

## Georeplikation

Motivation

Konsistenzgarantien

Pileus

Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

Konfliktfreie replizierte Datentypen (CRDTs)



## Konsistenzgarantien

### Beispiele typischer Konsistenzgarantien aus der Praxis

Konsistenzgarantie	Beschreibung
<i>Strong Consistency</i>	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreiboperationen
<i>Eventual Consistency (Letztendliche Konsistenz)</i>	Sichtbarkeit einer Teilmenge der vorherigen Schreiboperationen
<i>Consistent Prefix</i>	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreibafrufe 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.



## Motivation

### 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?

■ Wie lässt sich der Umgang mit schwacher Konsistenz vereinfachen?



## 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 Punktezähler: 2:5 Andere Leser: siehe letztendliche Konsistenz



## Anwendungsszenarien

- 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;  
}
```

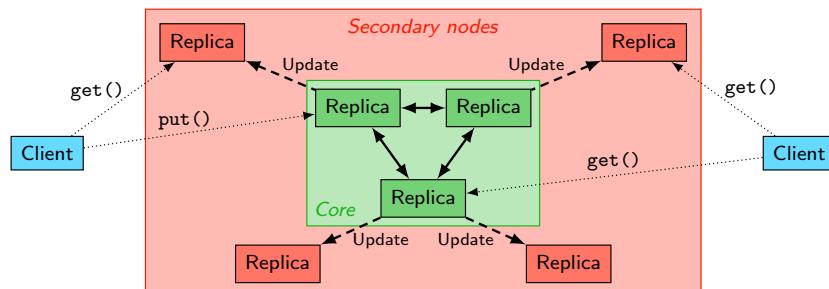
Consistent Prefix +  
⇒ (Monotonic Reads oder  
Bounded Staleness)

⇒ Konsistenzanforderungen sind abhängig vom Anwendungsfall



## Architektur

- Systemkern
  - Synchrone Replikation
  - Bearbeitung von
    - Schreibanfragen
    - Leseanfragen mit starken Konsistenzanforderungen
- Sekundärknoten
  - Asynchrone Übernahme der Daten aus dem Systemkern
  - Bearbeitung von Leseanfragen mit schwachen Konsistenzanforderungen



## Pileus

- 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 et al.  
**Consistency-based service level agreements for cloud storage**  
*Proceedings of the 24th Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '13)*, S. 309–324, 2013.



## 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.	Strong Consistency	150 ms	1.0
2.	Eventual Consistency	150 ms	0.5
3.	Strong Consistency	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**

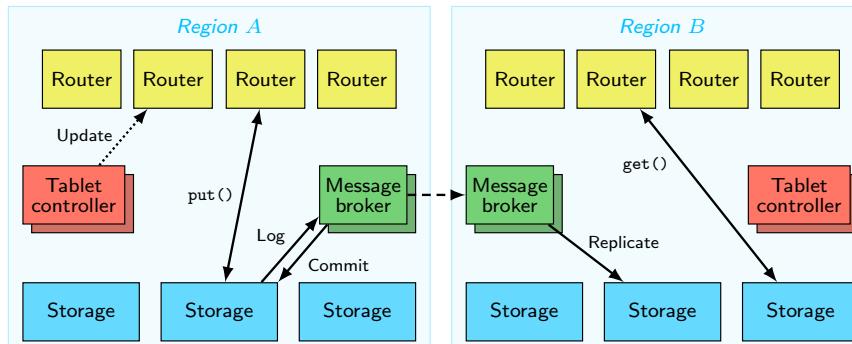
- Ziel: Maximierung von  $P_s \times s_{Utility}$  über alle  $s$
- Bei Gleichstand: Wahl des Replikats mit der vermeintlich geringsten Latenz



- 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 neusten 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  $T_{max}$

## Architektur

- 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**



- 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**
  - Alle Operationen mit hohen Latenzen werden asynchron ausgeführt
  - Datensatzspezifische Primärreplikate
- Literatur
  -  Brian F. Cooper, Raghu Ramakrishnan, Utkarsh Srivastava et al. **PNUTS: Yahoo's hosted data serving platform** *Proceedings of the VLDB Endowment*, 1(2):1277–1288, 2008.

## Bearbeitung von Anfragen

- Identifizierung des **zuständigen Speicherknotens** durch den Router
  - Router hält Kopie des Tablet-Controller-Zustands im Hauptspeicher
    - Information über Tablet-Grenzen
    - Abbildung von Tablets auf Speicherknoten
  - Überprüfung der Router-Entscheidung durch betroffenen Speicherknoten
  - Aktualisierung des Router-Zustands bei Fehlentscheidungen
- Identifizierung der **zuständigen Region** durch den Speicherknoten
  - 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 Speicherknoten
  - Übermittlung der Anfrage an den Message-Broker
  - Nach Message-Broker-Bestätigung: Lokale Bearbeitung der Anfrage

- Problemszenario beim Umgang mit schwach konsistenten Daten
  - Mehrere Clients ändern nebenläufig unterschiedliche Kopien eines Objekts
  - Änderungen müssen letztendlich miteinander verschmolzen werden
- Konflikte bei widersprüchlichen Änderungen
- Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs)
  - Konfliktfreie Verschmelzung ist per Konstruktion sichergestellt
  - Varianten
    - Zustandsbasiert      Periodische Aktualisierung durch Zustandsübertragung
    - Operationsbasiert      Aktualisierung durch Übermittlung der Änderungen
  - Beispiele: Zähler, Sets, Maps, Graphen

## Literatur

-  Marc Shapiro, Nuno Preguiça, Carlos Baquero, Marek Zawirski  
**Conflict-free replicated data types**  
*Proceedings of the 13th International Conference on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS '11)*, S. 386–400, 2011.



- Anforderungen
  - Operationen: Inkrementieren, Dekrementieren, Wert auslesen
  - Nebenläufige Modifikationen durch bis zu  $n$  Prozesse
- Zustandsbasierte Realisierung
  - Datenstrukturen
    - $r$  Eindeutige Replikat-ID aus dem Wertebereich  $[0, \dots, n - 1]$
    - $\text{int}[] I$  Array mit  $n$  Elementen für Inkrementoperationen
    - $\text{int}[] D$  Array mit  $n$  Elementen für Dekrementoperationen
  - Operationen
    - Inkrementieren       $I[r]++$
    - Dekrementieren       $D[r]++$
    - Wert auslesen       $(\sum_{i=0}^{n-1} I[i]) - (\sum_{i=0}^{n-1} D[i])$
  - Zusammenführung zweier Zustände  $A$  und  $B$ 
    - Elementweise Maximumsbildung
    - $I[i] = \max(I_A[i], I_B[i])$  bzw.  $D[i] = \max(D_A[i], D_B[i])$

