Überblick

Zeit – Überblick

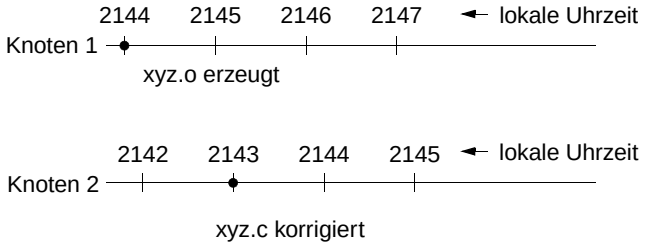
- Uhrensynchronisation
- Zeit im Verteilten System
- Logische Uhren
- Synchronisation von physikalischen Uhren
  - Konvergenz-Algorithmus - CNV
  - Network Time Protocol - NTP

Uhrensynchronisation

- Notwendigkeit von Uhrensynchronisation
  - Zeit als Mittel der Reihenfolgebestimmung
- Probleme der Uhrensynchronisation
- Logische Uhren
  - Lamport-Uhren
  - Vektoruhren
- Synchronisation von physikalischen Uhren
  - Grundlagen
  - Konvergenzalgorithmus CNV
  - Network Time Protocol NTP

Zeit als Mittel der Reihenfolgebestimmung

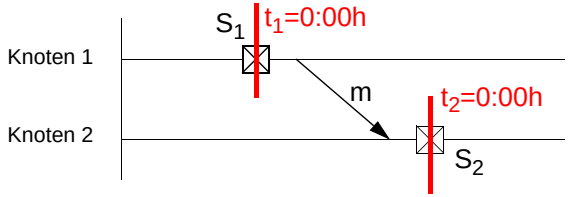
- Beispiel: `make`



⇒ Modifikation von `xyz.c` durch Knoten 2 wird nicht erkannt
⇒ Die Datei wird nicht neu übersetzt!

Zeit als Mittel der Reihenfolgebestimmung

- Beispiel: Verteilte Zustandssicherung
  - Gegeben: Verteiltes System aus interagierenden Knoten
  - Für eine konsistente Zustandsicherung soll bei allen Knoten zu festgelegter Uhrzeit der Zustand gesichert werden
  - Problem: Inkonsistente Sicherungspunkte möglich, falls die lokalen Uhren voneinander abweichen:



⇒ Auswirkung der Nachricht `m` in S_2 enthalten, aber nicht in S_1!

Probleme der Uhrensynchronisation

- Es gibt keine völlig identischen physikalische Uhren
  - Abweichende Initialisierung (konstantes Offset)
  - Abweichende Ganggeschwindigkeit (Frequenzfehler)
  - Umgebungseinflüsse (z.B. Bauteilalterung, **Temperaturabhängigkeit**)

  ⇒ Ohne Synchronisierung kann Fehler immer größer werden!
- Gemeinsame Uhr für alle Knoten eines verteilten Systems (meist) nicht realisierbar
- „Zentrale Referenzuhren“ (Funk, z.B. Langwellensender DCF77 in Mainflingen, amerikanischer Kurzwellensender WWV in Fort Collins, GPS) nur mit technisch beschränkter Genauigkeit

Logische Uhren

- Grundidee (Logische Uhren nach Lamport):

  Aussagen zur Reihenfolge unterschiedlicher Ereignisse
  - Nur benötigt, wenn eine Interaktion zwischen einzelnen Komponenten des verteilten Systems erfolgt ist!
  - Eine Aktion b, die logisch durch die Interaktion bedingt „nach“ einer Aktion a stattfindet, soll stets den größeren Zeitstempel tragen

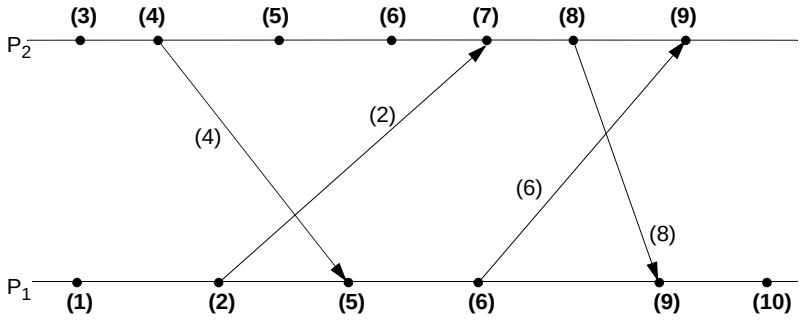
  ⇒ Synchronisation bei Kommunikation
- Anmerkung: Die im Folgenden beschriebenen Verfahren setzen voraus, dass die Kommunikation nur durch Nachrichtenaustausch über ein Kommunikationsnetz erfolgt

Logische Uhren

- Beschreibung des Algorithmus: Jeder Prozess i verfügt über einen Zähler C_i *(„Uhr“)*, der auf folgende Weise zählt:
  - Bei Ausführung einer lokalen Aktion und bei Ausführung einer Sende-Aktion durch Prozess i wird seine Uhr C_i um 1 erhöht; die Aktion bekommt den Wert nach dem Erhöhen als Zeitstempel
  - Jede Nachricht m trägt als Zeitstempel t_m den Zeitstempel der Sendeaktion
  - Bei Empfang einer Nachricht durch Prozess i bei lokalem Uhrenstand C_i und empfangenem Zeitstempel t_m wird die lokale Uhr auf $max(C_i, t_m) + 1$ gestellt und dieser Wert als Zeitstempel des Empfangsereignis verwendet

Logische Uhren

- Beispiel für zwei Prozesse P_1 und P_2



Logische Uhren

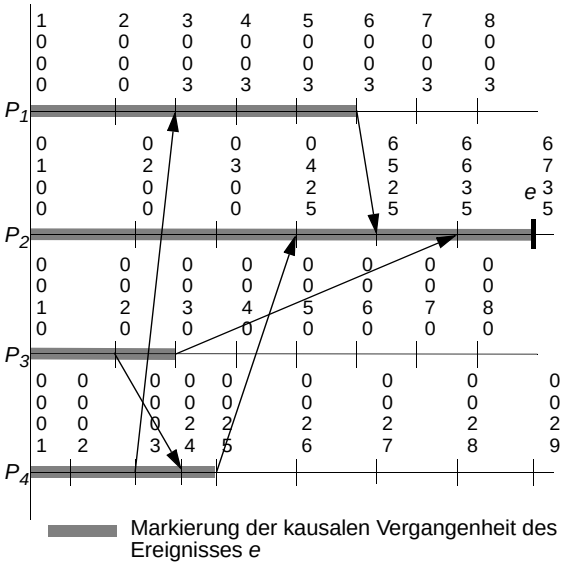
- Eigenschaften
  - Potentielle kausale Abhängigkeit eines Ereignisse E_2 von einem Ereignis E_1 [Kurznotation: $E_1 \rightarrow E_2$]:
    $$E_1 \rightarrow E_2 \Rightarrow t(E_1) < t(E_2)$$
  - Die Umkehrung
    $$t(E_1) < t(E_2) \Rightarrow E_1 \rightarrow E2$$
    gilt nicht!
  - Die Zeitstempel erzeugen eine **partielle** Ordnung auf der Menge aller Ereignisse. (Es gibt Ereignisse die „gleichzeitig“ auftreten und somit nicht geordnet werden können.)
- Ergänzung zu vollständiger Ordnung
  - Jeder Prozess erhält eindeutige Identifikation
  - Zeitstempel bestehend aus Prozess i und lokaler Zeit C_i.
  - Anordnung:
    $$(C_i, i) < (C_k, k) \Leftrightarrow C_i < C_k \text{ oder } (C_i = C_k \text{ und } i < k)$$

Logische Uhren — Vektoruhren

- Jeder Knoten besitzt nun eine lokale Uhr, die aus einem Vektor der Länge N (= Anzahl der vorhandenen Knoten) besteht
- Implementierung:
  1. Initialisierung jedes Zeitvektors mit dem Nullvektor.
  2. Bei jedem lokalen Ereignis eines Prozesses P_i wird dessen Komponente in seinem Zeitvektor inkrementiert: $C_i[i]++$
  3. Ein Prozess P_i, der eine Nachricht empfängt, inkrementiert seine Komponente im Zeitvektor und kombiniert diesen danach komponentenweise mit dem empfangenen Zeitvektor t:

$$C_i[i]++$$
$$\text{für } k = 1 \ldots N: \quad C_i[k] := max(C_i[k]; t[k])$$

Logische Uhren



Logische Uhren

- Eigenschaften
  - Erzeugt eine kausale Ordnung: $t(E_1) < t(E_2) \Leftrightarrow E_1 \rightarrow E_2$

    Definition von $<$ mit $t(E_1) := (a_1, ..., a_n)$ und $t(E_2) := (b_1, ..., b_n)$:

    $$t(E_1) < t(E_2) \Leftrightarrow (\forall i : a_i \leq b_i) \wedge (\exists i : a_i < b_i)$$

- Vorteil
  - Exakte Aussage zum kausalen Zusammenhang von Ereignissen mit Hilfe des Zeitstempels möglich
- Nachteil
  - Hoher Kommunikationsaufwand (Vektor aus N Elementen in jeder Nachricht; skaliert schlecht für großes N!)

Synchronisation von physikalischen Uhren

- Physikalische Zeit basierend auf Atom-Sekunde: *TAI*
  - „Die Sekunde ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung“

    [Gültige Definition seit 1967, davor über Erdrotation (bis 1956) bzw. über Erdumlaufzeit um die Sonne festgelegt.]
  - Genauigkeit von Cs-Uhren: bis ca. 10^{-14} (entspricht ca. $0.8ns$/Tag!)
- Verbreitung der amtlichen Zeit: Normalfrequenz/Zeitzeichensender
  - Langwelle: z.B. DCF77 (Mainflingen, D); WWVB (Boulder, US); maximale Genauigkeit bis ca. $50\mu s$
  - Kurzwelle: z.B. WWV (Colorado), WWVH (Hawaii); maximale Genauigkeit bis ca. $1ms$
  - GPS-Satelliten: maximale Genauigkeit ca. $0.3\mu s$

Synchronisation von physikalischen Uhren

- Softwarebasierte Synchronisation
  - Master-/Slave mit Verteilung einer Referenzzeit (broadcast oder poll)
  - Einigungsverfahren
- Charakterisierungsmöglichkeiten von Algorithmen
  - Monotonie (Zeitsprünge bei Korrekturen?)
  - Synchronisation mit der amtlichen Zeit
  - Robustheit gegen Netzpartitionierung
  - Fehlertoleranz gegen falsch gehende Referenzuhren
  - Referenztreue
  - Erzeugte Netzlast
  - Fehleraussage

Konvergenz-Algorithmus CNV

- Aufgabe des Algorithmus
  - Vermeidung einer Akkumulation einer immer größer werdenden Abweichung zwischen mehreren Uhren
- Ablauf
  - Jeder Prozess liest die Uhr jedes anderen Prozesses
  - Er stellt seine eigene Uhr auf den Mittelwert, wobei für Uhren, die **mehr** als eine festgelegte Schranke δ von der eigenen abweichen, der Wert der **eigenen** Uhr genommen wird
  - Die gewünschten Eigenschaften (Konvergenz gegen eine gemeinsame Uhrzeit, Tolerierung von fehlerhaften Uhren) werden erfüllt, wenn weniger als ein Drittel der Uhren fehlerhaft ist

Konvergenz-Algorithmus CNV

- Annahmen
  - Benötigt $n > 3m$ Prozesse, um m fehlerhafte Prozesse zu tolerieren
  - Initial sind alle Prozesse auf in etwa die gleiche Uhrzeit synchronisiert (Fehler kleiner als δ)
  - Die Uhren aller korrekten Prozesse laufen mit in etwa der korrekten Rate
  - Ein korrekter Prozess kann die Uhr eines anderen korrekten Prozess mit (vernachlässigbar) kleinem maximalen Fehler ϵ lesen
- Ziel
  - Zu jeder Zeit sollen alle korrekten Prozesse in etwa die gleiche Uhrzeit haben (Fehler kleiner als δ)

Konvergenz-Algorithmus CNV

- Plausibilitätsbetrachtung
  - Definitionen
    - p, q seien fehlerfreie Prozesse, r irgendein Prozess
    - $C_{p,q}$ sei die Uhrzeit von q, so wie sie p bekannt ist
  - Es gilt:
    - r fehlerfrei $\Rightarrow C_{p,r} \approx C_{q,r}$
    - r fehlerhaft $\Rightarrow |C_{p,r} - C_{q,r}| < 3\delta$
  - Alle Prozesse p stellen ihre Uhr auf $\sum_i (C_{p,i})/n$

Konvergenz-Algorithmus CNV

- Plausibilitätsbetrachtung
  - Schlechtester Fall:

$$\begin{array}{c}\text{(n-m)-mal } (C_{p,i} - C_{q,i}) \approx 0 \\ \text{m-mal } (C_{p,i} - C_{q,i}) < 3\delta\end{array}$$

  - Also: neue Differenz zwischen p und q ist $(3m/n) * \delta$
    Mit $n > 3m$ folgt: neue Differenz $< \delta$
  - Vernachlässigt sind dabei
    - die Zeit für die Ausführung des Algorithmus sowie
    - Fehler durch nicht gleichzeitiges Ablesen der Uhren

Das Network Time Protocol – NTP

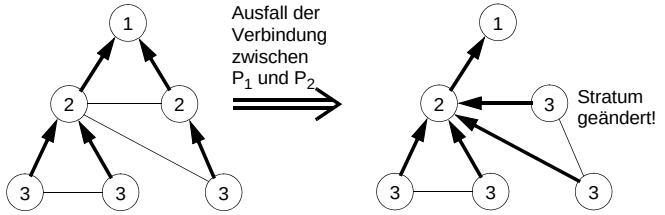
- Ausführliche Informationen zu NTP
  - `http://www.ntp.org` (Offizielle NTP-Homepage)
  - `http://www.eecis.udel.edu/~mills` (Homepage David Mills)
- Geschichte
  - Entwickelt seit 1982 (NTPv1, RFC 1059) unter Leitung von D. Mills
  - Seit 1990 NTPv3 (teilweise immer noch in Verwendung)
  - Aktuelle Version NTPv4, seit 1994
- Eigenschaften von NTP
  - Zweck: Synchronisierung von Rechneruhren im bestehenden Internet
  - Derzeit weit über 100.000 NTP-Knoten weltweit
    - 151 aktive öffentliche Stratum 1 - Knoten (Stand Okt. 2005)
    - 208 aktive öffentliche Stratum 2 - Knoten
  - Erreichbare Genauigkeiten von ca. $10ms$ in WANs; $< 1ms$ in LANs
  - NTP-Dämon auf fast allen Rechnerplattformen verfügbar, von PCs bis Crays; Unix, Windows, OS X, eingebettete Systeme
  - Fehlertolerant

Das Network Time Protocol – NTP

- Grundlegender Überblick
  - Primäre Server (*Stratum 1*), über Funk oder Standleitungen an amtliche Zeitstandards angebunden
  - Synchronisation weiterer Knoten nach primären Servern über ein selbstorganisierendes, hierarchisches Netz
  - Verschiedene Betriebsarten (Master/Slave, symmetrische Synchronisation, Multicast, jeweils mit/ohne Authentisierung)
  - Zuverlässigkeit durch redundante Server und Netzpfade
  - Optimierte Algorithmen, um Fehler durch Jitter, wechselnde Referenzuhren und fehlerhafte Server zu reduzieren
  - Lokale Uhren werden in Zeit und Frequenz durch einen adaptiven Algorithmus geregelt

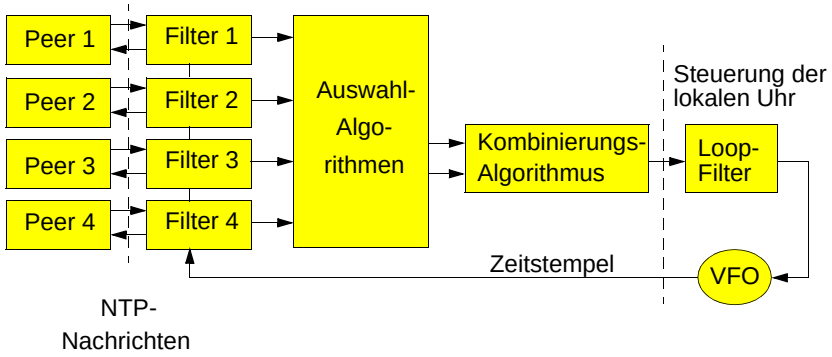
Das Network Time Protocol – NTP

- Stratum:
  - 1: primärer Zeitgeber
  - $i > 1$: synchronisiert mit Zeitgeber des Stratums $i - 1$
- Stratum kann dynamisch wechseln:



Das Network Time Protocol – NTP

- Architektur-Überblick

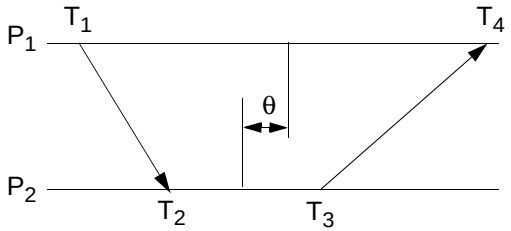


Das Network Time Protocol – NTP

- **Mehrere Referenzserver** („Peer") für Redundanz und Fehlerstreuung
- **Peer-Filter** wählen pro Referenzserver den jeweils besten Wert aus den **acht** letzten Offset-Messwerten aus
- Die **Auswahlalgorithmen** versuchen zunächst richtig gehende Uhren („*truechimers*") zu erkennen und falsche Uhren („*falsetickers*") herauszufiltern, und wählen dann möglichst genaue Referenzuhren aus
- Der **Kombinationsalgorithmus** berechnet einen gewichteten Mittelwert der Offset-Werte (frühere NTP-Versionen wählen einfach den am vertrauenswürdigsten erscheinenden Referenzknoten aus)
- **Loop Filter** und **VFO** (Variable Frequency Oscillator) bilden zusammen die geregelte lokale Uhr. Die Regelung ist so entworfen, dass Jitter und Drift bei der Regelung minimiert werden

Das Network Time Protocol – NTP

- Offset-Messung
  - Es werden die letzten 8 Messungen gespeichert; Index $i = 0$: neueste Messung



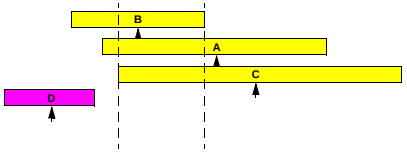
  - Reine Nachrichtenlaufzeit: $\delta = (T4 - T1) - (T3 - T2)$
  - Geschätztes Offset: $\theta = (T_2 + T_3)/2 - (T_1 + T_4)/2$
    - Exakter Wert, falls Laufzeiten in beide Richtungen gleich sind
    - Maximaler Fehler bei unsymmetrischen Laufzeiten: $\delta/2$

Das Network Time Protocol – NTP

- Peer-Filter-Algorithmus
  - Getrennte Ausführung pro Peer
  - Bei jeder Messung ermittelte Werte:
    - Offset θ, Laufzeit δ
    - Abschätzung des Messfehlers: $\epsilon = \mathit{Lesegenauigkeit} + \mathit{MAXDRIFT} * (T4 - T1)$
  - Eingetragene Messwerte werden in einen Puffer eingetragen
    - Speicherung der letzten 8 Messwerte
    - Aktualisierung der Fehlerabschätzung ϵ bei jeder neuen Messung um den möglichen Fehler durch Alterung (Uhrendrift)

      $i = 7...1 : (\delta_i, \theta_i, \epsilon_i) = (\delta_{i-1}, \theta_{i-1}, \epsilon_{i-1} + \mathit{MAXDRIFT} * \mathit{verstrichene\ Zeit})$
      $i = 0 : (\delta_0, \theta_0, \epsilon_0) = \mathit{neuer\ Messwert}$
  - Weitere Verarbeitung der Messwerte und Ermittlung eines *Korrektheitsintervalls* für den Peer

Das Network Time Protocol – NTP



- Auswahl-Algorithmus
  - Trennung von „truechimers" und „falsetickers"
  - DTS (Digital Time Service, Vorgänger-Algorithmus, einfacher): Ermittle Durchschnitt mit den meisten überlappenden Korrektheitsintervallen. Mittelpunkt des Intervalls wird als Offset zur Uhrenkorrektur verwendet.
  - Ziel bei NTP: Auswahl des Intervalls so, dass die Mittelpunkte der Intervalle der als korrekt betrachteten Knoten im Intervall liegen

Das Network Time Protocol – NTP

- Kombinierungsalgorithmus
  - Weiteres Aussortieren vergleichsweise schlechter Referenzen, bevorzugte Selektion von Referenzen mit kleinem Stratum
    → Zusammenstellung einer nach Qualität sortierten Liste von Referenzen (beste Referenz steht vorne)
  - Die übrig bleibenden Knoten werden zur Synchronisation verwendet
    - Einfache Variante: Falls der bisherige Referenzknoten sich in der Liste befindet, wird dieser weiterhin zur Synchronisation verwendet; ansonsten wird der Knoten am Anfang der Liste zum neuen Synchronisationsknoten
    - Komplexe Variante (NTPv4): Berechnung eines gewichteten Mittelwerts der Offsets aus allen Knoten
  - Das so ermittelte Offset wird an die Uhrenregelung (*Clock disciplin algorithm*) weitergegeben

Zusammenfassung

- Zeit in verteilten Systemen ist ein zentrale Herausforderung
- Wenn Aussagen zur kausalen Ordnung von Ereignissen benötigt werden, bietet sich der Einsatz von logischen Uhren an
  - Logische Uhren nach Lamport, erweiterbar zu einer totalen Ordnung auf alle Ereignisse, die kausale Beziehungen respektiert
  - Vektoruhren zur exakten Erfassung von kausalen Beziehungen
- Das Network Time Protocol (NTP) bietet die Möglichkeit, lokale Uhren mit für viele Zwecke ausreichender Genauigkeit an die offizielle Zeit zu synchronisieren
  - Hierarchisches Synchronisationsnetz
  - Selbstorganisierend und fehlertolerant