Reaktive Programmierung
Vorlesung 14 vom 30.06.15: Eventual Consistency

Christoph Lüth & Martin Ring

Universität Bremen

Sommersemester 2015

Fahrplan

- Teil I: Grundlegende Konzepte
- Teil II: Nebenläufigkeit
- Teil III: Fortgeschrittene Konzepte
  - Bidirektionale Programmierung: Zippers and Lenses
  - Eventual Consistency
  - Robustheit, Entwurfsmuster
  - Theorie der Nebenläufigkeit

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 Γ 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 Zeitpunk 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 eingecheckt 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 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: $\mathbb{N}$

    $query(P) = P$

    $update(P, +, m) = P + m$

    $merge(P_1, P_2) = max(P_1, P_2)$

- 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: $\mathbb{Z}$

    $query((P, N)) = query(P) - query(N)$

    $update((P, N), +, m) = (update(P, +, m), N)$

    $update((P, N), -, m) = (P, update(N, +, m))$

    $merge((P_1, N_1), (P_2, N_2)) = (merge(P_1, P_2), merge(N_1, N_2))$

CvRDT: Mengen

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

    $query(P) = P$

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

    $merge(P_1, P_2) = P_1 \cup P_2$

- 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: $\mathcal{P}(A)$

    $query((P, N)) = query(P) \setminus query(N)$

    $update((P, N), +, m) = (update(P, +, m), N)$

    $update((P, N), -, m) = (P, update(N, +, m))$

    $merge((P_1, N_1), (P_2, N_2)) = (merge(P_1, P_2), merge(N_1, N_2))$

Operationsbasierte CRDTs

- Kommutative replizierte Datentypen (CmRDTs)
- Knoten senden nur Operationen an andere Knoten
- *update* unterscheidete 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: $(x, t) \in X \times \mathit{timestamp}$
- $\mathit{query}((x, t)) = x$
- $\mathit{update}(=, x')$
  - lokal: $(x, t) := (x', \mathit{now}())$
  - extern: $\mathit{if}\ \ t < t'\ \ \mathit{then}\ (x, t) := (x', t')$

Vektor-Uhren

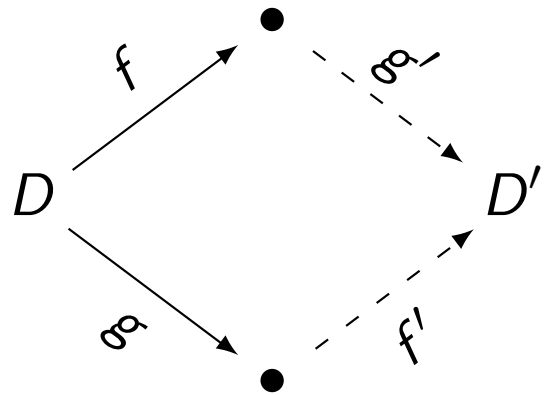
- Im LWW Register benötigen wir Timestamps
  - Kausalität muss erhalten bleiben
  - Timestamps müssen eine total Ordnung haben
- Datum und Uhrzeit ungeeignet
- Lösung: Vektor-Uhren
  - Jeder Knoten hat einen Zähler, der bei Operationen hochgesetzt wird
  - Zusätzlich merkt sich jeder Knoten den aktuellsten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

$$transform\ f\ g = \langle f', g' \rangle \Longrightarrow g' \circ f = f' \circ g$$
$$applyOp\ (g \circ f)\ D = applyOp\ g\ (applyOp\ f\ D)$$

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 5`
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 5`
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 5`
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:	`5`
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:	`5`
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 5`
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

Ein Beispiel:

Eingabe:
Ausgabe: `R P 1 5`
Aktionen: *Retain*, *Delete*, *Retain*, *Insert* `1`, *Retain*.

- Operationen sind partiell.

Operationen Komponieren

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

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

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

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

Operationen Komponieren

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

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

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

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

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:

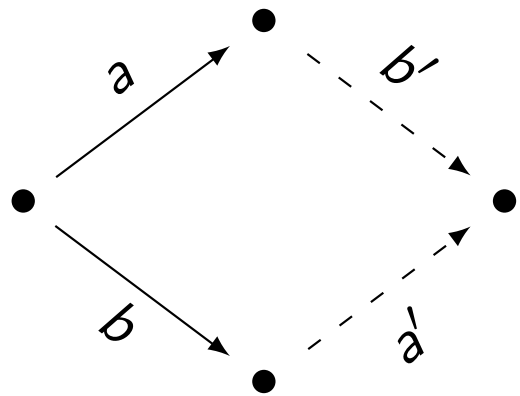
$$\begin{aligned} p &= [] \\ q &= [] \\ \mathit{compose}\ p\ q &= [\mathit{Delete}, \mathit{Insert}\ \texttt{X}, \mathit{Insert}\ \texttt{Y}, \mathit{Delete}] \end{aligned}$$

- *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

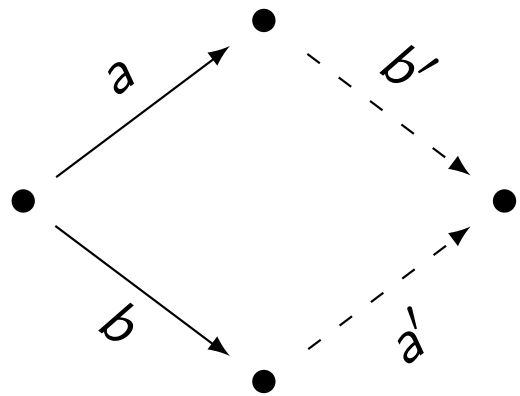


- Beispiel:

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

Operationen Transformieren

- Transformation

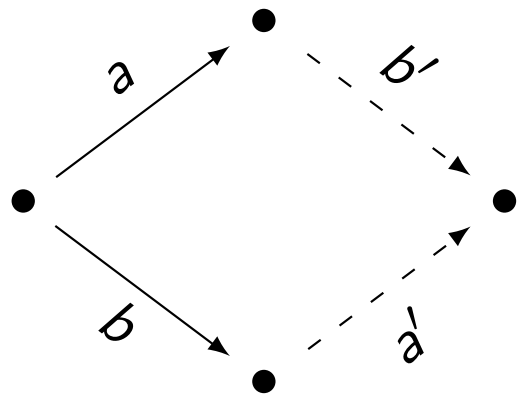


- Beispiel:

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

Operationen Transformieren

- Transformation

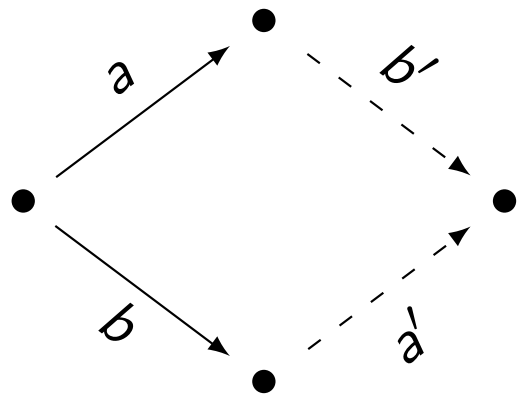


- Beispiel:

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

Operationen Transformieren

- Transformation

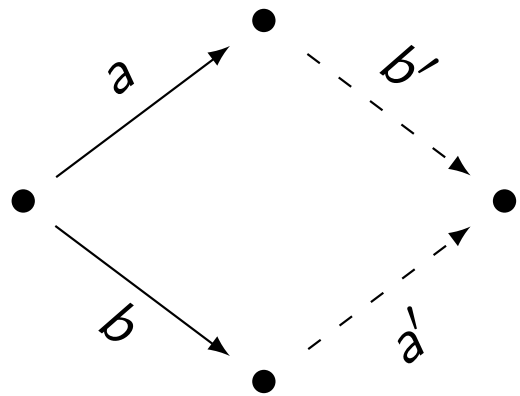


- Beispiel:

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

Operationen Transformieren

- Transformation

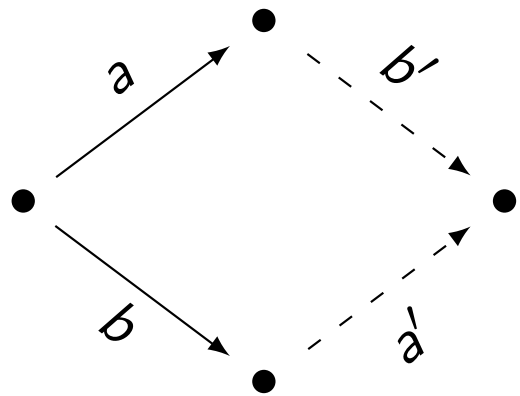


- Beispiel:

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

Operationen Transformieren

- Transformation

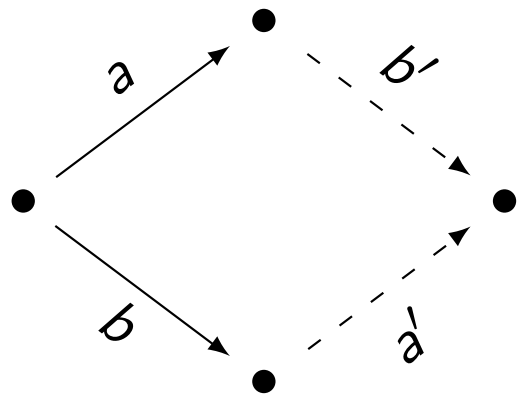


- Beispiel:

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

Operationen Transformieren

- Transformation



- Beispiel:

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

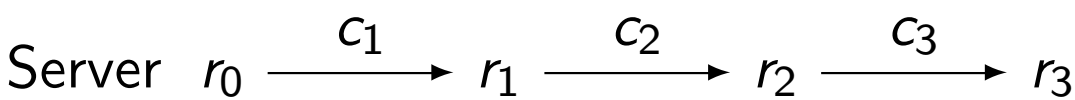
Operationen Verteilen

- 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

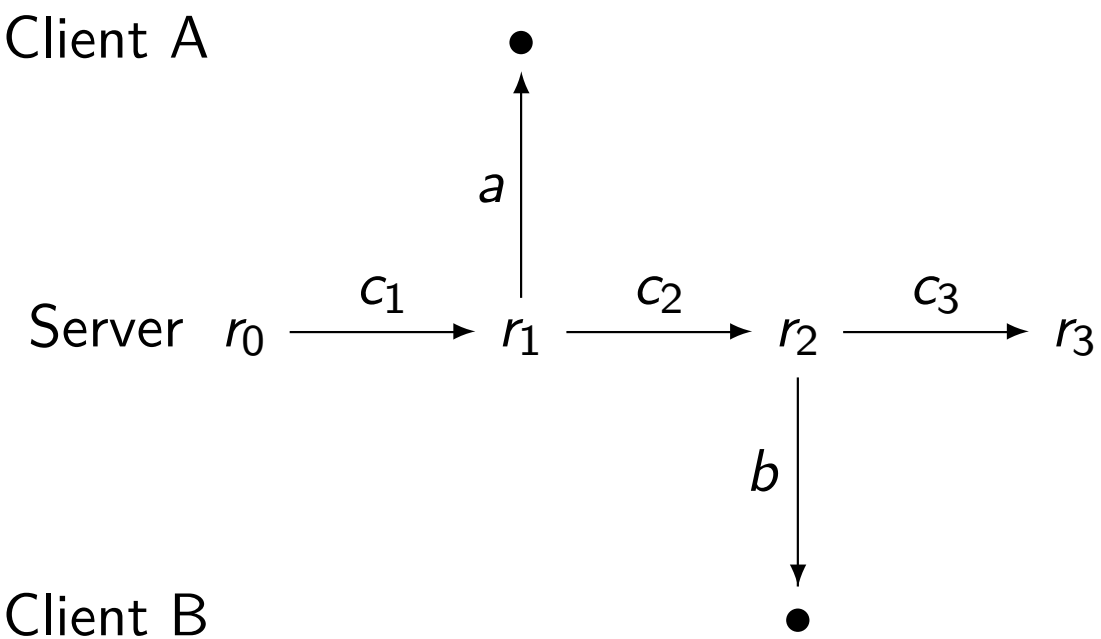
Client A



Client B

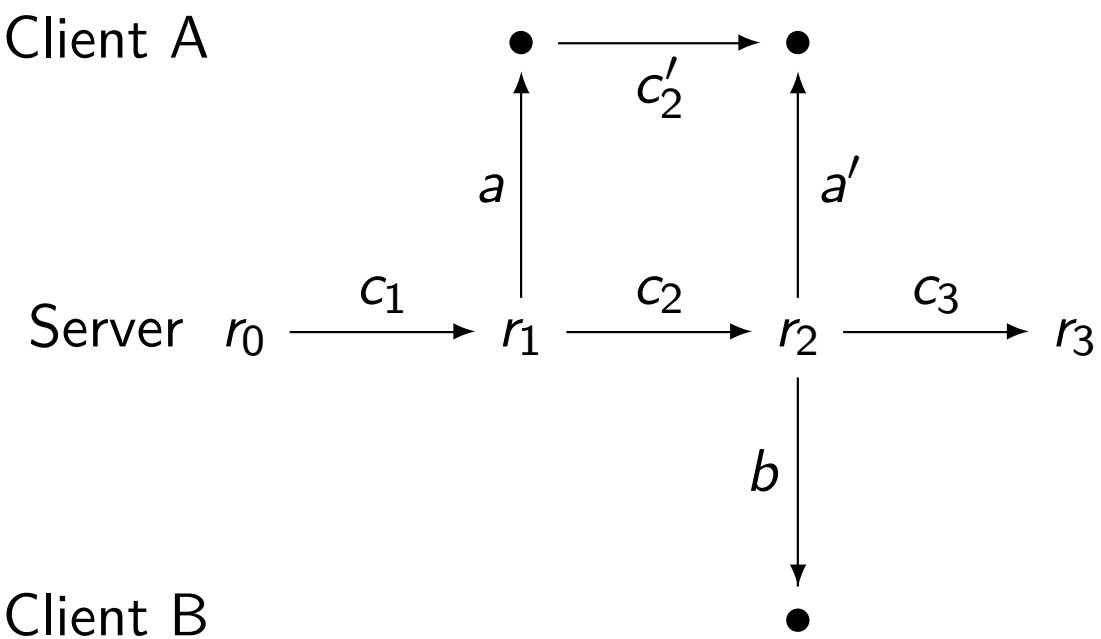
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



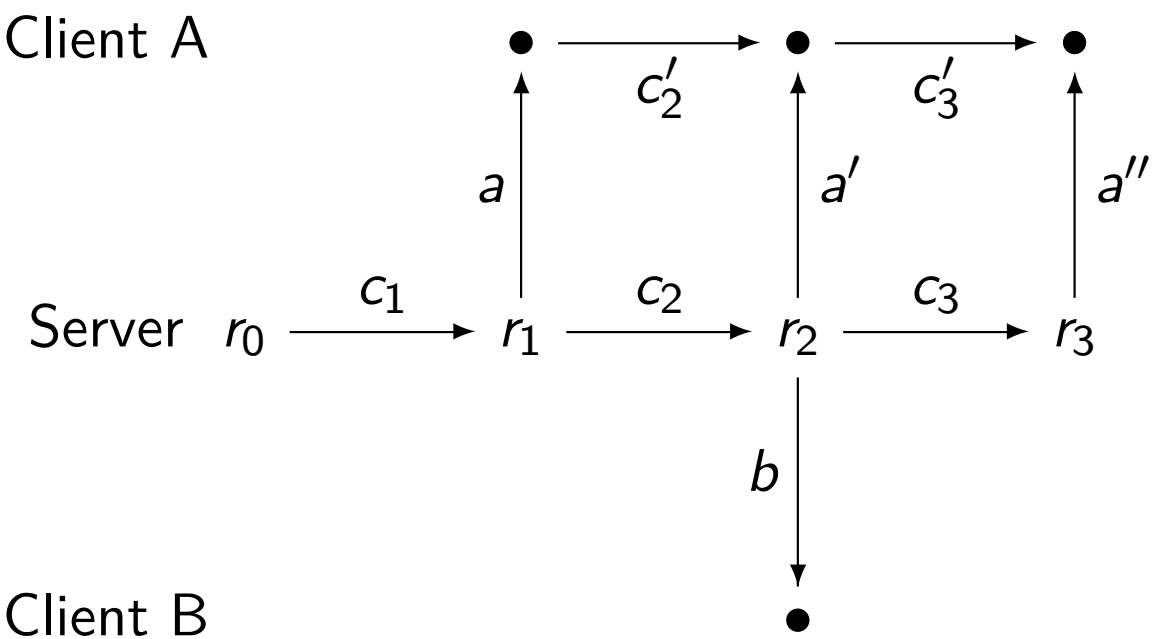
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



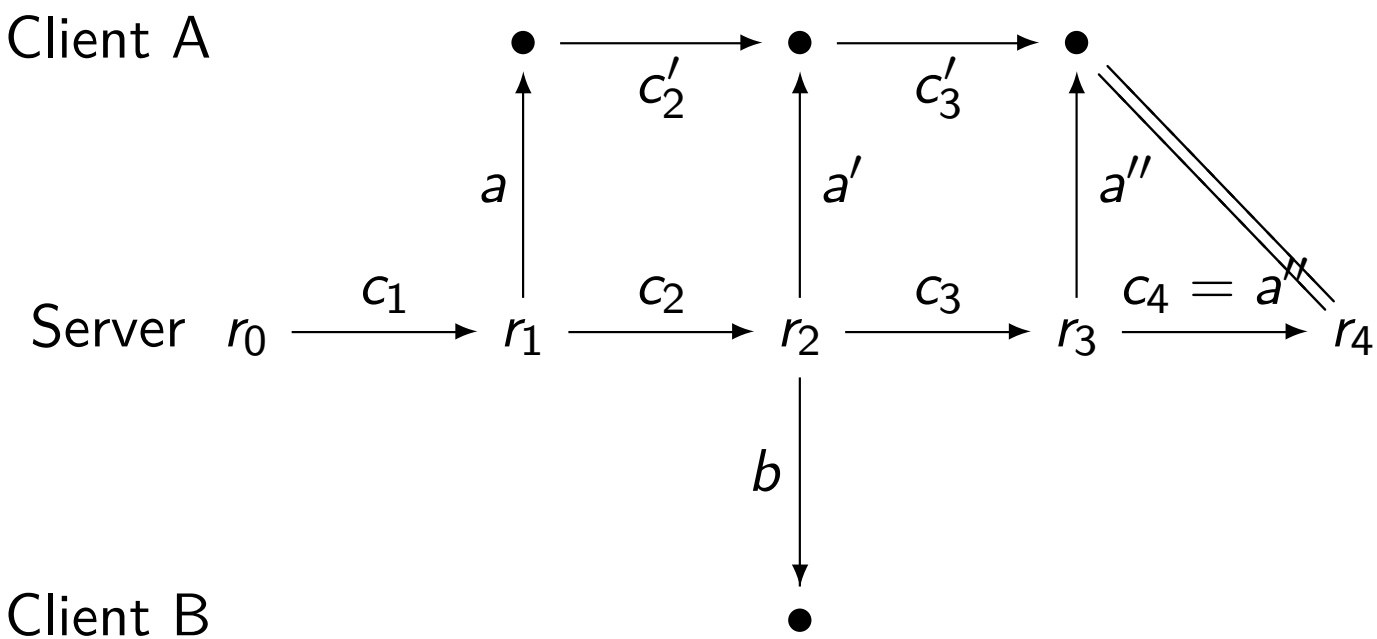
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



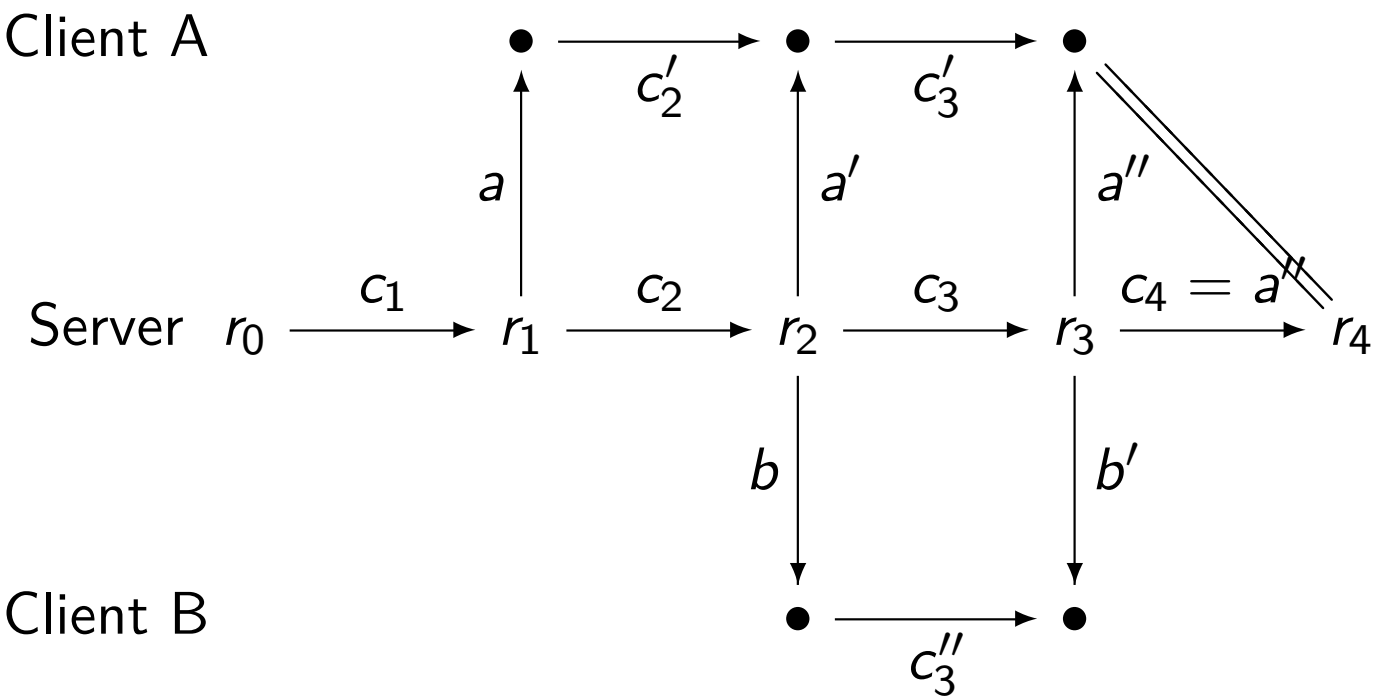
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



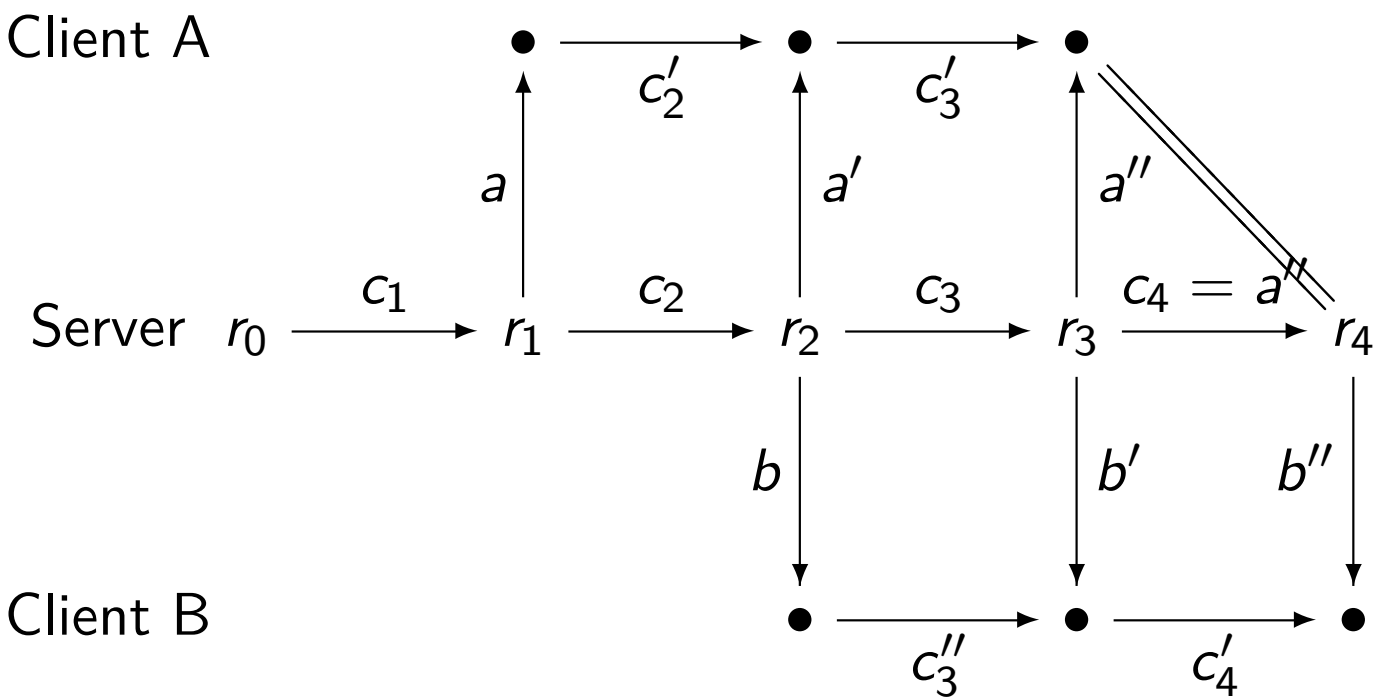
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



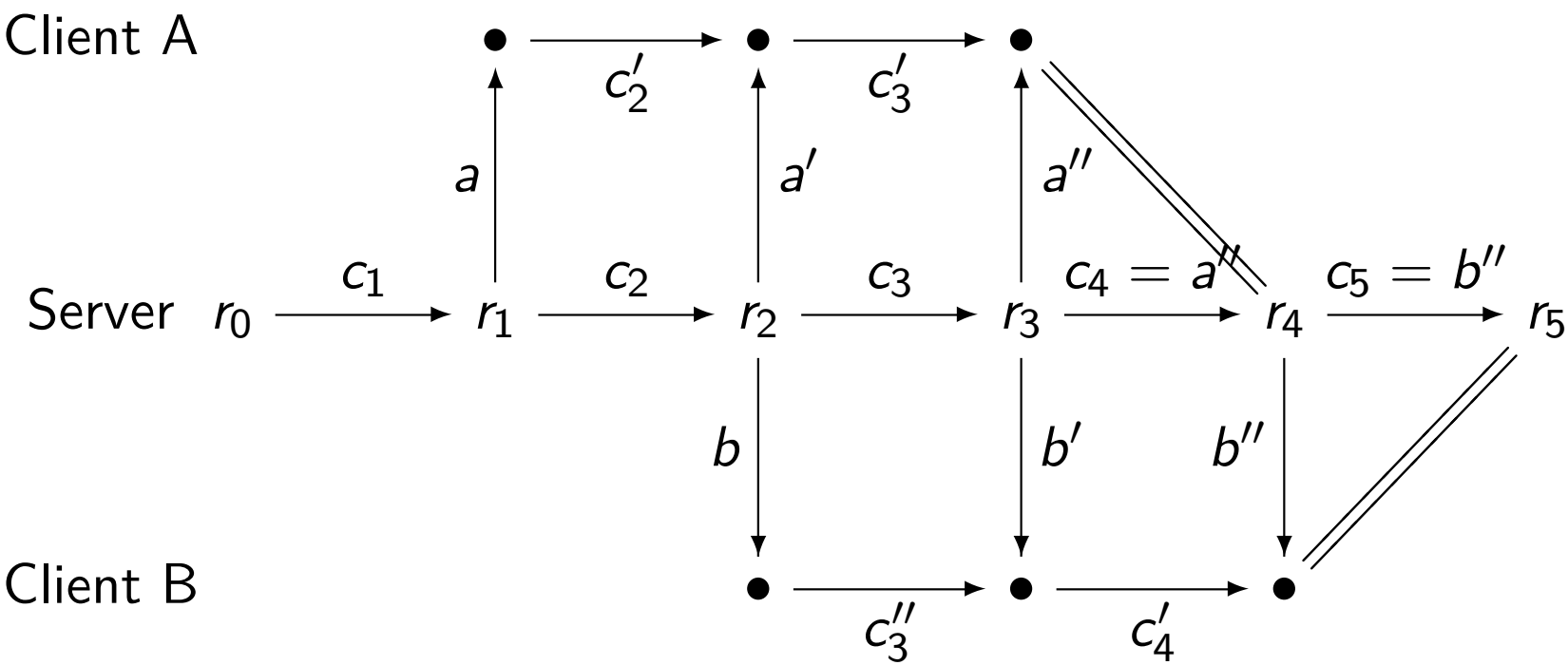
Der Server

- 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

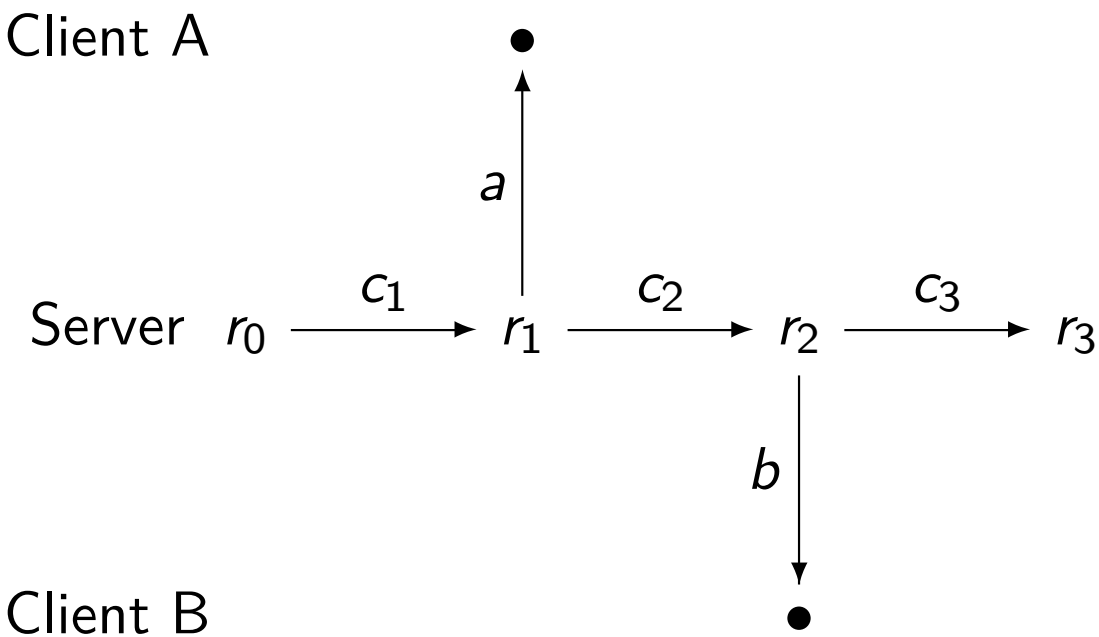
Client A

Server $r_0 \xrightarrow{c_1} r_1 \xrightarrow{c_2} r_2 \xrightarrow{c_3} r_3$

Client B

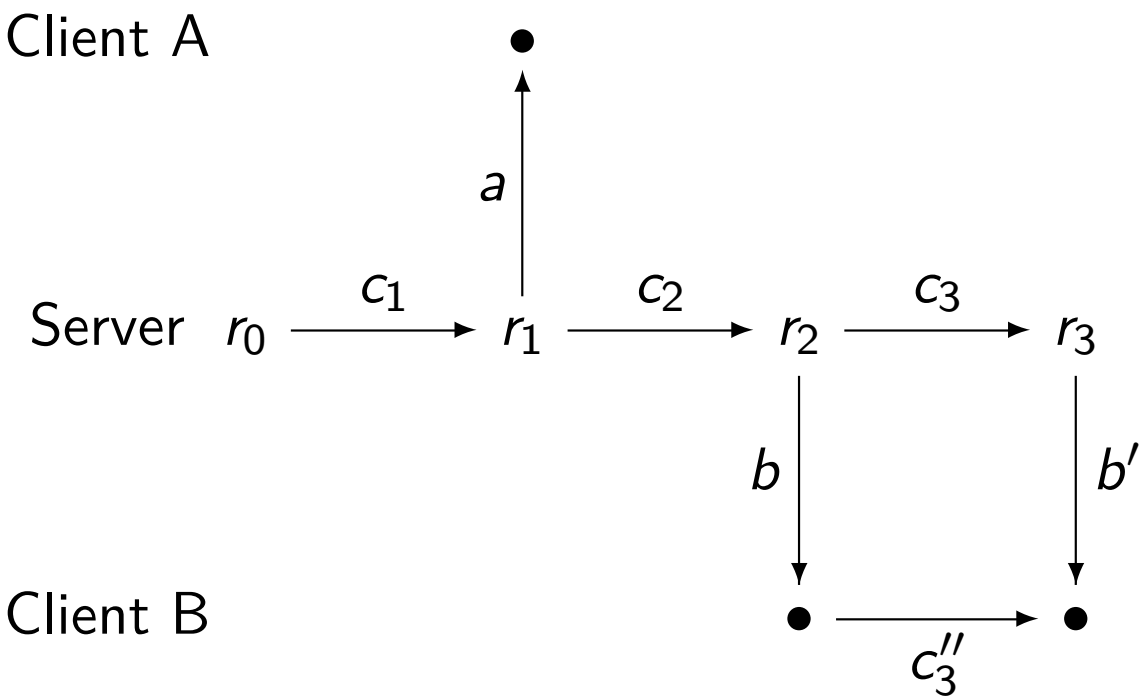
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



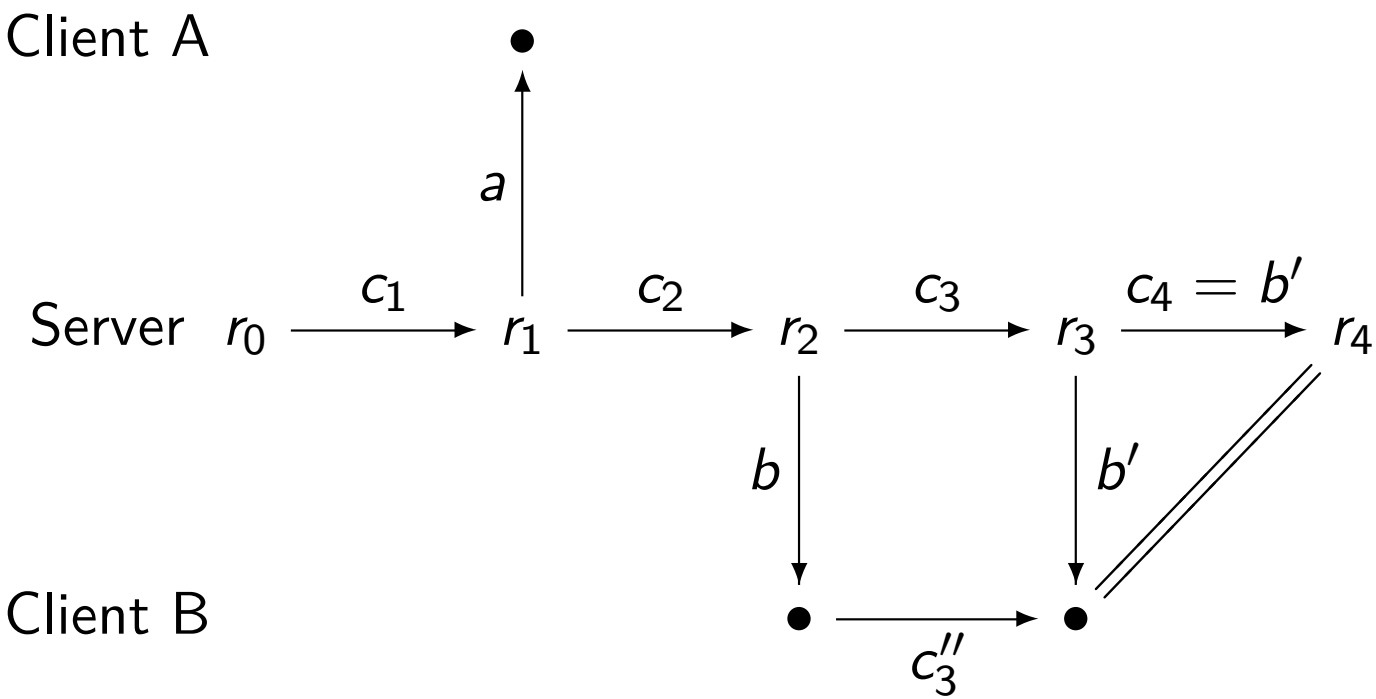
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



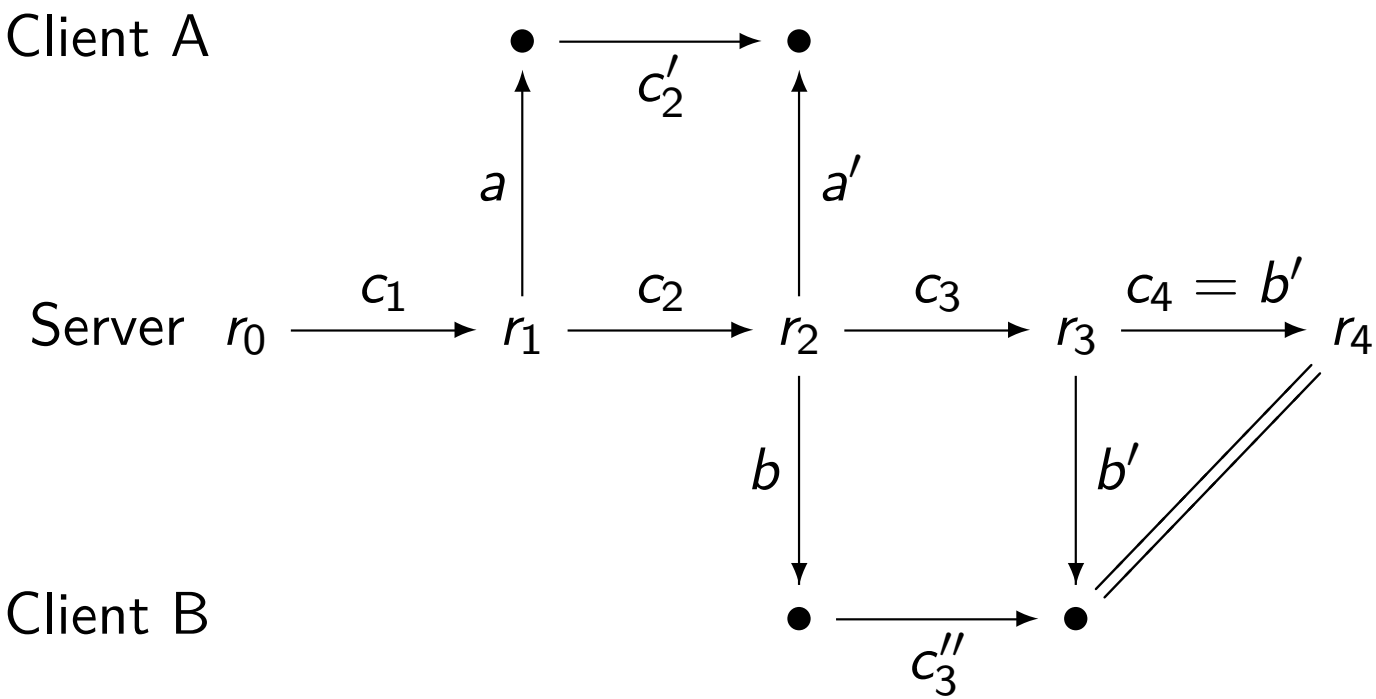
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



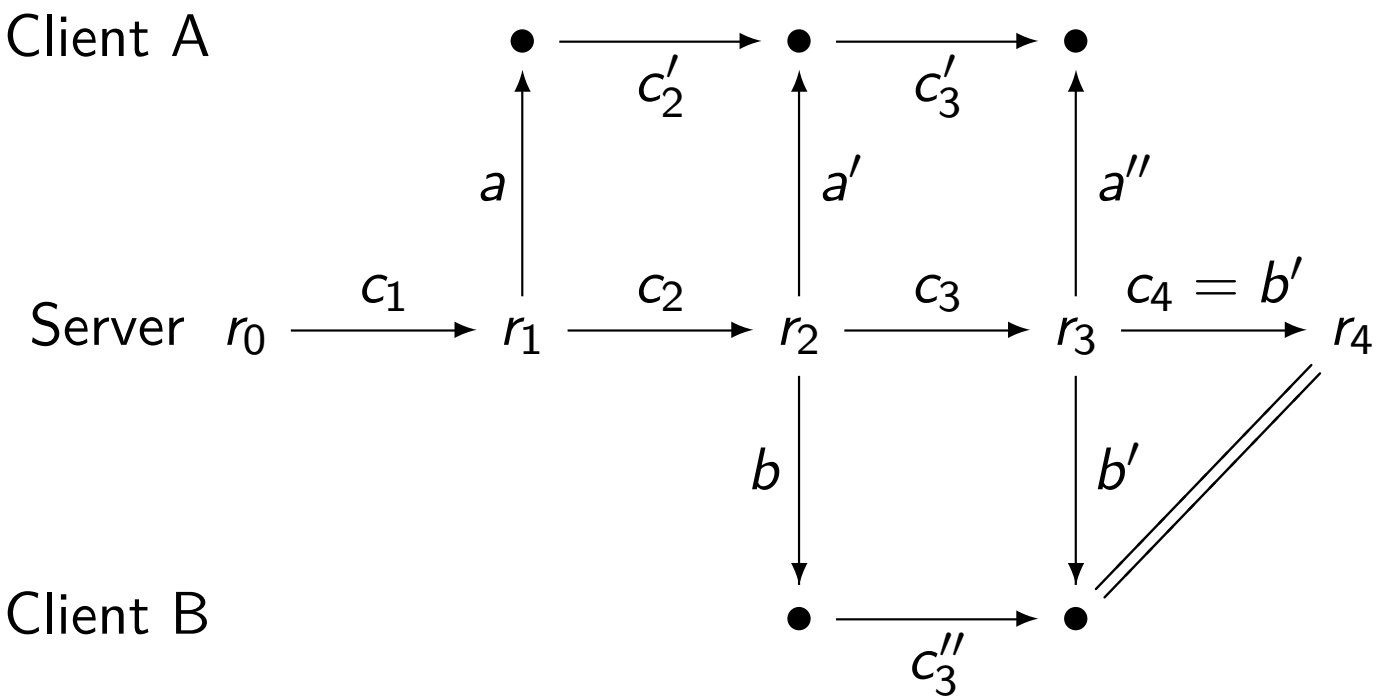
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



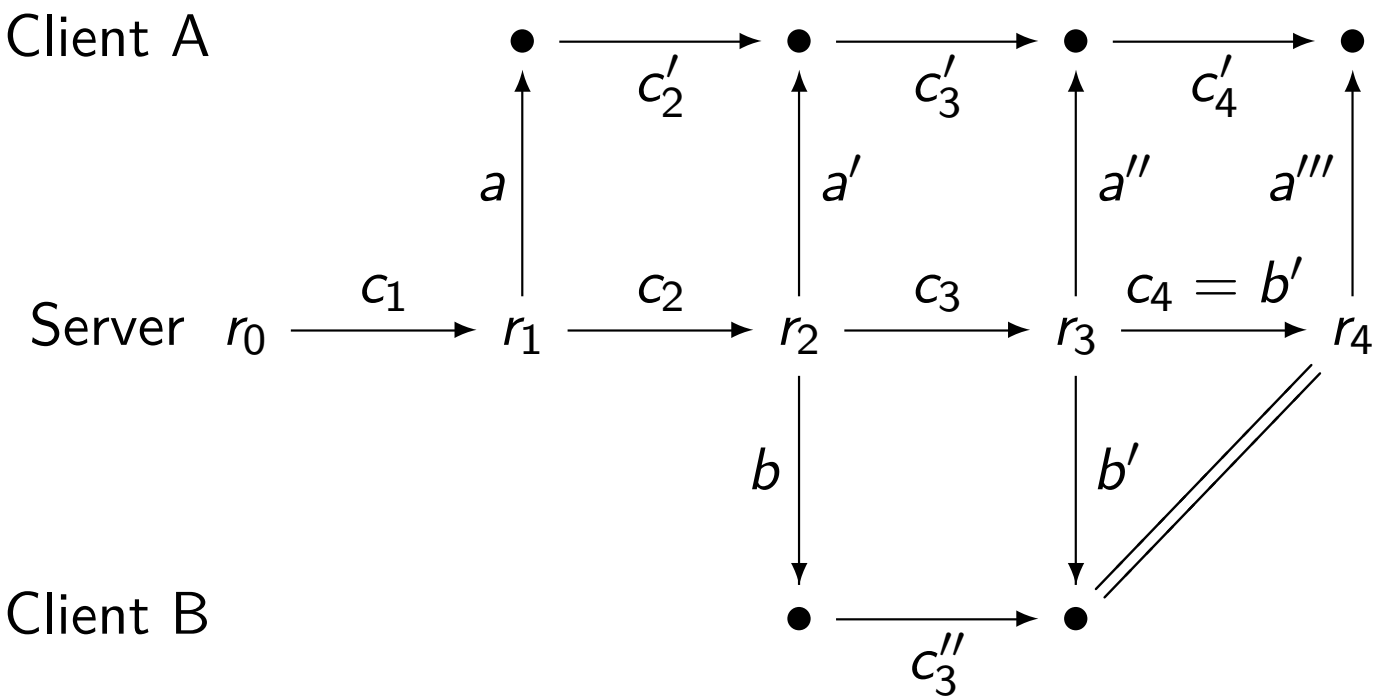
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



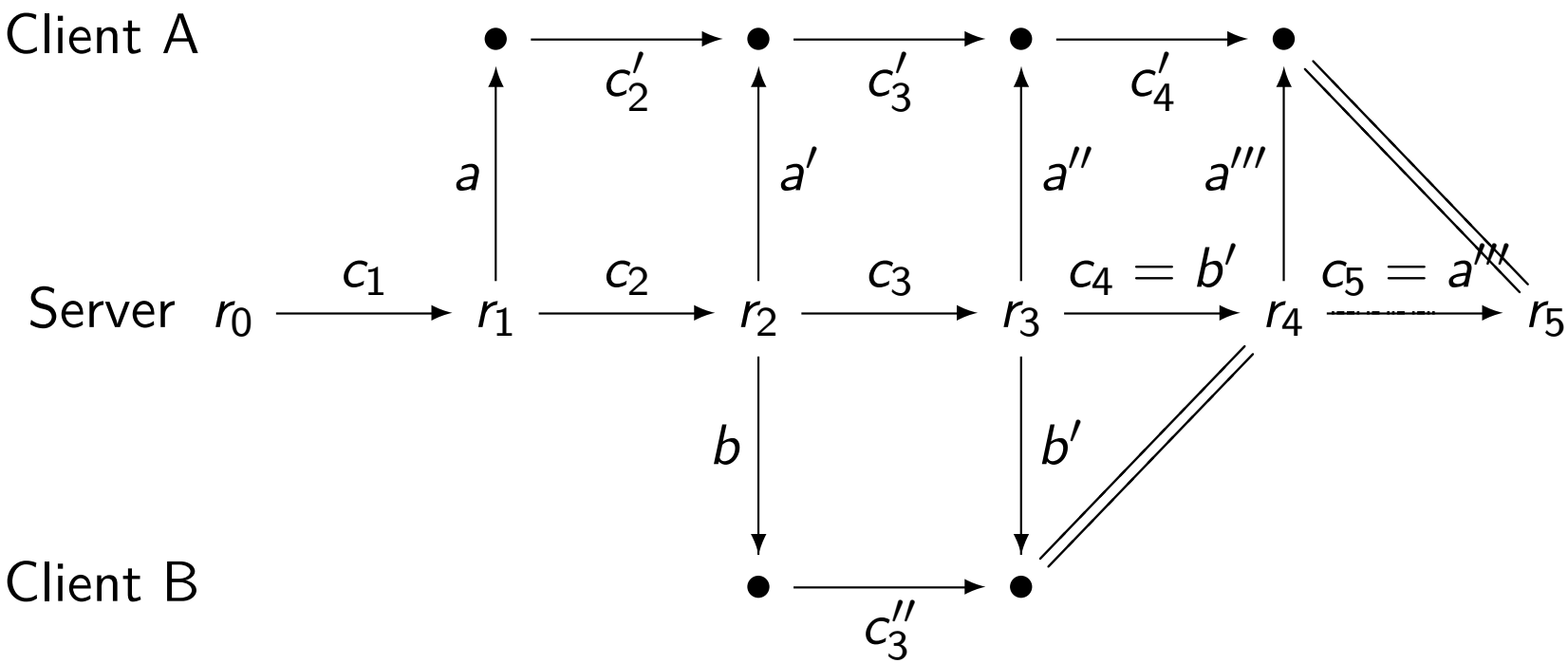
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



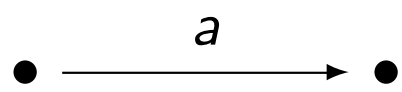
Der Server

- Zweck:
  - Nebenläufige Operationen sequentialisieren
  - Transformierte Operationen verteilen



Der Client

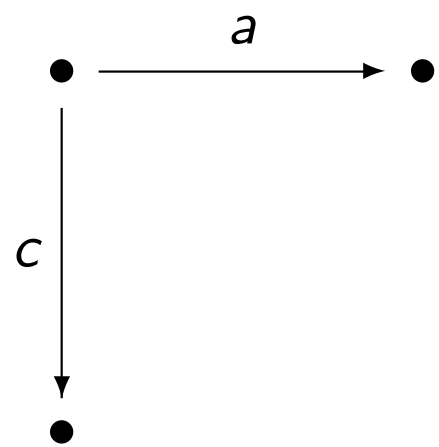
- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision r

Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht

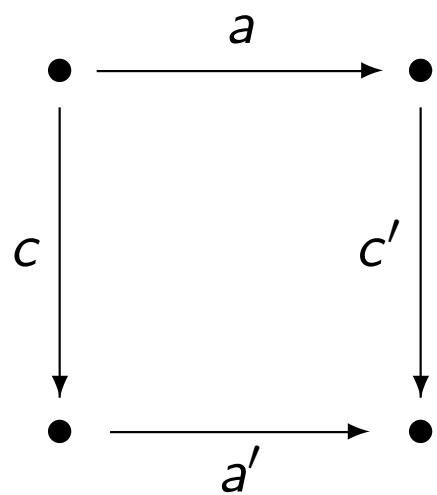


Revision r

Revision $r + 1$

Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht

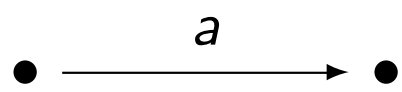


Revision r

Revision $r + 1$

Der Client

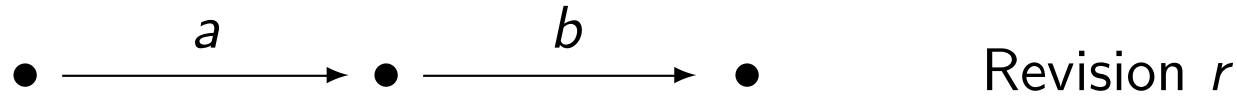
- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



Revision r

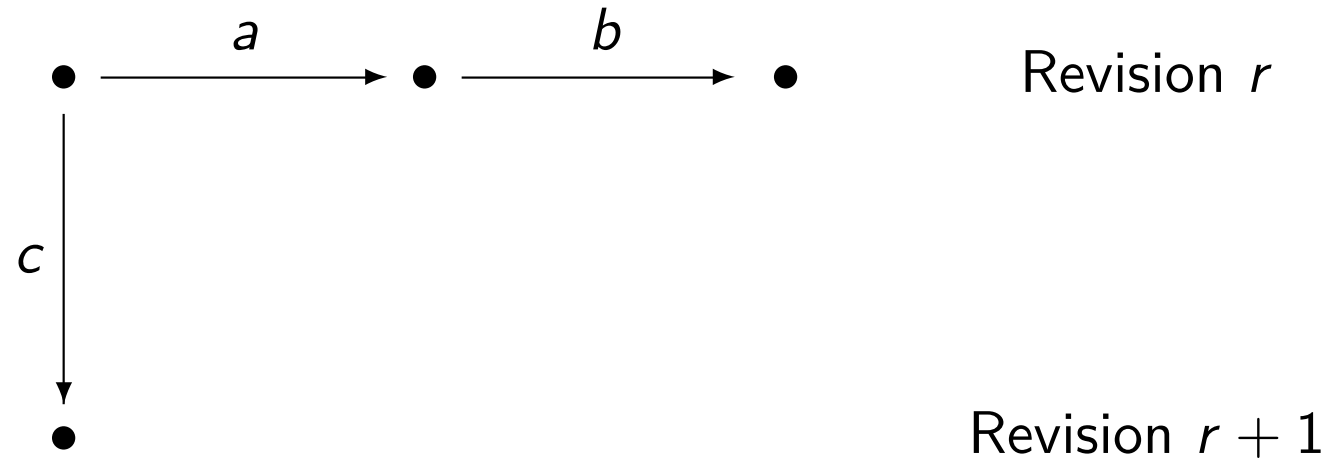
Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



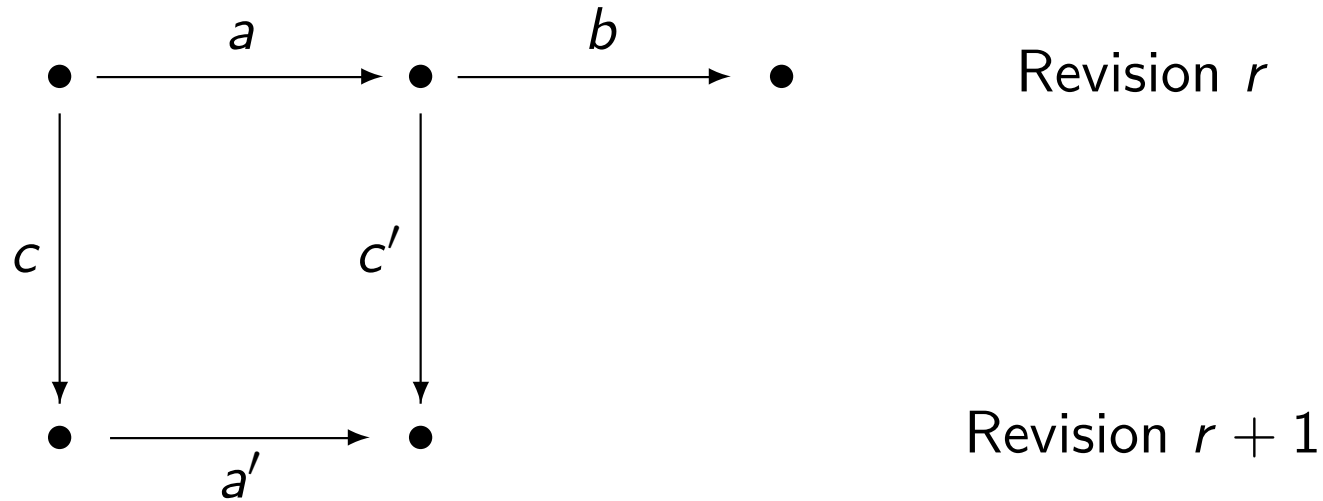
Der Client

- Zweck: Operationen Puffern während eine Bestätigung aussteht



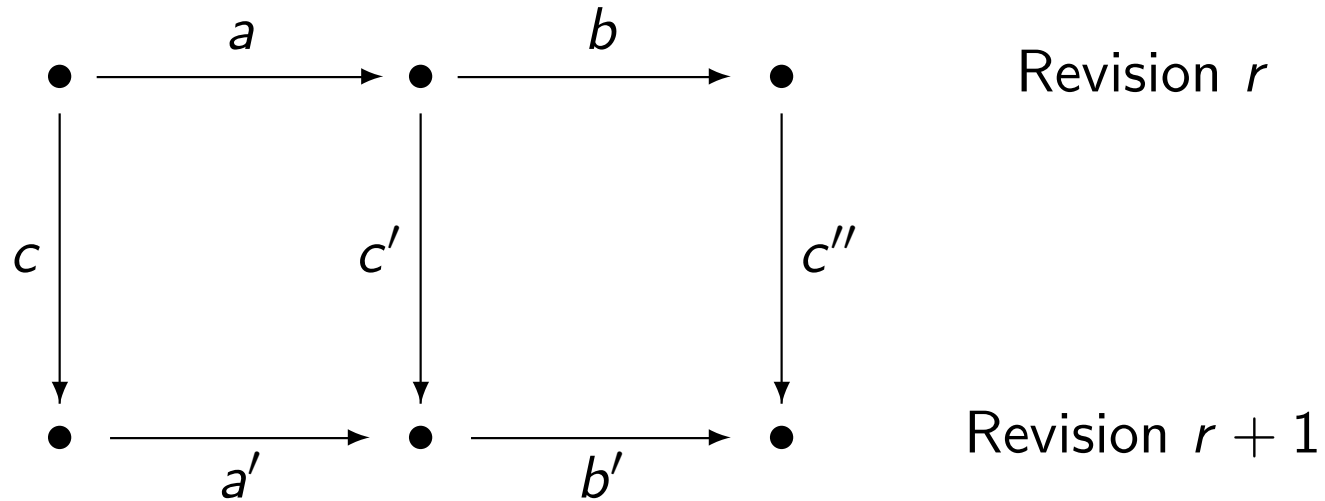
Der Client

- 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