Reaktive Programmierung
Vorlesung 11 vom 28.06.2022
Eventual Consistency

Christoph Lüth, Martin Ring

Universität Bremen

Sommersemester 2022

Fahrplan

- Einführung
- Monaden und Monadentransformer
- Nebenläufigkeit: Futures and Promises
- Aktoren: Grundlagen & Implementierung
- Bidirektionale Programmierung
- Meta-Programmierung
- Reaktive Ströme I
- Reaktive Ströme II
- Funktional-Reaktive Programmierung
- Software Transactional Memory
- Eventual Consistency
- CRDTs
- Robustheit, Entwurfsmuster und Theorie der Nebenläufigkeit, Abschluss
- Reaktive Programmierung in der Praxis

Heute

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

Was ist eigentlich Konsistenz?

- Konsistenz = **Widerspruchsfreiheit**
- Logische Konsistenz:
  - Eine Formelmenge Γ ist konsistent im Kalkül wenn: $\exists A.\neg(\Gamma \vdash A)$
  - Ein Kalkül ist konsistent wenn $\exists A.\neg(\emptyset \vdash A)$
- In einem verteilten (Speicher)system:
  - Redundante (verteilte) Daten
  - **Globale** Widerspruchsfreiheit?

Strikte Konsistenz

Strikte Konsistenz

- Daten sind zu jedem Zeitpunk global konsistent.
- Eine Leseoperation in einem beliebigen Knoten gibt den Wert der letzten globalen Schreiboperation zurück.

- Beispiel: Lokaler Speicherzugriff

- In verteilten Systemen **nicht praktikabel**.

Eventual Consistency

Eventual Consistency

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

- Beispiel: DNS
- **Informelle** Anforderung:
  - Abfragen können beliebige Werte zurückgeben bevor die Knoten konvergieren.
  - Keine Sicherheitseigenschaft!

Zwischen Strikter und Eventual Consistency

- Strikte Konsistenz ist zu **stark**, Eventual Consistency häufig zu **schwach**.
- Dazwischen gibt es ein breites Spektrum an Konsistenzeigenschaften.
- Wir unterscheiden
  - Data-Centric Consistency
  - Client-Centric Consistency

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.

- Nur so schnell wie das schwächste Glied

Kausale Konsistenz

Kausale Konsistenz

- Abschwächung von sequentieller konsistenz mit selbem Ergebnis
- Jeder Prozess sieht Operationen die **in Abhängigkeit stehen** in der selben Reihenfolge.

Client-Centric Consistency

- Monotonic Read
- Monotonic Write
- Read your Writes
- Writes follow Reads

Vektor-Uhren

- Um Operationen zu ordnen benötigen wir Timestamps
  - Kausalität muss erhalten bleiben
  - Timestamps müssen eine totale 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.

Strong Eventual Consistency

- **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 an alle verteilt 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

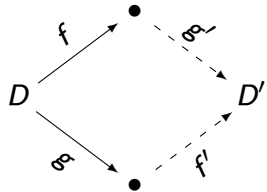
- Szenario: Webinterface mit Texteditor
- Meherere Nutzer können den Text verändern und sollen **immer die neuest mögliche Version** sehen.
- Siehe Google Docs, Etherpad und co.
- Der Effekt jeder Operation soll erhalten bleiben
- Es soll niemals Konflike geben

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*
  - Nicht konfliktfrei möglich.

Operational Transformation

- Idee: Nicht-kommutative Operationen transformieren



- Für *transform* muss gelten:

$$transform\ f\ g = \langle f', g' \rangle \Longrightarrow g' \circ f = f' \circ g \tag{1}$$

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

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 2 P 2`
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: `2 P 2`
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 2`
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:	2
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:	2
Ausgabe:	R P 2
Aktionen:	*Retain*,
	Delete,
	Retain,
	Insert 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

Ein **Beispiel**:

Eingabe:
Ausgabe: R P 2 2
Aktionen: *Retain*, *Delete*, *Retain*, *Insert* 2, *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 2 2`
Aktionen:	*Retain*,
	Delete,
	Retain,
	Insert 2,
	Retain.

Operationen Komponieren

- Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**
  - Keine einfache Konkatenation!
- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
p &= [\mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \mathtt{X}, \mathit{Retain}] \\
q &= [\mathit{Retain}, \mathit{Insert}\ \mathtt{Y}, \mathit{Delete}] \\
\mathit{compose}\ p\ q &=
\end{aligned}
$$

- *compose* ist partiell.
- **Äquivalenz** von Operationen:

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

Operationen Komponieren

- Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**
  - Keine einfache Konkatenation!
- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
p &= [\mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Retain}] \\
q &= [\mathit{Retain}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}, \mathit{Delete}] \\
\mathit{compose}\ p\ q &= [\mathit{Delete},
\end{aligned}
$$

- *compose* ist partiell.
- **Äquivalenz** von Operationen:

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

Operationen Komponieren

- Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**
  - Keine einfache Konkatenation!
- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
p &= [\mathit{Retain}] \\
q &= [\mathit{Insert}\ \mathtt{Y}, \mathit{Delete}] \\
\mathit{compose}\ p\ q &= [\mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \mathtt{X},
\end{aligned}
$$

- *compose* ist partiell.
- **Äquivalenz** von Operationen:

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

Operationen Komponieren

- Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**
  - Keine einfache Konkatenation!
- Beispiel:

$$\begin{aligned} p &= [\mathit{Retain}] \\ q &= [\mathit{Delete}] \\ \mathit{compose}\ p\ q &= [\mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}, \end{aligned}$$

- *compose* ist partiell.
- **Äquivalenz** von Operationen:

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

Operationen Komponieren

- Komposition: Fallunterscheidung auf der **Aktion**
  - Keine einfache Konkatenation!
- Beispiel:

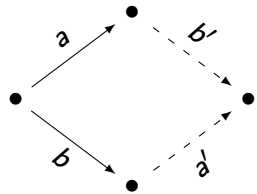
$$\begin{aligned} p &= [] \\ q &= [] \\ \mathit{compose}\ p\ q &= [\mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}, \mathit{Delete}] \end{aligned}$$

- *compose* ist partiell.
- **Äquivalenz** von Operationen:

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

Operationen Transformieren

- Transformation

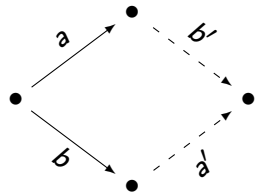


- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [\mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Retain}, \mathit{Delete}] \\
b &= [\mathit{Delete}, \mathit{Retain}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}] \\
\mathit{transform}\ a\ b &= ([\\
&\quad\ ,[\\
&\quad\ )
\end{aligned}
$$

Operationen Transformieren

- Transformation

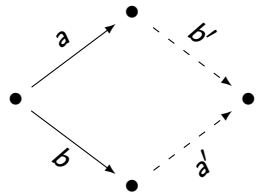


- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [\mathit{Retain}, \mathit{Delete}] \\
b &= [\mathit{Delete}, \mathit{Retain}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}] \\
\mathit{transform}\ a\ b &= ([\mathit{Insert}\ \texttt{X}, \\
&\quad , [\mathit{Retain}, \\
&\quad)
\end{aligned}
$$

Operationen Transformieren

- Transformation

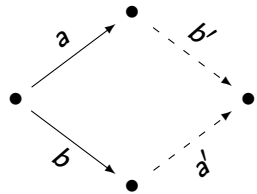


- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [Delete] \\
b &= [Retain, Insert\ \texttt{Y}] \\
transform\ a\ b &= ([Insert\ \texttt{X}, Delete, \\
&\quad , [Retain, \\
&\quad)
\end{aligned}
$$

Operationen Transformieren

- Transformation

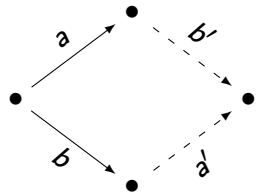


- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [] \\
b &= [\mathit{Insert}\ \mathtt{Y}] \\
\mathit{transform}\ a\ b &= ([\mathit{Insert}\ \mathtt{X}, \mathit{Delete}, \\
&\quad , [\mathit{Retain}, \mathit{Delete}, \\
&\quad)
\end{aligned}
$$

Operationen Transformieren

- Transformation

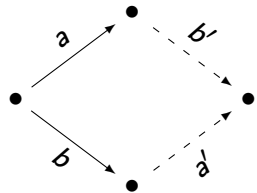


- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [] \\
b &= [] \\
\mathit{transform}\ a\ b &= ([\mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Delete}, \mathit{Retain} \\
&\quad , [\mathit{Retain}, \mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y} \\
&\quad)
\end{aligned}
$$

Operationen Transformieren

- Transformation

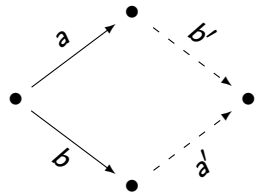


- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [] \\
b &= [] \\
\mathit{transform}\ a\ b &= ([\mathit{Insert}\ \mathtt{X}, \mathit{Delete}, \mathit{Retain}] \\
&\quad , [\mathit{Retain}, \mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \mathtt{Y}] \\
&\quad)
\end{aligned}
$$

Operationen Transformieren

- Transformation



- Beispiel:

$$
\begin{aligned}
a &= [\mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Retain}, \mathit{Delete}] \\
b &= [\mathit{Delete}, \mathit{Retain}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}] \\
\mathit{transform}\ a\ b &= ([\mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Delete}, \mathit{Retain}] \\
&\quad , [\mathit{Retain}, \mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}] \\
&\quad)
\end{aligned}
$$

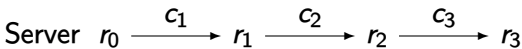
Operationen Verteilen

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

Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen

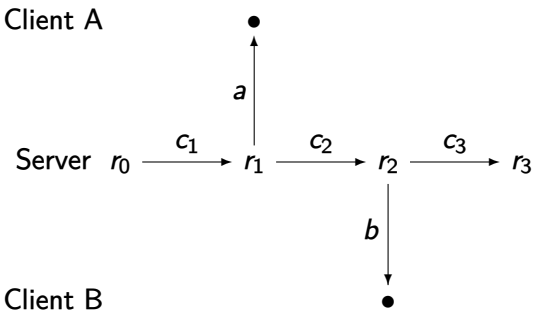
Client A



Client B

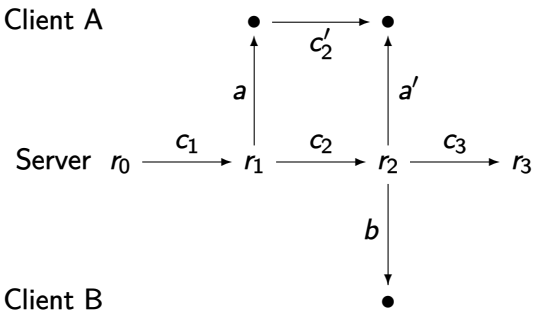
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



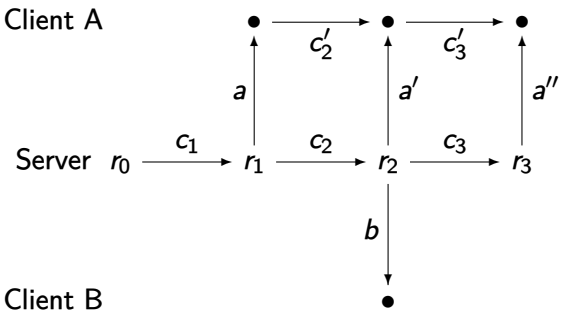
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



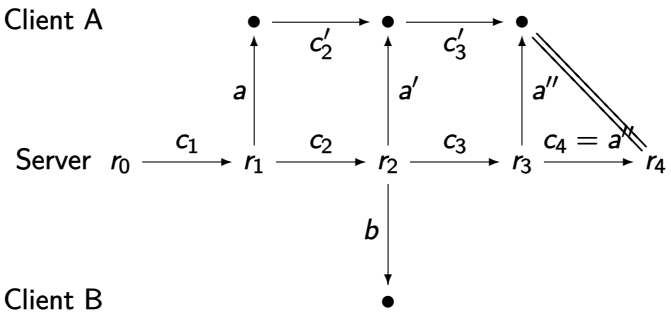
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



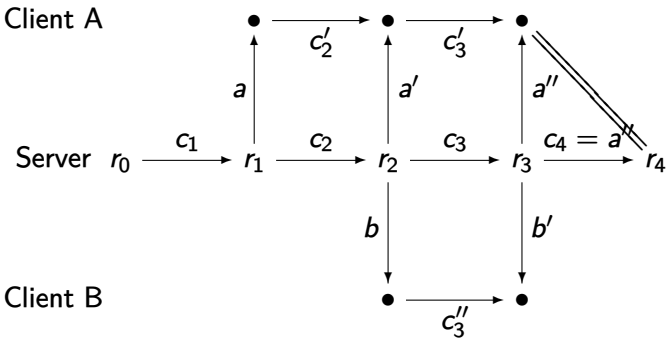
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



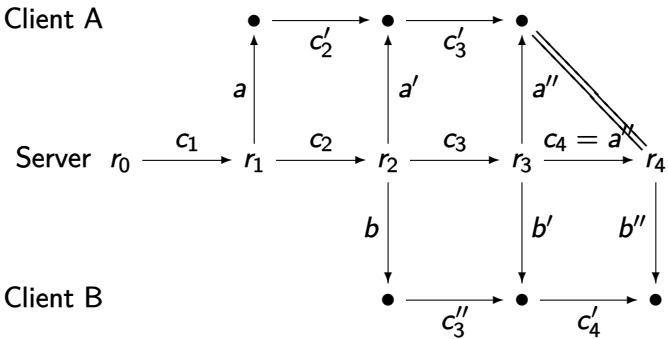
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



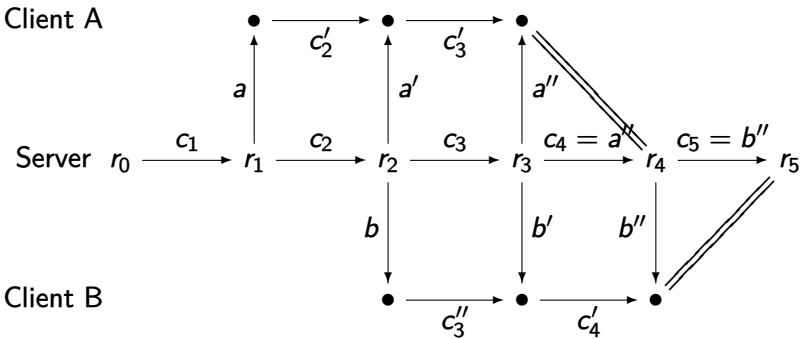
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



Der Server

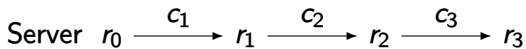
- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen

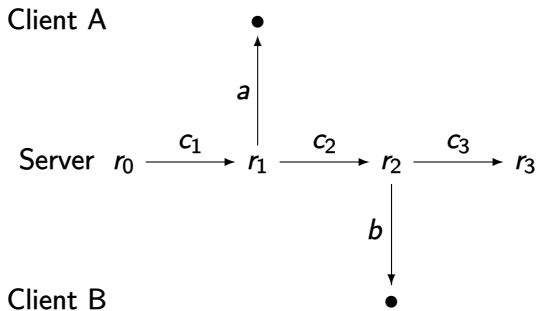
Client A



Client B

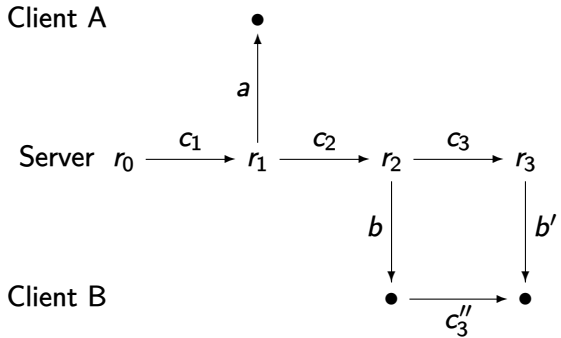
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



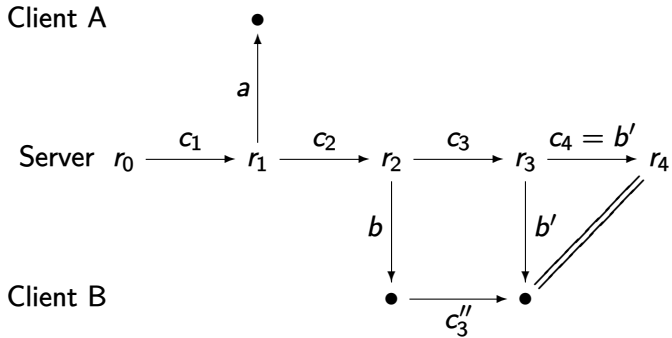
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



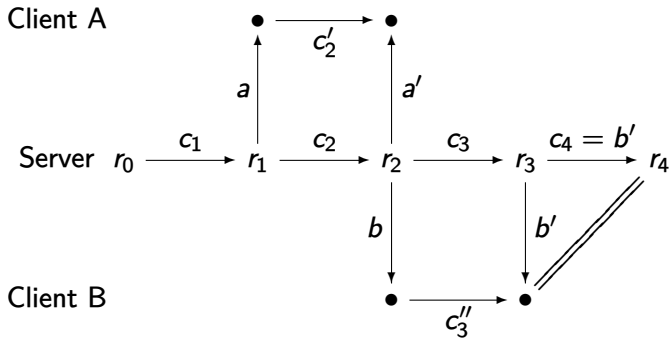
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



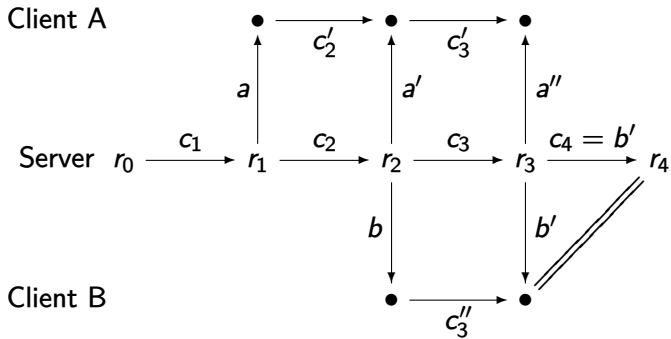
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



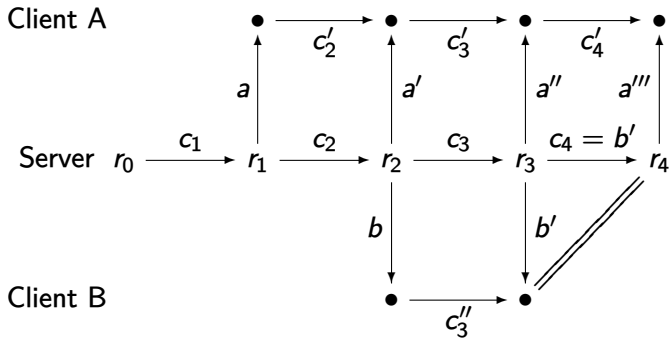
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



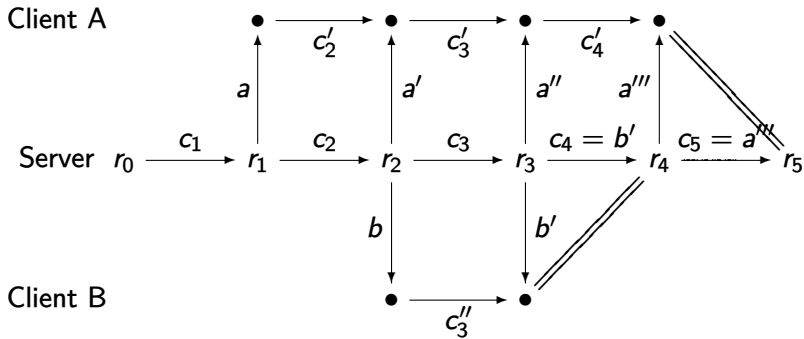
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



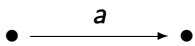
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



Der Client

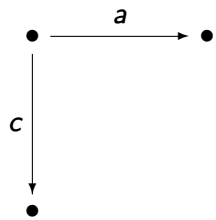
- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision r

Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht

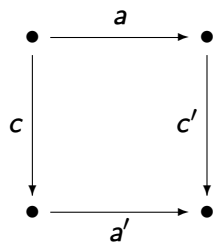


Revision r

Revision $r + 1$

Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht

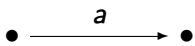


Revision r

Revision $r + 1$

Der Client

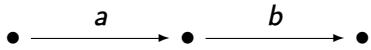
- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision r

Der Client

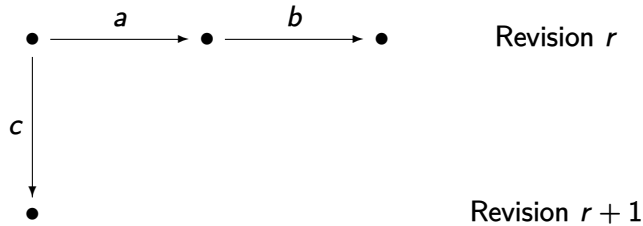
- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision r

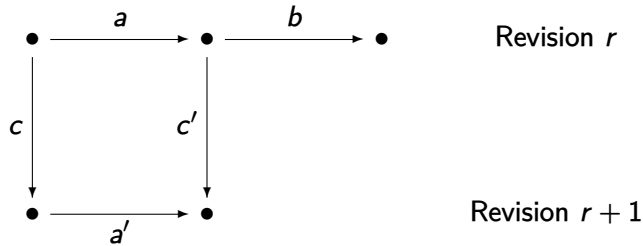
Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



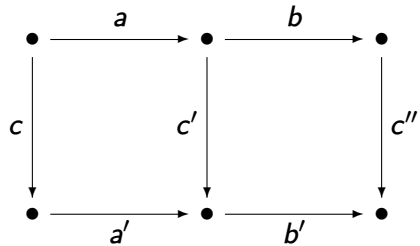
Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Zusammenfassung

- Strikte Konsistenz in verteilten Systemen nicht erreichbar
- Eventual Consistency
  - Wenn **längere Zeit** keine Änderungen stattgefunden haben befinden sich schließlich alle Knoten im **gleichen Zustand**.
- Strong Eventual Consistency
  - Wenn zwei Knoten die **gleiche Menge** Updates beobachten befinden sie sich im **gleichen Zustand**.
- Operational Transformation
  - Strong Eventual Consistency auch ohne kommutative Operationen
- Nächste Woche: Kommutative Replizierte Datentypen (CRDTs)