor wird in diesem Ansatz nicht eingesetzt [42, S.7]. Vielmehr wird das native System und dessen Ressourcen partitioniert, sodass mehrere virtuelle, voneinander isolierte Instanzen betrieben werden können, die als Container bezeichnet werden [43, S.2][37, S.1].

Container sind durch den Unix-Befehl *chroot* [23] inspiziert, der schon seit 1979 im Linux-Kernel integriert ist. In *FreeBSD* wurde eine erweiterte Variante von *chroot* verwendet, um sogenannte *Jails* (FreeBSD-spezifischer Begriff) umzusetzen [10]. In *Solaris*, ein von der Firma *Oracle* entwickeltes Betriebssystem für Servervirtualisierungen [19], wurde dieser Mechanismus in Form von *Zones* (Solaris-spezifischer Begriff) [34] weiter verbessert und es etablierte sich der Name *Container* als Überbegriff, als weitere proprietäre Lösungen von *HP* und *IBM* zur selben Zeit auf dem Markt erschienen [36, S.2].

Während ein Hypervisor für jede VM das komplette Gast-OS abstrahiert, werden für Container direkt Funktionen des Hosts zur Verfügung gestellt. Deswegen werden Containerlösungen auch als Virtualisierungen auf Betriebssystemebene (des Hosts) bezeichnet [42, S.6][43, S.2]. Aus technischer Sicht ist der Hypervisor ein Stück Software, das eine Abstraktion der Hardware bereitstellt, während Container direkt via *System Calls* mit der Hostmaschine kommunizieren. Das hat zur Folge, dass alle Container direkt mit einem Host kommunizieren und sich damit den Kernel dessen teilen [43, S.2][36, S.3]. Moderne Container können als vollwertige Systeme betrachtet werden, nicht mehr als - wie ursprünglich vorgesehen - reine Ausführungsumgebungen [42, S.7].

Das Containern zugrundeliegende Feature der Isolation wird bei Linux-basierenden Containerlösungen mit *namespaces*, einem Feature des Kernels, realisiert. Die Verteilung und das Management der Hostressourcen wird mit *control groups* umgesetzt. Beide Techniken werden den Kapiteln 4.1 und 4.2 genauer be-

trachtet.

Containerlösungen umfassen die Technologien *OpenVZ*, *Solaris Zones*, sowie Linux-Container wie *Linux VServer*, *Linux Container (LXC)* [42, S.7][43, S.1] und *Docker*, welches im Fokus dieser Arbeit steht.

In Container-basierten Systemen hingegen, laufen die Container im „User Space“ direkt auf dem Kernel des Host-OS und nutzen dessen *System Call*-Interface [42, S.6+7]. Dadurch muss nicht das gesamte Betriebssystem virtualisiert werden und es kommt im Vergleich zu der Hypervisor-Virtualisierung zu einer fast nativen Performance [43, S.1], da der Virtualisierungs-Overhead des Hypervisors wegfällt. Unter dem Gesichtspunkt der Rechenleistung beispielsweise, kommt es bei Containerlösungen im Durchschnitt zu einem Overhead von ca. 4%, wenn diese mit der nativen Leistung einer festen Hardwarkonfiguration verglichen wird [43, S.4][39, S.5]. In traditionellen Virtualisierungen beansprucht der Hypervisor allein etwa 10-20% der Hostkapazität [35, S.2][39, S.5]. In der Praxis machen sich diese beiden Verhältnisse an einer hohen Dichte an Containern auf einem Container-basiertem Host und dadurch einer indirekt besseren Ressourcenausnutzung bemerkbar [42, S.7+8].

Aus der Sicht der Sicherheit kann das Fehlen eines Hypervisors doppeldeutig interpretiert werden: Zum einen schrumpft die Angriffsfläche des Hosts, da nicht das gesamte Betriebssystem virtualisiert wird [42, S.6]. Je weniger Hostfunktionen virtualisiert werden, desto geringer wird auch das Sicherheitsrisiko, dass eine Hostfunktion von einem Angreifer missbraucht werden kann. Zum anderen ist es aus designtechnischer Sicht unsicherer die virtuellen Umgebungen direkt auf einem Host laufen zu lassen. Angriffe, die von einem Gast-OS über die zusätzliche Softwareschicht eines Hypervisors an den Host gerichtet sind, sind, wie der Erfolg von Hypervisoren der letzten Jahre bestätigt, sehr schwierig durchzuführen. Deswegen werden Container als weniger sicher im Vergleich zur Hypervisor-gestützten Virtualisierung gesehen [42, S.6]. Mit welchen Sicherheitsmechanismen Container ausgerüstet sind, ist Gegenstand von Kapitel 4.

Ein Benchmarktest, der den Durchsatz (Operationen pro Sekunde) eines



*VoltDB*-Setups[31] von Hypervisor-basierte Cloudlösungen mit containerbasierten Cloudlösungen verglichen, kam zu dem Ergebnis, dass die Containerlösung unter genanntem Gesichtspunkt eine fünffache Leistung aufwies [30, S.2+3].

Auch im Lifecycle von virtuellen Instanzen bieten Container Vorteile: Während in traditionellen VMs das komplette Gast-OS neu gestartet werden muss, um Änderungen zu übernehmen, entspricht ein Containerneustart nur einem Neustart eines Prozesses auf Host [36, S.2].

Containerlösungen erlauben es, mehrere getrennte Instanzen parallel auf einem einzigen physischen Host zu betreiben [42, S.6]. Dadurch, dass ein Hypervisor in einer solchen Konfiguration nicht existiert und die Container direkt Hostkernel-Features nutzen, gibt es einen entscheidenden Nachteil für Containerlösungen - und damit auch Docker - gegenüber Hypervisor-basierter Virtualisierung: Das Container-Betriebssystem muss wie das Host-Betriebssystem Linux-basiert sein. In einem Host auf dem *Ubuntu Server* installiert ist, können nur weitere Linux-Distributionen als Container laufen. Ein *Microsoft Windows* kann also nicht als Container auf genannten Host gestartet werden, da die Kernel miteinander nicht kompatibel sind [42, S.6]. Diese Inflexibilität im Spektrum der einsetzbaren Betriebssysteme liegt den Containerlösungen zugrunde.

### 2.1.3 Einordnung Docker

Docker gehört zu den Technologien der Container-basierten Virtualisierung.

Docker ist wie in Kapitel 2.1.2 zuvor angedeutet, nicht die erste containerbasierte Virtualisierungslösung. Einige ältere Containersysteme, wie z.B. *Solaris Zones*, existieren schon länger als Docker, etablierten sich allerdings nie in der Praxis.

## **2.2 Sicherheitsziele in der IT**

Folgende Sicherheitsziele können für IT-Systeme definiert werden

### **2.2.1 Vertraulichkeit**

Die Vertraulichkeit steht für das Konzept von Geheimhaltung. Durch verschiedene kryptographische Verschlüsselungsverfahren kann Klartext in einen unleserlichen Geheimentext transformiert werden, der keine Information über den ursprünglichen Klartext enthält und somit sicher gegenüber Abhörern ist.

### **2.2.2 Integrität**

Unter Integrität versteht man die Zusicherung, dass bestimmte Daten original sind und nachweisbar nicht manipuliert wurden. Integrität kann für Daten z.B. mit kryptographisch sicheren MACs hergestellt werden.

### **2.2.3 Authentizität**

Authentizität beschreibt die Identifikation eines Objekts gegenüber einem System. Maßnahmen der Authentifikation sind z.B. Passwortabfragen, digitale Zertifikate oder biometrische Merkmale einer Person. Ist eine Authentifikation erfolgreich, ist die Echtheit des Objekts bestätigt.

### **2.2.4 Verfügbarkeit**

Die Verfügbarkeit bezeichnet die Eigenschaft eines Systems, Anfragen jederzeit zu verarbeiten und andere Systeme nicht negativ zu beeinflussen. Ein prominentes Beispiel eines Angriffs auf die Verfügbarkeit ist die DoS-Attacke.

### 2.2.5 Verbindlichkeit

Die Verbindlichkeit eines Systems sagt aus, dass jede Aktion eindeutig auf eine Ursache, also z.B. einen User, der die Aktion ausgeführt hat, zurückzuführen ist.

### 2.2.6 Privatheit, Anonymität

Die Anonymität als Schutzziel erfüllt i.d.R. Datenschutzbestimmungen, nach denen Nutzer nicht als Individuen identifiziert werden dürfen. Dieses Ziel hat keinen Bezug zur vorliegenden Arbeit, soll aber zur Vollständigkeit an dieser Stelle aufgeführt sein.

### 2.2.7 Authorisierung

*Ist das eigenes Sicherheitsziel? Quellen widersprechen sich.*

## 2.3 Einführung in Docker

Docker ist eine unter der Apache 2.0 Lizenz veröffentlichte, quelloffene Engine, die den Einsatz von Anwendungen in Containern automatisiert. Sie ist überwiegend in der Programmiersprache *Golang* implementiert und wurde seit ihrem ersten Release im März 2013 von dem von Solomon Hykes gegründeten Unternehmen *Docker, Inc.*[25], vormals *dotCloud Inc.*, sowie mehr als 1.600 freiwillig mitwirkenden Entwicklern ständig weiterentwickelt. [12][42, S.7][11][1].

Docker erweitert *LXC* um eine Schnittstelle auf Kernel- und Applikationslevel [36, S.2].

Der große Vorteil von Docker gegenüber älteren Containerlösungen ist das Level an Abstraktion und die Bedienungsfreundlichkeit, die Nutzern ermöglicht

wird. Während sich Lösungen vor Docker auf dem Markt durch deren schwierige Installation und Management sowie schwachen Automatisierungsfunktionen nicht etablieren konnten, adressiert Docker genau diese Schwachpunkte [42, S.7] und bietet neben Containern viele Tools und einen Workflow für Entwickler, die beide die Arbeit mit Containern erleichtern soll [35, S.1].

Wenn wie von Docker empfohlen in jedem Container nur eine Anwendung läuft, begünstigt das eine moderne Service-orientierte Architektur mit *Microservices*. Nach dieser Architektur werden Anwendungen oder Services verteilt zur Verfügung gestellt und durch eine Serie an miteinander kommunizierenden Containern umgesetzt. Der Grad an Modularisierung der dadurch entsteht, kann für die Verteilung, die Skalierung und das Debugging von Service- oder Anwendungskomponenten (Container) eingesetzt werden [42, S.9]. Je nach Usecase können Container Testumgebungen, Anwendungen bzw. Teile davon, oder Replikate komplexer Anwendungen für Entwicklungs- und Produktionszwecke abbilden. Container also nehmen die Rolle austauschbarer, kombinierbarer und portierbarer Module eines Systems ein [42, S.12].

Ein bekanntes Problem bei der Softwareentwicklung ist, dass Code in der Umgebung eines Entwicklers fehlerfrei ausgeführt wird, jedoch in Produktionsumgebungen Fehler verursacht. In der Regel fallen beide Umgebungen in unterschiedliche personelle Zuständigkeitsbereiche, was vereinfacht eine Übergabe von Entwicklungs- nach Produktionsumgebung mit sich zieht. Diesem Umstand wurde mit der Einführung von *DevOps*-Teams entgegengewirkt.

Einen anderen Ansatz dieses Problem zu lösen, liefern Container: Das Kernproblem im genannten Szenario sind die Entwicklungs- und Produktionsumgebung, zwischen denen Code ausgetauscht wird, da diese nicht identisch sind. Mithilfe von Containern können in der ansonsten gleichen Konstellation nun ganze Container, die den Code beinhalten, zwischen den Umgebungen ausgetauscht werden. Der große Vorteil der Container ist, dass die Ausführungsumgebung in diesem bereits enthalten ist, also mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit in einer Entwicklerinfrastruktur als auch auf einer Produktionsinfrastruktur startfähig ist (Anstelle von „infrastruktur“ kann

auch von „Umgebung“ gesprochen werden)(BEGRIFFLICHKEIT ERKLÄREN: es sind alle Umgebungen“ (Entwicklerumgebung, Produktionsumgebung, Containerumgebung) – KLARER FORMULIEREN).

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Docker ist Konsistenz: Die Umgebungen, in denen Softwareentwickler Code schreiben, sind identisch mit den Umgebungen, die später auf Servern laufen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler erst im Betrieb auftritt, nicht aber in der Entwicklung, wird dadurch sehr klein gehalten [42, S.8].

Quellcode kann inklusive virtualisierter Ausführungsumgebung flexibel von einem Laptop auf einen Testserver und später auf einen physischen oder virtualisierten Produktionsserver oder Cloud-Infrastruktur, wie z.B. *Microsoft Azure*, geschoben werden. Dieser kurzlebige Zyklus zwischen Entwicklung, Testen und Deployment erlaubt einen effizienten Workflow [42, S.8+12]. Da Quellcode das wertvollste Asset der meisten IT-Firmen ist und dieser erst dann Wert hat, wenn er bei einem Kunden ausgeführt wird, macht den beschriebenen Workflow zu einem wichtigen Entscheidungsgrund bei der Wahl der Entwicklerumgebung [35, S.1].

Die folgenden Unterkapitel gehen auf die einzelnen nativen Komponenten im Docker-Ökosystem ein. Nachdem zuerst die Architektur einer Docker-Umgebung sowie zum Betrieb von Containern benötigte Dockerfiles definiert werden, rückt der Fokus auf praxisnahe Aspekte wie Images, Container und Registries.

### 2.3.1 Docker Architektur

Docker selbst ist nach einem Client-Server-Modell aufgebaut: Ein Docker-Client kommuniziert mit einem Docker-Daemon, also ein Prozess, der den Server abbildet [6]. Beide Teile können auf einer Maschine oder einzeln auf unterschiedlichen Hosts laufen. Die Kommunikation zwischen Client und Daemon geschieht über eine RESTful API. Wie Abb.2 zeigt, ist es dadurch auch möglich Befehle entfernter Clients über ein Netzwerk an den Daemon zu

senden [37].

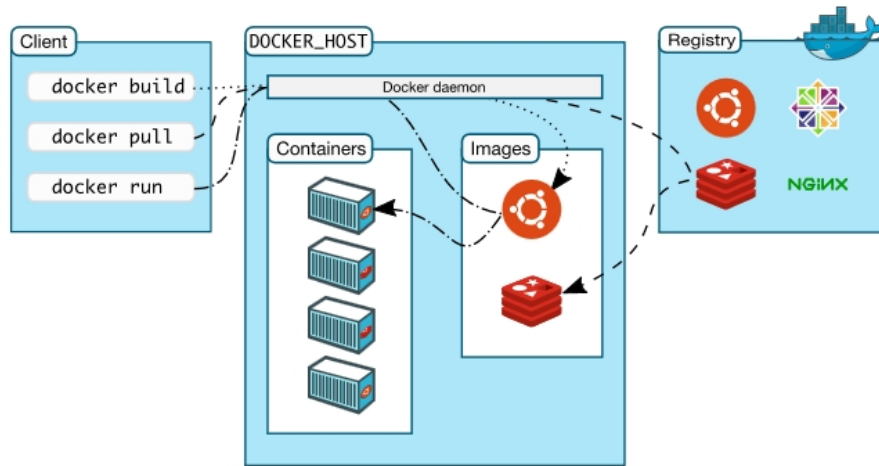


Abbildung 2: Die Client-Server-Architektur von Docker [6].

Der Daemon kann von einer Registry Images (siehe Kapitel 2.3.6 und 2.3.4) beziehen, z.B. dem öffentlichen Docker Hub.

Der Docker-Host selbst ist, wie in Abb.3 dargestellt, aufgebaut. Im Idealfall läuft auf der Hardware ein minimales Linux-Betriebssystem, auf dem die Docker-Engine installiert ist. Die Engine verwaltet im Betrieb die Container (siehe Kapitel 2.3.5), in denen in Abb.3 die Apps A-E laufen. Wie auch in der Grafik zu sehen ist, teilen sich die Container gemeinsam verwendete Bibliotheken.

## 2.3.2 Dockerfile

Ein Dockerfile ist eine Datei mit selbigem Namen, die ein oder mehrere Anweisungen enthält. Letztere werden konsekutiv ausgeführt und führen jeweils zu einer neuen Schicht, die in das später generierte Image einfließt. Damit stellen Dockerfiles eine einfache Möglichkeit dar, Images automatisiert zu generieren.

Eine Anweisung kann z.B. sein, ein Tool zu installieren oder zu starten, eine Umgebungsvariable festlegen oder einen Port öffnen.

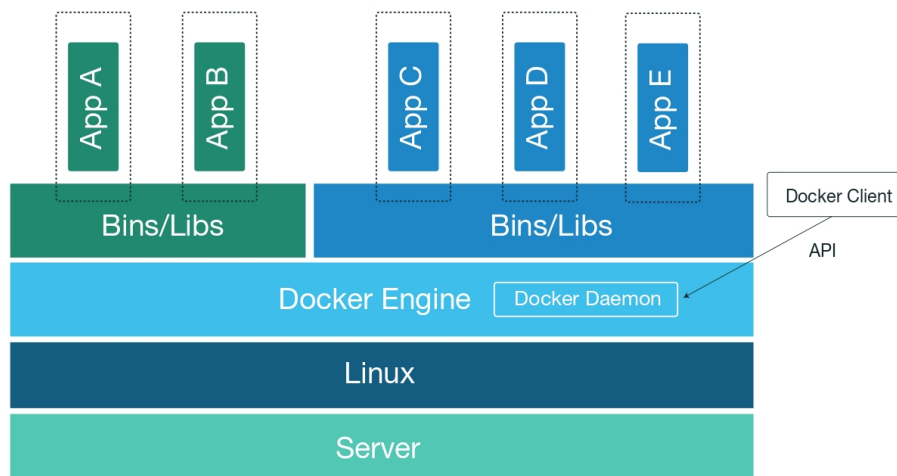


Abbildung 3: Aufbau eines Docker-Hosts, wenn dieser unter einem Linux-Betriebssystem betrieben wird, das direkt auf der Serverhardware läuft. [38, S.3].

### 2.3.3 Containerformate LXC, libcontainer, runC und OCF

Containerformate bilden das Herzstück der containerbasierten Virtualisierung. In ihnen ist in Form einer API definiert, auf welche Art und Weise Container mit dem Host kommunizieren dürfen. Es wird z.B. festgelegt, wie das Dateisystem des Hosts verwendet wird, welche Hostfeatures genutzt werden dürfen und wie die allgemeine Laufzeitumgebung von Containern spezifiziert ist.

Dockers Containerformat hat sich in den letzten Monaten oft verändert, daher soll an dieser Stelle auf die neusten Entwicklungen eingegangen werden.

Im ersten Release von Docker wurde die Ausführungsumgebung *LXC* verwendet, die im März 2014 von der Docker-eigenen Entwicklung *libcontainer* abgelöst wurde. *libcontainer* ist komplett in der Programmiersprache *Golang* implementiert und kann ohne Dependencies mit dem Kernel kommunizieren [3].

Ende Juni 2015 hat Docker angekündigt, zusammen mit mehr als 20 Vertre-

tern aus der Industrie, u.a. *Google*, *IBM* und *VMware*, einen neuen Standard *Open Container Format (OCF)* zu schaffen, welcher im Rahmen des *Open Container Projects (OCP)* entstehen soll [4]. Am gleichen Tag hat Docker *runC* angekündigt, eine Implementierung des *OCF*, die maßgeblich auf dem alten Format *libcontainer* beruht, aber die Spezifikationen von *OCF* umsetzt [22][14][20].

### 2.3.4 Images

Images bilden als unveränderbare Files die Basis von Containern. Sie sind einfach portierbar und können geteilt, gespeichert und aktualisiert werden. Images sind durch ein *Union*-Dateisystem in Schichten gegliedert, die überlagert ein Image ergeben, das als Container gestartet werden kann [42, S.11]. *Union*-Dateisysteme haben gemeinsam, dass sie alle auf dem *Copy-on-write*-Modell basieren [42, S.8]. Konkrete Vertreter sind *AuFS*, *Btrfs* und *Device Mapper* [35, S.3].

Genauer gesagt besteht ein Image u.a. aus einem Manifest, das auf auf Dateiebene ein oder mehrere Schichten (Layers) referenziert, wobei eine Schicht auch ein Image repräsentieren kann. Images und Schichten sind jeweils über Hashwerte eindeutig referenzierbar und liegen auf dem Docker-Host im Verzeichnis `/var/lib/docker/graph/`. Im Unterordner eines Images liegen mehrere Image-spezifische Dateien (vgl. Abb.4), u.a. das Manifest in der Datei `json`, das in einer JSON-Struktur vorliegt und neben Metainformationen auch Details des Dockerfiles, aus dem das Image generiert wurde, beinhaltet [13].

```
root@moritz-VirtualBox:/var/lib/docker/graph/8d74077f3b19b8a2e663f106aafc2569fea0be6ba79de76988d2da00e87f0201# ll
total 44
drwx----- 2 root root 4096 Jan 21 12:44 ./
drwx----- 8 root root 20480 Jan 21 13:14 ../
-rw----- 1 root root 71 Jan 21 12:44 checksum
-rw----- 1 root root 1294 Jan 21 12:44 json
-rw----- 1 root root 1 Jan 21 12:44 layersize
-rw----- 1 root root 82 Jan 21 12:44 tar-data.json.gz
-rw----- 1 root root 1271 Jan 21 12:44 viCompatibility
```

Abbildung 4: Dateien im Ordner eines Images (eigene Abbildung).

Images werden Schritt für Schritt erstellt, z.B. mit den folgenden Aktionen



[42, S.11].

- Eine Datei hinzufügen
- Ein Kommando ausführen, z.B. ein Tool mittels des Paketmanagers `apt` installieren
- Einen Port öffnen, z.B. den Port 80 für einen Webserver

Die Schichten eines Images umfassen in der Regel jeweils eine minimale Ausführungsumgebung mit Bibliotheken, Binaries und Hilfspaketen sowie den Quellcode der Anwendung, die im Container ausgeführt werden soll. Die Schichtenstruktur erlaubt es, Images modularisiert aufzubauen, sodass sich Änderungen eines Images nur auf eine Schicht auswirken. Soll z.B. in ein bestehendes Image der Webserver *Nginx* integriert werden, kann dieser mit dem Kommando `sudo apt-get install nginx` installiert werden, was eine neue Schicht im Image erzeugt. Mit mehreren ähnlichen Images ist gewährleistet, dass nur die konkreten Unterschiede zwischen diesen als eigene Schichten hinterlegt sind. Eine gemeinsame Codebasis, die von mehreren Images genutzt wird, liegt in wenigen Schichten, die sich die Images teilen [35, S.3]. Wie in Abb.5 beispielhaft zu sehen ist, basieren die beiden Images `redis:3.0.6` und `nginx:1.9.9` auf zwei gleichen Schichten, die durch die Anweisungen `ADD` und `CMD` erzeugt werden. In dieser Abbildung sind die Informationen zu dem Image in der ersten Zeile zu sehen und die Schichten der Images sind in den jeweiligen Spalten vertikal gelistet.

Über die Kommandozeile kann z.B. das Image eines *CentOS*-Betriebssystems von der öffentlichen Docker-Registry (siehe Kapitel 2.3.6) wie in Abb.6 mit dem Befehl `docker pull nginx` auf die lokale Maschine gespeichert werden [26][8]. Wie in Abb.6 und Abb.5 zu sehen ist, werden sechs Schichten heruntergeladen, die jeweils über einen Hashwert identifiziert werden und zusammengefügt das angefragte Image `centos:7.2.1511` ergeben.

Eine Liste aller lokal vorliegenden Images, wie in Abb.7, kann mit dem Befehl `docker images` in der Shell generiert werden [7].



Abbildung 5: Visualisierung eines Vergleichs von Images von *Redis*, *Nginx* und *CentOS* auf Schichtebene [21].

```

moritz@moritz-VirtualBox:~$ docker pull centos:7.2.1511
7.2.1511: Pulling from library/centos
fa5be2806d4c: Pull complete
fd95e76c4fb2: Pull complete
3eeaf11e482e: Pull complete
c022c5af2ce4: Pull complete
aef507094d93: Pull complete
8d74077f3b19: Pull complete
Digest: sha256:9e234be1c6be5de7dd1dae8ed1e1d089e16169df841e9080dfdbdb7e6ad83e5e
Status: Downloaded newer image for centos:7.2.1511

```

Abbildung 6: Screenshot von der Ausführung des Befehls `docker pull centos:7.2.1511` (eigene Abbildung).

```

moritz@moritz-VirtualBox:~$ docker images
REPOSITORY          TAG             IMAGE ID        CREATED         VIRTUAL SIZE
nginx                1.9.9           407195ab8b07   13 days ago    133.9 MB
centos               7.2.1511        8d74077f3b19   5 weeks ago    194.6 MB

```

Abbildung 7: Screenshot von der Ausführung des Befehls `docker images` (eigene Abbildung).

### 2.3.5 Container

Ein Container ist die laufende Instanz eines Images, die in Sekundenbruchteilen gestartet werden kann [35, S.1]. Sie beinhalten eine idealerweise minimale Laufzeitumgebung, in der eine oder mehrere Anwendungen laufen.

In Bezug zu anderen Docker-Begriffen, enthält ein Container ein Image und erlaubt eine Reihe von Operationen, die auf ihn angewandt werden können. Darunter fallen z.B. das Erstellen, Starten, Stoppen, Neustarten und Beenden eines Containers. Welchen Inhalt ein Container hat, also ob ein Container auf einem Datenbank- oder Webserver-Image beruht, ist dafür unerheblich [42, S.12][36, S.2].


Container werden als privilegiert bezeichnet, wenn sie mit Root-Rechten gestartet werden. Standardmäßig startet ein Container mit einem reduzierten Set an sog. *capabilities*, welches keine vollen Root-Rechte umfasst.

### 2.3.6 Registries

Eine Registry ist ein gehosteter Service, der als Speicher- und Verteilerplattform für Images dient. Die Images werden mit Tags versehen in Repositories angeboten [5].

Docker stellt eine Vielzahl an Images öffentlich und frei verwendbar in einer eigenen zentralen Registry, dem Docker Hub, zur Verfügung [42, S.11][37, S.3][5]. Für dieses System können Personen und Organisationen Accounts anlegen und eigenständig Images in öffentliche und private Repositories hochladen. Das Docker-Hub bietet bereits mehr als 150.000 Repositories, die etwa 240.000 Nutzer zusammenstellten und hochluden, zur freien Verwendung an (Stand Juni 2015) [29, S.16]. Die Einträge im Hub können von Nutzern bewertet werden. Außerdem wird angezeigt, wie oft ein Image bereits über das Hub bezogen wurde (siehe Abb.8).

Ein Repository besteht aus mindestens einem Image. Um Images in einem Repository voneinander zu unterscheiden, werden Images Tags zugewiesen,



[Explore](#) [Help](#)

Q Search

[Sign up](#) [Log In](#)

Explore Official Repositories




<div></div> <div><div>busybox</div><div>official</div></div>	<div>434</div> <div>STARS</div>	<div>58.8 M</div> <div>PULLS</div>	<div>&gt;</div> <div>DETAILS</div>
<div></div> <div><div>ubuntu</div><div>official</div></div>	<div>3.0 K</div> <div>STARS</div>	<div>37.7 M</div> <div>PULLS</div>	<div>&gt;</div> <div>DETAILS</div>
<div></div> <div><div>swarm</div><div>official</div></div>	<div>115</div> <div>STARS</div>	<div>21.3 M</div> <div>PULLS</div>	<div>&gt;</div> <div>DETAILS</div>

Abbildung 8: Web-UI des Docker Hubs mit den beliebtesten Repositories [9].

um beispielweise mehrere Versionen eines Images in einem Repository zu kennzeichnen. Die Images werden nach dem Schema `<repository>:<tag>` identifiziert. So gibt es z.B. im offiziellen Repository des Webserver *Nginx* Images mit den Tags `latest`, `1`, `1.9` und `1.9.9` [26]. Wenn bei dem Download kein Tag angegeben ist, wie in Kapitel wird automatisch das aktuellste Image `latest` bezogen, wie es im letzten Kapitel 2.3.4 praktiziert wurde.

Docker bietet außerdem an, private Registries zu erstellen. Diese können dann, z.B. gesichert von einer unternehmenseigenen Firewall, betrieben werden. Neben der Vertraulichkeit, bieten private Registries den Vorteil, dass sich die Speicherung und Verteilung von Images an den internen Softwareentwicklungsprozess anpassen lassen. Registries selbst können als Container betrieben werden [5].

Der Zugriff auf eine Registry kann über TLS und der Verwendung eines Zertifikats, sowie *basic authentication* abgesichert werden.

# Kapitel 3

## Ziel der Arbeit

Die wichtigsten Sicherheitsfragen für Container-basierte Systeme sind in den folgenden Punkten formuliert. Sie beruhen auf der Annahme, dass ein Angreifer die Kontrolle über einen Container X übernommen hat und versucht, über diesen Schaden zu verursachen.

1. Ist es dem Angreifer möglich, seine Rechte auf den Hosts zu erweitern, sodass er auf diesem Root-Rechte erwirken kann? (Vertraulichkeit, Authentizität, Integrität) (Isolation)
2. Ist es dem Angreifer möglich, auf einen anderen Container Y des gleichen Hosts zuzugreifen? (Vertraulichkeit, Authentizität, Integrität) (Isolation)
3. Ist es dem Angreifer möglich, den Host auf eine Art und Weise zu beeinflussen, die den Betrieb anderer Container auf diesem Host beeinträchtigt? (Verfügbarkeit, Integrität) (Ressourcenverwaltung)

Wenn von der Netzwerkseite abgesehen wird, lässt sich das Szenario der Fragestellung (2.) auf das der Frage (1.) reduzieren, da der Zugriff auf andere Container nur über den Host möglich ist.

Um Frage (1.) zu beantworten, wird im ersten Hauptkapitel die intrinsische Sicherheit von Docker untersucht. Damit ist eine Reihe von Sicherheitsfeatu-

res des Linux Kernels gemeint, die u.a. Docker nutzt, um nach Aussage des Unternehmens Docker sichere Container zu ermöglichen. V.a. Mechanismen zur Isolation und Ressourcenverwaltung werden betrachtet, da sie direkt mit den erwünschten Sicherheitszielen aus Kapitel 2.2 in Bezug stehen.

Des Weiteren stellt sich die Frage, ob die Arbeit mit Docker und seinen Containern sicher ist. Wie in der Einführung zu Docker beschrieben, stellt Docker zusammen mit anderen Anbietern einen Workflow und eine Palette an Tools zur Verfügung, die die Arbeit mit Containern erleichtern sollen. Wie diese Tools zur Sicherheit bzw. Angreifbarkeit von Docker-Systemen beitragen, wird im Kontext von den Sicherheitszielen betrachtet.

Nicht betrachtet werden die Sicherheitsrisiken, die sich durch den Betrieb eines Containernetzwerks ergeben. Sicherheit aus Sicht der Netzwerktechnik und den verschiedenen OSI-Schichten ist nicht Gegenstand der Untersuchung.



# Kapitel 4

## Security aus Linux Kernel-Features

### 4.1 Isolierung durch namespaces

#### 4.1.1 Prozessisolierung (process namespace)

#### 4.1.2 Dateisystemisolierung (filesystem namespace)

#### 4.1.3 Geräteisolierung (device namespace)

#### 4.1.4 IPC-Isolierung (ipc namespace)

#### 4.1.5 UTS-Isolierung (uts namespace)

#### 4.1.6 Netzwerkisolierung (network namespace)

#### 4.1.7 Userisolierung (user namespace)

### 4.2 Ressourcenverwaltung / Limitierung von Ressourcen durch 24 control groups

### 4.3 Einschränkungen von Zugriffsrechten

#### 4.3.1 capabilities





# Kapitel 5

## Security im Docker-Ökosystem

### 5.1 Docker Images und Registries

#### 5.1.1 neues Signierungs-Feature

### 5.2 Docker Daemon

#### 5.2.1 REST-API

#### 5.2.2 Support von Zertifikaten

### 5.3 Containerprozesse

### 5.4 Docker Cache

### 5.5 privileged Container

### 5.6 Networking 26

#### 5.6.1 bridge Netzwerk

#### 5.6.2 overlay Netzwerk

den.

Im Juni 2014 hat Google das Open-Source Tool *Kubernetes* angekündigt, das Cluster mit Docker-Containern verwalten soll. Laut Google ist Kubernetes die Entkopplung von Anwendungscontainern von Details des Hosts. Soll in Datencentern die Arbeit mit Containern vereinfachen.

Neben einigen Startups, haben sich *Google*, *Microsoft*, *VMware*, *IBM* und *Red Hat* als *Kubernetes*-Unterstützer geäußert.

# Kapitel 6

## Docker in Unternehmen/Cloud- Infrastrukturen

# Kapitel 7

## Fazit

Spekulation in der Industrie ist, dass sich Organisationen und Unternehmen zusammenschließen und sich auf eine neue, universale Lösung einigen, die die heutigen Fähigkeiten der sich ergänzenden Technologien Docker und Kubernetes, abdeckt [36, S.4].

# Glossar

**Best-Practice** Eine bestimmte, ideale Vorgehensweise für den Umgang mit einer Sache, die zu einem erwünschten Zustand, z.B. der Erfüllung eines Standards, beiträgt. Im Fall von Docker kann es eine Best-Practice sein, Images zu signieren um deren Integrität zu gewährleisten. 3

**Cloud** Eine entfernte Rechnerinfrastruktur, die Dienste (Anwendungen, Plattformen, etc.) zur Nutzung bereitstellt.

- Private Cloud: Dienste werden aus Gründen der Sicherheit oder des Datenschutzes nur firmenintern für eigenen Mitarbeiter angeboten.
- Public Cloud: Dienste sind öffentlich nutzbar.
- Hybrid Cloud: Mischform aus einer privaten und öffentlichen Cloud. Manche Dienste werden nur firmenintern verwendet, andere auch von außerhalb des Firmennetzes.

[32] . 1, 9, 13

**DevOps** DevOps-Teams sind sowohl für die Entwicklung (*Dev* = Development) eines Produkts als auch den Betrieb (*Ops* = Operations) dessen verantwortlich. Durch die gemeinsame Ergebnisverantwortung fällt der Overhead einer Übergabe, zwischen ansonsten getrennten Teams, weg [41]. 12

**Multi-Tenant-Service** Eine Serveranwendung, die mehrere Nutzer gleichzeitig verwenden. Jeder Nutzer kann nur auf seine eigenen Daten zugreifen und interferiert nicht mit anderen Nutzern. Auf dem Server kann die Anwendung, die dieses Prinzip umsetzt, in einer Instanz (ohne Redundanz) laufen [24]. 2

# Abkürzungsverzeichnis

**API** Application Programming Interface. 13, 15, 26

**CPU** Central Processing Unit. 1

**DoS** Denial of Service. 10

**IT** Informationstechnik. 1, 3, 5, 10, 13

**JSON** JavaScript Object Notation. 16

**LSM** Linux Security Model. 24

**MAC** Mandatory Access Control. 24

**OCF** Open Container Format. 16

**OCP** Open Container Project. 16

**OS** Operating System. 6–9

**OSI** Open Systems Interconnection (Modell). 22

**REST** Representational State Transfer. 13, 26

**SELinux** Security Encanced Linux. 24

**TLS** Transport Layer Security. 20



**UI** User Interface. 20

**VM** Virtual Machine. 5–7, 9, 26

# Literaturverzeichnis

- [1] About docker. über Website <https://www.docker.com/company> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [2] Amazon web services. über Website <https://aws.amazon.com/de/> , aufgerufen am 14.01.2016.
- [3] Docker 0.9: Introducing execution drivers and libcontainer. über Website <https://blog.docker.com/2014/03/docker-0-9-introducing-execution-drivers-and-libcontainer/> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [4] Docker and broad industry coalition unite to create open container project. über Website <http://blog.docker.com/2015/06/open-container-project-foundation/> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [5] Docker docs - registry. über Website <https://docs.docker.com/registry/> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [6] Docker docs - understanding the architecture. über Website <https://docs.docker.com/engine/introduction/understanding-docker/> , aufgerufen am 14.01.2016.
- [7] Docker documentation für den befehl `docker images`. über Website <https://docs.docker.com/engine/reference/commandline/images/> , aufgerufen am 21.01.2016.

- [8] Docker documentation für den befehl `docker pull`. über Website <https://docs.docker.com/engine/reference/commandline/pull/> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [9] Docker hub - explore. über Website <https://hub.docker.com/explore/> , aufgerufen am 15.01.2016.
- [10] *FreeBSD* einföhrung in *Jails*. über Website [https://www.freebsd.org/doc/de\\_DE.ISO8859-1/books/handbook/jails-intro.html](https://www.freebsd.org/doc/de_DE.ISO8859-1/books/handbook/jails-intro.html) , aufgerufen am 18.01.2016.
- [11] Github repository changelog von docker. über Website <https://github.com/docker/docker/blob/master/CHANGELOG.md> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [12] Github repository der docker engine. über Website <https://github.com/docker/docker> , aufgerufen am 11.01.2016.
- [13] Github repository glossar von docker. über Website <https://github.com/docker/distribution/blob/master/docs/glossary.md> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [14] Github repository von *runC*. über Website <https://github.com/opencontainers/runc> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [15] Google trends der suchbegriffe *Docker*, *Virtualization* und *LXC*. über Website <https://www.google.de/trends/explore#q=docker%2Cvirtualization%2Clxc> , aufgerufen am 19.01.2016.
- [16] Homepage des kvm hypervisors und virtualisierungslösung. über Website [http://www.linux-kvm.org/page/Main\\_Page](http://www.linux-kvm.org/page/Main_Page) , aufgerufen am 18.01.2016.
- [17] Homepage des vmware esxi hypervisors. über Website <https://www.vmware.com/de/products/esxi-and-esx/overview> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [18] Homepage des xen hypervisors. über Website <http://www.xenproject.org/> , aufgerufen am 18.01.2016.

- [19] Homepage *Solaris* betriebssystem. über Website <http://www.oracle.com/de/products/servers-storage/solaris/solaris11/overview/index.html> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [20] Homepage von *runC*. über Website <https://runc.io/> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [21] Imagelayers of three different docker images. über Website <https://imagelayers.io/?images=redis:3.0.6,nginx:1.9.9,centos:centos7.2.1511> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [22] Introducing runc: a lightweight universal container runtime. über Website <http://blog.docker.com/2015/06/runc/> , aufgerufen am 21.01.2016.
- [23] Linux manual page chroot. über Website [https://www.freebsd.org/doc/de\\_DE.ISO8859-1/books/handbook/jails-intro.html](https://www.freebsd.org/doc/de_DE.ISO8859-1/books/handbook/jails-intro.html) , aufgerufen am 18.01.2016.
- [24] Multi-tenant data architecture. über Website <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa479086.aspx> , aufgerufen am 19.01.2016.
- [25] Offizieller twitter-account des docker-gründers, solomon hykes. über Website <https://twitter.com/solomonstre> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [26] Offizielles repository des webservers nginx. über Website [https://hub.docker.com/\\_/nginx/](https://hub.docker.com/_/nginx/) , aufgerufen am 11.01.2016.
- [27] Release notes von *FreeBSD V.4* und *Jails*. über Website <https://www.freebsd.org/releases/4.0R/notes.html> , aufgerufen am 19.01.2016.
- [28] Release notes von *Solaris 10*. über Website <https://docs.oracle.com/cd/E19253-01/pdf/817-0552.pdf> , aufgerufen am 19.01.2016.
- [29] Slides of keynote at dockercon in san francisco - day 2. über Website [de.slideshare.net/Docker/dockercon-15-keynote-day-2/16](http://de.slideshare.net/Docker/dockercon-15-keynote-day-2/16) , aufgerufen am 11.01.2016.

- [30] Softlayer benchmark, data sheet. über Website [https://voltdb.com/sites/default/files/voltdb\\_softlayer\\_benchmark\\_0.pdf](https://voltdb.com/sites/default/files/voltdb_softlayer_benchmark_0.pdf) , aufgerufen am 14.01.2016.
- [31] Voltdb homepage. über Website <https://voltdb.com/> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [32] Was bedeutet public, private und hybrid cloud? über Website <http://www.cloud.fraunhofer.de/de/faq/publicprivatehybrid.html> , aufgerufen am 19.01.2016.
- [33] Überblick hyper-v hypervisor von microsoft. über Website <https://technet.microsoft.com/library/hh831531.aspx> , aufgerufen am 18.01.2016.
- [34] Übersicht zu *Solaris Zones*. über Website [https://docs.oracle.com/cd/E24841\\_01/html/E24034/gavhc.html](https://docs.oracle.com/cd/E24841_01/html/E24034/gavhc.html) , aufgerufen am 18.01.2016.
- [35] Charles Anderson. Docker. *IEEE Software*, 2015.
- [36] David Bernstein. Containers and cloud: From lxc to docker to kubernetes. *IEEE Cloud Computing*, September 2014.
- [37] Thanh Bui. Analysis of docker security. Technical report, Aalto University School of Science, January 2015.
- [38] Docker. Introduction to docker security. über Website [https://www.docker.com/sites/default/files/WP\\_Intro%20to%20container%20security\\_03.20.2015%20%281%29.pdf](https://www.docker.com/sites/default/files/WP_Intro%20to%20container%20security_03.20.2015%20%281%29.pdf) , aufgerufen am 18.01.2016, March 2015.
- [39] Wes Felter, Alexandre Ferreira, Ram Rajamony, and Juan Rubio. Ibm research report - an updated performance comparison of virtual machines and linux containers. Technical report, IBM Research Division - Austin Research Laboratory, July 2014.
- [40] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. *IT-Grundschutz-Katalog B 3.304 Virtualisierung*, 2011.

- [41] Jürgen Rühling. Devops in unternehmen etablieren - ein ziel, ein team, gemeinsamer erfolg. über Website <http://www.heise.de/developer/artikel/DevOps-in-Unternehmen-etablieren-2061738.html> , aufgerufen am 18.01.2016, December 2013.
- [42] James Turnbull. *The Docker Book*. 1.2.0 edition, September 2014.
- [43] Miguel G. Xavier, Marcelo V. Neves, Fabio D. Rossi, Tiago C. Ferreto, Timoteo Lange, and Cesar A. F. De Rose. Performance evaluation of container-based virtualization for high performance computing environments. *IEEE PDP 2013*, 2012.