

Verteilte Systeme

Multicast

Sommersemester 2026

Christian Berger

Nach Folien von Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



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
 - Synchroner 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...]

Fair-Loss-Punkt-zu-Punkt-Verbindung

■ 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

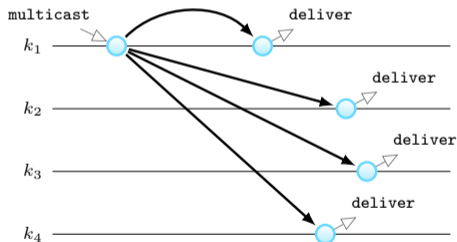
■ Bemerkungen

- 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**



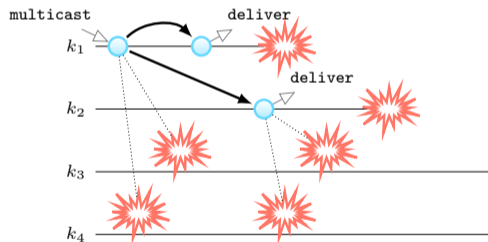
■ Problemszenarien (Beispiele)

- 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**

■ Beispielszenario

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



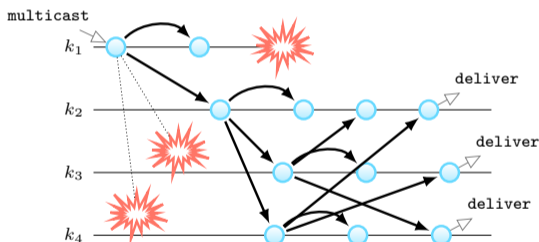
■ Problem

- `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

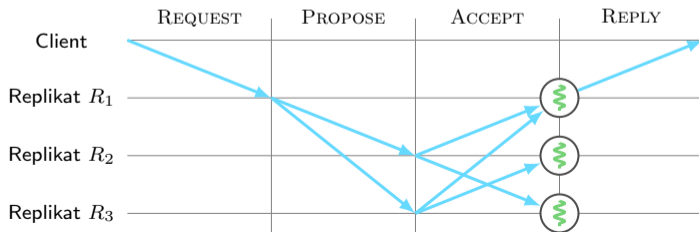
Proc. of the 2nd Workshop on Large-Scale Distributed Systems and Middleware (LADIS '08), S. 14–19, 2008.

■ 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