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 Ganggeschwindigkeiten (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?

Konvergenz-Algorithmus CNV

- Problemstellung
  - Uhrensynchronisation trotz fehlerhafter Protokollteilnehmer
  - Fehlermodell
    - Bis zu f der insgesamt n Rechner können *byzantinisch* fehlerhaft sein
    - Fehlerhafte Rechner senden eventuell (absichtlich) falsche Zeitwerte
  - Abweichung der Uhren korrekter Rechner soll höchstens δ betragen
- Konvergenz-Algorithmus CNV
  - Periodische Kombination der Uhrzeiten verschiedener Rechner
  - Bestimmung der Uhrzeit eines entfernten Rechners
    - Abschätzung der Differenz zwischen der lokalen und der entfernten Uhr
    - Berechnung des absoluten Werts bei Bedarf: Aktuelle lokale Zeit + Differenz
  - Für Korrektheit erforderliche Anzahl an Teilnehmern: $n > 3f$
- Literatur

Leslie Lamport and P. M. Melliar-Smith
Synchronizing clocks in the presence of faults
Journal of the ACM, 32(1):52–78, 1985.

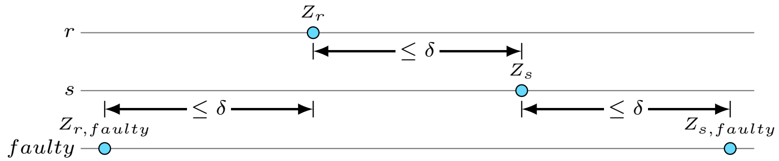
Funktionsweise

- Variablen
  - Z_r Lokale Uhrzeit des Rechners r
  - $Z_{r,s}$ Sicht von Rechner r auf die aktuelle Uhrzeit von Rechner s
- Annahmen
  - Initial: Die Uhrzeiten aller Rechner unterscheiden sich um höchstens δ
  - Vernachlässigbar
    - Ausführungsdauer des Algorithmus
    - Taktratenunterschiede zwischen den Uhren korrekter Rechner
    - Ungenauigkeit beim Auslesen der Uhrzeit eines korrekten Rechners
- Algorithmus für einen Rechner r

1. Aktualisierung der Sicht auf die Uhrzeiten $Z_{r,i}$ jedes anderen Rechners i
2. Identifizierung und Unterdrückung von Ausreißern
   - Kategorisierung als Ausreißer, falls $|Z_r - Z_{r,i}| > \delta$
   - Ersetzen durch lokale Uhrzeit: $Z_{r,i} := Z_r$
3. Aktualisierung der eigenen Uhrzeit durch Mittelwertbildung: $Z_r := \frac{\sum_i Z_{r,i}}{n}$

Korrektheit

- Abweichungen zwischen den Sichten korrekter Rechner r und s
  - Sicht auf die Uhr eines korrekten Rechners: $Z_{r,correct} \approx Z_{s,correct}$
  - Sicht auf die Uhr eines fehlerhaften Rechners: $|Z_{r,faulty} - Z_{s,faulty}| \leq 3\delta$



- Maximale Abweichung der lokalen Uhrzeiten nach der Aktualisierung

$$|Z_r - Z_s| = \left| \frac{(n-f) \cdot Z_{r,correct} + f \cdot Z_{r,faulty}}{n} - \frac{(n-f) \cdot Z_{s,correct} + f \cdot Z_{s,faulty}}{n} \right|$$

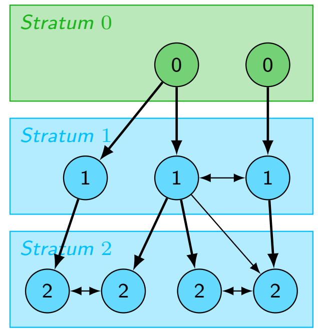
$$\approx \left| \frac{f \cdot Z_{r,faulty}}{n} - \frac{f \cdot Z_{s,faulty}}{n} \right| = \frac{f}{n} \cdot |Z_{r,faulty} - Z_{s,faulty}|$$

$$\leq \frac{f}{n} \cdot 3\delta = \frac{3f}{n} \cdot \delta$$

$\Rightarrow$ Für $n > 3f$: $|Z_r - Z_s| < \delta$

Network Time Protocol (NTP)

- Network Time Protocol (NTP)
  - Genauigkeit
    - Lokales Netz $<$ 1 ms
    - Weitverteiltes Netz $\sim$ 10 ms
  - Implementierung
    - Einsatz von 64-Bit-Zeitstempeln
    - Kommunikaton 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

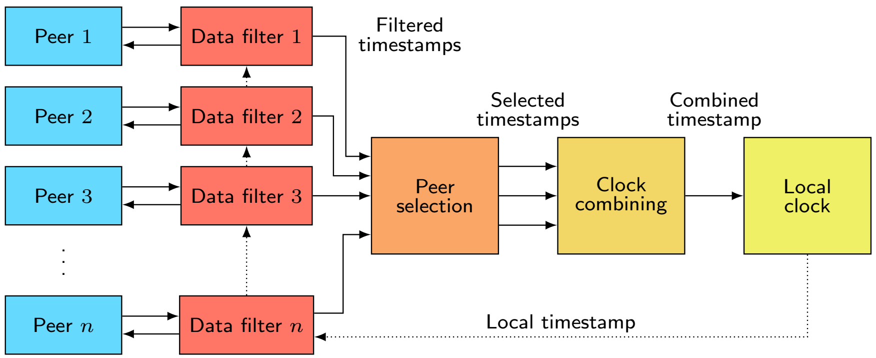


- Literatur

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

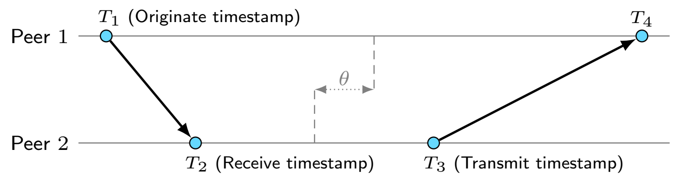
Architektur

- 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

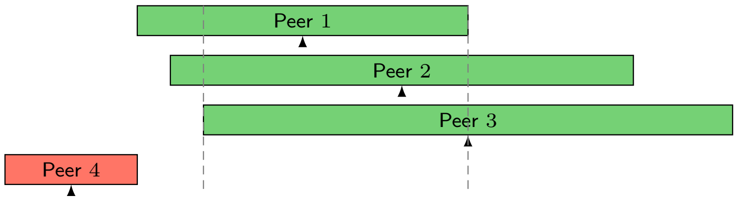
- Durchführung von Messungen
  - Weitergabe von Zeitstempeln per Nachrichtenaustausch zwischen Peers
  - Bestimmung der Nachrichtenlaufzeit $\delta = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$
  - Abschätzung der Uhrenabweichung
    - Offset zwischen zwei Uhren: $\theta = \frac{T_2+T_3}{2} - \frac{T_1+T_4}{2}$
    - 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 („*falsetickers*“)
  - Berücksichtigung von Messfehlern durch 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 Zeitstempel
  - Bevorzugung von Peers mit kleinem Stratum
  - Berechnung eines gewichteten Mittelwerts der Offsets selektierter Peers

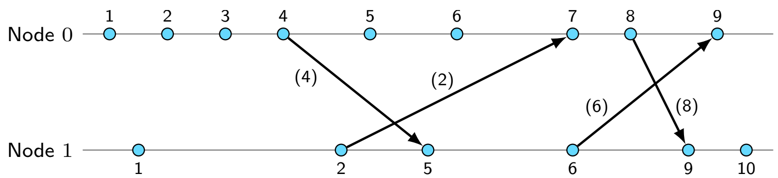
Logische Uhren

- 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 $a \nrightarrow b$ und $b \nrightarrow a$ 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.

Lamport-Uhren — Funktionsweise

- 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 $C\langle s\rangle := C_i$ zur Nachricht
  - Ereignis e: Empfang einer Nachricht mit Zeitstempel $C\langle s\rangle$ auf Knoten j
    1. Ermittlung eines Empfangszeitstempels $C\langle e\rangle := max(C_j, C\langle s\rangle) + 1$
    2. Setzen der lokalen Uhr auf $C_j := C\langle e\rangle$



Lamport-Uhren — Ordnungen

- 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: $C\langle a\rangle < C\langle b\rangle$
  - Kein Umkehrschluss von Zeitstempeln auf kausale Abhängigkeit möglich
    - Annahme: Für zwei Zeitstempel $C\langle c\rangle$ und $C\langle d\rangle$ gilt $C\langle c\rangle < C\langle d\rangle$
    - 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: $(C_i, i) < (C_j, j) \Leftrightarrow C_i < C_j \vee (C_i = C_j \wedge i < j)$
  - Anwendungsbeispiel: *Lamport-Locks* [Siehe 6. Übungsaufgabe]

Vektoruhren — Überblick

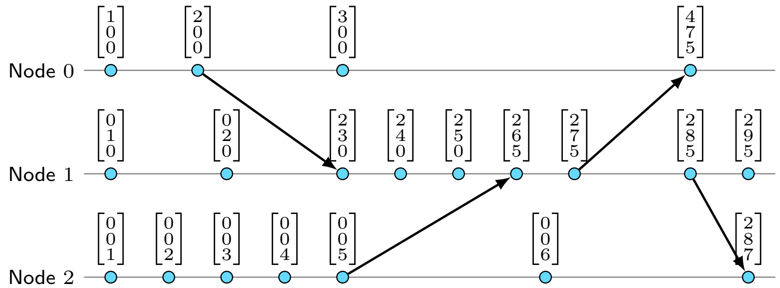
- Problem bei Lamport-Uhren
  - Nutzung derselben Zeitlinie durch alle beteiligten Knoten
  - Zeitstempel lassen keine Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge zu
- Vektoruhren
  - Erweiterung des Lamport-Uhren-Prinzips
  - Verwaltung einer eigenen Zeitlinie für jeden beteiligten Knoten
- Literatur

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(23):215–226, 1989.

Vektoruhren — Funktionsweise

- 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 $\vec{C}\langle s\rangle$
    - $\vec{C}_i[i] := \vec{C}_i[i] + 1$
    - $\vec{C}_i[x] := max(\vec{C}_i[x], \vec{C}\langle s\rangle[x])$ für $0 \leq x \neq i < N$



Vektoruhren — Kausale Ordnung

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