

Middleware – Cloud Computing – Übung

Verteilte Dateisysteme & Container: Docker

Wintersemester 2025/26

Paul Bergmann, Christian Berger

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Container-Betriebssystemvirtualisierung

Motivation

Docker

- Einführung

- Architektur

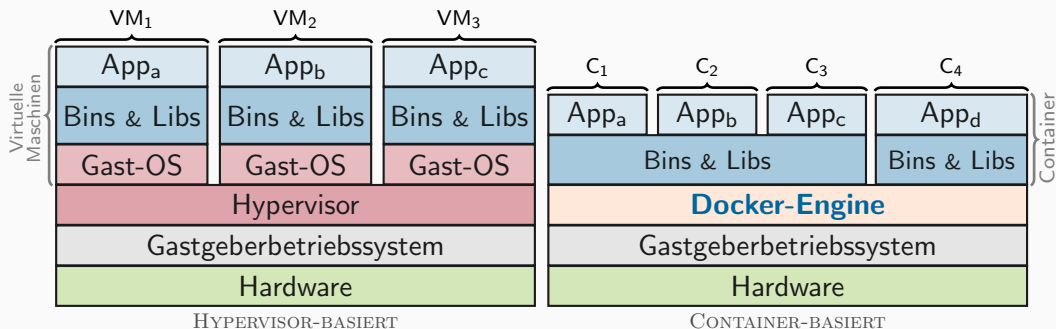
- Arbeitsablauf

- Hinweise

Container- Betriebssystemvirtualisierung

Motivation

Virtualisierungsformen im Vergleich



- Hypervisor-basierte Virtualisierung
 - Erlaubt Virtualisierung von kompletten Betriebssystemen
- Container-basierte Virtualisierung
 - Leichtgewichtig: Hypervisor entfällt, kleinere Abbilder, schnelleres Hochfahren
 - Bindung an Betriebssystemkernel und vorhandene Treiber
 - Im Rahmen dieser Übung betrachtet: **Docker**



Container- Betriebssystemvirtualisierung

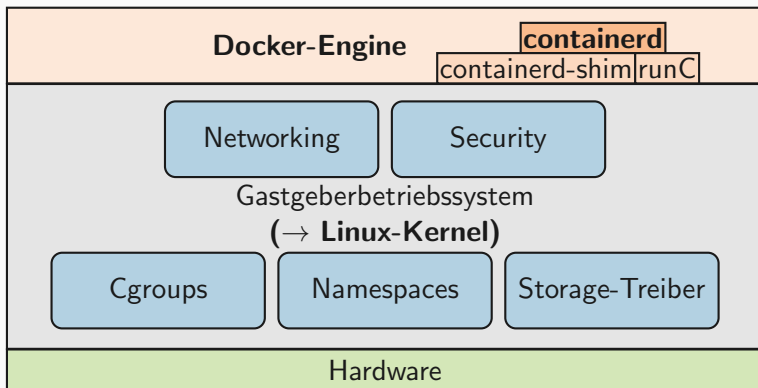
Docker



Video: „Introduction to Docker?“

Vortrag von Docker-Erfinder Solomon Hykes

(Link: <https://www.youtube.com/watch?v=Q5P0uMHxW-0>, Dauer: ~47 Min.)



- Docker setzt auf bereits existierenden Linux-Komponenten auf
 - Dominierende Komponenten
 - Ressourcenverwaltung: Control Groups
 - Namensräume
 - Überlagerte Dateisysteme
- } **containerd & runC**

- Control Groups (cgroups) ermöglichen das Steuern und Analysieren des Ressourcenverbrauchs bestimmter Benutzer und Prozesse
- Durch Control Groups abgedeckte Ressourcen
 - Speicher (RAM, Swap-Speicher)
 - CPU
 - Disk-I/O
- Funktionsweise
 - cgroups-Dateisystem mit Pseudoverzeichnissen und -dateien
 - Prozesse werden mittels Schreiben ihrer PID in passende Kontrolldatei zu einer Control Group hinzugefügt
 - Auflösen einer Control Group entspricht dem Entfernen des korrespondierenden Pseudoverzeichnisses



Tejun Heo

Control Group v2

<https://www.kernel.org/doc/html/latest/admin-guide/cgroup-v2.html>, 2015.

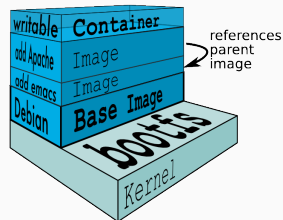
- Namensräume werden zur Isolation von Anwendungen auf unterschiedlichen Ebenen herangezogen
- **Dateisysteme**
 - Jedes Dateisystem benötigt eigenen Einhängpunkt, welcher einen neuen Namensraum aufspannt
 - Überlagerte Dateisysteme (mit Docker verwendbar: `overlayfs`) erlauben Verschmelzen von Verzeichnissen aus eigenständigen Dateisystemen
- **Prozesse**
 - Hierarchische Struktur mit einem PID-Namensraum pro Ebene
 - Pro PID-Namensraum eigener `init`-ähnlicher Wurzelprozess
 - Isolation: Prozesse können keinen Einfluss auf andere Prozesse in unterschiedlichen Namensräumen nehmen
- **Netzwerke**
 - Eigene Netzwerk-Interfaces zwischen Host und einzelnen Containern
 - Jeweils eigene Routing-Tabellen und iptables-Ketten/Regeln

■ Unterscheidung

- Docker-Abbild: Software-Basis zum Instanzieren von Docker-Containern
- Docker-Container: Instanzisiertes Docker-Abbild in Ausführung

■ Inhalt eines Docker-Containers

- Dateisystem
- Laufzeitumgebung
- Binärdateien
- Systembibliotheken



Quelle der Illustration: <https://docs.docker.com/terms/layer/>

■ Dockerizing: „Verfrachten“ einer Anwendung in einen Container

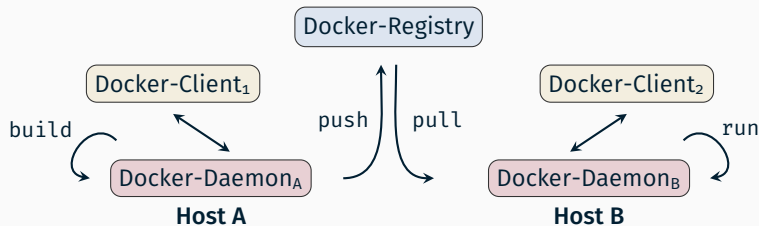
- Instanzieren eines Containers erfolgt über das Aufrufen einer darin befindlichen Anwendung
- Container an interne Anwendungsprozesse gebunden
→ Sobald letzte Anwendung terminiert ist, beendet sich auch die Container-Instanz

■ Git-orientierter Arbeitsablauf

- Ähnliche Befehlsstruktur (z. B. pull, commit, push)
- Git Hub $\Leftrightarrow$ Docker Hub

■ Typischer Arbeitsablauf

1. Docker-Abbilder bauen (build)
2. Ausliefern: Abbilder in Registry ein- und auschecken (push/pull)
3. Docker-Container instanzieren und zur Ausführung bringen (run)



- Von Docker, Inc. bereitgestellte Registry: **Docker Hub**
 - Cloud-Service zur Verwaltung von Docker-Abbildern bzw. -Anwendungen
 - Registrieren bzw. Anlegen eines Benutzerkontos zum Hochladen notwendig
 - Anzahl kostenloser, **öffentlicher** Repositories nicht begrenzt
 - Nur ein privates Repository kostenlos
- **Private Registry** (hier: I4-Docker-Registry)
 - Ermöglicht das Verwalten garantiert nicht-öffentlicher Repositories
 - Unabhängigkeit von Verfügbarkeit einer öffentlichen Registry
- Authentifizierung gegenüber der (privaten) Docker-Registry
 - An-/Abmelden an/von (optional spezifiziertem) Docker-Registry-Server

```
> docker login [<OPTIONS>] [<REGISTRY-HOSTNAME>]  
> [...] // Registry-zugreifende Befehle ausführen, siehe naechste Folie  
> docker logout [<REGISTRY-HOSTNAME>]
```

- **Achtung:** Weglassen eines Registry-Hostname impliziert Verwendung der **Docker-Hub**-Registry bei nachfolgenden push- oder pull-Befehlen.
↪ (I4-Docker-Registry-Hostname: i4mw.cs.fau.de)

■ Vorgefertigtes Abbild aus Repository auschecken

```
> docker image pull <NAME>[:<TAG>]
```

Hinweis: TAG nur optional, wenn Image mit Default-Tag (= latest) existiert.

■ Container starten (mehr ab Folie 14)

```
> docker run -it <NAME>[:<TAG>] <COMMAND>
```

■ Änderungen im Container vornehmen

- Ausführen beliebiger Programme im Container mit `/bin/bash` als `COMMAND`
- Installieren von Programmen via Paket-Manager (z.B. `apt-get -yq install vim`)

- Falls Änderungen erfolgt sind und erhalten bleiben sollen

1. Änderungen persistent machen und Abbild (lokal!) erzeugen

```
> docker commit <CONTAINER-ID> <NAME>[:<TAG>]
```

2. Abbild publizieren bzw. in Registry einspielen

```
> docker image push <NAME>[:<TAG>]
```

Hinweis: Da `pull` und `push` keinen Registry-Hostname vorsehen, müssen die Abbilder bei eigenen Registries über den `<NAME>`-Parameter passend gekennzeichnet sein:

- `<NAME>` besteht aus {Abbild,Benutzer}name und Registry-Hostname
- Beispiel: `$ docker image push i4mw.cs.fau.de/user/myimage:test`

■ In der Praxis: **Dockerfiles**

- Rezepte zum skriptbasierten Bauen eines Abbilds
- Zeilenweises Abarbeiten der darin befindlichen Instruktionen

■ Vordefinierte, voneinander unabhängige **Docker-Instruktionen**

- `FROM <IMAGE>[:<TAG>]` $\mapsto$ Basisabbild auswählen (obligatorisch)
- `EXPOSE <PORT> [<PORT>...]` $\mapsto$ Container-übergreifende Port-Freigabe
- `RUN <COMMAND>` $\mapsto$ Ausführen eines Befehls (in *Shell-Form*)
- `COPY <SRCs> <DST>` $\mapsto$ Dateien/Verz. ins Container-Dateisystem kopieren
- `ENTRYPOINT [<EXE>, <PARAM-1>, ...]` $\mapsto$ Container-Einstiegspunkt setzen
 - Nur ein Einstiegspunkt (= Befehl) pro Container möglich
 - Container-Aufruf führt zwangsläufig zu Aufruf des entsprechenden Befehls
 - Parameter des letzten CMD-Befehls werden als zusätzliche Parameter an ENTRYPOINT-Aufruf angehängt, solange der Container ohne Kommando bzw. Argumente gestartet wird:
`CMD [<EXTRA-PARAM-1>, <EXTRA-PARAM-2>, ...]`

$\rightarrow$ Vollständige Referenz: <https://docs.docker.com/reference/builder/>

■ Vorgehen

- Datei Dockerfile anlegen und mit Docker-Instruktionen befüllen
- Build-Prozess starten mit Kontext unter PATH, URL oder stdin (-)

```
> docker image build -t <NAME>[:<TAG>] <PATH | URL | - >
```

■ Beispiel-Dockerfile (Anm.: mwqueue.jar liegt im selben Verzeichnis wie das Dockerfile)

```
1 FROM      i4mw.cs.fau.de/gruppe0/javaimage
2 EXPOSE    18084
3 RUN       useradd -m -g users -s /bin/bash mwcc
4 WORKDIR   /opt/mwcc
5 RUN       mkdir logdir && chown mwcc:users logdir
6 COPY      mwqueue.jar /opt/mwcc/
7 USER      mwcc
8 ENTRYPOINT ["java", "-cp", "mwqueue.jar:lib/*", "mw.queue.MWQueueServer"]
9 CMD       ["-logdir", "logdir"]
```

- | | |
|--|---------------------------------|
| 1. Eigenes Abbild javaimage als Ausgangsbasis heranziehen | 6. JAR-Datei hineinkopieren |
| 2. Port 18084 freigeben | 7. Ausführenden Benutzer setzen |
| 3. Benutzer mwcc erstellen, diesen zur Gruppe users hinzufügen und Shell setzen | 8. Einstiegspunkt setzen |
| 4. Basisverzeichnis setzen (/opt/mwcc und lib-Unterverzeichnis existieren bereits) | 9. Standardargumente setzen |
| 5. Log-Verzeichnis erstellen und Benutzerrechte setzen | |

■ Besonderheiten von Docker-Abbildern

- Jeder Befehl im Dockerfile erzeugt ein neues Zwischenabbild
- Basis- und Zwischenabbilder können gestapelt werden
- Differenzbildung erlaubt Wiederverwendung zur Platz- und Zeitersparnis

■ Lokal vorliegende Docker-Abbilder anzeigen (inkl. Image-IDs):

```
> docker image ls
```

REPOSITORY	TAG	IMAGE ID	CREATED	SIZE
<none>	<none>	7fd98daef919	2 days ago	369MB
i4mw.cs.fau.de/ubuntu	latest	5506de2b643b	2 months ago	78MB

- Repository: Zum Gruppieren verwandter Abbilder
- Tag: Zur Unterscheidung und Versionierung verwandter Abbilder
- Image-ID: Zur Adressierung eines Abbilds bei weiteren Befehlen

Hinweis: Beim Erstellen eines Abbilds mit bereits existierendem Tag wird das alte Abbild nicht gelöscht, sondern mit <none>-Tag versehen aufgehoben (siehe 1. Eintrag in Ausgabe).

■ Nur lokale Abbilder können über die Kommandozeile gelöscht werden

```
> docker image rm [<OPTIONS>] <IMAGE> [<IMAGE>...] # IMAGE := z. B. Image-ID
```

- Docker-Container im Hintergrund mittels `-d(etached)`-Flag starten

```
> docker run -d [<OPTIONS>] <IMAGE> [<COMMAND> + [ARG...]]
```

- Laufende Container und insbesondere deren **Container-IDs** anzeigen

```
> docker ps -a
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	...
ba554f163f63	eg_pgql:latest	"bash"	33 seconds ago	...
345b60f9a4c5	eg_pgql:latest	"/usr/lib/postgresql"	7 minutes ago	...
5496bd5d89d9	debian:latest	"bash"	46 hours ago	...

...	STATUS	PORTS	NAMES
...	Up 32 seconds	5432/tcp	sad_lumiere
...	Up 7 minutes	0.0.0.0:49155->5432/tcp	pg_test
...	Exited (0) 46 hours ago		hungry_brattain

→ `-a`-Flag, um auch beendete Container und deren Exit-Status anzuzeigen

- Weitere Operationen auf Containern

- Entfernen/Beenden ↪ `docker rm [OPTIONS] <CONTAINER-IDs...>`
- Attach ↪ `docker attach --sig-proxy=false <CONTAINER-IDs...>`

Hinweis: `--sig-proxy=false` nötig, um mit `Ctrl-c` detach zu können

■ Möglichkeiten der Container-Analyse

- Logs ($\hat{=}$ Ausgaben auf stderr und stdout) eines Containers anzeigen

```
> docker logs [<OPTIONS>] <CONTAINER-ID>
```

- Container-Metainformationen (Konfiguration, Zustand, ...) anzeigen

```
> docker inspect <CONTAINER-ID>
```

- Laufende Prozesse innerhalb eines Containers auflisten

```
> docker top <CONTAINER-ID>
```

- Jegliche Veränderungen am Container-Dateisystem anzeigen

```
> docker diff <CONTAINER-ID>
```

■ Es existieren eine Reihe von Container-Zuständen bzw. -Events

- Start/Wiederanlauf: create, start, restart, unpause
- Stopp/Unterbrechung: destroy, die, kill, pause, stop
- Anzeigen aller Event am Docker-Server $\mapsto$ `docker events`

■ Nachträglich Befehle ausführen (z. B. zu Debugging-Zwecken)

- Weiteren Befehl innerhalb eines bereits laufenden Containers starten

```
> docker exec <CONTAINER-ID> <COMMAND>
```

- Eine Shell innerhalb eines bereits gestarteten Containers starten

```
> docker exec -it <CONTAINER-ID> /bin/bash
```

■ Netzwerk-Ports (Publish-Parameter)

- Jeder Container besitzt eigenes, internes Netzwerk
- EXPOSE-Instruktion im Dockerfile dient zu Dokumentationszwecken
- Für Zugriff von außen, interne Ports explizit auf die des Host abbilden
 - Manuell, um Host- und Container-Port exakt festzulegen

```
> docker run -p <HOST-PORT>:<CONTAINER-PORT> ...
```

- Automatisch: zufällig gewählter Port (Bereich: 49153–65535) auf Host-Seite

```
> docker run -P ...
```

- Daten innerhalb eines Containers sind an dessen Lebensdauer gebunden
- Erhalten von Daten über die Container-Lebensdauer hinweg mit Docker-Volumes
- Befehlsübersicht
 - Volume erstellen

```
> docker volume create <VOLUME-NAME>
```

- Volumes auflisten

```
> docker volume ls
```

- Volume löschen

```
> docker volume rm <VOLUME-NAME>
```

- Neuen Container mit einem existierenden Volume starten

```
> docker run --mount source=<VOLUME-NAME>,target=<MOUNT-POINT> ...
```

Hinweis: Beim Einhängepunkt (<MOUNT-POINT>) ist darauf zu achten, dass der Benutzer im Container Schreibrechte auf das korrespondierende Verzeichnis hat.

- **Hilfsskripte** liegen in OpenStack-VM bereit unter `/usr/local/bin`
- **Verfügbare Skripte**

- Löschen aller {gestoppt,ungetaggten} Docker-Container

```
> docker-rm-{stopped,untagged}
```

- Alle Container stoppen und Docker-Daemon neustarten

```
> docker-full-reset
```

- Alle getaggten Abbilder in die I4-Docker-Registry hochladen

```
> docker-images-push
```

- I4-Docker-Registry durchsuchen

```
> docker-registry-search <SEARCH_STRING>
```