

Middleware – Cloud Computing – Übung

Aufgabe 3: Verteilte Dateisysteme

Wintersemester 2024/25

Harald Böhm, Laura Lawniczak, Tobias Distler

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

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



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Aufgabe 3

- Übersicht

- Hinweise zu Java

Verteilte Dateisysteme

- Dateisysteme

- Hadoop Distributed File System (HDFS)

Container-Betriebssystemvirtualisierung

- Motivation

- Docker

 - Einführung

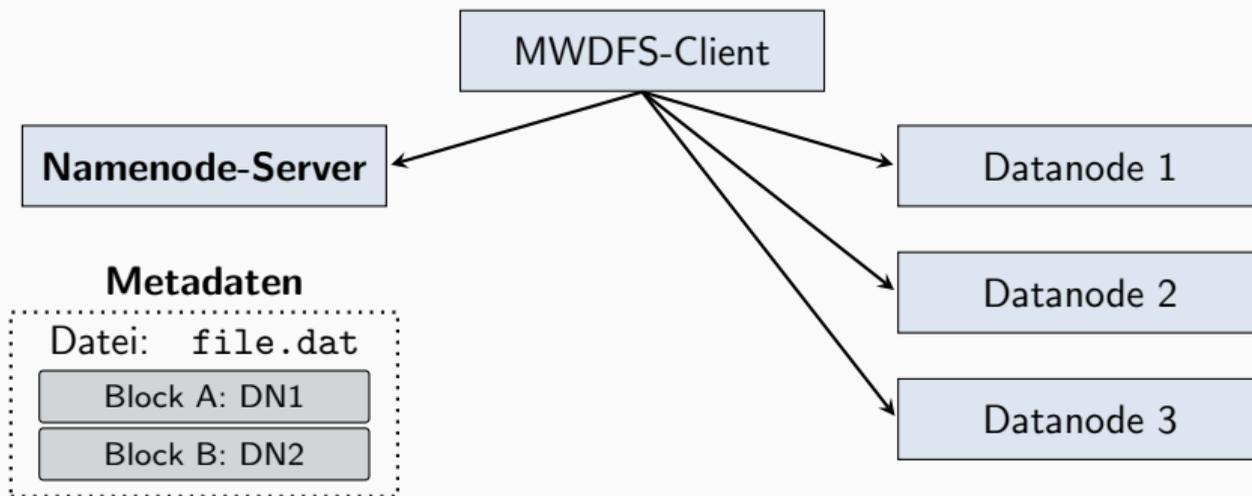
 - Architektur

 - Arbeitsablauf

 - Hinweise

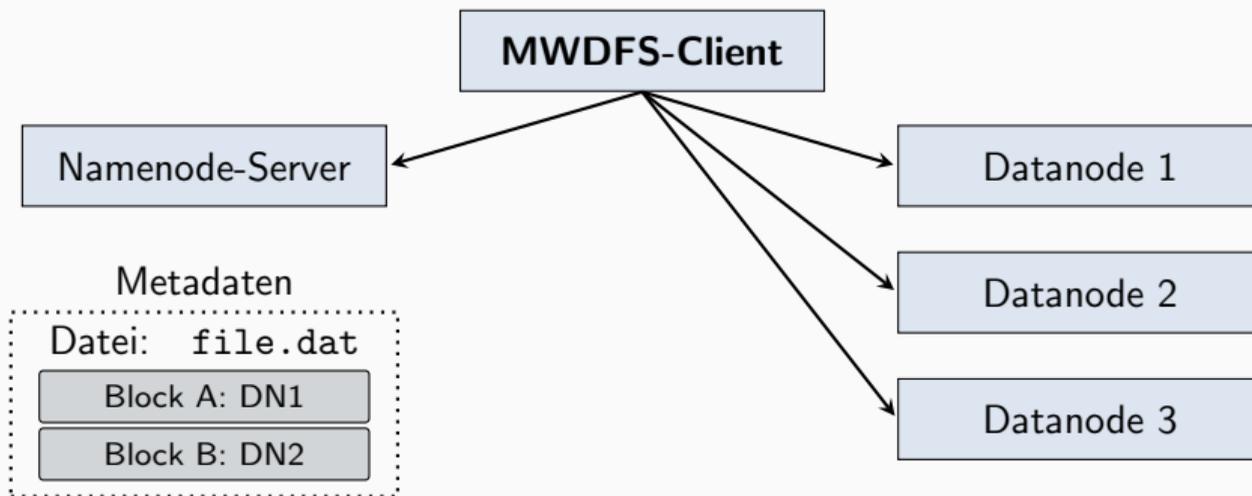
Aufgabe 3

Übersicht



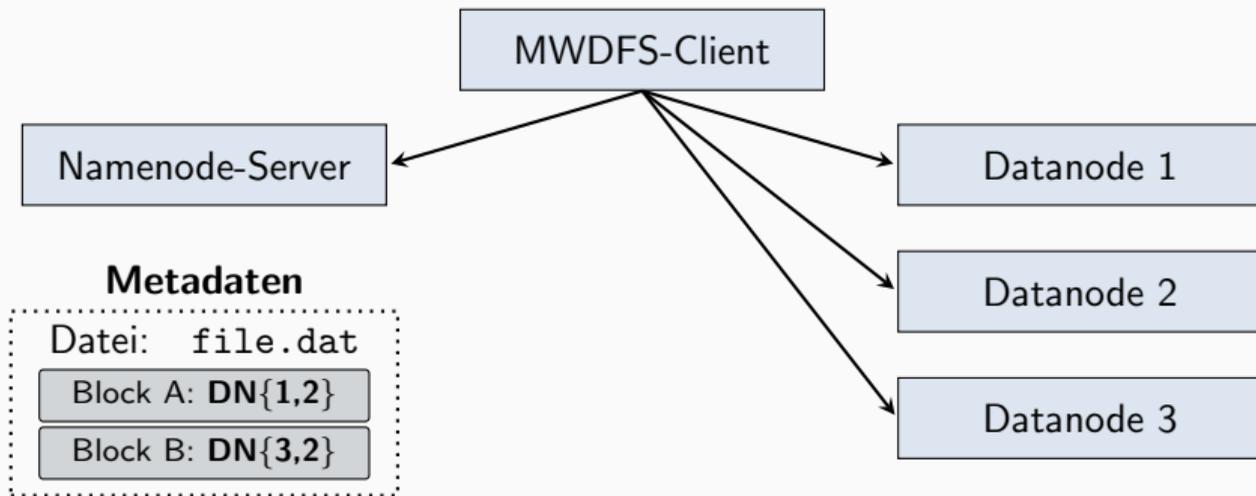
■ Namenode-Server

- **Metadaten**
- Leases für Schreibzugriffe
- Datei-Operationen (Anlegen, Auflisten, Löschen)

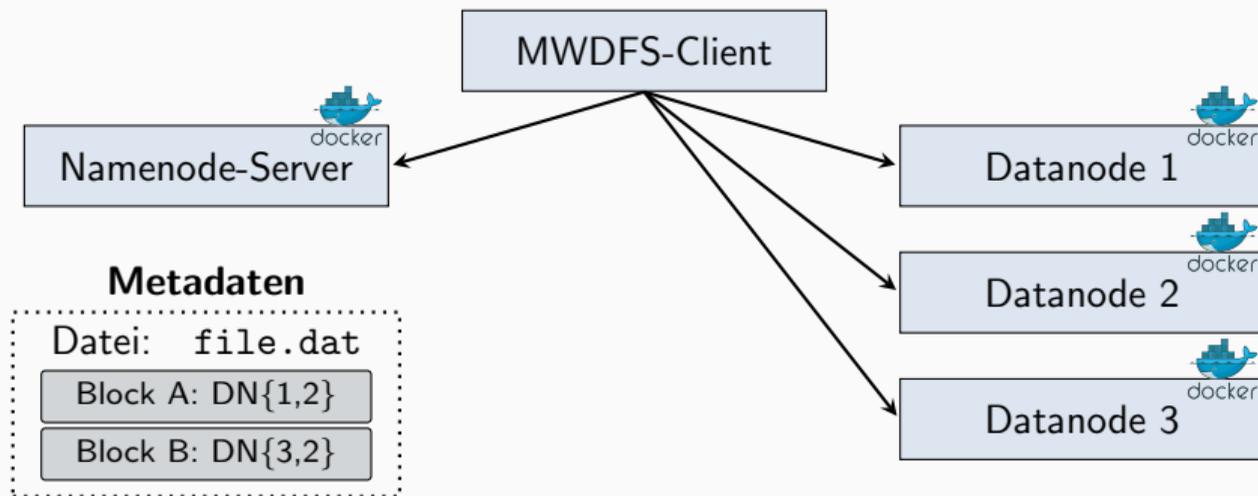


■ MWDFS-Client

- Datenzugriff
- Datei-Operationen (Anlegen, Auflisten, Löschen)



- **Replikation** (optional für 5,0 ECTS)
 - Datenblöcke redundant auf mehreren Datanodes speichern
 - Erweiterung der serverseitigen **Metadaten**
- **Zustandspersistierung** (optional für 5,0 ECTS)
 - Effizientes Schreiben der Dateimetadaten bzw. Operationen
 - Wiederherstellung des Zustands nach Namennode-{Absturz,Neustart}



■ Docker und OpenStack

- Docker-Images erstellen
- Betrieb von Namenode-Server und drei Datanodes als **Docker-Container**
→ OpenStack-Cloud
- Zugriff auf das System über MWDFS-Client
→ CIP-Pool

Aufgabe 3

Hinweise zu Java

- {S,Des}erialisierung mittels {Data,Buffered,File}{Output,Input}Stream
- Öffnen der Ströme zum Schreiben und Lesen

```
// Holen der Ausgabestroeme (Schreiben in Datei 'journal')
FileOutputStream fos = new FileOutputStream("journal");
DataOutputStream dos = new DataOutputStream(new BufferedOutputStream(fos));

// Holen der Eingabestroeme (Lesen aus Datei 'journal')
FileInputStream fis = new FileInputStream("journal");
DataInputStream dis = new DataInputStream(new BufferedInputStream(fis));
```

- Schreiben und Lesen von Daten
 - write- und read-Methoden für unterschiedliche Datentypen (z.B. writeInt(), writeBytes())
 - Erzwingen des Schreibvorgangs auf Datenträger mittels Aufruf von force() am FileChannel-Objekt
→ boolean-Parameter von force: 'true' := Dateiinhalt **und** -metadaten schreiben

```
dos.writeLong(42);
dos.flush(); // Puffer leeren
fos.getChannel().force(true);
```

- Datanodes empfangen (POST) und senden (GET) Blockdaten als Binärdaten
- Client-Zugriffe zum Senden und Empfangen eines Datenblocks
 - Für POST-Anfrage Entity-Objekt mit geeignetem MIME-Type wählen:
„application/octet-stream“ → `MediaType.APPLICATION_OCTET_STREAM`

```
// WebTarget datanode zeigt auf http://<server>/datablock/<blockid>
public void sendBlockToDatanode(byte[] block, WebTarget datanode) {
    try {
        Response r = datanode.request()
                               .post(Entity.entity(block, MediaType.APPLICATION_OCTET_STREAM));
    } [...] // Fehlerbehandlung
}
```

- Für GET-Anfrage Response-Type auf `byte[]` setzen

```
public byte[] receiveBlockFromDatanode(WebTarget datanode) {
    byte[] block = null;
    try {
        block = datanode.request().get(byte[].class);
    } [...] // Fehlerbehandlung
    return block;
}
```

Verteilte Dateisysteme

Dateisysteme

Lokale Dateisysteme

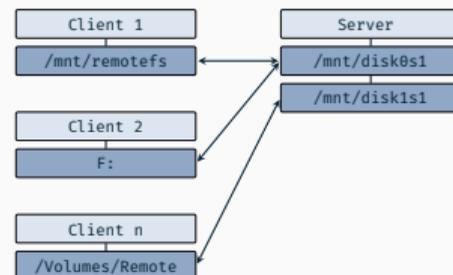
- Adressierung von Daten auf physikalischen Datenträgern
- *Beispiele:* FAT32, Ext4, Btrfs

Netzwerk-Dateisysteme

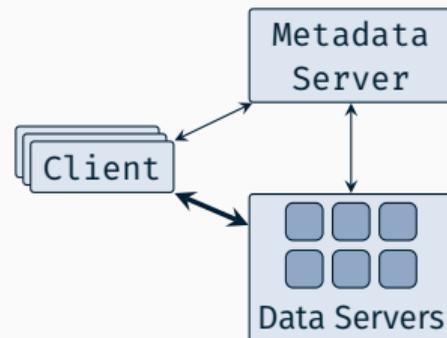
- Zugriff auf entfernte, persistente Daten über Rechengrenzen
- *Beispiele:* Andrew File System (AFS), Network File System (NFS)

⚡ Probleme

- Fehleranfälligkeit (z.B. Ausfall von Netzwerkverbindungen)
- Flaschenhalsbildung durch Ungleichgewicht (Anzahl Clients vs. Server)



- Trennung von Belangen (engl. *separation of concerns*)
 - Indizierung
 - Datenverwaltung
- Replikation der Daten für höhere Ausfallsicherheit
→ Einhaltung von *Service-Level-Agreement*, kurz: SLA
- Auflösung von Konflikten zwischen Clients
- Beispiele:
 - Ceph
 - Google File System
 - **Hadoop Distributed File System**



Verteilte Dateisysteme

Hadoop Distributed File System (HDFS)

- Teil des Apache Hadoop Frameworks für skalierbare, verteilte Datenverarbeitung

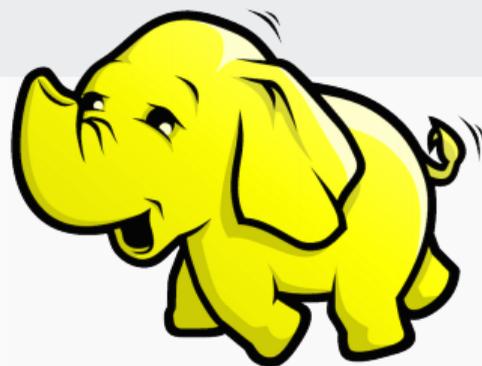


Konzepte

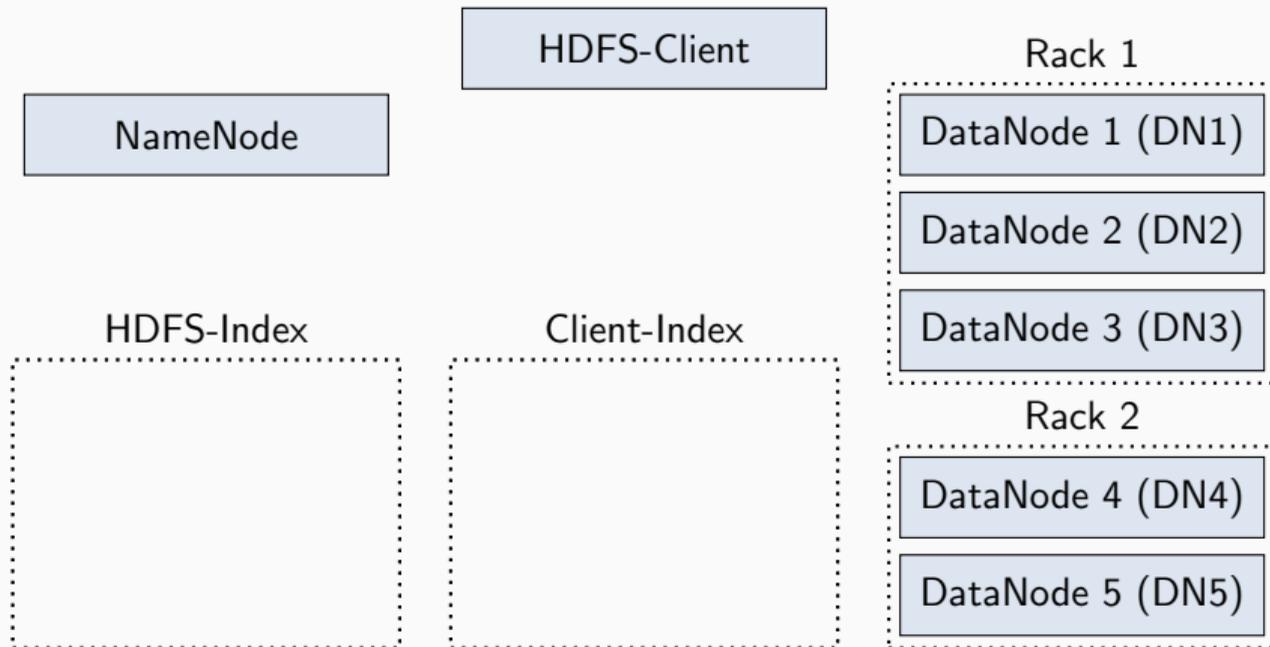
- Write-once, read-many (WORM)
- Replikation
- Datenlokalität („rack-aware“)

Architektur

- HDFS-Client
- NameNode → Namensraum (Index, Metadaten)
- DataNode → Blockreplikate (Blockdaten + Metadaten)

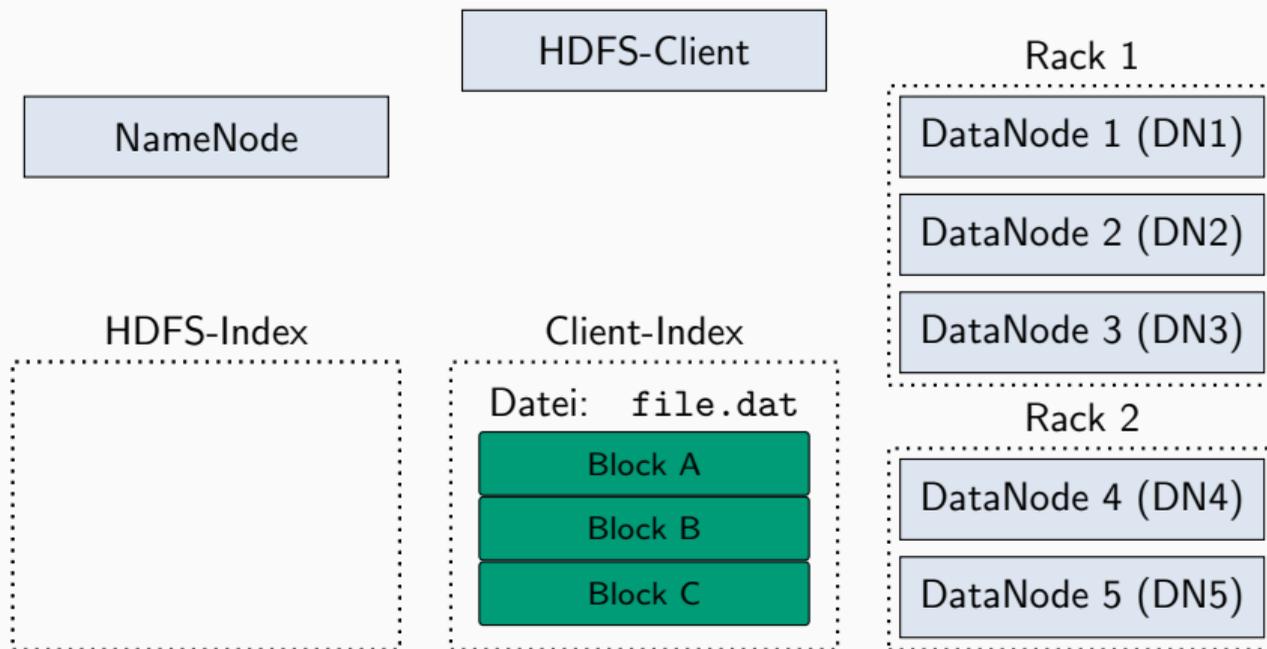


Hadoop Distributed File System (HDFS)

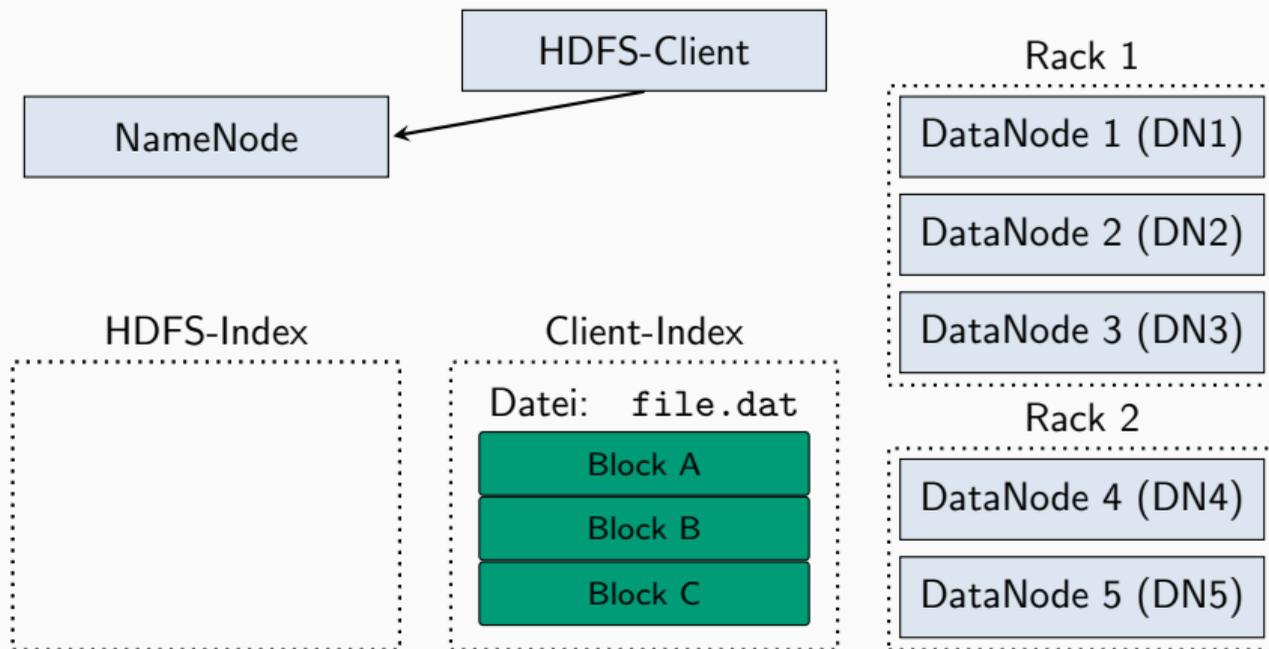


■ System-Konfiguration

- 1x HDFS-Client
- 1x NameNode
- 5x DataNodes (Rack 1: DN1-3, Rack 2: DN4-5)

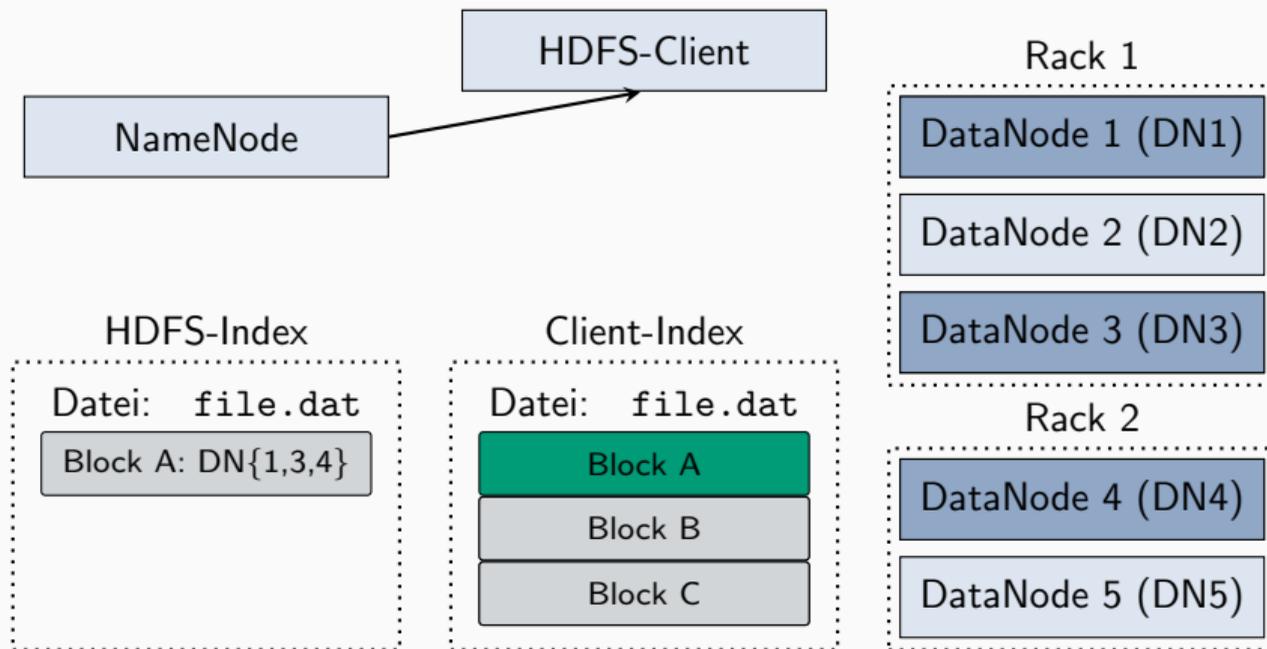


- HDFS-Client legt die aus drei Blöcken (A, B und C) bestehende Datei `file.dat` im HDFS an



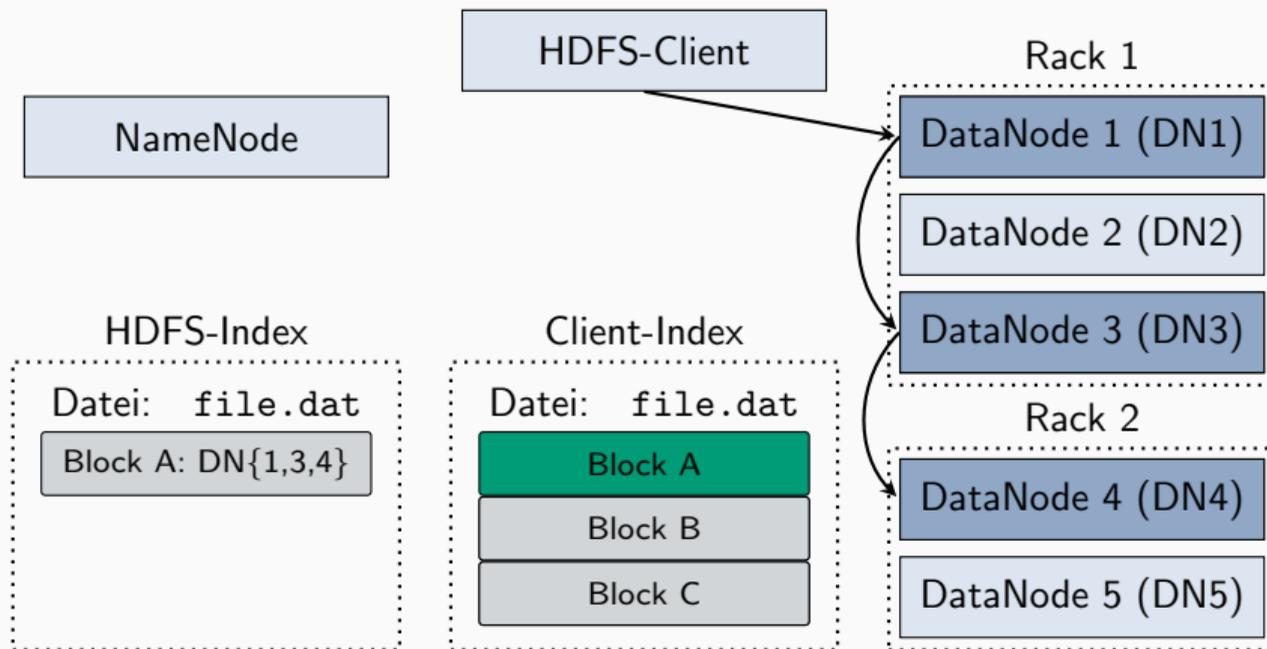
1. HDFS-Client → NameNode:

Anforderung eines sog. Lease (dt. *Miete*) für das Schreiben der Datei `file.dat`

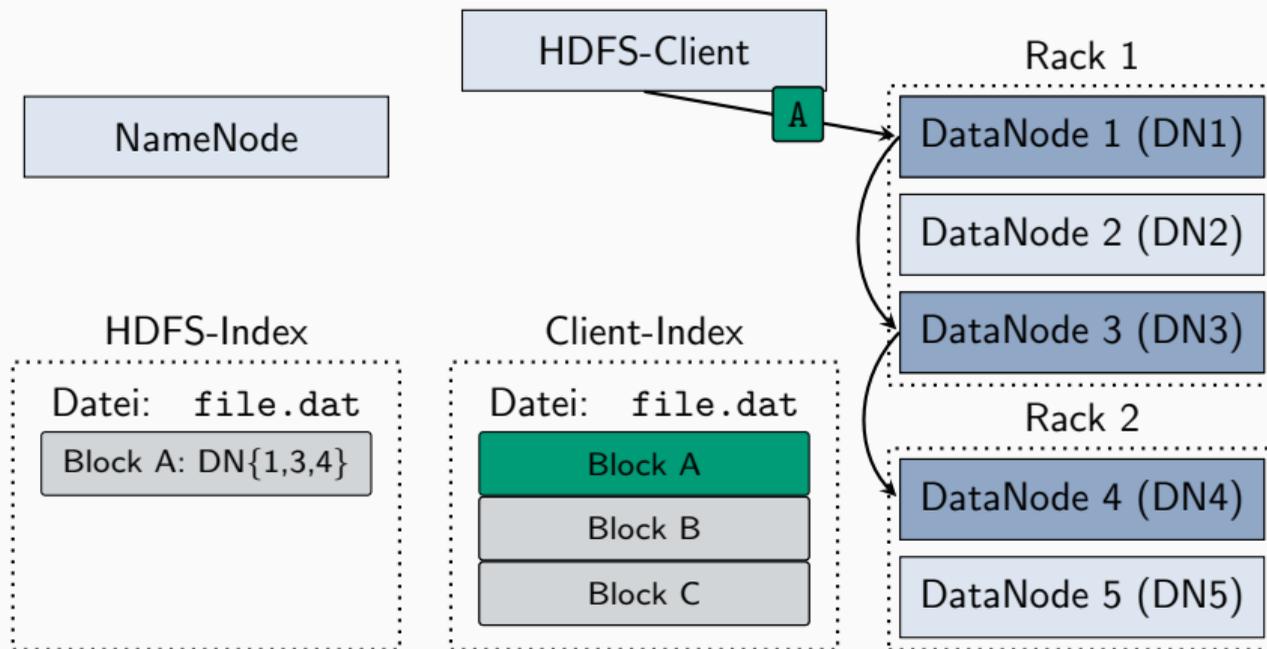


2. NameNode → HDFS-Client:

Erteilung des Lease, Erzeugung einer Block-ID für den ersten Block (Block A),
Zuteilung der Replikate (DN1, DN3 und DN4)

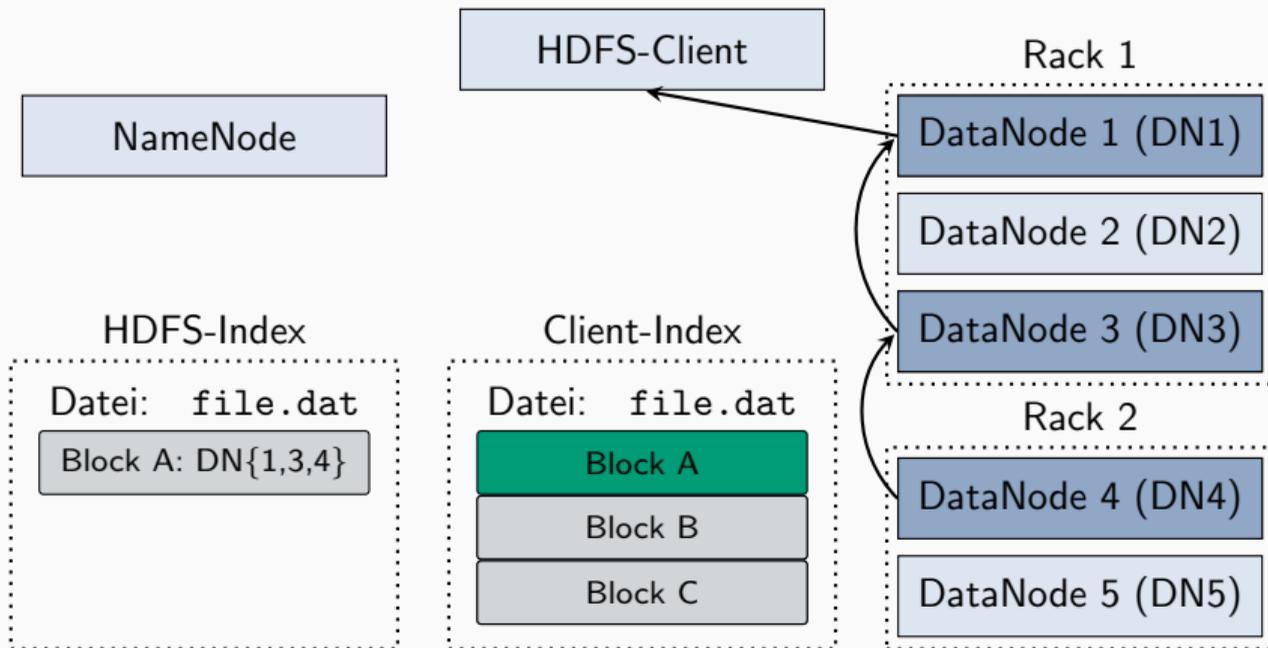


3. „Daten-Pipeline“ zur Vorbereitung der Schreiboperationen von Block A:
HDFS-Client – DN1 – DN3 – DN4



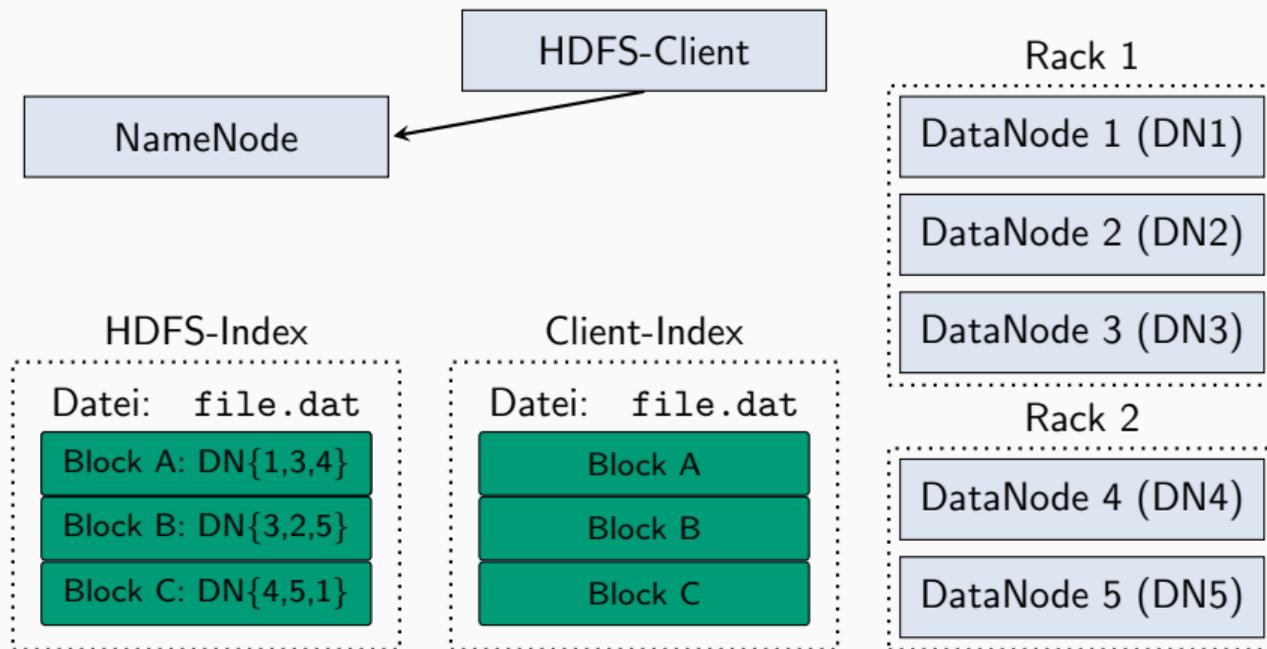
4. Durchführung der Schreiboperationen:

HDFS-Client sendet Block A an DN1, DN1 sendet empfangenen Block A an DN3, DN3 sendet empfangenen Block A an DN4



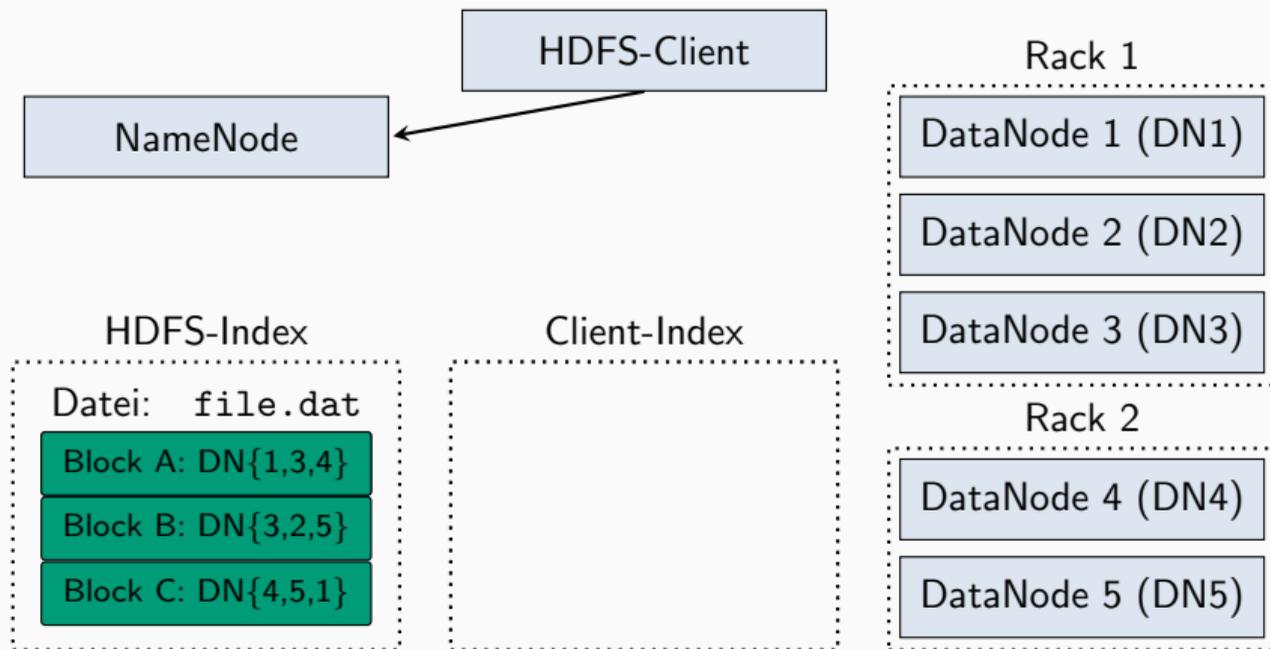
5. Bestätigung der Schreiboperationen:

Jede DataNode bestätigt das erfolgreiche Schreiben von Block A entlang der Pipeline (Abbau)



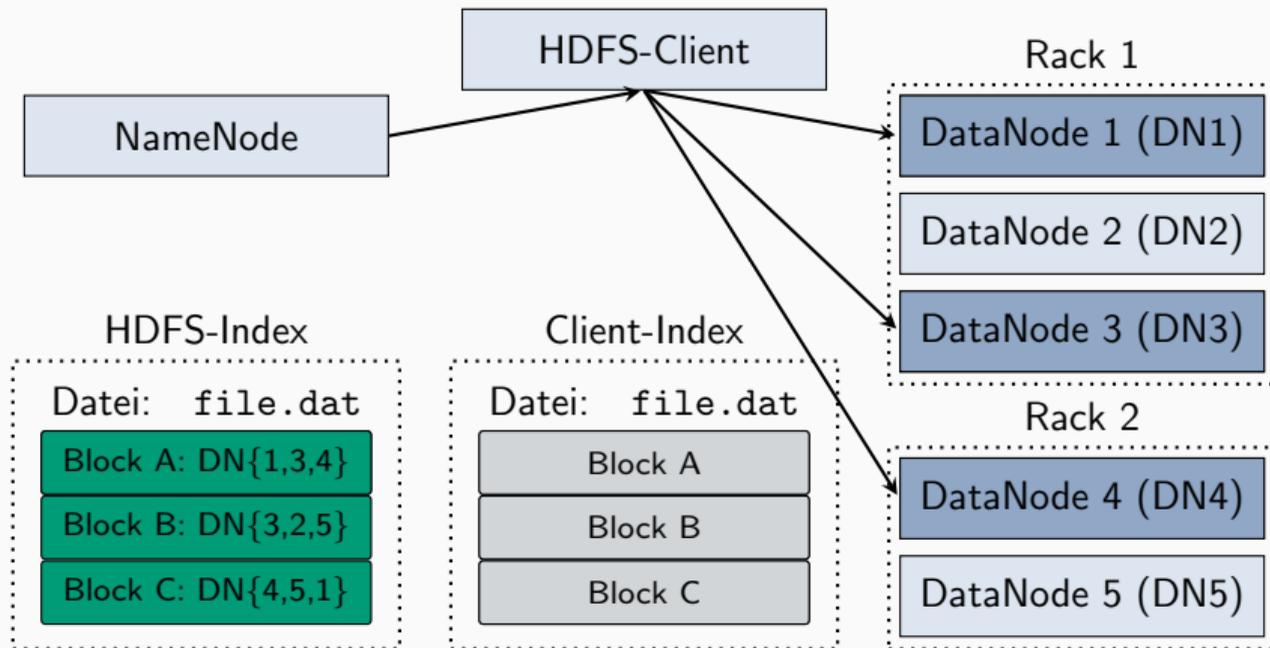
6. HDFS-Client → DataNodes:

Analog werden die restlichen Blöcke der Datei vom HDFS-Client an die DataNodes verschickt; HDFS-Client benachrichtigt NameNode von erfolgreicher Schreiboperation

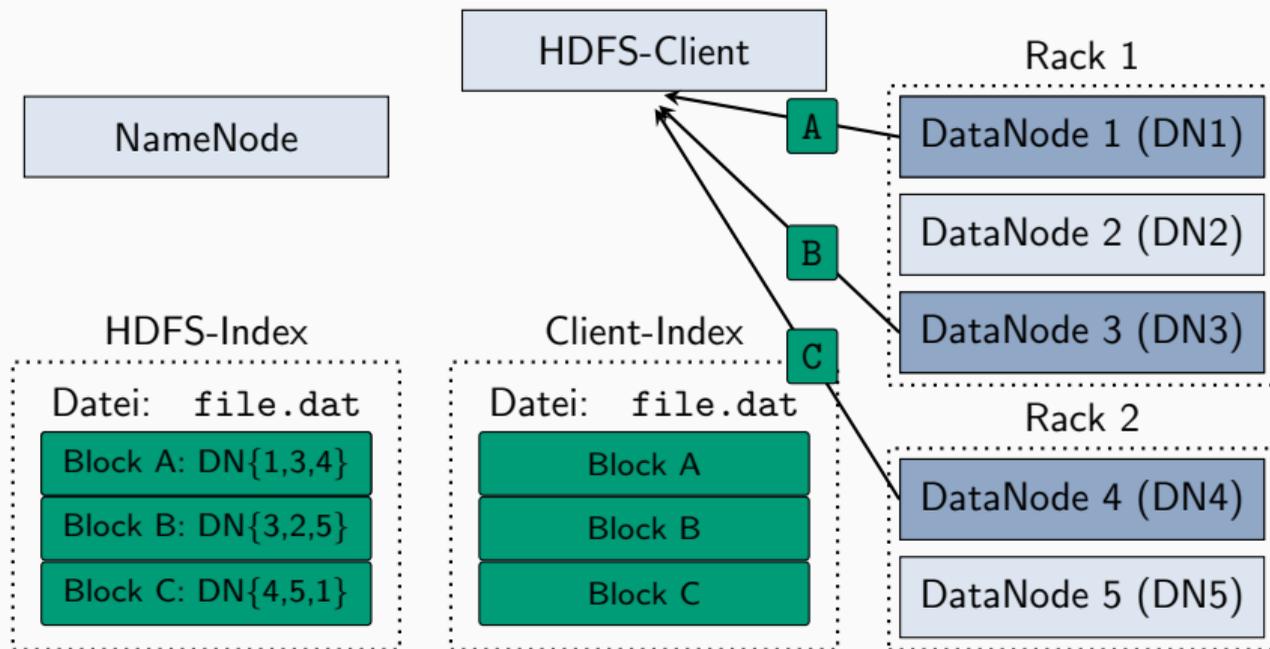


1. HDFS-Client → NameNode:

Anforderung der DataNodes-Liste: Alle DataNodes, die Blöcke der zu lesenden Datei file.dat speichern



2. NameNode → HDFS-Client, HDFS-Client → DataNodes:
Client erhält DataNodes-Liste und wählt den ersten DataNode für jeden der Datenblöcke

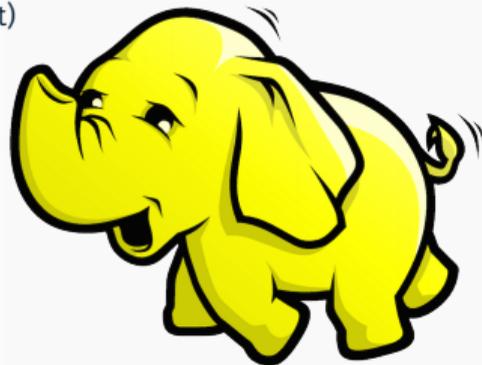


3. DataNodes → HDFS-Client:

HDFS-Client liest die Blöcke sequentiell, DataNodes senden die angeforderten Blöcke an den HDFS-Client

■ (Weitere) HDFS-Details

- Herzschlag-Nachrichten (engl. heartbeat) von DataNodes zum NameNode
 - Alle drei Sekunden (Default) ein Herzschlag
 - Replikationsfaktor sicherstellen
 - Grundlast bei sehr großen Clustern
- Block-Report: NameNode generiert Metadaten aus den Block-Reports
 - Umfangreicher Bericht über alle Blöcke alle 60 Minuten (Default)
 - Löschen ungenutzter Blöcke
- NameNode
 - *Die Sollbruchstelle des Systems?*



■ Literatur



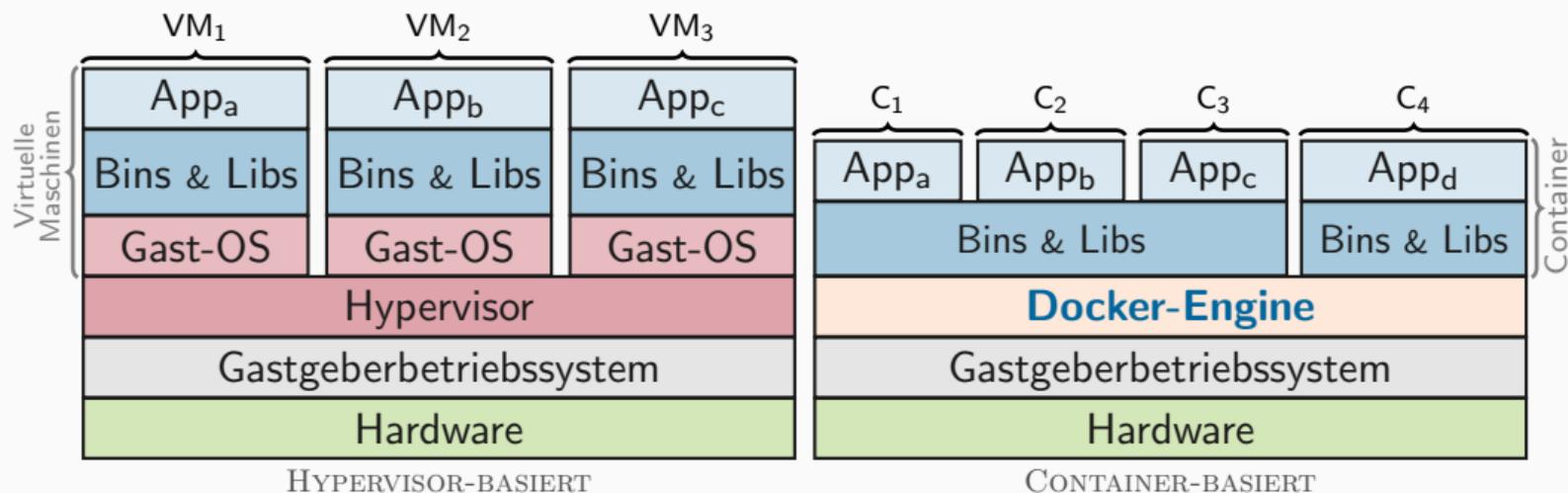
Konstantin Shvachko, Hairong Kuang, Sanjay Radia, and Robert Chansler
The Hadoop distributed file system

Proceedings of the 26th IEEE Symposium on Mass Storage Systems and Technologies (MSST '10), pages 1–10, 2010.

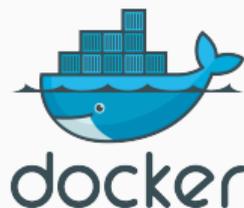
Container- Betriebssystemvirtualisierung

Motivation

Virtualisierungsformen im Vergleich

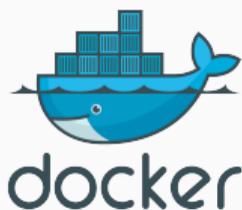


- Hypervisor-basierte Virtualisierung
 - Erlaubt Virtualisierung von kompletten Betriebssystemen
- Container-basierte Virtualisierung
 - Leichtgewichtig: Hypervisor entfällt, kleinere Abbilder, schnelleres Hochfahren
 - Bindung an Betriebssystemkernel und vorhandene Treiber
 - Im Rahmen dieser Übung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



Container- Betriebssystemvirtualisierung

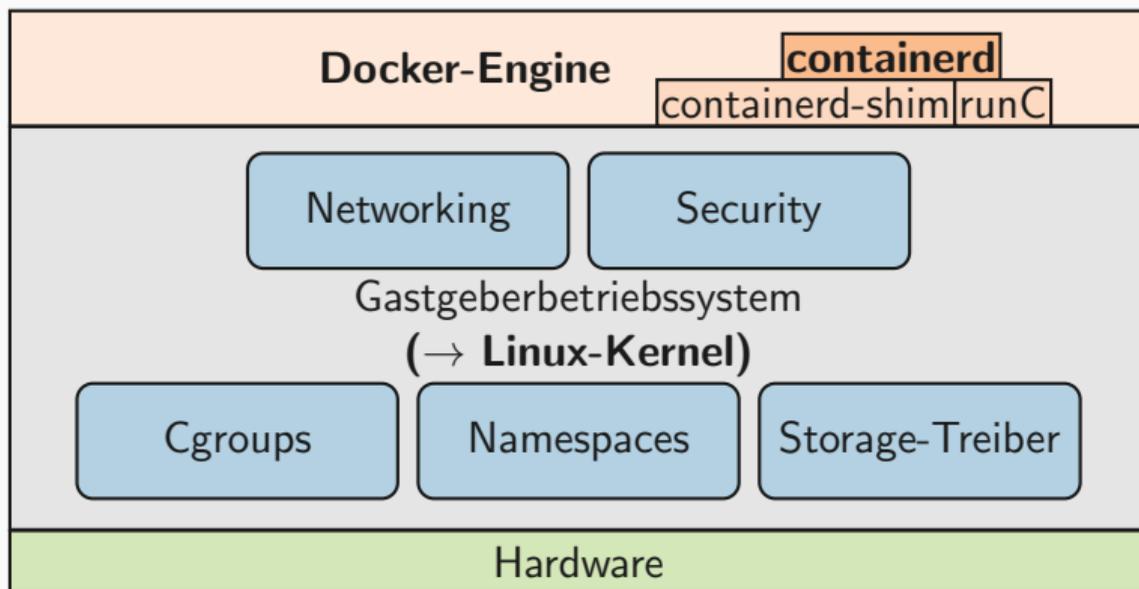
Docker



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.

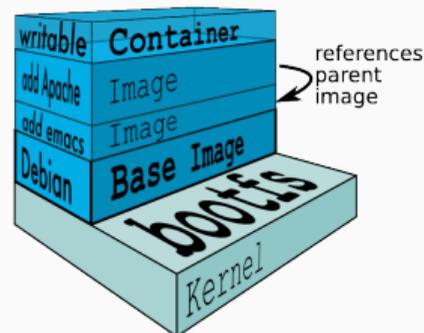
- Namensräume werden zur Isolation von Anwendungen auf unterschiedlichen Ebenen herangezogen
- **Dateisysteme**
 - Jedes Dateisystem benötigt eigenen Einhängepunkt, welcher einen neuen Namensraum aufspannt
 - Überlagerte Dateisysteme (mit Docker verwendbar: `overlayfs`) erlauben Verschmelzen von Verzeichnissen 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: Instanziertes 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

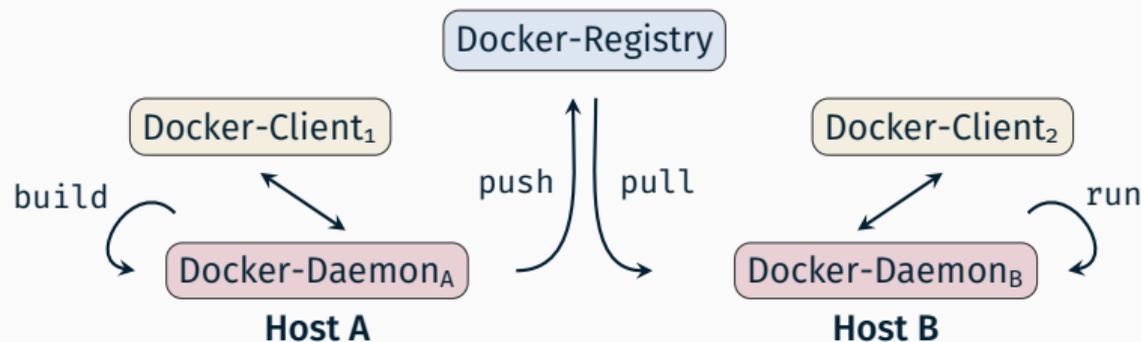
- Instanzieren eines Containers erfolgt über das Aufrufen einer darin befindlichen Anwendung
- Container an interne Anwendungsprozesse gebunden
→ Sobald letzte Anwendung terminiert ist, beendet sich auch die Container-Instanz

■ Git-orientierter Arbeitsablauf

- Ähnliche Befehlsstruktur (z. B. pull, commit, push)
- Git Hub ↔ 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 ausfuehren, 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>] ↪ Basisabbild auswählen (obligatorisch)
- EXPOSE <PORT> [<PORT>...] ↪ Container-übergreifende Port-Freigabe
- RUN <COMMAND> ↪ Ausführen eines Befehls (in *Shell-Form*)
- COPY <SRCs> <DST> ↪ Dateien/Verz. ins Container-Dateisystem kopieren
- ENTRYPOINT [<EXE>, <PARAM-1>, ...] ↪ 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>, ...]

→ 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
2. Port `18084` freigeben
3. Benutzer `mwcc` erstellen, diesen zur Gruppe `users` hinzufügen und Shell setzen
4. Basisverzeichnis setzen (`/opt/mwcc` und `lib`-Unterverzeichnis existieren bereits)
5. Log-Verzeichnis erstellen und Benutzerrechte setzen
6. JAR-Datei hineinkopieren
7. Ausführenden Benutzer setzen
8. Einstiegspunkt setzen
9. Standardargumente 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` detachen 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>
```