

Verteilte Systeme

Georeplikation

Sommersemester 2026

Christian Berger

Nach Folien von Tobias Distler

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



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

Georeplikation

Motivation

Konsistenzgarantien

Pileus

Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

- Georeplikation
 - Platzierung von Replikaten an **verschiedenen geografischen Standorten**
 - Konsequenzen
 - Minimierung der Fehlerabhängigkeit zwischen Replikaten
 - Reduzierung der Distanz zwischen Client und Replikat
 - Höhere Latenzen zwischen den Replikaten
- Probleme bei der Bereitstellung **starker Konsistenz**
 - Gesteigerte Antwortzeit aufgrund eines mehrphasigen Einigungsprotokolls
 - Erhöhter Kommunikationsaufwand durch Austausch von Bestätigungen
 - Nichtverfügbarkeit von Replikaten, die keinen Kontakt zur Gruppe haben
 - Vergleiche: Uniformer zuverlässiger Multicast
- Herausforderungen
 - Welche **abgeschwächten Konsistenzgarantien** sind praktikabel?
 - Wie kann ein System unterschiedliche Konsistenzgarantien unterstützen?

Georeplikation

Motivation

Konsistenzgarantien

Pileus

Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

■ Beispiele typischer **Konsistenzgarantien** aus der Praxis

Konsistenzgarantie	Beschreibung
<i>Strong Consistency</i>	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreiboperationen
<i>Eventual Consistency</i> (<i>Letztendliche Konsistenz</i>)	Sichtbarkeit einer Teilmenge der vorherigen Schreiboperationen
<i>Consistent Prefix</i>	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreibaufrufe bis zu einem bestimmten Punkt in der Sequenz
<i>Bounded Staleness</i>	Sichtbarkeit aller Schreiboperationen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt; eventuell beliebige danach
<i>Monotonic Reads</i>	Sichtbarkeit einer monoton wachsenden Teilmenge der vorherigen Schreiboperationen
<i>Read My Writes</i>	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreiboperationen desselben Lesers

■ Literatur



Doug Terry
Replicated data consistency explained through baseball
Communications of the ACM, 56(12):82–89, 2013.

Konsistenzgarantien im Vergleich

- Beispiel: Entwicklung des Spielstands in einem Baseball-Spiel

Zeitpunkt [min]	0	5	17	37	47	79	163	181
Mannschaft A	0	0	1	1	1	2	2	2
Mannschaft B	0	1	1	2	3	3	4	5

- Mögliche Rückgabewerte von Leseaufrufen zum Zeitpunkt $t = 182$

[Annahme: Die Punkte jeder Mannschaft werden in separaten Datensätzen verwaltet, aber gemeinsam gelesen.]

<i>Strong Consistency</i>	2:5
<i>Eventual Consistency</i>	0:0, 0:1, 0:2, 0:3, 0:4, 0:5, 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 2:0, 2:1, 2:2, 2:3, 2:4 oder 2:5
<i>Consistent Prefix</i>	0:0, 0:1, 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 2:4 oder 2:5
<i>Bounded Staleness</i> [Beispiel: max. 100 min alte Werte]	2:3, 2:4 oder 2:5
<i>Monotonic Reads</i> [Beispiel: 1. Aufruf bei 1:3]	1:3, 1:4, 1:5, 2:3, 2:4 oder 2:5
<i>Read My Writes</i>	Offizieller Punkteähler: 2:5 Andere Leser: siehe letztendliche Konsistenz

- Offizieller Punktezähler bei Aktualisierung des Spielstands

```
public void incrementScore(String team) {  
    int oldScore = store.get(team);  
    store.put(team, oldScore + 1);  
}
```

⇒ **Read My Writes**

- Schiedsrichter nach der regulären Spielzeit: Entscheidung, ob Verlängerung nötig

```
public boolean isDraw() {  
    [scoreA, scoreB] = store.getAll("A", "B");  
    return (scoreA == scoreB);  
}
```

⇒ **Strong Consistency**

- Radioreporter bei periodischer Spielstandsmeldung

```
while(true) {  
    [scoreA, scoreB] = store.getAll("A", "B");  
    Report scoreA and scoreB;  
    Sleep for 30 minutes;  
}
```

Consistent Prefix +
⇒ **(Monotonic Reads oder Bounded Staleness)**

⇒ **Konsistenzanforderungen sind abhängig vom Anwendungsfall**

Georeplikation

Motivation

Konsistenzgarantien

Pileus

Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

■ Problem

- Schwach konsistente Leseanfragen liefern oft stark konsistente Daten
- **Mehraufwand durch fehlendes Wissen** über die Aktualität von Daten

```
Data data = weaklyConsistentGet([Schlüssel]);  
Display data;  
Data latestData = stronglyConsistentGet([Schlüssel]);  
if(latestData != data) Display latestData;
```

■ Pileus

- Ansatz zur georeplizierten Speicherung von Schlüssel-Wert-Paaren
- Spezifizierung **konsistenzbasierter Dienstgütekriterien** durch den Client
- Anfrageabhängige Auswahl des Kontaktreplikats für Leseoperationen

■ Literatur



Douglas B. Terry, Vijayan Prabhakaran, Ramakrishna Kotla, Mahesh Balakrishnan et al.
Consistency-based service level agreements for cloud storage
Proc. of the 24th Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '13), S. 309–324, 2013.

■ Systemkern

■ **Synchrone Replikation**

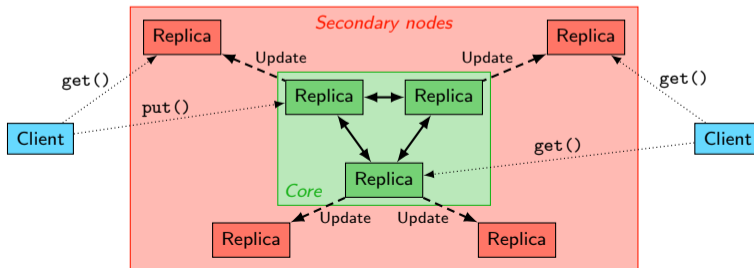
■ Bearbeitung von

- Schreibanfragen
- Leseanfragen mit starken Konsistenzanforderungen

■ Sekundärknoten

■ **Asynchrone Übernahme der Daten** aus dem Systemkern

■ Bearbeitung von Leseanfragen mit schwachen Konsistenzanforderungen



Konsistenzbasierte Dienstgütekriterien (SLAs)

- Spezifizierung durch die **Client-Anwendung** [Aufruf: `get(String key, SLA sla)`]
 - Festlegung der gewünschten Konsistenz und einer oberen Latenzschranke
 - Gewichtung der Kriterien nach „Nützlichkeit“ (*Utility*)

Nr.	Konsistenzgarantie	Latenz	Nützlichkeit
1.	<i>Strong Consistency</i>	150 ms	1.0
2.	<i>Eventual Consistency</i>	150 ms	0.5
3.	<i>Strong Consistency</i>	1000 ms	0.2

- Auswertung durch die **Client-Bibliothek**
 - Analyse des Verhaltens verschiedener Replikate
 - Abschätzung von replikatspezifischen Wahrscheinlichkeiten
 - P_C Wahrscheinlichkeit für Einhaltung der Konsistenzgarantie
 - P_L Wahrscheinlichkeit für Bereitstellung der Latenz
 - $P_S = P_C \times P_L$ Wahrscheinlichkeit für Einhaltung des Dienstgütekriteriums s
 - **Auswahl des Kontaktreplikats**
 - Ziel: Maximierung von $P_S \times s_{Utility}$ über alle s
 - Bei Gleichstand: Wahl des Replikats mit der vermeintlich geringsten Latenz

- Einsatz von **Modifikationszeitstempeln für Datensätze**
 - Systemkern
 - Erzeugung von Zeitstempeln bei der Ausführung von Schreibanfragen
 - Weiterleitung von Änderungen in aufsteigender Reihenfolge ihrer Zeitstempel
 - Alle Replikate
 - Pro Datensatz: Verwaltung eines Zeitstempels T_D der letzten Änderung
 - T_{max} : Zeitstempel der neuesten Aktualisierung
 - Antworten enthalten T_D und T_{max} [→ Abschätzung des Aktualitätsgrads der Daten möglich.]
- **Analyse des Replikatverhaltens** durch den Client
 - Messung der individuellen Umlaufzeiten zu einzelnen Replikaten
 - Verwaltung der neuesten bekannten T_{max} verschiedener Replikate
- Abschätzung von Konsistenzwahrscheinlichkeiten
 - Bestimmung eines erforderlichen **Mindestzeitstempels** T_{min} (Beispiele)
 - *Read My Writes* Zeitstempel der letzten Änderung des Clients
 - *Monotonic Reads* Zeitstempel der neuesten vom Client gelesenen Version
 - Vergleich von T_{min} und T_{max}

Georeplikation


Motivation

Konsistenzgarantien

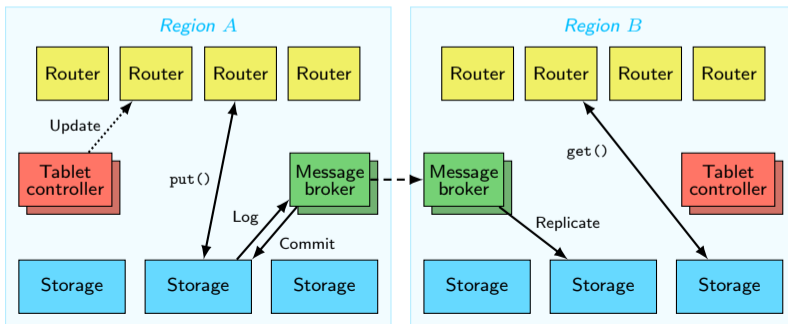
Pileus

Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

- Einsatzszenarien bei Yahoo (Beispiele)
 - Verwaltung von **Nutzerinformationen** (Profildaten, Zugriffsstatistiken,...)
 - Speicherung von Metadaten für Videos, Fotos und Email-Anhänge
- Verwaltung von **Schlüssel-Wert-Paaren in Tabellen**
 - Sortierung von Datensätzen
 - Aufsteigend nach Schlüssel oder Schlüssel-Hashwert
 - `scan()`: Zusätzliche Operation zum Iterieren über mehrere Datensätze
 - Speicherung von Tabellen aufgeteilt nach Abschnitten (*Tablets*)
- **Charakteristika**
 - Datensatzspezifische Primärreplikate
 - Alle Operationen mit hohen Latenzen werden asynchron ausgeführt
- **Literatur**
 -  Brian F. Cooper, Raghu Ramakrishnan, Utkarsh Srivastava, Adam Silberstein et al.
PNUTS: Yahoo!'s hosted data serving platform
Proceedings of the VLDB Endowment, 1(2):1277–1288, 2008.

- Replikation über **mehrere geografisch verteilte Regionen**
- Komponenten pro Region
 - Speicherknoten Bearbeitung von Anfragen
 - Tablet-Controller Zuordnung von Tablets zu Speicherknoten
 - Router Weiterleitung von Anfragen an Speicherknoten
 - Message-Broker Übermittlung von Nachrichten an **andere Regionen**



- Identifizierung des **zuständigen Speicherknotts** durch den Router
 - Router hält Kopie des Tablet-Controller-Zustands im Hauptspeicher
 - Information über Tablet-Grenzen
 - Abbildung von Tablets auf Speicherknotts
 - Überprüfung der Router-Entscheidung durch betroffenen Speicherknotts
 - Aktualisierung des Router-Zustands bei Fehlentscheidungen
- Identifizierung der **zuständigen Region** durch den Speicherknotts
 - Jeder Datensatz enthält Referenz auf die Region seiner Primärkopie
 - Weiterleitung von Schreibanfragen an entsprechende Region
 - Häufige Schreibanfragen von anderem Ort → Wechsel der Primärregion
 - Behandlung von Einfügeoperationen durch eine Default-Region
- **Ausführung einer Schreibanfrage** auf dem Speicherknotts
 - Übermittlung der Anfrage an den Message-Broker
 - Nach Message-Broker-Bestätigung: Lokale Bearbeitung der Anfrage