

Reaktive Programmierung  
Vorlesung 14 vom 26.06.19  
Eventual Consistency

Christoph Lüth, Martin Ring

Universität Bremen

Sommersemester 2019

# Fahrplan

- ▶ Einführung
- ▶ Monaden und Monadentransformer
- ▶ Nebenläufigkeit: Futures and Promises
- ▶ Aktoren I: Grundlagen
- ▶ Aktoren II: Implementation
- ▶ Meta-Programmierung
- ▶ Bidirektionale Programmierung
- ▶ Reaktive Ströme I
- ▶ Reaktive Ströme II
- ▶ Funktional-Reaktive Programmierung
- ▶ Software Transactional Memory
- ▶ **Eventual Consistency**
- ▶ Robustheit und Entwurfsmuster
- ▶ Theorie der Nebenläufigkeit, Abschluss

# Heute

- ▶ Konsistenzeigenschaften
- ▶ Eventual Consistency
- ▶ CRDTs
- ▶ Operational Transformation
  - ▶ *Das Geheimnis von Google Docs und co.*

# Was ist eigentlich Konsistenz?

- ▶ Konsistenz = **Widerspruchsfreiheit**
- ▶ In der Logik:
  - ▶ Eine Formelmenge  $\Gamma$  ist konsistent wenn:  $\exists A. \neg(\Gamma \vdash A)$
- ▶ In einem verteilten System:
  - ▶ Redundante (verteilte) Daten
  - ▶ **Globale** Widerspruchsfreiheit?

# Strikte Konsistenz

## Strikte Konsistenz

- ▶ Daten sind zu jedem Zeitpunkt global konsistent.
- ▶ Eine Leseoperation in einem beliebigen Knoten gibt den Wert der letzten globalen Schreiboperation zurück.
- ▶ In echten verteilten Systemen **nicht implementierbar**.

# Sequentielle Konsistenz

## Sequentielle Konsistenz

- ▶ Zustand nach verteilter Programmausführung = Zustand nach einer äquivalenten sequentiellen Ausführung in einem Prozess.
- ▶ Jeder Prozess sieht die selbe Folge von Operationen.

# Eventual Consistency

## Eventual Consistency

Wenn **längere Zeit** keine Änderungen stattfinden konvergieren die Daten an jedem Knoten zu einem gemeinsamen Wert.

- ▶ Beispiel: DNS

# Strong Eventual Consistency

- ▶ Eventual Consistency ist eine **informelle** Anforderung.
  - ▶ Abfragen können beliebige Werte zurückgeben bevor die Knoten konvergieren.
  - ▶ Keine Sicherheit!
- ▶ **Strong Eventual Consistency** garantiert:
  - ▶ wenn zwei Knoten die **gleiche (ungeordnete) Menge** von Operationen empfangen haben, befinden sie sich im **gleichen Zustand**.
- ▶ Beispiel: Versionskontrollsystem *git*
  - ▶ Wenn jeder Nutzer seine lokalen Änderungen eingchecked hat, dann haben alle Nutzer die gleiche Sicht auf den *head*.

# Monotonie

- ▶ Strong Eventual Consistency kann einfach erreicht werden:
  - ▶ Nach jedem empfangenen Update alle Daten zurücksetzen.
- ▶ Für sinnvolle Anwendungen brauchen wir eine weitere Garantie:

## Monotonie

Ein verteiltes System ist monoton, wenn der Effekt jeder Operation erhalten bleibt (keine Rollbacks).

# Beispiel: Texteditor

- ▶ Szenario: Webinterface mit Texteditor
- ▶ Mehrere Nutzer können den Text verändern und sollen **immer die neueste Version** sehen.
- ▶ Siehe Google Docs, Etherpad und co.

# Naive Methoden

- ▶ Ownership
  - ▶ Vor Änderungen: Lock-Anfrage an Server
  - ▶ Nur ein Nutzer kann gleichzeitig das Dokument ändern
  - ▶ Nachteile: Verzögerungen, Änderungen nur mit Netzverbindung
- ▶ Three-Way-Merge
  - ▶ Server führt nebenläufige Änderungen auf Grundlage eines **gemeinsamen Ursprungs** zusammen.
  - ▶ Requirement: *the chickens must stop moving so we can count them*

# Conflict-Free Replicated Data Types

- ▶ Konfliktfreie replizierte Datentypen
- ▶ Garantieren
  - ▶ Strong Eventual Consistency
  - ▶ Monotonie
  - ▶ Konfliktfreiheit
- ▶ Zwei Klassen:
  - ▶ Zustandsbasierte CRDTs
  - ▶ Operationsbasierte CRDTs

# Zustandsbasierte CRDTs

- ▶ Konvergente replizierte Datentypen (CvRDTs)
- ▶ Knoten senden ihren gesamten Zustand an andere Knoten.
- ▶ Nur bestimmte Operationen auf dem Datentypen erlaubt (*update*).
- ▶ Eine **kommutative**, **assoziative**, **idempotente** *merge*-Funktion
  - ▶ Funktioniert gut mit Gossiping-Protokollen
  - ▶ Nachrichtenverlust unkritisch

# CvRDT: Zähler

- ▶ Einfacher CvRDT

- ▶ Zustand:  $P \in \mathbb{N}$ , Datentyp:  $\mathbb{N}$

$$\text{query}(P) = P$$

$$\text{update}(P, +, m) = P + m$$

$$\text{merge}(P_1, P_2) = \max(P_1, P_2)$$

- ▶ Wert kann nur größer werden.

# CvRDT: PN-Zähler

- ▶ Gängiges Konzept bei CRDTs: Komposition
- ▶ Aus zwei Zählern kann ein komplexerer Typ **zusammengesetzt** werden:
  - ▶ Zähler P (Positive) und Zähler N (Negative)
  - ▶ Zustand:  $(P, N) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ , Datentyp:  $\mathbb{Z}$

$$\text{query}((P, N)) = \text{query}(P) - \text{query}(N)$$

$$\text{update}((P, N), +, m) = (\text{update}(P, +, m), N)$$

$$\text{update}((P, N), -, m) = (P, \text{update}(N, +, m))$$

$$\text{merge}((P_1, N_1), (P_2, N_2)) = (\text{merge}(P_1, P_2), \text{merge}(N_1, N_2))$$

# CvRDT: Mengen

- ▶ Ein weiterer einfacher CRDT:
  - ▶ Zustand:  $P \in \mathcal{P}(A)$ , Datentyp:  $\mathcal{P}(A)$

$$\text{query}(P) = P$$

$$\text{update}(P, +, a) = P \cup \{a\}$$

$$\text{merge}(P_1, P_2) = P_1 \cup P_2$$

- ▶ Die Menge kann nur wachsen.

# CvRDT: Zwei-Phasen-Mengen

- ▶ Durch Komposition kann wieder ein komplexerer Typ entstehen.
- ▶ Menge P (Hinzugefügte Elemente) und Menge N (Gelöschte Elemente)
- ▶ Zustand:  $(P, N) \in \mathcal{P}(A) \times \mathcal{P}(A)$ , Datentyp:  $\mathcal{P}(A)$

$$\mathit{query}((P, N)) = \mathit{query}(P) \setminus \mathit{query}(N)$$

$$\mathit{update}((P, N), +, m) = (\mathit{update}(P, +, m), N)$$

$$\mathit{update}((P, N), -, m) = (P, \mathit{update}(N, +, m))$$

$$\mathit{merge}((P_1, N_1), (P_2, N_2)) = (\mathit{merge}(P_1, P_2), \mathit{merge}(N_1, N_2))$$

# Operationsbasierte CRDTs

- ▶ Kommutative replizierte Datentypen (CmRDTs)
- ▶ Knoten senden nur **Operationen** an andere Knoten
- ▶ *update* unterscheidet zwischen lokalem und externem Effekt.
- ▶ Netzwerkprotokoll wichtig
- ▶ Nachrichtenverlust führt zu Inkonsistenzen
- ▶ Kein *merge* nötig
- ▶ Kann die übertragenen **Datenmengen** erheblich **reduzieren**

# CmRDT: Zähler

- ▶ Zustand:  $P \in \mathbb{N}$ , Typ:  $\mathbb{N}$
- ▶  $query(P) = P$
- ▶  $update(+, n)$ 
  - ▶ lokal:  $P := P + n$
  - ▶ extern:  $P := P + n$

# CmRDT: Last-Writer-Wins-Register

- ▶ Zustand:  $(x, t) \in X \times \text{timestamp}$
- ▶  $query((x, t)) = x$
- ▶  $update(=, x')$ 
  - ▶ lokal:  $(x, t) := (x', now())$
  - ▶ extern: *if*  $t < t'$  *then*  $(x, t) := (x', t')$

# Vektor-Uhren

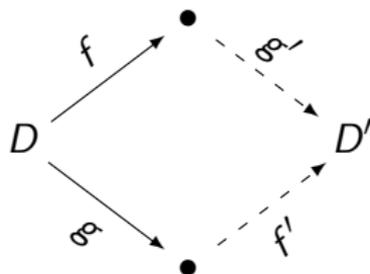
- ▶ Im LWW Register benötigen wir Timestamps
  - ▶ Kausalität muss erhalten bleiben
  - ▶ Timestamps müssen eine total Ordnung haben
- ▶ Datum und Uhrzeit ungeeignet
- ▶ Lösung: Vektor-Uhren
  - ▶ Jeder Knoten hat einen Zähler, der bei Operationen hochgesetzt wird
  - ▶ Zusätzlich merkt sich jeder Knoten den aktuellsten Zählerwert, den er bei den anderen Knoten beobachtet hat.

# Operational Transformation

- ▶ Die CRDTs die wir bis jetzt kennengelernt haben sind recht einfach
- ▶ Das Texteditor Beispiel ist damit noch nicht umsetzbar
- ▶ Kommutative Operationen auf einer Sequenz von Buchstaben?
  - ▶ Einfügen möglich (totale Ordnung durch Vektoruhren)
  - ▶ Wie Löschen?

# Operational Transformation

- ▶ Idee: Nicht-kommutative Operationen transformieren



- ▶ Für *transform* muss gelten:

$$\text{transform } f \ g = \langle f', g' \rangle \implies g' \circ f = f' \circ g \quad (1)$$

$$\text{applyOp } (g \circ f) \ D = \text{applyOp } g \ (\text{applyOp } f \ D) \quad (2)$$

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

Ein **Beispiel**:

Eingabe: R 1 P 7

Ausgabe:

Aktionen:

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

Ein **Beispiel**:

Eingabe: 1 P 7

Ausgabe: R

Aktionen: *Retain*,

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

Ein **Beispiel**:

Eingabe: P 7

Ausgabe: R

Aktionen: *Retain*,  
*Delete*,

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

Ein **Beispiel**:

Eingabe: 7  
Ausgabe: R P  
Aktionen: *Retain*,  
*Delete*,  
*Retain*,

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

Ein **Beispiel**:

Eingabe: 7  
Ausgabe: R P 1  
Aktionen: *Retain*,  
*Delete*,  
*Retain*,  
*Insert 1*,

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

Ein **Beispiel**:

Eingabe:

Ausgabe: R P 1 7

Aktionen: *Retain,*  
*Delete,*  
*Retain,*  
*Insert 1,*  
*Retain.*

# Operationen für Text

Operationen bestehen aus **drei**

Arten von Aktionen:

- ▶ *Retain*— Buchstaben beibehalten
- ▶ *Delete*— Buchstaben löschen
- ▶ *Insert c* — Buchstaben *c* einfügen

Eine **Operation** ist eine Sequenz von Aktionen

- ▶ Operationen sind **partiell**.

Ein **Beispiel**:

Eingabe:

Ausgabe: R P 1 7

Aktionen: *Retain,*  
*Delete,*  
*Retain,*  
*Insert 1,*  
*Retain.*

# Operationen Komponieren

- ▶ Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**

- ▶ Keine einfache Konkatenation!

- ▶ Beispiel:

$$p = [Delete, Insert X, Retain]$$

$$q = [Retain, Insert Y, Delete]$$

$$compose\ p\ q =$$

- ▶ *compose* ist partiell.

- ▶ **Äquivalenz** von Operationen:

$$compose\ p\ q \cong [Delete, Delete, Insert X, Insert Y]$$

# Operationen Komponieren

- ▶ Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**

- ▶ Keine einfache Konkatenation!

- ▶ Beispiel:

$$p = [\textit{Insert X}, \textit{Retain}]$$

$$q = [\textit{Retain}, \textit{Insert Y}, \textit{Delete}]$$

$$\textit{compose } p \ q = [\textit{Delete},$$

- ▶ *compose* ist partiell.

- ▶ **Äquivalenz** von Operationen:

$$\textit{compose } p \ q \cong [\textit{Delete}, \textit{Delete}, \textit{Insert X}, \textit{Insert Y}]$$

# Operationen Komponieren

- ▶ Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**

- ▶ Keine einfache Konkatenation!

- ▶ Beispiel:

$$p = [\textit{Retain}]$$

$$q = [\textit{Insert Y}, \textit{Delete}]$$

$$\textit{compose } p \ q = [\textit{Delete}, \textit{Insert X},$$

- ▶ *compose* ist partiell.

- ▶ **Äquivalenz** von Operationen:

$$\textit{compose } p \ q \cong [\textit{Delete}, \textit{Delete}, \textit{Insert X}, \textit{Insert Y}]$$

# Operationen Komponieren

- ▶ Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**

- ▶ Keine einfache Konkatenation!

- ▶ Beispiel:

$$p = [\textit{Retain}]$$

$$q = [\textit{Delete}]$$

$$\textit{compose } p \ q = [\textit{Delete}, \textit{Insert } X, \textit{Insert } Y,$$

- ▶ *compose* ist partiell.

- ▶ **Äquivalenz** von Operationen:

$$\textit{compose } p \ q \cong [\textit{Delete}, \textit{Delete}, \textit{Insert } X, \textit{Insert } Y]$$

# Operationen Komponieren

- ▶ Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**

- ▶ Keine einfache Konkatination!

- ▶ Beispiel:

$$p = []$$

$$q = []$$

$$\text{compose } p \ q = [\textit{Delete}, \textit{Insert X}, \textit{Insert Y}, \textit{Delete}]$$

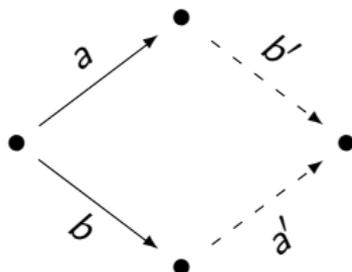
- ▶ *compose* ist partiell.

- ▶ **Äquivalenz** von Operationen:

$$\text{compose } p \ q \cong [\textit{Delete}, \textit{Delete}, \textit{Insert X}, \textit{Insert Y}]$$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

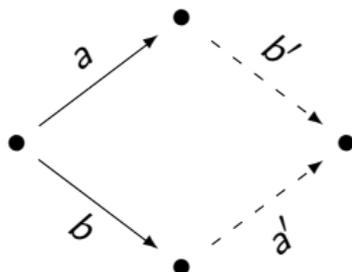
$a = [Insert\ X, Retain, Delete]$

$b = [Delete, Retain, Insert\ Y]$

$transform\ a\ b = ([$   
 $, [$   
 $)$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

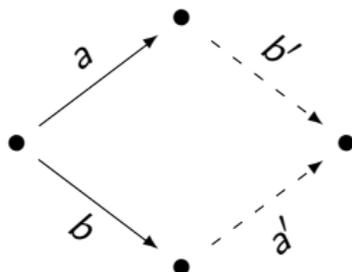
$a = [\textit{Retain}, \textit{Delete}]$

$b = [\textit{Delete}, \textit{Retain}, \textit{Insert Y}]$

$\textit{transform } a \ b = ([\textit{Insert X},$   
 $\quad \quad \quad , [\textit{Retain},$   
 $\quad \quad \quad )$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

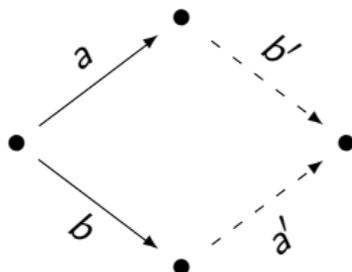
$a = [Delete]$

$b = [Retain, Insert Y]$

$transform\ a\ b = ([Insert\ X, Delete,$   
 $\quad\quad\quad, [Retain,$   
 $\quad\quad\quad])$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

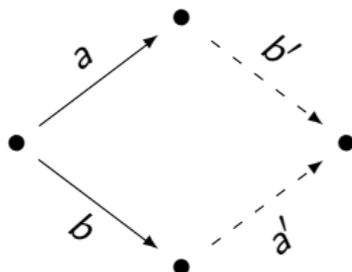
$a = []$

$b = [Insert\ Y]$

$transform\ a\ b = ([Insert\ X, Delete,$   
 $, [Retain, Delete,$   
 $])$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

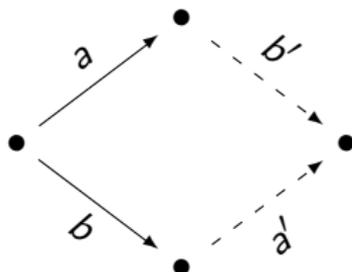
$$a = []$$

$$b = []$$

$$\text{transform } a \ b = ([\text{Insert X}, \text{Delete}, \text{Retain}], [\text{Retain}, \text{Delete}, \text{Insert Y}])$$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

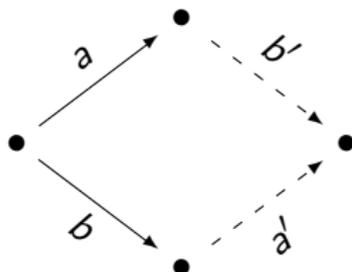
$$a = []$$

$$b = []$$

$$\text{transform } a \ b = ([\text{Insert X}, \text{Delete}, \text{Retain}], [\text{Retain}, \text{Delete}, \text{Insert Y}])$$

# Operationen Transformieren

## ► Transformation



## ► Beispiel:

$a = [\textit{Insert X}, \textit{Retain}, \textit{Delete}]$

$b = [\textit{Delete}, \textit{Retain}, \textit{Insert Y}]$

$\textit{transform a b} = ([\textit{Insert X}, \textit{Delete}, \textit{Retain}]$   
 $\quad , [\textit{Retain}, \textit{Delete}, \textit{Insert Y}]$   
 $\quad )$

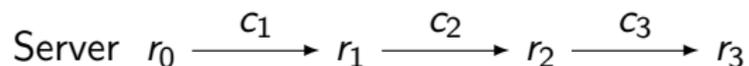
# Operationen Verteilen

- ▶ Wir haben die Funktion *transform* die zwei nicht-kommutativen Operationen  $a$  und  $b$  zu kommutierenden Gegenständen  $a'$  und  $b'$  transformiert.
- ▶ Was machen wir jetzt damit?
- ▶ Kontrollalgorithmus nötig

# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen

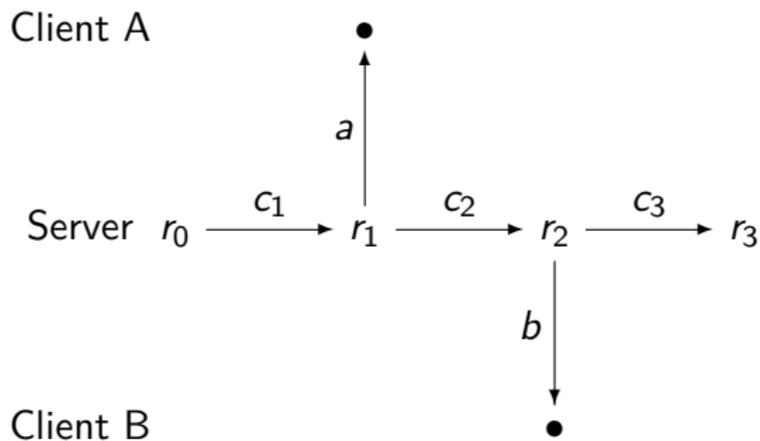
Client A



Client B

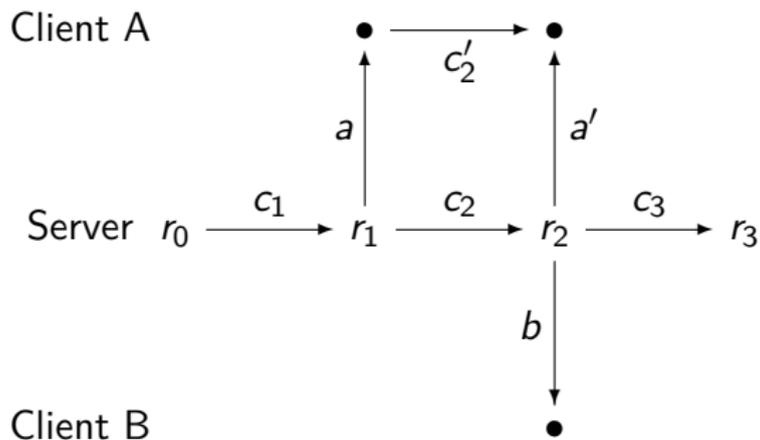
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



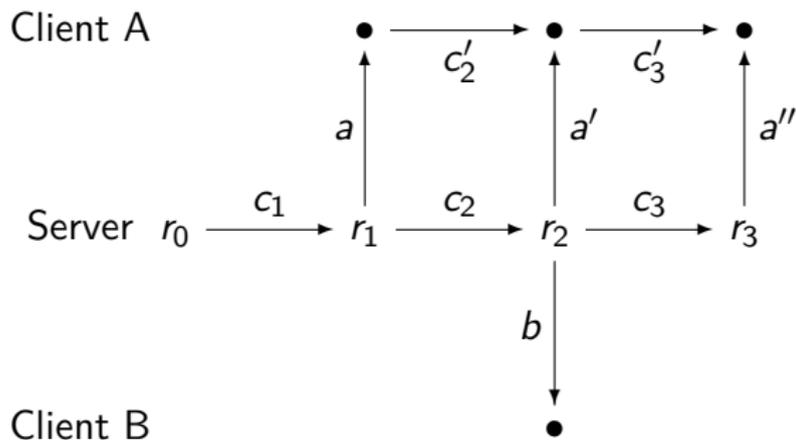
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



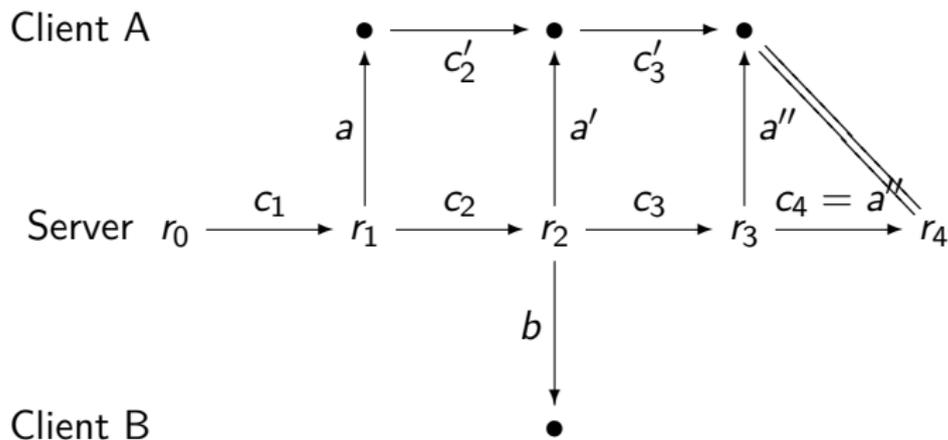
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



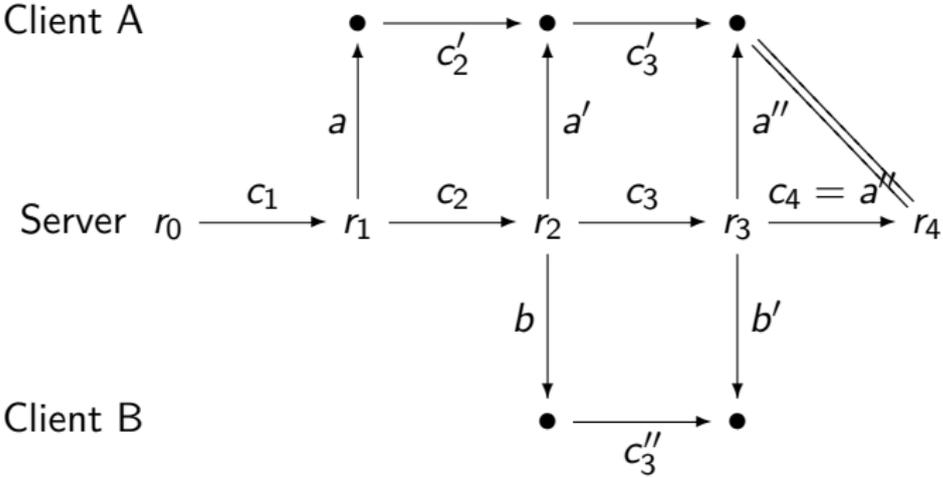
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



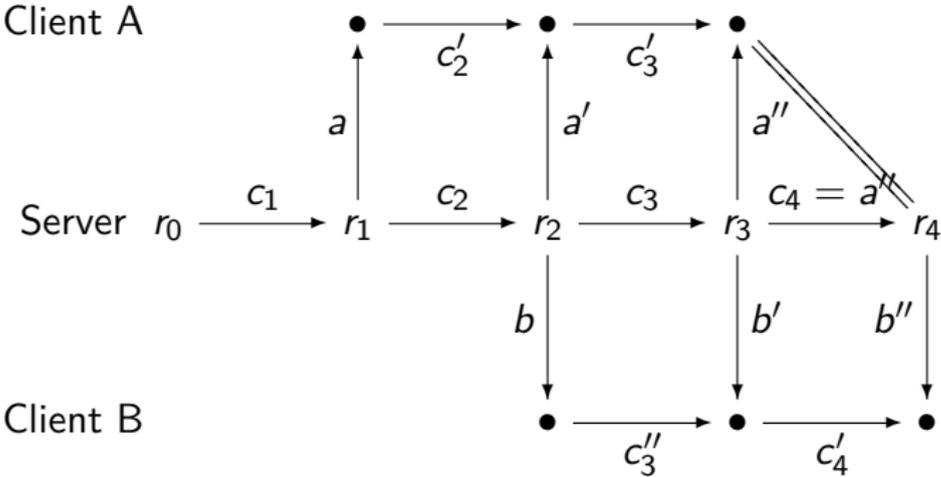
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



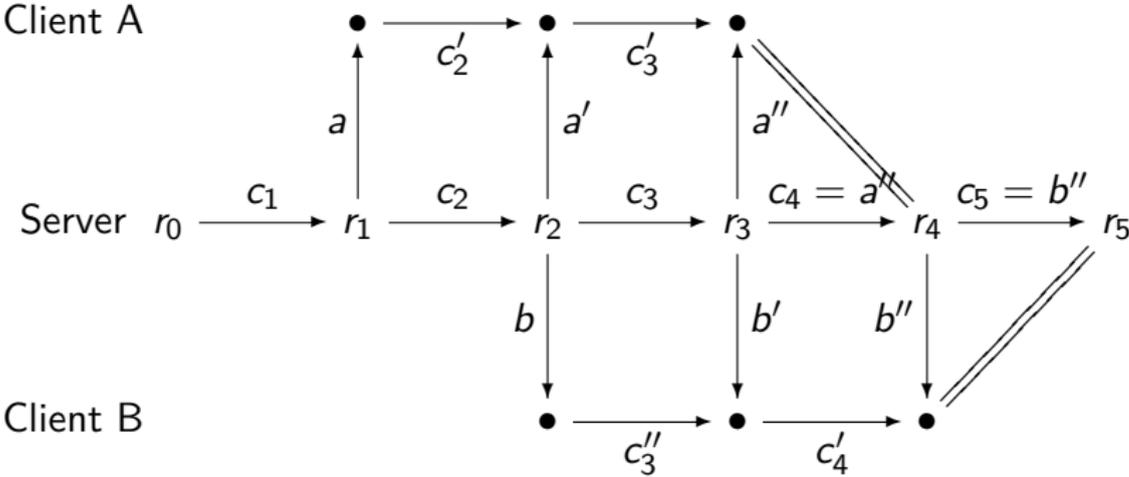
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



# Der Server

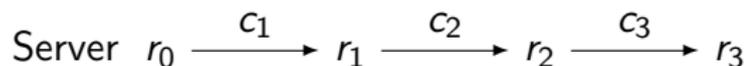
- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen

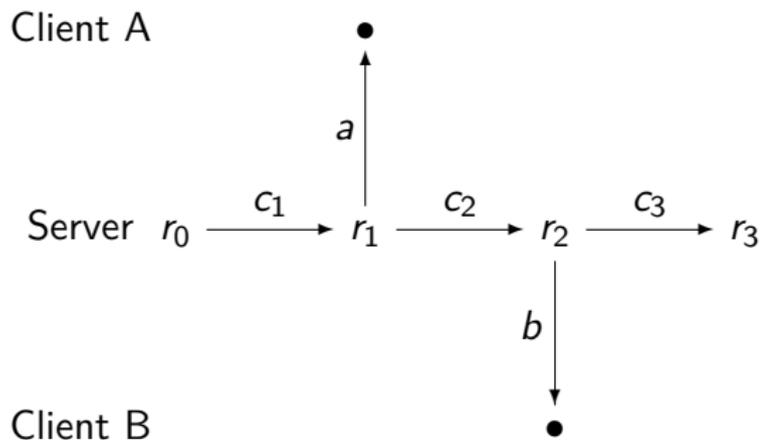
Client A



Client B

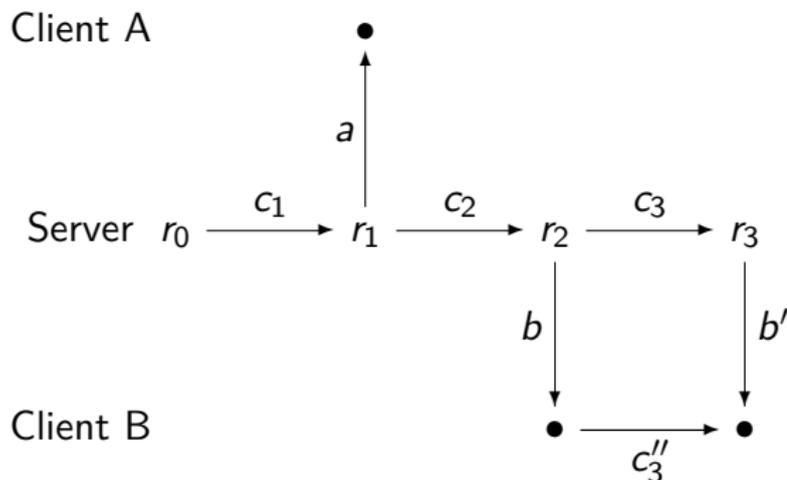
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



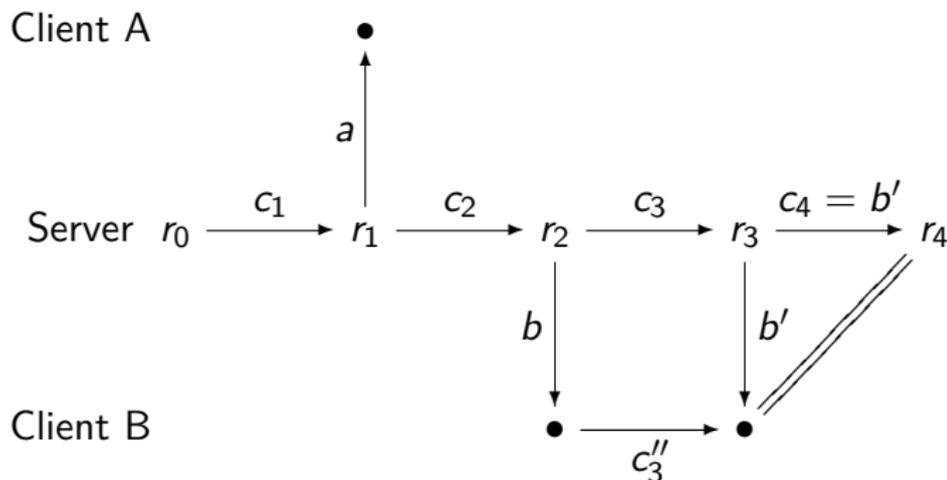
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



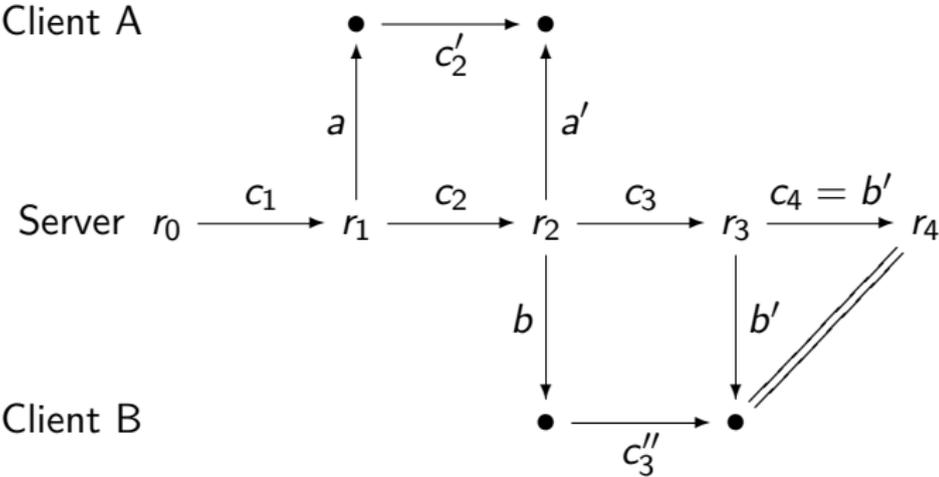
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



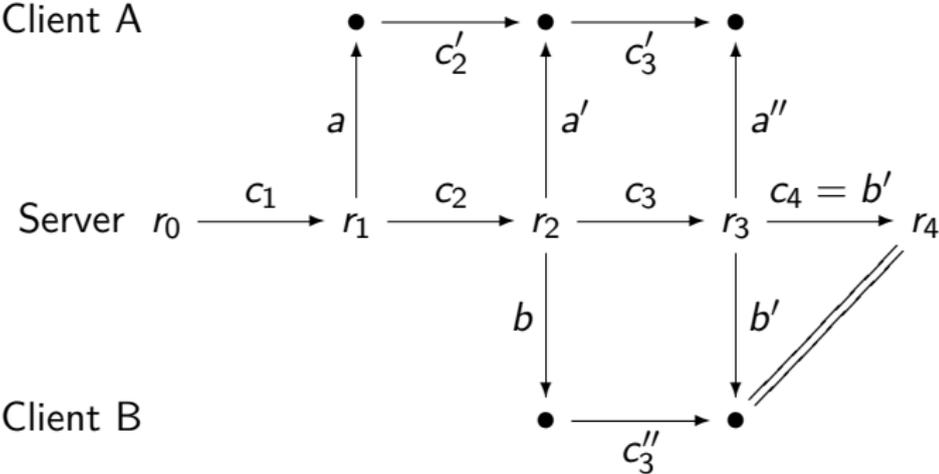
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



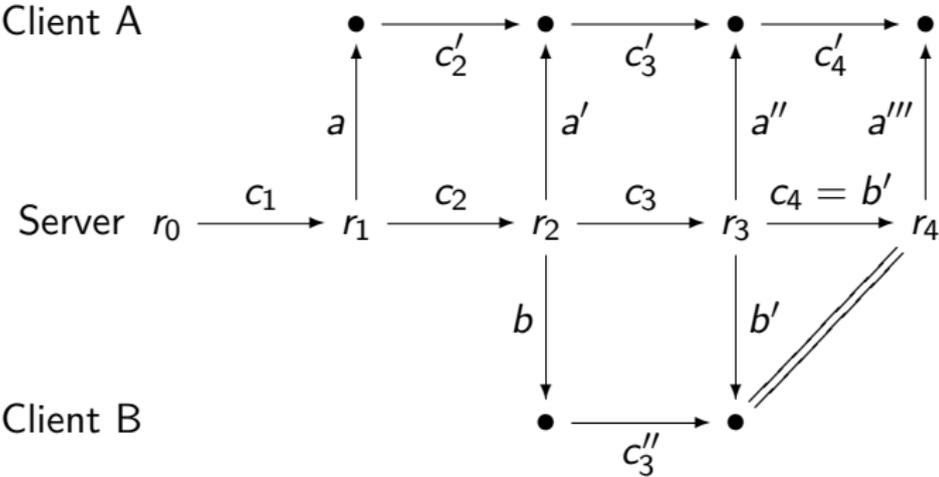
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



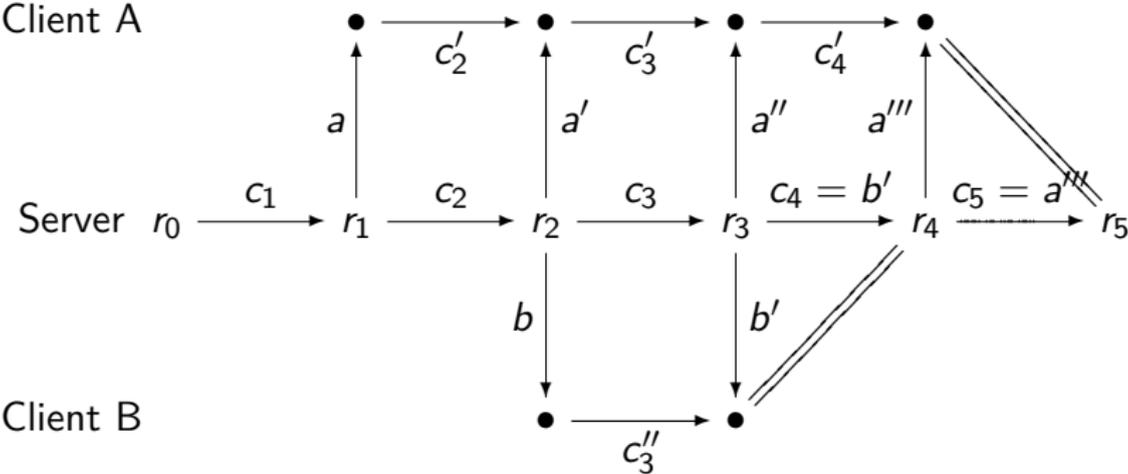
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequenzialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



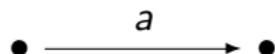
# Der Server

- ▶ Zweck:
  - ▶ Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - ▶ Transformierte Operationen verteilen



# Der Client

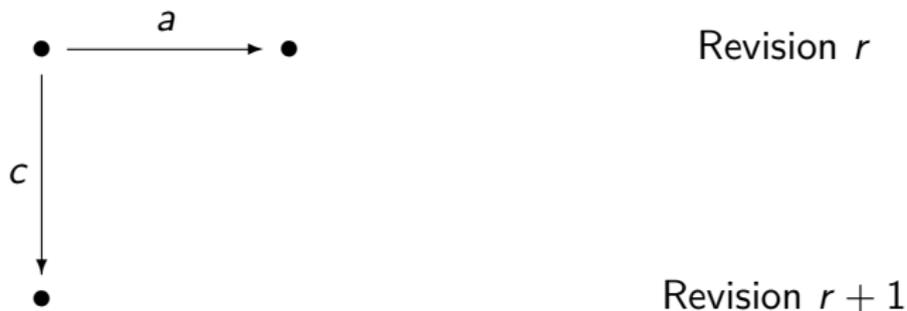
- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision *r*

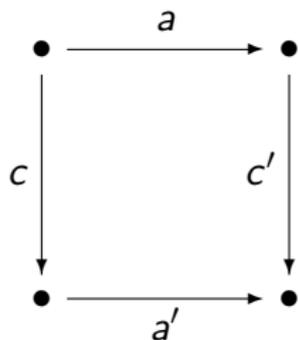
# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht

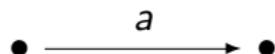


Revision  $r$

Revision  $r + 1$

# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision *r*

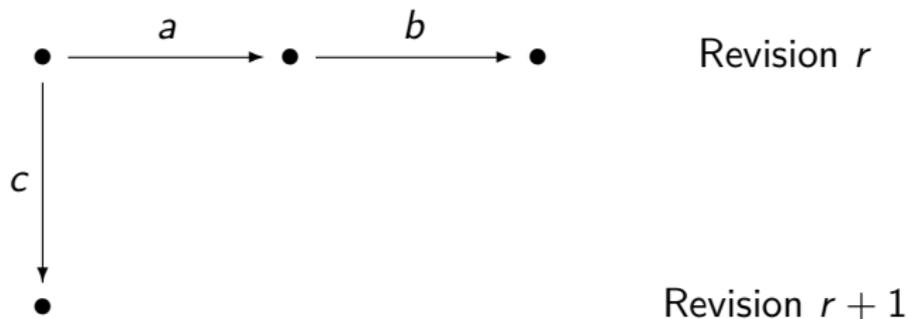
# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



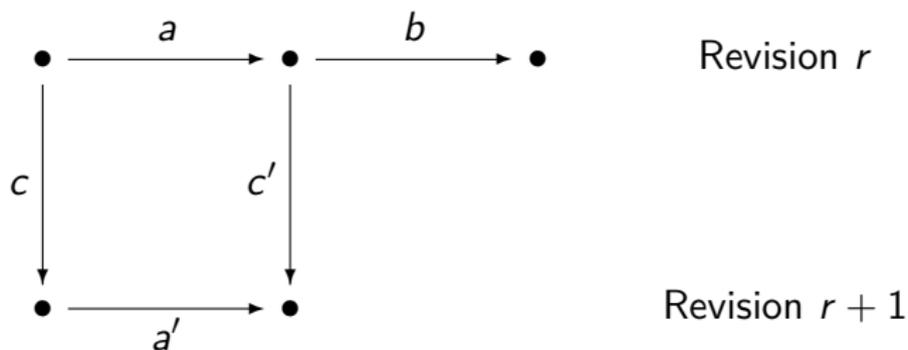
# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



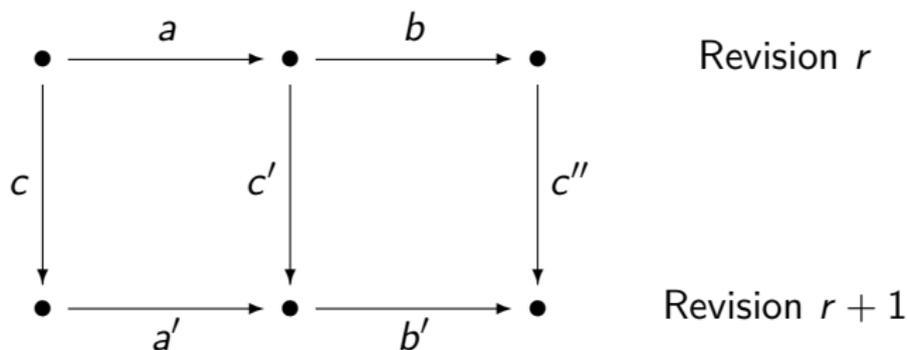
# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



# Der Client

- ▶ Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



# Zusammenfassung

- ▶ Strikte Konsistenz in verteilten Systemen nicht erreichbar
- ▶ Strong Eventual Consistency
  - ▶ Wenn **längere Zeit** keine Änderungen stattgefunden haben befinden sich schließlich alle Knoten im **gleichen Zustand**.
  - ▶ Wenn zwei Knoten die **gleiche Menge** Updates beobachten befinden sie sich im **gleichen Zustand**.
- ▶ Conflict-Free replicated Data Types:
  - ▶ Zustandsbasiert: CvRDTs
  - ▶ Operationsbasiert: CmRDTs
- ▶ Operational Transformation
  - ▶ Strong Eventual Consistency auch ohne kommutative Operationen