

Middleware – Cloud Computing – Übung

Konsistente Replikation

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

Replikation

Konsistenzwahrung

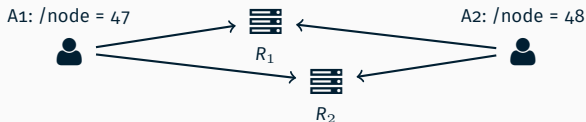
Zab

Replikation

Konsistenzwahrung

■ Replikation einer zustandsbehafteten Anwendung

- Replikatzustände müssen konsistent gehalten werden
- Beispiel für inkonsistente Zustände zweier Replikate R_1 und R_2
 - Zwei Anfragen A_1 und A_2 , die einem Knoten /node neue Daten zuweisen



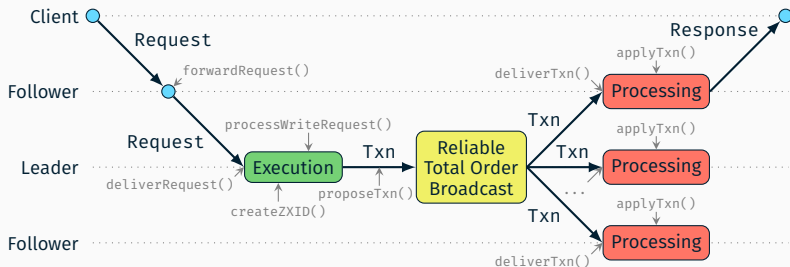
- Annahme: A_1 erreicht R_1 früher als A_2 , bei R_2 ist es umgekehrt

R_1	/node-Daten	R_2	/node-Daten
< init >	\emptyset	< init >	\emptyset
A_1	47	A_2	48
A_2	48 ⚡	A_1	47 ⚡

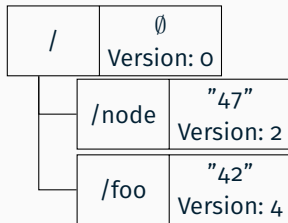
- Sicherstellung der **Replikatkonsistenz**: Alle Replikate vollziehen Zustandsänderungen in derselben Reihenfolge
- Replikationsvarianten
 - Aktiv: Anfragen an alle Replikate verteilen und dort ausführen
 - **Passiv (Zookeeper)**: Anführer bearbeitet Anfragen und verteilt Zustandsänderungen

Replikation in ZooKeeper

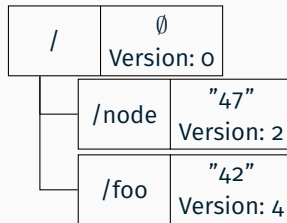
- Gruppe von ZooKeeper-Replikaten
 - $2f + 1$ Replikate zur Tolerierung von höchstens f Fehlern bzw. Ausfällen
 - Jedes Replikat nimmt Verbindungen von Clients an
- Leader-Follower-Ansatz für stark konsistente Schreibanfragen
 - Follower leitet Anfrage an den Leader weiter
 - Leader bearbeitet Anfrage und schreibt **Änderungen in Zustandstransaktion**
 - Fehlerfall: Erstellung einer Fehlertransaktion [Bsp.: Zu löschender Knoten existiert nicht.]
 - Total Order Broadcast verteilt Transaktionen in vom Leader vorgegebener Reihenfolge
 - Transaktionsauslieferung erst nach Bestätigung durch Mehrheit der Replikate
 - Konsistente Ausführung ausgelieferter Transaktionen auf allen Replikaten



Zustand des Anführers



Zustand eines Followers



Anfrage

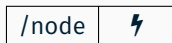
Transaktion

Antwort an Client

Client A: setData("/node", "47", 1)



Client B: setData("/node", "48", 1)

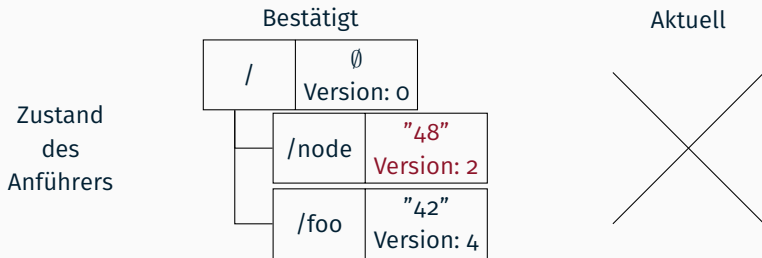


⚠ Das Beispiel wird im zugehörigen Video besprochen

- **Einsicht:** Leseanfragen haben keinen Einfluss auf Replikatkonsistenz
- **Optimierte Bearbeitung lesender Anfragen in ZooKeeper**
 - Ausschließlich durch direkt mit Client verbundenem Replikat
 - Sofort nach Erhalt, d. h. unabhängig von schreibenden Anfragen
 - Aber: Unter Garantie von FIFO für sämtliche Anfragen eines Clients
- **Vorteile**
 - Einsparung von Ressourcen
 - Kürzere Antwortzeiten
- **Konsequenzen**
 - Antworten auf Leseanfragen sind abhängig vom bearbeitenden Replikat
 - Rückgabe von „veralteten“ Daten und Versionsnummern möglich
- **sync()-Methode**
 - Erzwingen eines Synchronisationspunkts
 - Wartet bis alle vor dem sync() empfangenen Anfragen bearbeitet wurden

- Problemstellung
 - Leseanfragen dürfen nur konsistenten, bestätigten Zustand zurückgeben
 - ⇒ Unbestätigte Zustandsänderungen könnten im Fehlerfall noch verloren gehen
 - Schreibanfragen müssen aber auf aktuellem, unbestätigtem Zustand arbeiten
 - ⇒ Anführer muss beide Zustände gleichzeitig verwalten
- Effizienter Lösungsansatz
 - **Bestätigter Zustand Z_B**
 - Verwaltung des vollständigen Baumes von Datenknoten
 - Aktualisierung durch Einspielen bestätigter, total geordneter Transaktionen
 - Grundlage für die Bearbeitung rein lesender Anfragen
 - **Aktueller Zustand Z_A**
 - Verwaltung in Form einer Sammlung von gegenüber Zustand Z_B geänderten Knoten
 - Modifikation durch Bearbeitung von schreibenden Anfragen
 - Basis für die Erstellung von Zustandstransaktionen
- Mechanismus zur Garbage-Collection
 - Vergabe eindeutiger IDs (zxids) an Zustandsänderungen/-transaktionen
 - Einspielen einer Transaktion → Löschen der unbestätigten Änderung

Anfrageverarbeitung ohne aktuellen Zustand



Anfrage

Transaktion

Antwort an Client

Client A: setData("/node", "47", 1)

/node	"47" Version: 2
-------	--------------------



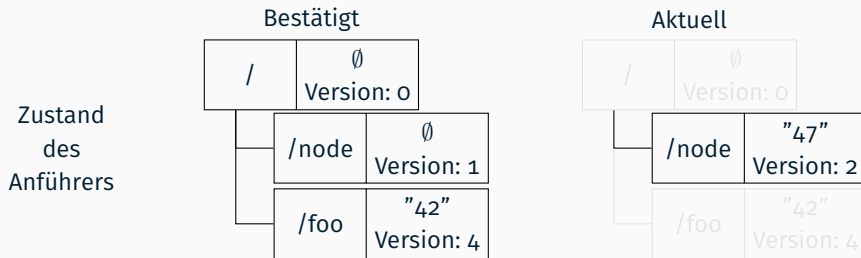
Client B: setData("/node", "48", 1)

/node	"48" Version: 2
-------	--------------------



⚠ Das Beispiel wird im zugehörigen Video besprochen

Anfrageverarbeitung mit aktuellem Zustand



Anfrage

Transaktion

Antwort an Client

Client A: setData("/node", "47", 1)

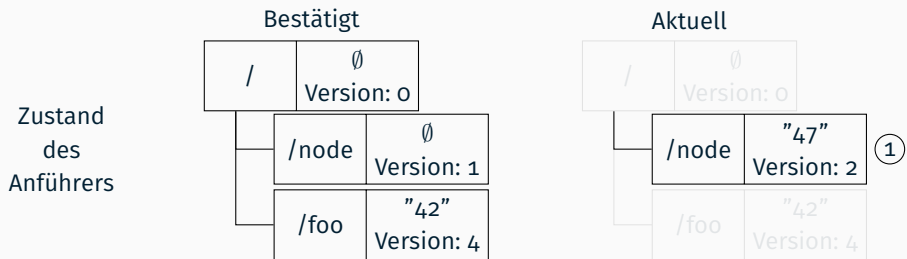
/node	"47" Version: 2
-------	--------------------

Client B: setData("/node", "48", 1)

/node	⚡
-------	---

⚠ Das Beispiel wird im zugehörigen Video besprochen

Garbage-Collection von Transaktionen

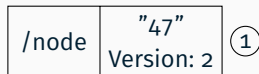


Anfrage

Transaktion

Antwort an Client

Client A: setData("/node", "47", 1)



Client B: setData("/node", "48", 1)



⚠ Das Beispiel wird im zugehörigen Video besprochen

Replikation

Zab

- Protokoll für zuverlässigen und geordneten Nachrichtenaustausch
 - Von Apache ZooKeeper verwendet, aber nicht modular integriert
 - Nachträgliche eigenständige Implementierung als *Zab*
 - Modifikation zur Anpassung an die Übungsaufgabe
 - *Übungsfolien sind Dokumentation* der modifizierten Bibliothek
- *Totally Ordered Broadcast Protocol* mit zwei Betriebsmodi
 - **Normalbetrieb** (*Broadcast*)
 - Bereitstellen einer eindeutigen **Sequenznummer** (*zxid*) für jede Transaktion
 - Zuverlässige Verteilung aller Zustandstransaktionen in Reihenfolge der Sequenznummern
 - **Wahl eines neuen Anführers** (*Recovery*)
 - Szenarien: Ausfall des Anführers, Anführer hat keine Mehrheit mehr
 - Sicherstellung der Eindeutigkeit von Sequenznummern

- Literatur



Benjamin Reed and Flavio P. Junqueira

A simple totally ordered broadcast protocol

Proceedings of the 2nd Workshop on Large-Scale Distributed Systems and Middleware, pages 1-6, 2008.

- Repräsentation eines Zab-Knotens in der abstrakten Basisklasse Zab
- Varianten von Zab-Teilnehmern
 - SingleZab Einzelne (lokale) Instanz, zum Testen
 - MultiZab Teil einer verteilten Gruppe aus mindestens 3 Replikaten
- Methoden

```
public void startup();
public void shutdown();
public void forwardRequest(Serializable request);
public long createZXID();
public void proposeTxn(Serializable txn, long zxid);
```

- startup() Starten eines Zab-Knotens
- shutdown() Stoppen eines Zab-Knotens
- forwardRequest() Weiterleiten einer Anfrage an den Anführer
- createZXID() Anfordern der nächsten Sequenznummer (zxid)
- proposeTxn() Vorschlagen einer zu ordnenden Transaktion
 - Aufruf muss in Reihenfolge der zxids erfolgen
 - createZXID() und proposeTXN() immer als Paar aufrufen

[Hinweis: Da Zab in den ersten 4 Bytes einer zxid eine Epochennummer codiert, führt eine Neuwahl des Anführers zu einem Sprung in den von createZXID() erzeugten zxid-Werten.]

- Empfang von Nachrichten über die Schnittstelle ZabCallback
- Methoden

```
public void deliverRequest(Serializable request);  
public void deliverTxn(Serializable txn, long zxid);  
public void status(ZabStatus status, String leader);
```

- deliverRequest() Übergabe einer dem Anführer weitergeleiteten Anfrage
 - deliverTxn() Zustellung der nächsten geordneten Transaktion
 - status() Benachrichtigung über Änderungen des Status
- Status eines Zab-Knotens (ZabStatus)
 - LOOKING Temporärer Zustand während der Anführerwahl
 - FOLLOWING Lokales Replikat ist Follower
 - LEADING Lokales Replikat ist Anführer
- Hinweise
 - Aufrufe von deliverRequest() können nebenläufig erfolgen
 - Geordnete Transaktionen werden dagegen durch Zab sequentiell zugestellt
 - Alle von einer Mehrheit ($f + 1$) der $2f + 1$ Replikate bestätigten Transaktionen werden auf allen korrekten Replikaten zugestellt

- Übergabe eines `Properties`-Objekts an den Zab-Konstruktor
- Parameter
 - `myid` ID des lokalen Replikats
 - `peer<i>` Zab-Adresse des Replikats *i*
 - ...
- Identische Konfiguration der `peer<i>`-Adressen auf allen Replikaten nötig
- Beispielkonfiguration eines `MultiZab`-Knotens (insgesamt 3 Replikate)
 - Zusammenstellung der Konfiguration für ein Replikat mit der ID 1

```
Properties zabProperties = new Properties();
zabProperties.setProperty("myid", String.valueOf(1));
zabProperties.setProperty("peer1", "localhost:12345");
zabProperties.setProperty("peer2", "localhost:12346");
zabProperties.setProperty("peer3", "localhost:12347");
```

- Initialisierung eines Zab-Knotens

```
ZabCallback zabListener = [...];
Zab zabNode = new MultiZab(zabProperties, zabListener);
```


- Zab verwendet intern die Logging-API *log4j*
 - Konfiguration z.B. durch eine Datei `log4j2.properties`, die im Classpath abgelegt sein muss
 - Granularitätsstufen: OFF, ERROR, WARN, INFO, DEBUG, ALL, ...
 - Dokumentation unter:
<https://logging.apache.org/log4j/2.x/manual/configuration.html>
- Beispiele für log4j-Konfigurationen
 - Ausgabe der Log-Meldungen auf der Konsole (Stufe: DEBUG)

```
rootLogger = DEBUG, CONSOLE
appender.CONSOLE.name = CONSOLE
appender.CONSOLE.type = Console
appender.CONSOLE.layout.type = PatternLayout
```

- Ausgabe der Log-Meldungen in der Datei `zab.log` (Stufe: INFO)

```
rootLogger=INFO, FILE
appender.FILE.name = FILE
appender.FILE.type = File
appender.FILE.fileName = zab.log
appender.FILE.layout.type = PatternLayout
```