

9 Multicast

- 9.1 Motivation
- 9.2 Grundlagen
- 9.3 Zustellungsgarantien
- 9.4 Ordnungsgarantien
- 9.5 Praxisbeispiel



Herausforderungen

- 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 ed.)
Springer, 2011.



- Fehlertoleranz durch Replikation [Siehe Vorlesung zu FT-CORBA]
 - 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 [Beispiel hier: Warm passive]
 - Bestimmung eines Master-Replikats, 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

- 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
 - 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



Erkennung von Fehlern

- 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 Algorithmen** [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 temporär, 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**



Best-Effort-Multicast

Eigenschaften

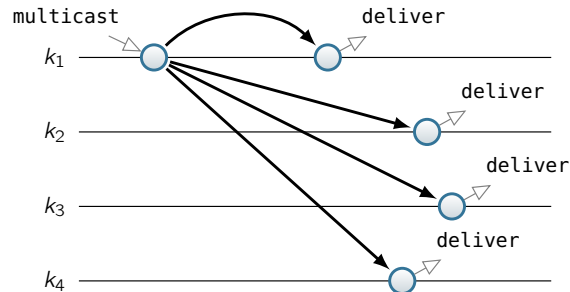
- Eigenschaften
 - **Gültigkeit:** Falls ein korrekter Knoten eine Nachricht n sendet, dann liefert jeder korrekte Knoten n letztendlich aus
 - **Keine Vervielfachung:** Eine Nachricht wird maximal einmal ausgeliefert
 - **Keine Erzeugung:** Falls ein Knoten die Nachricht n eines Senders k ausliefert,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

■ Bemerkungen

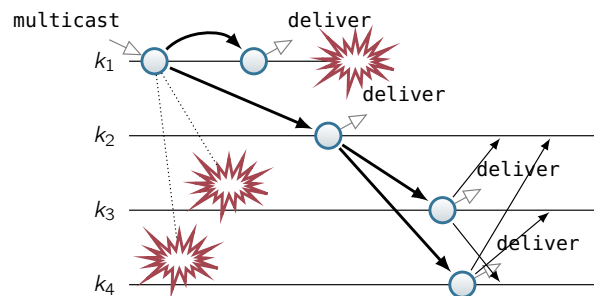
- Konsistenz zwischen korrekten Knoten ist sichergestellt
- Keine Aussage über fehlerhafte Knoten (vgl. Best-Effort-Multicast)

⇒ **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



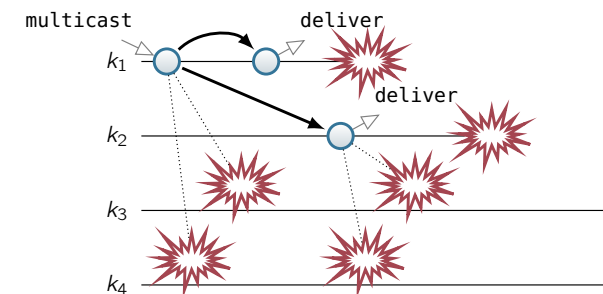
■ Varianten: Weiterleitung der Nachrichten an andere Knoten

- 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 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 n auch zuvor von Knoten k gesendet
- **Uniforme Einigung:** Falls eine Nachricht n von **irgendeinem** Knoten ausgeliefert wird, dann liefern letztendlich alle korrekten Knoten 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



FIFO-Ordnung

■ Eigenschaft

- **FIFO:** First In, First Out
- **FIFO-Auslieferung:** Falls ein Knoten eine Nachricht n_1 vor einer Nachricht n_2 sendet, dann liefert ein korrekter Knoten nur dann n_2 aus, wenn er zuvor bereits 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

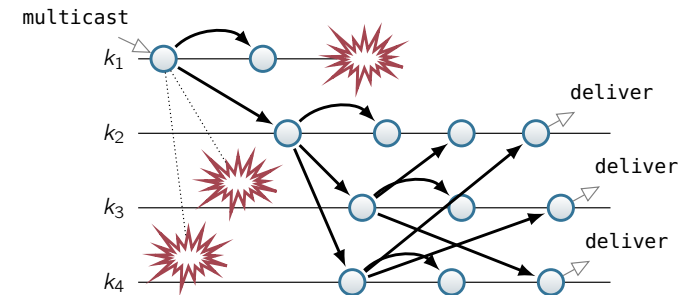
■ Beispiel für Realisierung

- Nachrichtenversand per (uniformem) zuverlässigem Multicast
- Nachrichten tragen senderspezifische Sequenznummern
- Einhaltung der Reihenfolge bei Auslieferung der Nachrichten



■ 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]



Totale Ordnung

■ Eigenschaft

- Annahmen
 - n_1 und n_2 sind zwei beliebige Nachrichten
 - k_1 und k_2 sind zwei beliebige korrekte Knoten, die 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 n_1 vor 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



■ Paxos-Protokoll

- Entwickelt Ende der 1980er, veröffentlicht 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

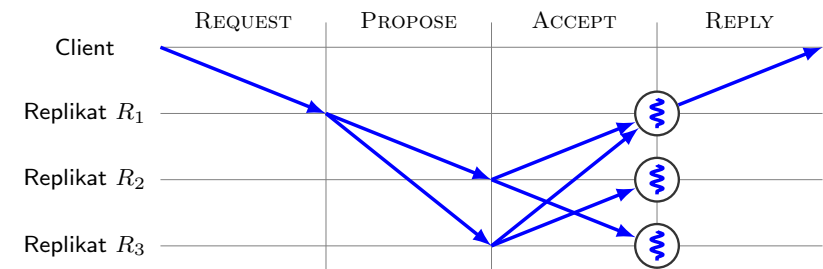
ACM Transactions on Computer Systems, 16(2):133–169, 1998.



Jonathan Kirsch and Yair Amir

Paxos for System Builders: An Overview

Proceedings of the 2nd Workshop on Large-Scale Distributed Systems and Middleware, pages 14–18, 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



■ Parallelisierung von Protokollinstanzen

- Ansatz
 - Anführer schickt neues PROPOSE während frühere Instanzen noch laufen
 - Beschränkung der maximalen Anzahl gleichzeitig ausgeführter Instanzen
 - Instanzen können in unterschiedlicher Reihenfolge fertig werden
 - Berücksichtigung der Sequenznummern bei Bearbeitung der Anfragen
- Vorteile
 - Keine Wartezeiten beim Eintreffen von Anfragen
 - Steigerung des Durchsatzes
- Nachteil: Erhöhter Aufwand für Konsistenzwahrung bei Anführerwechsel

■ Einigung mehrerer Anfragen pro Protokollinstanz (Batching)

- PROPOSE enthält {Sequenznummer, Anfrage₁, Anfrage₂, Anfrage₃, ...}
- Bearbeitung der Anfragen nach ihrer Position im PROPOSE
- Vorteil: Reduzierung des Aufwands je zu einigender Anfrage
- Nachteil: Verzögerung von Anfragen

