Verteilte Systeme

Verteilte Synchronisation

Sommersemester 2025

Tobias Distler

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

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

FAU FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Überblick

Motivation

- Zeit als **Mittel zur Reihenfolgebestimmung** (Beispiele)
  - Erkennung von Modifikationen an Dateien (z. B. bei make)
  - Protokollierung von Ereignissen zu Debugging-Zwecken
- Problem: **Völlig identische physikalische Uhren existieren nicht**
  - Unterschiedliche Offsets bei der Initialisierung
  - Abweichende Gangeschwindigkeiten (Frequenzfehler)
  - Umgebungseinflüsse (z. B. Bauteilalterung, Temperaturschwankungen)
- Beobachtungen in Bezug auf verteilte Systeme
  - Regelmäßige Synchronisierung von Uhren erforderlich
  - Physikalische Zeitstempel für manche Anwendungsfälle **zu grobgranular**
- Herausforderungen
  - Wie lassen sich physikalische Uhren möglichst präzise synchronisieren?
  - Wie können Ereignisse ohne physikalische Zeitstempel geordnet werden?
  - Wie können geordnete Ereignisse verteilte Synchronisationsprobleme lösen?

Überblick

Network Time Protocol (NTP)

- Network Time Protocol (NTP)
  - **Genauigkeit**
    - Lokales Netz < 1 ms
    - Weitverteiltes Netz ~ 10 ms
  - Implementierung
    - Einsatz von 64-Bit-Zeitstempeln
    - Kommunikation per UDP
  - Zusammenschluss von **Referenz-Servern** auf mehreren Hierarchiestufen (Strata)
    - Stratum 0 Zeitgeber (z.B. Atomuhren)
    - Stratum 1 Primäre NTP-Server
    - Stratum $i > 1$ Abhängige NTP-Server
  - Fehlertoleranz durch **Interaktion mit mehreren Referenz-Servern**

- Literatur

David L. Mills
Internet time synchronization: The network time protocol
IEEE Transactions on Communications, 39(10):1482–1493, 1991.

Architektur

- **Austausch von Zeitstempeln** mit mehreren Referenz-Servern *(Peers)*
- Verarbeitung von Zeitstempeln
  - Bestimmung eines **Referenzzeitstempels pro Peer** durch Filterung
  - Auswahl (vermeintlich) präziser Peers
  - Kombination der selektierten Informationen
- Aktualisierung des **Regelmechanismus der lokalen Uhr**

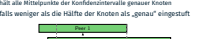
Sammlung und Aufbereitung von Messdaten

- **Durchführung von Messungen**
  - Weitergabe von Zeitstempeln per Nachrichtenaustausch zwischen Peers
  - Bestimmung der Nachrichtenlaufzeit $\delta = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$
  - **Abschätzung der Ihrenabweichung**
    - Offset zwischen zwei Uhren: $\theta = \frac{T_2 - T_1}{2} + \frac{T_3 - T_4}{2}$
    - Exakter Wert, falls Laufzeiten in beide Richtungen identisch
    - Maximaler Fehler bei asymmetrischen Laufzeiten: $\frac{\delta}{2}$

- **Filterung von Messwerten** für jeden Peer
  - Betrachtung der letzten 8 Wertpaare (δ, θ)
  - Bevorzugung von Messergebnissen mit kürzeren Nachrichtenlaufzeiten
  - Benachteiligung älterer Werte bei Abschätzung von Messfehlern

Auswahl und Kombination von Messdaten

- **Auswahl präziser Peers**
  - Trennung genauer Knoten (*„truechimers"*) von ungenauen (*„falsetichers"*)
  - Berücksichtigung von Messfehlern: **Einsatz von Konfidenzintervallen**
  - Suche nach einem Intervall X mit folgenden Eigenschaften
    - X ist vollständig in jedem Konfidenzintervall genauer Knoten enthalten
    - X enthält alle Mittelpunkte der Konfidenzintervalle genauer Knoten
  - Abbruch, falls weniger als die Hälfte der Knoten als „genau" eingestuft



- **Kombination der ausgewählten Offsets**
  - Bevorzugung von Peers mit kleinem Stratum
  - Berechnung eines gewichteten Mittelwerts der Offsets selektierter Peers

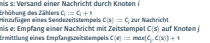
Verteilte Synchronisation

- Motivation
- Network Time Protocol (NTP)
- Logische Uhren
- Gegenseitiger Ausschluss

- Problemstellung
  - Erstellung einer **Ordnung auf Ereignisse** in einem verteilten System
  - Annahme: Physikalische Zeitstempel zu ungenau
- Lösungsansatz: Einsatz von **logischen Uhren**
  - Einführung einer „ereignete sich vor"-Relation $\rightarrow$" (*„happened before"*)
  - Bedingungen für verschiedene Ereignisse a, b und c
    - Falls sich a auf demselben Knoten wie b und vor b ereignete, dann $a \rightarrow b$
    - Falls a das Senden einer Nachricht ist und b ihr Empfang, dann $a \rightarrow b$
    - Falls $a \rightarrow b$ und $b \rightarrow c$ gilt, dann muss auch $a \rightarrow c$ gelten
  - Ereignisse a und b sind *nebenläufig*, falls $a \not\rightarrow b$ und $b \not\rightarrow a$ gilt
  - Praktische Umsetzung in Form von **Lamport-Uhren**
- Literatur

  Leslie Lamport
  Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system
  Communications of the ACM, 21(7):558–565, 1978.

- Annahmen
  - Jeder Knoten i im System verfügt über einen **Zähler** C_i („Uhr")
  - Relevante Ereignisse: Versand / Empfang von Nachrichten, lokale Aktionen
- Algorithmus
  - Lokale Aktionen führen jeweils zur **Erhöhung des Zählers** um 1
  - Ereignis s: Versand einer Nachricht durch Knoten i
    1. Erhöhung des Zählers $C_i := C_i + 1$
    2. Hinzufügen eines Sendezeitstempels $C(s) := C_i$ zur Nachricht
  - Ereignis e: Empfang einer Nachricht mit Zeitstempel $C(s)$ auf Knoten j
    1. Ermittlung eines Empfangszeitstempels $C(e) := max(C_j, C(s)) + 1$
    2. Setzen der lokalen Uhr auf $C_j := C(e)$



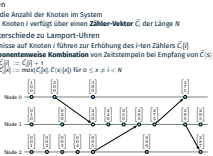
- Eigenschaften
  - Erzeugung einer **partiellen Ordnung** auf der Menge aller Ereignisse
  - Existenz von „gleichzeitigen" Ereignissen möglich
  - Zeitstempel (potentiell) kausal abhängiger Ereignisse
    - Annahme: Ereignis a hat Ereignis b beeinflusst
    - Folge: $C(a) < C(b)$
  - Kein Umkehrschluss von Zeitstempeln auf kausale Abhängigkeit möglich
    - Annahme: für zwei Zeitstempel $C(c)$ und $C(d)$ gilt $C(c) < C(d)$
    - Ereignis d kann von c (potentiell) beeinflusst worden sein oder auch nicht
- Erstellung einer **totalen Ordnung**
  - Vergabe einer eindeutigen ID i für jeden beteiligten Knoten
  - Zeitstempel (C_i, i): Kombination aus lokaler Zeit und Knoten-ID
  - Anordnung: $(C_i, i) \rightarrow (C_j, j) \Leftrightarrow (C_i < C_j \wedge i < j)$
  - Anwendungsbeispiel: Lock-Protokoll von Lamport [Siehe später]

- Problem bei Lamport-Uhren
  - Nutzung **derselben Zeitlinie** durch alle beteiligten Knoten
  - Zeitstempel lassen keine Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge zu
- Vektoruhren
  - Erweiterung des Lamport-Uhren-Prinzips
  - Verwaltung einer **eigenen Zeitlinie** für jeden beteiligten Knoten
- Literatur

Colin J. Fidge
Timestamps in message-passing systems that preserve the partial ordering
Proceedings of the 11th Australian Computer Science Conference (ACSC'88), S.55–66, 1988.

Friedemann Mattern
Virtual time and global states of distributed systems
Parallel and Distributed Algorithms, 1(C):215–226, 1989.

- Annahmen
  - N ist die Anzahl der Knoten im System
  - Jeder Knoten i verfügt über einen **Zähler-Vektor** $\vec{C}_i$ der Länge N
- Hauptunterschiede zu Lamport-Uhren
  - Ereignisse auf Knoten i führen zur Erhöhung des i-ten Zählers $\vec{C}_i[i]$
  - **komponentenweise Kombination** von Zeitstempeln bei Empfang von $\vec{C}$'s
    - $\vec{C}_i[i] := \vec{C}_i[i] + 1$
    - $\vec{C}_i[k] := \max(\vec{C}_i[k], \vec{C}(x)[k])$ für $0 \leq k \neq i < N$



- **Vergleich von Vektoruhren**
  - Einführung einer „ist kleiner als"-Relation „$<$" für Vektoruhren
  - $\vec{C}_i < \vec{C}_j \Leftrightarrow (\forall k : \vec{C}_i[k] \leq \vec{C}_j[k]) \wedge (\exists k : \vec{C}_i[k] < \vec{C}_j[k])$
- Identifizierung (potentiell) **kausal abhängiger Ereignisse** möglich
  - $\vec{C}(a) < \vec{C}(b)$ Ereignis b wurde eventuell von Ereignis a beeinflusst
  - $\vec{C}(a) \not< \vec{C}(b)$ Ereignisse a und b sind unabhängig voneinander
- Bestimmung der kausalen Vergangenheit eines Ereignisses

Gegenseitiger Ausschluss

- Problemstellung
  - Zugriff auf gemeinsame Ressourcen durch mehrere Knoten
  - Koordinierung des **Eintritts in einen kritischen Abschnitt**
  - Zu keinem Zeitpunkt darf mehr als ein Knoten die Eintrittserlaubnis haben
- Zusätzliche **Anforderungen in der Praxis** (Beispiele)
  - Fairness bei der Erteilung der Eintrittserlaubnis
  - Tolerierung von Knotenfehlern
  - Effiziente Nutzung des Netzwerks
  - Geringe Koordinierungsverzögerung zwischen
    - Zeitpunkt der Freigabe des kritischen Abschnitts durch einen Knoten und
    - Zeitpunkt des Betretens des Abschnitts durch einen anderen Knoten
- Herausforderungen
  - Einholen der Eintrittserlaubnis für den kritischen Abschnitt
  - **Korrektheit trotz Verteilung der Knoten** über unabhängige Rechner

Grundsätzliche Herangehensweisen

- Nutzung eines **zentralen Koordinators**
  - Erteilung von Eintrittserlaubnissen durch einen separaten Dienst
  - Bei Bedarf: Replikation des zentralen Koordinators
- **Tokenbasierte Algorithmen**
  - Eintrittserlaubnis wird durch eine Marke (*Token*) repräsentiert
  - Problem: Wie kommt ein eintrittswilliger Knoten in den Besitz der Marke?
- **Quorenbasierte Algorithmen**
  - Dezentraler Ansatz mit reduziertem Kommunikationsaufwand
  - Einholen der Erlaubnisse einer Untermenge von Knoten
- **Vollständig verteilte Algorithmen**
  - Einholen der Erlaubnisse aller Knoten des verteilten Systems
  - Beispiel: Lock-Protokoll von Lamport

Quorensysteme

- Charakteristika eines Quorensystems
  - Menge von Knotenmengen („Quoren")
  - **Quoren überschneiden sich paarweise** in mindestens einem Element
- Varianten und Spezialfälle
  - Zentraler Koordinator
  - Einzelnes Quorum mit allen Knoten
  - Alle Untermengen mit mehr als der Hälfte aller Knoten (*Mehrheitsquoren*)
  - **Gewichtete Mehrheitsquoren**
    - Jedem Knoten i wird ein Gewicht G_i zugewiesen
    - Gesamtgewicht aller Knoten $G_{gesamt} := \sum_i G_i$
    - Quoren: Alle Knotenmengen mit Gewicht $G_{Quorum} > \frac{G_{gesamt}}{2}$

Lock-Protokoll von Lamport

- **Annahmen**
  - Eindeutige und global bekannte Knoten-IDs ($\rightarrow$ totalgeordnete Ereignisse)
  - Zuverlässige Punkt-zu-Punkt-FIFO-Verbindungen zwischen allen Knoten
  - Keine Knotenausfälle
- **Funktionsweise** (Sideways to the Disney)
  - Austausch von Lamport-Uhr-Zeitstempeln mittels Nachrichten
    - REQUEST Antrag auf Eintritt in den kritischen Abschnitt
    - ACK Bestätigung des Empfangs einer REQUEST-Nachricht
    - RELEASE Bekanntgabe des Austritts aus dem kritischen Abschnitt
  - Bewilligung eines Antrags mit Zeitstempel (C_i, i) von Knoten i, sobald
    1. es ist kein unbewilligter Antrag mit kleinerem Zeitstempel lokal bekannt
    2. Für alle von anderen Knoten j empfangenen Zeitstempel gilt $(C_i, i) < (C_j, j)$
- Literatur

Leslie Lamport
Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system
Communications of the ACM, 21(7):558–565, 1978.