

# Verteilte Systeme

Multicast

---

Sommersemester 2022

Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)



Lehrstuhl für Verteilte Systeme  
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

## Multicast

Motivation

Grundlagen

Zustellungsgarantien

Ordnungsgarantien

Paxos

- Fehlertoleranz durch Replikation
    - Redundante Applikationsinstanzen auf unterschiedlichen Rechnern
    - Problemstellung: **Replikatzustände müssen konsistent gehalten werden**
  - Aktive Replikation
    - Einsatz von gleichberechtigten, deterministischen Replikaten
    - Jedes Replikat führt alle Anfragen aus
    - Konsistenz durch Erstellung einer **totalen Ordnung auf alle Anfragen**
  - Passive Replikation
    - Bestimmung eines Primärreplikats, das als einziges Anfragen ausführt
    - Aktualisierung der anderen Replikate mittels Zustandsänderungen
    - Konsistenz durch Einhaltung der **Reihenfolge der Zustandsänderungen**
- ⇒ Unabhängig von der Replikationsart: Mechanismus zum **Senden von Nachrichten an die gesamte Replikatgruppe** erforderlich

- Multicast-Unterstützung durch das **Kommunikationssystem**
  - Vorteil: Geringere Komplexität der Replikations-/Anwendungsschicht
  - Beispiel: Teil eines Gruppenkommunikationssystems
  - Implementierungsvarianten
    - Auf Basis spezieller Netzwerkmechanismen (z. B. IP-Multicast) [Hier nicht betrachtet]
    - Mit Hilfe von **Punkt-zu-Punkt-Verbindungen**
- **Herausforderungen**
  - Zuverlässige Zustellung von Nachrichten trotz Fehlern
  - Bereitstellung von Ordnungsgarantien
  - Beweisbarkeit zugesicherter Eigenschaften
- Literatur
  -  Christian Cachin, Rachid Guerraoui, and Luís Rodrigues  
**Introduction to Reliable and Secure Distributed Programming (2nd Edition)**  
*Springer*, 2011.

## Multicast

Motivation

**Grundlagen**

Zustellungsgarantien

Ordnungsgarantien

Paxos

- Unterschiede zu Broadcast
  - Sender kennt die Empfänger seiner Nachricht
  - Explizite Anmeldung bei **Eintritt in eine Multicast-Gruppe** erforderlich
- Zentrale Operationen eines Kommunikationssystems
  - Senden (*multicast*)
    - Anwendung übergibt Nachricht an das Kommunikationssystem
    - Nachricht enthält Adressen aller designierten Empfänger
  - Ausliefern (*deliver*)
    - Kommunikationssystem übergibt Nachricht an die Anwendung
    - Eine einmal ausgelieferte **Nachricht kann nicht zurückgenommen werden**
- *Knoten*: Teilnehmer an einer Multicast-Gruppe
  - Übliche Synonyme: Prozess, Rechner, Prozessor,...
  - Im Folgenden: Unterscheidung im Kontext von Fehlern
    - **Fehlerhaft**: Knoten, der während der Beobachtungsphase ausfällt
    - **Korrekt**: Knoten, der nicht fehlerhaft ist

- Grundansatz zur Realisierung von Fehlerdetektoren
  - **Austausch von Heartbeat-Nachrichten** zwischen Knoten
  - Überwachung der Heartbeat-Nachrichten mittels Timeouts
  - Auswertung des Ausbleibens von Heartbeat-Nachrichten
- Problem: Genauigkeit der Fehlererkennung
  - Synchrone Systeme
    - **Bekannte obere Schranken** für Ausführungs- und Übertragungszeiten
    - Ausbleiben einer Heartbeat-Nachricht ist Beleg für einen Fehler
    - Präzise Fehlererkennung möglich
  - Asynchrone Systeme
    - **Keine oberen Schranken** für Ausführungs- und Übertragungszeiten
    - Ausbleiben einer Heartbeat-Nachricht ist allenfalls Hinweis auf einen Fehler
    - Keine präzise Fehlererkennung möglich

⇒ **Die {Nicht-,}Verfügbarkeit eines Fehlerdetektors hat im Allgemeinen Einfluss auf das Design von Protokollen** [Siehe später...]

- Grundidee
  - Modell einer unzuverlässigen Netzwerkverbindung zwischen zwei Knoten
  - Ausgangsbasis für die Modellierung komplexerer Verbindungen
- Eigenschaften
  - **Faire Verluste:** Eine von einem korrekten Knoten unendlich oft gesendete Nachricht wird vom Empfänger unendlich oft ausgeliefert
  - **Endliche Vervielfachung:** Eine von einem korrekten Knoten endlich oft gesendete Nachricht wird vom Empfänger endlich oft ausgeliefert
  - **Keine Erzeugung:** Nur gesendete Nachrichten werden ausgeliefert
- Bemerkungen
  - Einschränkende, aber realistische Annahmen über Unzuverlässigkeit
  - Betrachtung temporärer, gutmütiger Netzwerkfehler
    - Keine dauerhafte Netzwerkpartitionierung zwischen Sender und Empfänger
    - Wahrscheinlichkeit, dass eine gesendete Nachricht ausgeliefert wird, ist  $> 0$

# Perfekte Punkt-zu-Punkt-Verbindung

- Eigenschaften
  - **Zuverlässige Auslieferung:** Falls Sender und Empfänger einer Nachricht korrekt sind, liefert der Empfänger die Nachricht letztendlich aus
  - **Keine Vervielfachung:** Eine Nachricht wird maximal einmal ausgeliefert
  - **Keine Erzeugung:** Nur gesendete Nachrichten werden ausgeliefert
- Realisierung
  - Ausgangsbasis: Fair-Loss-Punkt-zu-Punkt-Verbindung
  - Sendeseite
    - Wiederholte Übertragung einer zu sendenden Nachricht
    - Pausen zwischen einzelnen Übertragungen
  - Empfangsseite
    - Protokoll über bereits ausgelieferte Nachrichten
    - Erkennung und Unterdrückung von Duplikaten

⇒ **Baustein für Multicast-Implementierungen**

## Multicast

Motivation

Grundlagen

**Zustellungsgarantien**

Ordnungsgarantien

Paxos

- Eigenschaften

- **Gültigkeit:** Falls ein korrekter Knoten eine Nachricht  $n$  sendet, dann liefert jeder korrekte Knoten die Nachricht  $n$  letztendlich aus
- **Keine Vervielfachung:** Eine Nachricht wird maximal einmal ausgeliefert
- **Keine Erzeugung:** Falls ein Knoten die Nachricht  $n$  eines Senders  $k$  ausliefert, wurde die Nachricht  $n$  auch zuvor von Knoten  $k$  gesendet

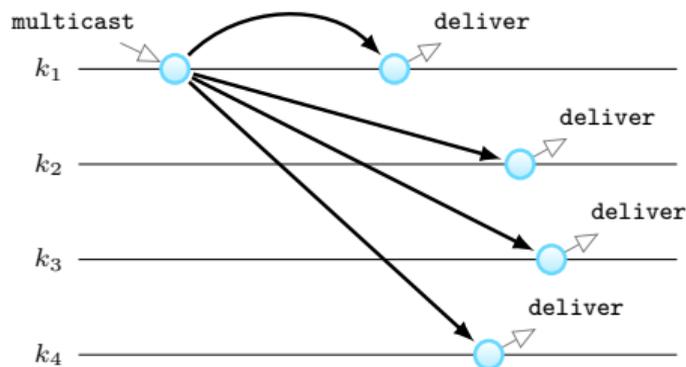
- Bemerkungen

- Vergleiche: Eigenschaften einer perfekten Punkt-zu-Punkt-Verbindung
- Keine Aussagen über
  - Nachrichten, die von fehlerhaften Knoten gesendet wurden
  - das Ausliefern von Nachrichten auf fehlerhaften Knoten
- Es kann von fehlerhaften Knoten gesendete Nachrichten geben, die nur von einem Teil der korrekten Knoten ausgeliefert werden

⇒ **Im Fehlerfall: Inkonsistenz zwischen korrekten Knoten möglich**

## ■ Realisierung

- Einsatz perfekter Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
- Sender verschickt Nachricht an alle Knoten
- Ein Knoten liefert die Nachricht aus, **sobald er sie bekommen hat**



## ■ Problemszenarien (Beispiele)

- Sender fällt aus, bevor er die Nachricht an alle Knoten gesendet hat
- Empfänger fällt aus, bevor er die Nachricht ausliefern konnte

## ■ Eigenschaften

[Grau: Identisch zum Best-Effort-Multicast]

- **Gültigkeit:** Falls ein korrekter Knoten  $k$  eine Nachricht  $n$  sendet, dann liefert Knoten  $k$  die Nachricht  $n$  letztendlich auch aus
- **Keine Vervielfachung:** Eine Nachricht wird maximal einmal ausgeliefert
- **Keine Erzeugung:** Falls ein Knoten die Nachricht  $n$  eines Senders  $k$  ausliefert, wurde die Nachricht  $n$  auch zuvor von Knoten  $k$  gesendet
- **Einigung:** Falls eine Nachricht  $n$  von einem korrekten Knoten ausgeliefert wird, dann liefern letztendlich alle korrekten Knoten die Nachricht  $n$  aus

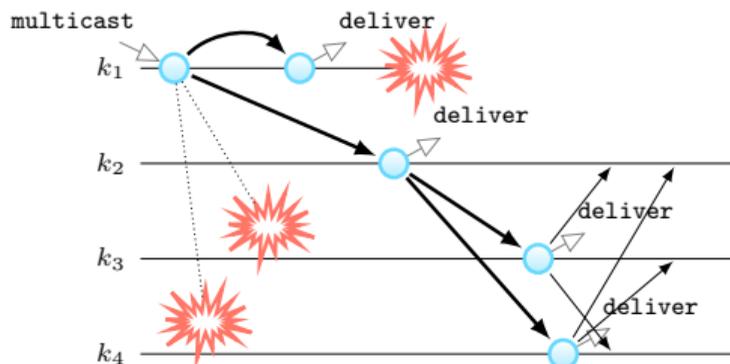
## ■ Bemerkungen

- Konsistenz zwischen korrekten Knoten ist sichergestellt
- Keine Aussage über fehlerhafte Knoten (vgl. Best-Effort-Multicast)

⇒ **Im Fehlerfall: Inkonsistenz zwischen korrekten Knoten und fehlerhaften Knoten möglich**

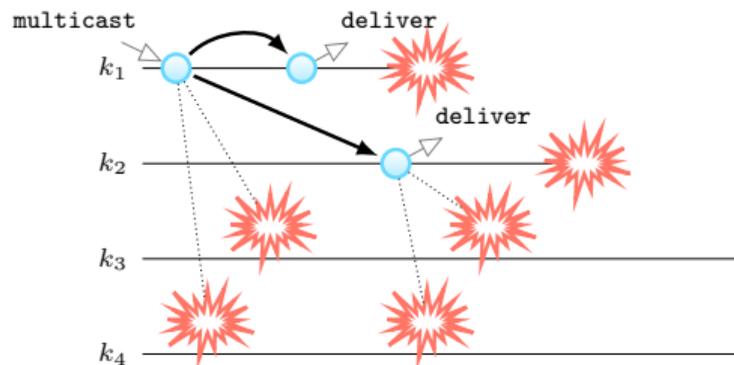
## ■ Realisierung

- Grundansatz wie bei Best-Effort-Multicast
- Ein Empfänger leitet die Nachricht **an alle anderen Knoten** weiter

■ **Varianten:** Weiterleitung der Nachrichten an andere Knoten

- unmittelbar nach ihrem Empfang (*Eager*)
- nach der Erkennung eines Knotenausfalls (*Lazy*)

- Beispielszenario
  - Fehlerhafter Knoten sendet Nachricht
  - Nachricht erreicht keinen korrekten Knoten
  - Nachricht wird **von mindestens einem fehlerhaften Knoten ausgeliefert**



### ■ Problem

- deliver könnte zu einer Aktion (z. B. Antwort an Client) geführt haben
- Korrekte Knoten werden diese Aktion niemals durchführen

## ■ Eigenschaften

[Grau: Identisch zum zuverlässigen Multicast]

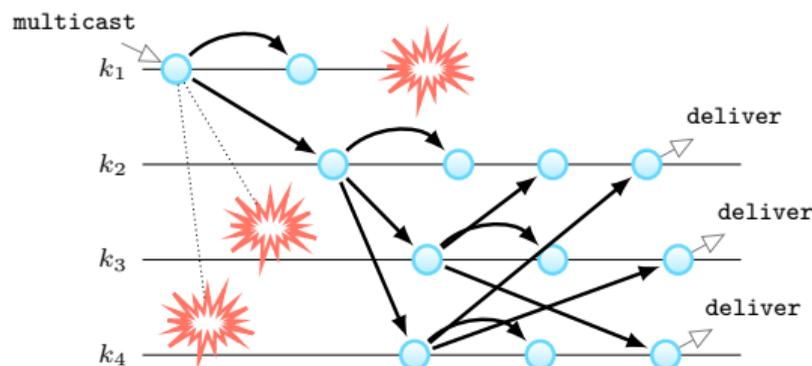
- **Gültigkeit:** Falls ein korrekter Knoten  $k$  eine Nachricht  $n$  sendet, dann liefert Knoten  $k$  die Nachricht  $n$  letztendlich auch aus
- **Keine Vervielfachung:** Eine Nachricht wird maximal einmal ausgeliefert
- **Keine Erzeugung:** Falls ein Knoten die Nachricht  $n$  eines Senders  $k$  ausliefert, wurde die Nachricht  $n$  auch zuvor von Knoten  $k$  gesendet
- **Uniforme Einigung:** Falls eine Nachricht  $n$  von **irgendeinem** Knoten ausgeliefert wird, dann liefern letztendlich alle korrekten Knoten die Nachricht  $n$  aus

## ■ Bemerkungen

- Einschränkung der im Fehlerfall möglichen Inkonsistenz
- Keine Aussage über Nachrichten, die von fehlerhaften Knoten stammen

⇒ **Eine durch die Auslieferung einer Nachricht ausgelöste Aktion wird letztendlich von allen korrekten Knoten ausgeführt**

- Realisierung
  - Grundansatz wie beim zuverlässigen Multicast
  - Ein **Knoten wartet auf Bestätigungen**, bevor er eine Nachricht ausliefert



## ■ Varianten

- Warten auf Bestätigungen aller korrekten Knoten [→ erfordert Fehlerdetektor]
- Warten auf  $\lceil \frac{K+1}{2} \rceil$  Bestätigungen [Annahme:  $K$  Knoten insgesamt, max.  $\lfloor \frac{K-1}{2} \rfloor$  fehlerhaft]

## Multicast

Motivation

Grundlagen

Zustellungsgarantien

**Ordnungsgarantien**

Paxos

- Eigenschaft
  - *FIFO: First In, First Out*
  - **FIFO-Auslieferung:** Falls ein Knoten eine Nachricht  $n_1$  vor einer Nachricht  $n_2$  sendet, dann liefert jeder Knoten nur dann Nachricht  $n_2$  aus, wenn er zuvor bereits Nachricht  $n_1$  ausgeliefert hat
- Bemerkungen
  - FIFO-Eigenschaft bezieht sich jeweils auf die Nachrichten **eines Knotens**
  - Keine Aussage über die Reihenfolge, in der von unterschiedlichen Knoten gesendete Nachrichten ausgeliefert werden
- Beispiel für Realisierung
  - Nachrichtenversand per (uniformem) zuverlässigem Multicast
  - Nachrichten tragen **senderspezifische Sequenznummern**
  - Einhaltung der Reihenfolge bei Auslieferung der Nachrichten

- Eigenschaft
  - Annahmen
    - $n_1$  und  $n_2$  sind zwei beliebige Nachrichten
    - $k_1$  und  $k_2$  sind zwei beliebige Knoten, die die Nachrichten  $n_1$  und  $n_2$  ausliefern
  - **Totale Ordnung:** Falls Knoten  $k_1$  Nachricht  $n_1$  vor Nachricht  $n_2$  ausliefert, dann liefert Knoten  $k_2$  auch Nachricht  $n_1$  vor Nachricht  $n_2$  aus
- Bemerkungen
  - Totale Ordnung bezieht sich auf **sämtliche ausgelieferten Nachrichten**
  - Zentraler Baustein replizierter Systeme
  - Problemstellung orthogonal zu FIFO-Ordnung
- Mögliche Realisierung
  - (Uniformer) zuverlässiger FIFO-Multicast als Basis
  - **Wahl eines Anführerknotens** [Neuwahl nach Ausfall des aktuellen Anführers]
  - Anführer bestimmt die globale Auslieferungsreihenfolge aller Nachrichten

## Multicast

Motivation

Grundlagen

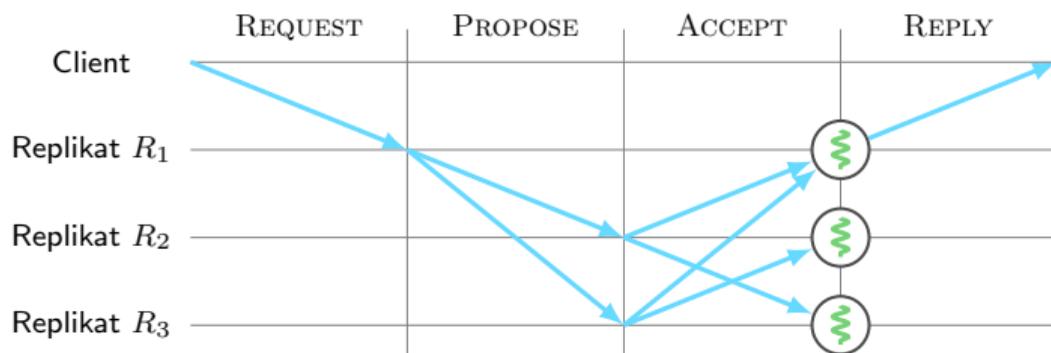
Zustellungsgarantien

Ordnungsgarantien

Paxos

- *Paxos*-Protokoll
  - Entwickelt Ende der 1980er, Papierveröffentlichung 1998
  - **Einigungsprotokoll** zur Replikation deterministischer Zustandsmaschinen
  - Tolerierung von Replikatausfällen
- Varianten (Beispiele)
  - *Cheap Paxos*           Einsparung von Ressourcen
  - *Fast Paxos*            Reduzierung der Latenz
  - *Byzantine Paxos*      **Tolerierung willkürlicher Fehler**
- Literatur
  -  Leslie Lamport  
**The Part-time Parliament**  
*ACM Transactions on Computer Systems*, 16(2):133–169, 1998.
  -  Jonathan Kirsch and Yair Amir  
**Paxos for System Builders: An Overview**  
*Proc. of the 2nd Workshop on Large-Scale Distributed Systems and Middleware (LADIS '08)*, S. 14–19, 2008.

- Architektur
  - $2f + 1$  Replikate zur Tolerierung von bis zu  $f$  Replikatausfällen
  - Vorbereitung: Wahl eines Anführerreplikats (hier: Replikat  $R_1$ )
- Protokollinstanz: **Zuweisung einer Sequenznummer** zu einer Anfrage
  - REQUEST Client sendet Anfrage an Anführerreplikat
  - PROPOSE Anführer schlägt {Sequenznummer, Anfrage} vor
  - ACCEPT Andere Replikate nehmen Vorschlag an
  - REPLY Beantwortung der Anfrage nach Erhalt von  $f$  ACCEPTS



- Anführerwechsel
  - Anlass: Trotz neuer Anfragen werden keine neuen Instanzen gestartet
  - Mögliche Implementierung
    - Neuer Anführer (→ Replikat mit nächsthöherer ID) schlägt Wechsel vor
    - Andere Replikate stimmen dem Vorschlag zu
      - \* **Bericht über Anfragen**, für die sie ein PROPOSE/ACCEPT geschickt haben
      - \* Ab sofort: Ignorieren von PROPOSE-Nachrichten des alten Anführers
    - Wechsel beendet, sobald  $f$  andere Replikate dem neuen Anführer folgen
    - Neuer Anführer startet Instanzen für **bekannte Anfragen** neu
- Sicherungspunkte
  - Probleme
    - Ohne zusätzliche Maßnahmen müssten beim Wechsel des Anführers **sämtliche bisherigen Protokollinstanzen** wiederholt werden
    - Langsame Replikate haben keine Chance aufzuholen
  - Ansatz: Regelmäßige Erzeugung von **Anwendungssicherungspunkten**
    - Verwerfen von Informationen über ältere Protokollinstanzen
    - Bereitstellung des Sicherungspunkts auf Anfrage eines anderen Replikats