

Verteilte Systeme

R. Kaiser, R. Kröger, O. Hahm

(HTTP: <http://www.cs.hs-rm.de/~kaiser>
E-Mail: eobert.kaiser@hs-rm.de)

Kai Beckmann
Sebastian Flothow
Alexander Schönborn

Sommersemester 2021

7. Globale Zeit / Uhrensynchronisation



http://www.bikersnews.de/motorrad/test+und+technik/im+sog_162.html

Inhalt

7. Globale Zeit / Uhrensynchronisation

7.1 Einführung

7.2 Zeitbegriff und Zeitsysteme

7.3 Rechneruhren

7.4 Synchronisationsprotokolle

7.5 Logische Zeitmarken

Einführung

Probleme mit nicht-synchronisierten Rechneruhren

- Zeitstempel von Dateien (make)
- zeitgesteuertes Ausführen von Aufträgen (cron)
- TDMA-basierte Medienzugriffsverfahren

Motivation

- Etablierung von systemweiter Zeit in verteilten Systemen
- Synchronität mit realer Außenzeit

Zielsetzung

- Synchronisation von Rechneruhren

Einführung (2)

Anwendungen

- korrekte Funktion zeitbezogener lokaler und verteilter Anwendungen
- korrektes Ordnen von Ereignissen in verteilten Systemen
- Leistungsmessung in verteilten Systemen
- verteilte Echtzeitsysteme einschl. Synchronität mit realer Außenzeit

Zeitbegriff und Zeitsysteme

Verschiedene Zeitbegriffe im Laufe der Geschichte Astronomische Zeit

- basiert auf der gleichförmigen Bewegung von Himmelskörpern und deren Beobachtung
- Sonnenzeit
 - ▶ mittlere Dauer einer Erdumdrehung
 - ▶ Sonnentag: Zenit-Zenit (bis 1956)
 - ▶ $1 \text{ Sek} = \frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60} \text{ Sonnentag}$
 - ▶ wenig stabil (Abbremsung der Erdrotation, Schwankungen durch Massenverlagerungen)
- Sternzeit
 - ▶ mittlere Dauer der Umlaufzeit der Erde um die Sonne
 - ▶ $1 \text{ Sek} = \frac{1}{31.556.925,9747} \text{ Teil des trop. Jahres 1900 (ab 1957)}$

Physikalische Zeit

basiert auf (periodischen) physikalischen Prozessen klassische Beispiele:

- Kerzenuhr (Verbrennen von Wachs)
- Pendeluhr, Genauigkeit best: 10^{-7}
- Quarzuhr, Genauigkeit best: 10^{-9} , typisch: $10^{-5} \dots 10^{-6}$

Atomuhr

- Definition im SI-Einheitensystem (ab 1967):
„Die Sekunde ist das 9.192.631.770fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.“
- Cäsium-133-Uhr, Genauigkeit best: 10^{-14} , typisch: 10^{-13} ($< 1\mu\text{s}$ pro Jahr)
- Caesium-Fontäne, Genauigkeit $< 10^{-15}$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) *

Hochschule RheinMain

- in Braunschweig
- Betrieb mehrerer Atomuhren (CS1-CS4, CSF1)
- Verantwortung für die gesetzliche Zeit in D (ab 1978)
- Betrieb von Verteildiensten



<https://www.meinberg.de/images/xatomuhr.jpg.pagespeed.ic.3l8wJGqj54.jpg>

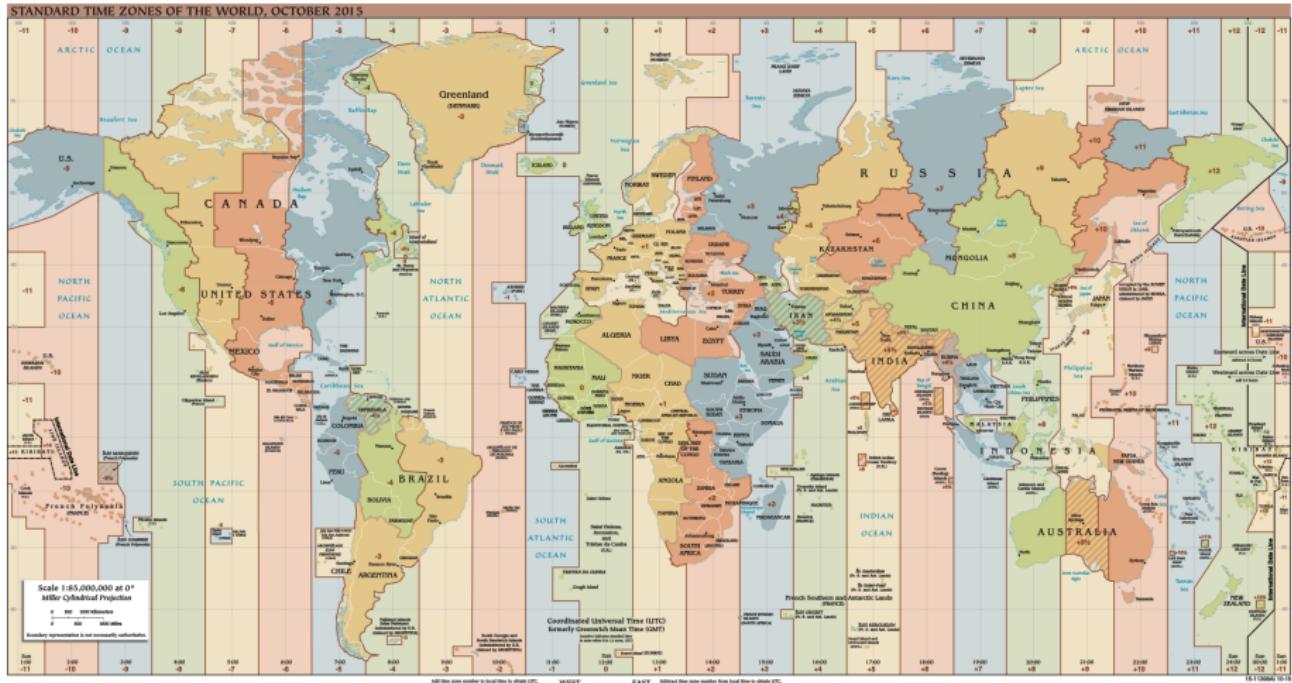
Foto: PTB

Zeitsysteme

GMT: Greenwich Mean Time

- Lokale Ortszeitangaben (wahre und mittlere) üblich bis ca. 1880
- Probleme für Eisenbahn-Fahrpläne
- „Greenwich Mean Time“ gesetzliche Standardzeit in England ab 1880
- Ab 1.06.1891: deutsche und österreichisch/ungarische Eisenbahnverwaltungen führen die Zeit des 15. Längengrads als *mitteleuropäische Eisenbahn-Zeit (M. E. Z.)* ein.
- Deutsches Reich: gesetzliche Uhrzeit ab 1.04.1893 ist „die mittlere Sonnenzeit des fünfzehnten Längengrades östlich von Greenwich“
- Meridiankonferenz Washington 1884 definiert Greenwich als Null-Meridian und führt Zeitzonen ein →GMT Sonnenzeit
- ab 1.1.1925 Beginn des Tags um Mitternacht (für Astronomen bis dahin mittags)

Zeitzonen



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Time_Zones_of_the_World_\(October_2015\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Time_Zones_of_the_World_(October_2015).svg)

Zeitsysteme (2)

UT: Universal Time

- Weltzeit abgeleitet aus Sternzeit (ab 1957) am Null-Meridian
- UT1: Berücksichtigung der Polschwankungen

TAI: Temps Atomique International

- mittlere Atomzeit seit 1.1.1958
- Betrieb von ca. 250 Atomuhren weltweit
- weltweit koordiniert durch Bureau International de l'Heure (BIH)

UTC: Coordinated Universal Time

- heutiger Zeitstandard (ab 1972)
- basiert auf TAI, aber Anpassungen an UT1 durch „Schaltsekunde“ bei mehr als 900 ms Unterschied
- Abweichung: 1 Sek in 300.000 Jahren

Zeitverteildienste

Historisch

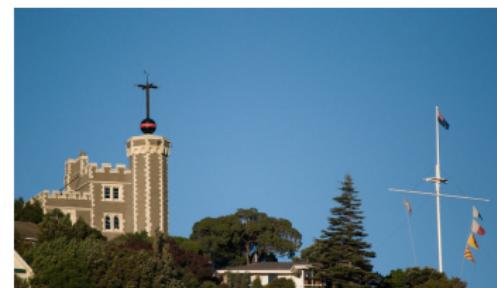
- One O'Clock Gun



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/One_O'Clock_Gun.JPG

- ▶ **Problem:**
Schalllaufzeit

- Zeitball



<https://www.flickr.com/photos/fliessphil/2530153597/>

- ▶ **Problem:** Sichtverbindung
notwendig

Zeitverteildienste (2)

Langwellen-Radiosender

- z.B. in D: DCF77 (77.5 kHz, Frankfurt/Mainflingen)
- basierend auf Atomuhr CS-2 der PTB
- Sekudentakt
- aufmodulierter voller BCD-Zeitcode (58 Bit) in jeder Minute
- Genauigkeit
 - ▶ $2 \cdot 10^{-13}$ gemittelt über 100 Tage
 - ▶ 1-10 msec je Sek. (atmosphärische Störungen)

GOES Satellitensystem

- Geostationary Operational Environment Satellite
- Genauigkeit ca. 0.5 msec
- Dienst der NOAA von 1974 bis 2004

Zeitverteildienste (3)

GPS-Satellitensystem als Basis

- Global Positioning System, primär militärisch
- 24 Satelliten, Umlaufzeit 12 h, mind. 4 jederzeit „sichtbar“
- Cäsium-Uhren an Bord
- Synchronisation gegenüber Uhren anderer Satelliten durch Bodenstation auf ± 5 ns genau
- Standortbestimmung durch Unterschiede in Signallaufzeiten ($5\text{ns} \cong 1.5\text{m}$ mil.; $1\mu\text{s} \cong 300\text{m}$ zivil)
- künstliche Ungenauigkeiten in Krisenzeiten
- Differentielles GPS nutzt zusätzlich Bodenstationen mit bekannten Standorten (Geodäsie)

GPS-basierte Uhr

- GPS-Signal als Referenz einer PLL-Schaltung
- hochgenaue Sekundenimpulse (pps pulse-per-second)
- typ. Genauigkeit: ca. $1\mu\text{s}$

Zeitverteildienste (4)

Galileo-Satellitensystem der EU/ESA

- europäisches, zu GPS kompatibles System (GPS III)
- bis zu 30 Satelliten
 - ▶ mit je 2 Atomuhren
 - ▶ senden Zeitsignal und Positionsdaten
 - ▶ globale Abdeckung
- Dienste
 - ▶ kostenloser Dienst für Ortung, Navigation, Zeitsynchronisation (Genauigkeit ca. 4 m horizontal, 8 m vertikal)
 - ▶ kommerzieller Dienst (Genauigkeit 1 m, Bewegungen 0.2 m/sec) (Vermessungswesen, Netzsynchronisation, Flottenmanagement)
 - ▶ Safety-of-Life-Dienst, (sicherheitskritische Anwendungen in Luft- und Schifffahrt, Bahnverkehr)
 - ▶ Dienst „von öffentlichem Interesse“, (Signal mit sehr hoher Genauigkeit, Qualität, Zuverlässigkeit und Integrität für hoheitliche Anwendungen)



Andere Systeme: GLONASS (Russland) und Beidou (China)

Begriffe

Referenzzeit

- Approximation der wahren physikalischen Zeit

Abweichung, Genauigkeit (Accuracy)

- absolute oder relative Differenz zu einer Referenzzeit

Präzision, Auflösung (Precision)

- kleinste Zeitdauer zwischen zwei aufeinander folgenden anzeigbaren Zeitpunkten

Stabilität (Stability)

- Frequenzschwankung einer Uhr (Angabe oft in *ppm*)

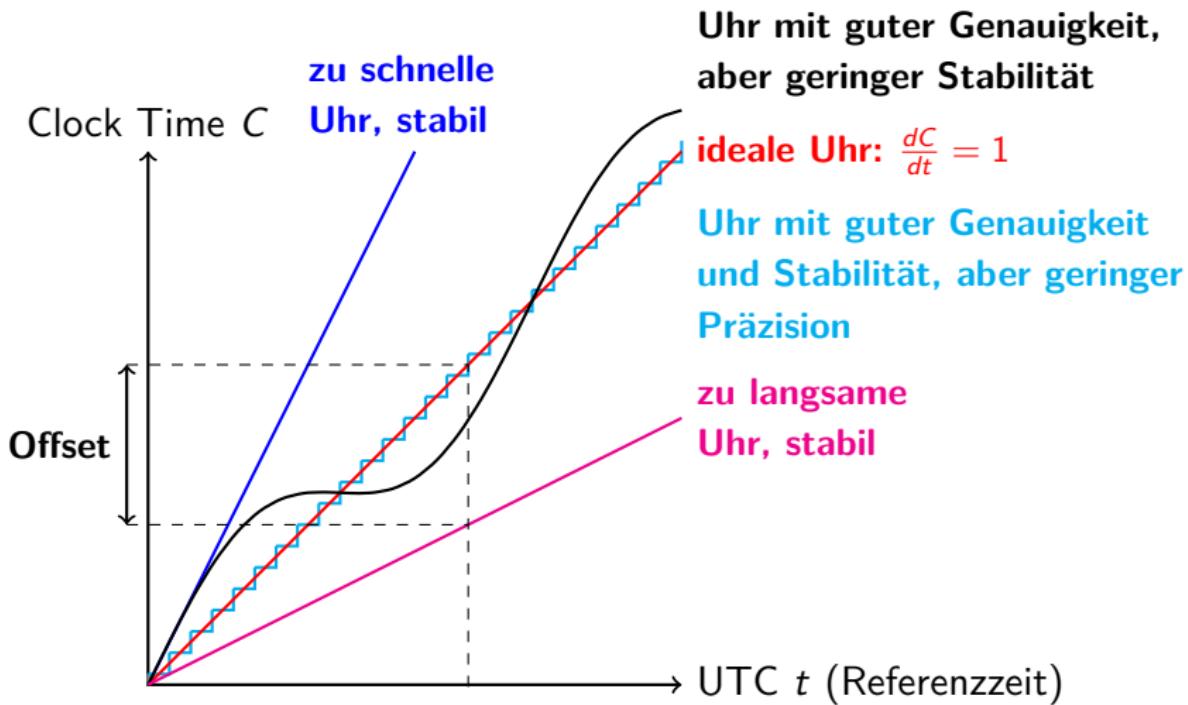
Offset

- Zeitdifferenz zwischen zwei Uhren bzw. zur Referenzzeit

Drift

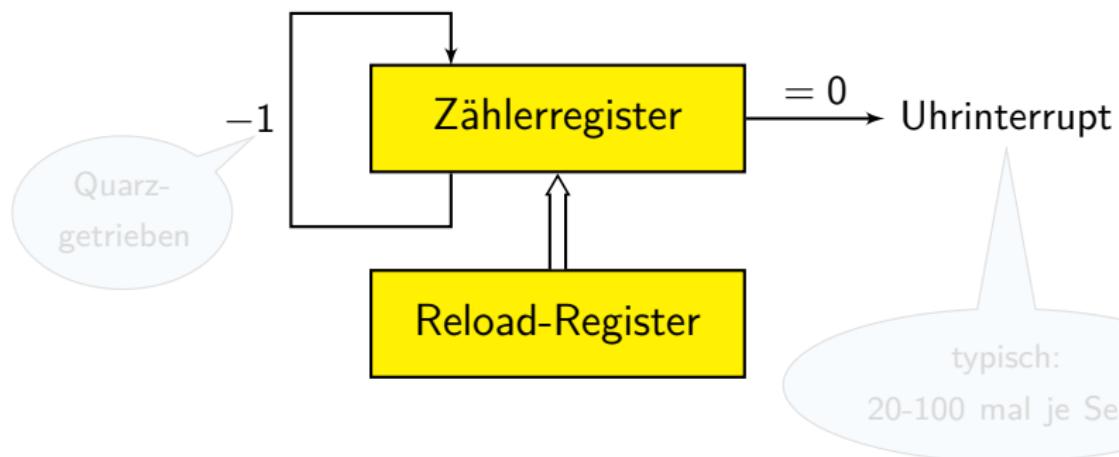
- Frequenzdifferenz zwischen zwei Uhren bzw. zur Referenzzeit

Veranschaulichung



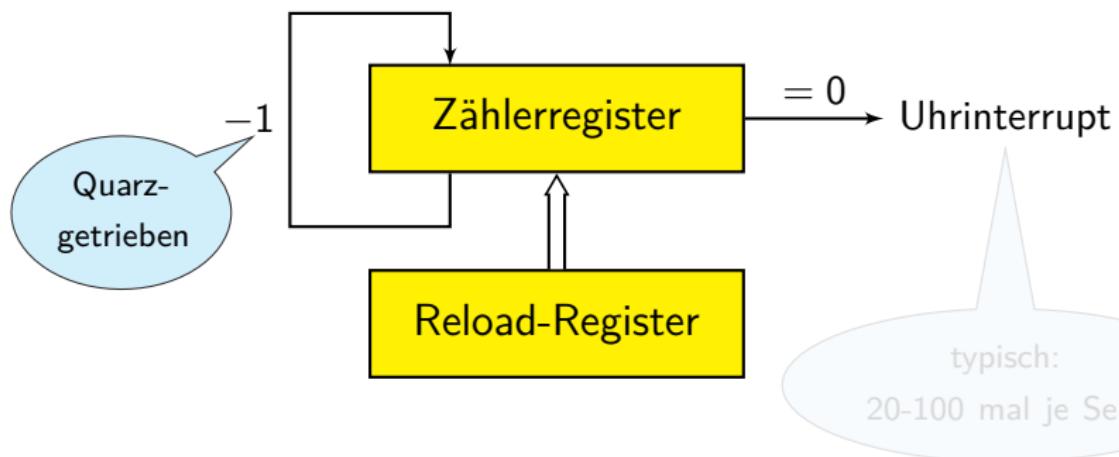
Rechneruhren

Hardware einer lokalen Rechensystemuhr



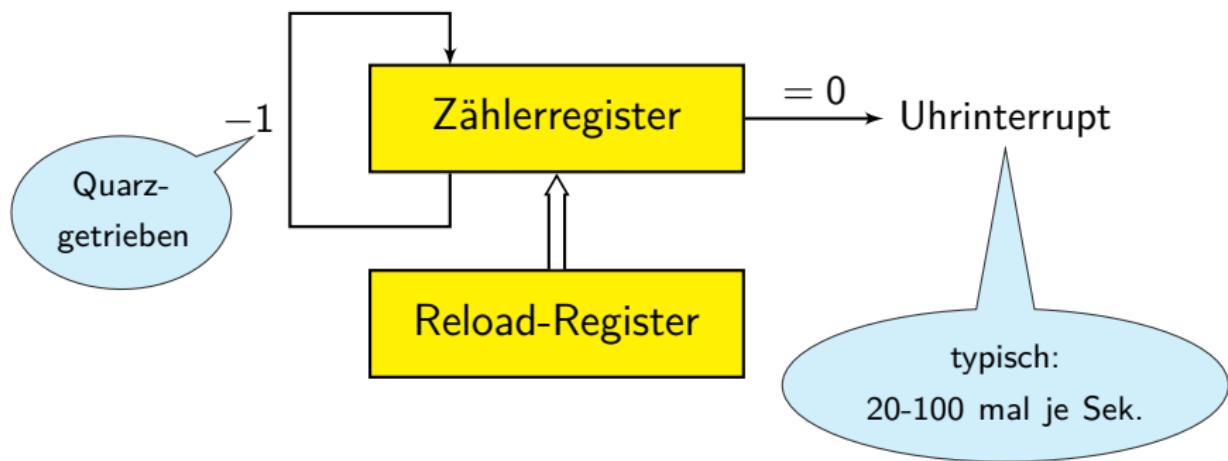
Rechneruhren

Hardware einer lokalen Rechensystemuhr



Rechneruhren

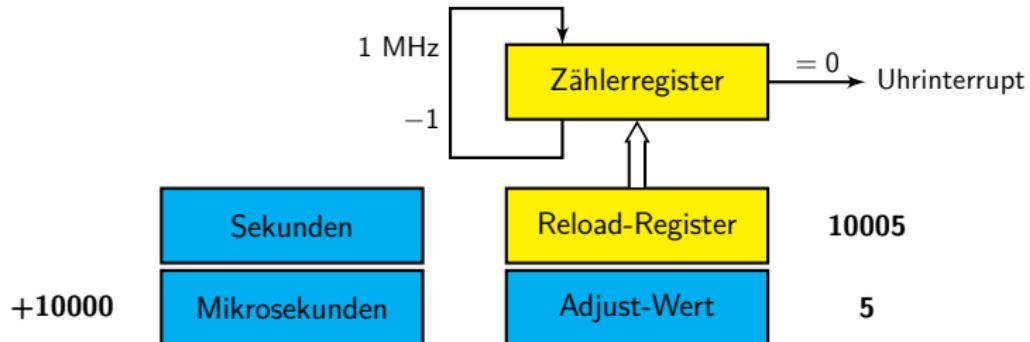
Hardware einer lokalen Rechensystemuhr



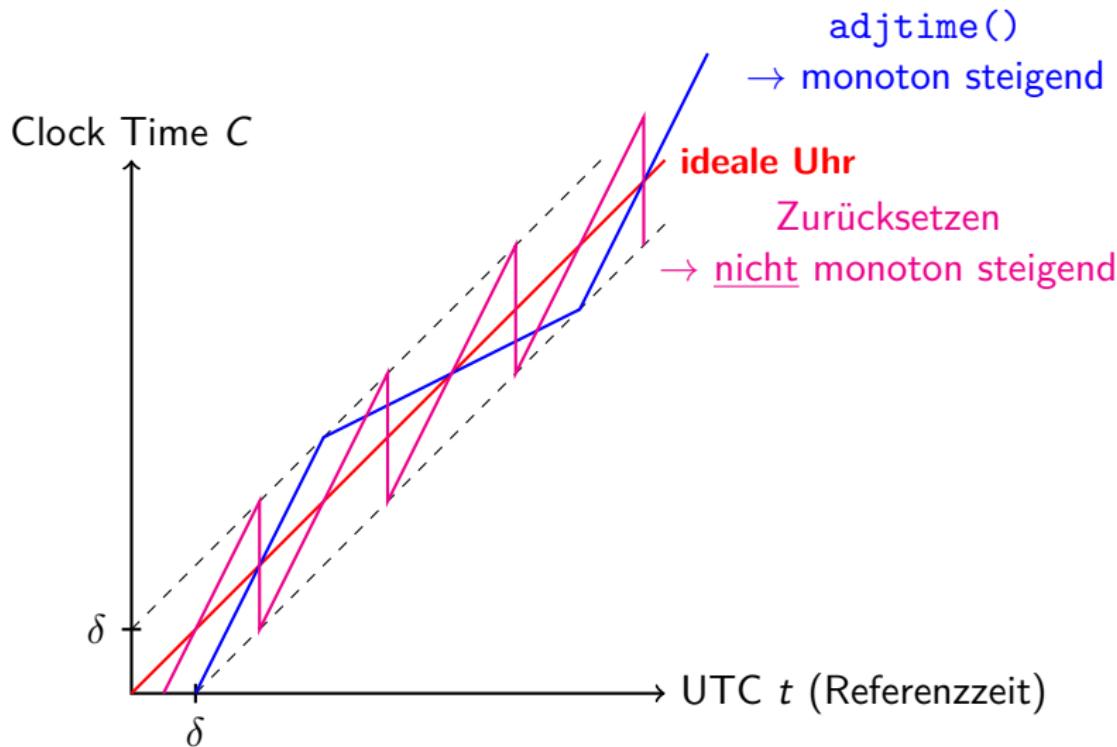
Betriebssystem-Uhren

Beispiel UNIX

- zwei 32-Bit (oder 64-Bit) Integer-Variablen
 - ▶ Anzahl Sekunden seit 1.1.1970
 - ▶ Anzahl μs (oder ns) in der aktuellen Sekunde
- typ. 100 Interrupts/s
- bei Interrupt werden Variablen um nominelle Anzahl μs erhöht
- Korrekturwert (Adjust-Wert) für Ausgleich der Drift des Quarzes
- Systemdienste `settimeofday`, `adjtime`



Prinzip der Korrektur



Referenzzeitquellen

DCF77-Uhr für einfache Anforderungen an Systemzeit

- Genauigkeit typisch: ± 2 msec

GPS-Uhr bei hohen Anforderungen (z.B. Messsystem)

- Genauigkeit typisch: ± 250 nsec

Atom-Uhr

- Rubidium / Caesium-Quellen
- Spezielle Zulassung erforderlich
- Montage in Rack
- z.T. ausschließlich für militärische Zwecke

Rechnerschnittstelle

- Erzeugung von Pulse-Per-Second (pps)-Signalen als Interrupts
- Kodierte Timecode-Signale,
z.B. IRIG-Standard (Inter Range Instrumentation Group)

Genaue lokale Betriebssystem-Uhren

Verwendung einer externen Referenzzeitquelle

Linux-Kern mit „Nano-Kernel-Patch“

- Erhöhung der Auflösung der Systemuhr auf 1 ns (statt μ s)
- Standard in neueren Linux-Kernen
- Nutzung der pps-Signale der Referenzzeitquelle als Interrupts
- Korrektur der Systemuhr entsprechend Referenzzeit der Hardware-Uhr
- Varianz der Interrupt-Latzenzeiten beeinflusst Genauigkeit
- mehrere externe Zeitquellen an einem Rechner möglich zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit
- Genauigkeit: typisch $< 1 \mu$ s

Beispiel: David L. Mills' Uhren (Uni Delaware)



- Spectracom 8170 WWVB Receiver
- Spectracom 8183 GPS Receiver
- Hewlett Packard 105A Quartz Frequency Standard
- Hewlett Packard 5061A Cesium Beam Frequency Standard
- NTP primary time server *rackety* and *pogo* (elsewhere)

<http://doc.ntp.org/4.1.2/refclock.htm>

Kommerzielle Time Server

Time Server

- Dedizierter LAN-Netzwerkknoten zur Zeitsynchronisation
- Interne oder externe Referenzzeitquelle
- Unterstützung für Standard-Protokolle (s.u.) (NTP, SNTP, PTP/IEEE 1588)

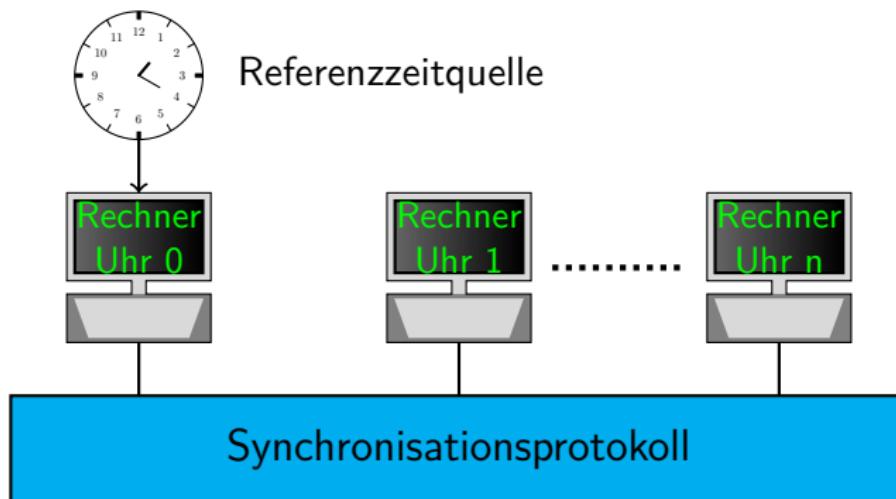
Produkte in vielen Varianten

- Meinberg (D)
- IPCAS (D)
- Galleon (UK)
- ELPROMA (NL)
- Time Tools (UK)

Synchronisationsprotokolle

Konstruktion einer verteilten Zeitbasis für Rechensysteme

- UTC-basierte externe Referenzzeitquelle
- lokale Uhren in den Rechensystemen
- Synchronisationsprotokoll



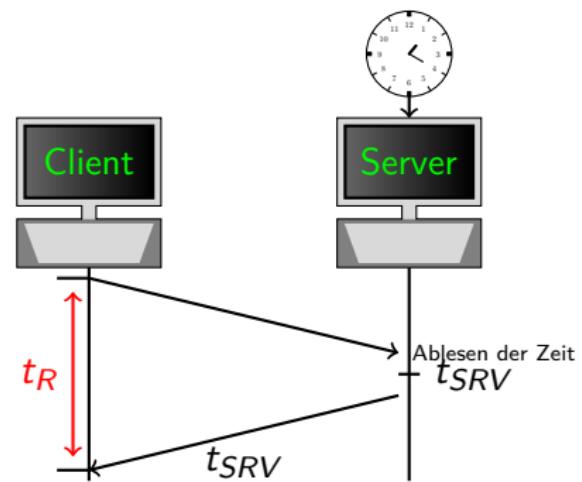
Probleme

- Nachrichtenverzögerung im Netzwerk nicht deterministisch
 - Bearbeitung der Protokollnachrichten zeitlich nicht deterministisch
- ⇒ **keine exakte Synchronisation möglich**

Algorithmus von Cristian (1989)

- passiver Zeitserver (als Referenzzeitquelle)
- periodisches Abfragen der Zeit durch Klienten
- mittlere Roundtriptlaufzeit (incl. Verarbeitungszeit auf dem Server) messen und berücksichtigen
- Schwächen:
 - ▶ „Rückwärtsgehen“ einer Uhr ist möglich
 - ▶ Schwankungen in Nachrichtenlaufzeiten

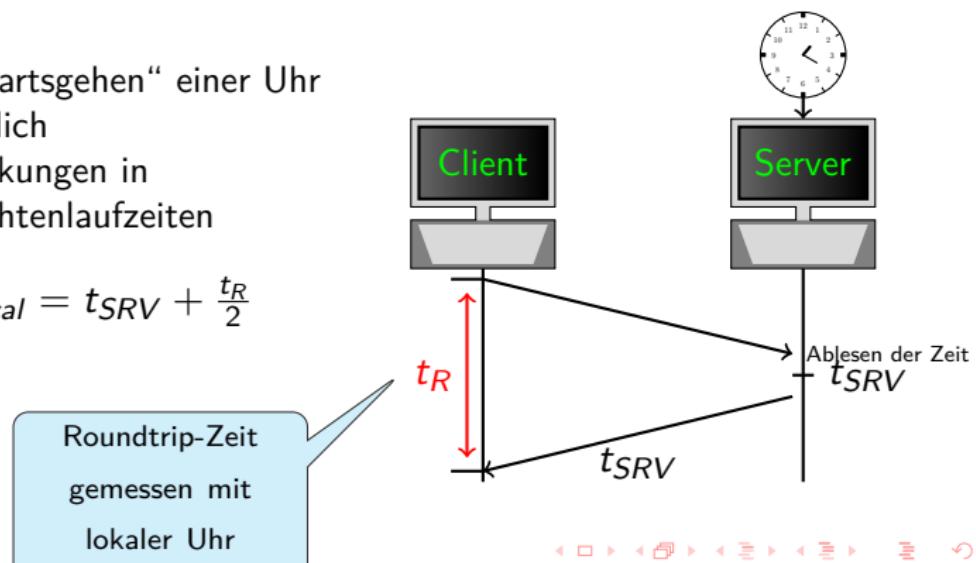
Setze: $t_{local} = t_{SRV} + \frac{t_R}{2}$



Algorithmus von Cristian (1989)

- passiver Zeitserver (als Referenzzeitquelle)
- periodisches Abfragen der Zeit durch Klienten
- mittlere Roundtriptlaufzeit (incl. Verarbeitungszeit auf dem Server) messen und berücksichtigen
- Schwächen:
 - ▶ „Rückwärtsgehen“ einer Uhr ist möglich
 - ▶ Schwankungen in Nachrichtenlaufzeiten

Setze: $t_{local} = t_{SRV} + \frac{t_R}{2}$



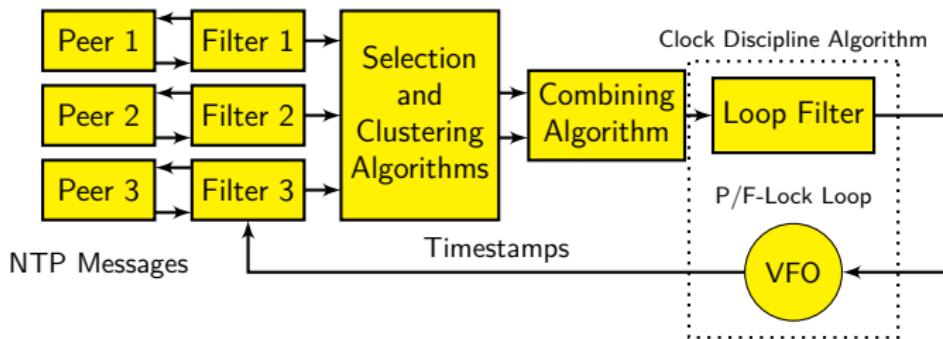
Time Synchronisation Protocol (TSP)

- Berkeley UNIX `timed`
- basiert auf ICMP/IP
- etabliert „mittlere Netzwerkzeit“ in allen Stellen
- Master/Slave-Algorithmus
 - ▶ aktiver Master: fragt aktuelle Zeiten aller Knoten ab, berechnet Mittel
 - ▶ verteilt Differenz (Offset) an jeden Client
- nutzt `settimeofday()` und `adjtime()` in den Knoten
- deutliche Schwächen
 - ▶ „Rückwärtsgehen“ einer Uhr ist möglich
 - ▶ keine Kompensation von Schwankungen in Nachrichtenlaufzeiten
 - ▶ keine Fehlerabschätzung
 - ▶ schlechte Skalierbarkeit
- Variante: Master mit ext. Referenzzeitquelle verteilt aktuelle Zeit statt berechnetem Mittelwert

Network Time Protocol (NTP)

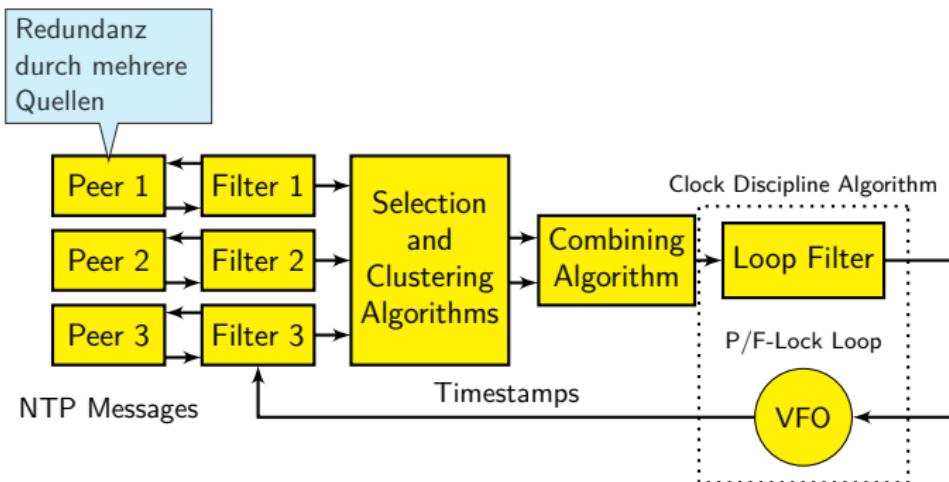
- Entwicklung primär durch D. Mills (Univ. of Delaware) getrieben
- <http://www.ntp.org>
- Ziele:
 - ▶ hohe Genauigkeit
 - ▶ Berücksichtigung schwankender Nachrichtenlaufzeiten
 - ▶ Berücksichtigung von Rechnerausfällen durch Bezug zu mehreren Zeitservern (Peers)
 - ▶ Aussortieren offensichtlich unbrauchbarer Zeitquellen (false ticker)
 - ▶ eingeschränkte Authentifizierung, Verschlüsselung
 - ▶ hohe Skalierbarkeit
- Heute Internet Standard
 - ▶ RFC 1305, 1992, frühere Version RFC 1129, RFC 958 (1985)
 - ▶ > 1.000.000 Rechner, Router, usw.
 - ▶ Nutzt UDP, Port 123
 - ▶ UNIX ntpd, xntpd (Clients aber auch für fast alle anderen Systeme)
 - ▶ Zeitserver der PTB: ptbtime1.ptb.de, ptbtime2.ptb.de
- Genauigkeit:
 - ▶ im LAN <1 ms, Internet < ca. 10 ms

NTP(2)-Arbeitsweise



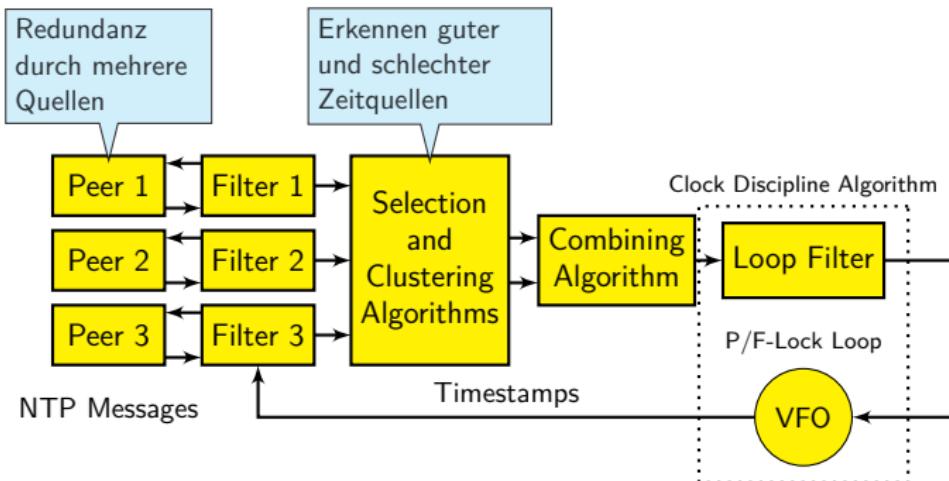
(Abbildung von Mills)

NTP(2)-Arbeitsweise



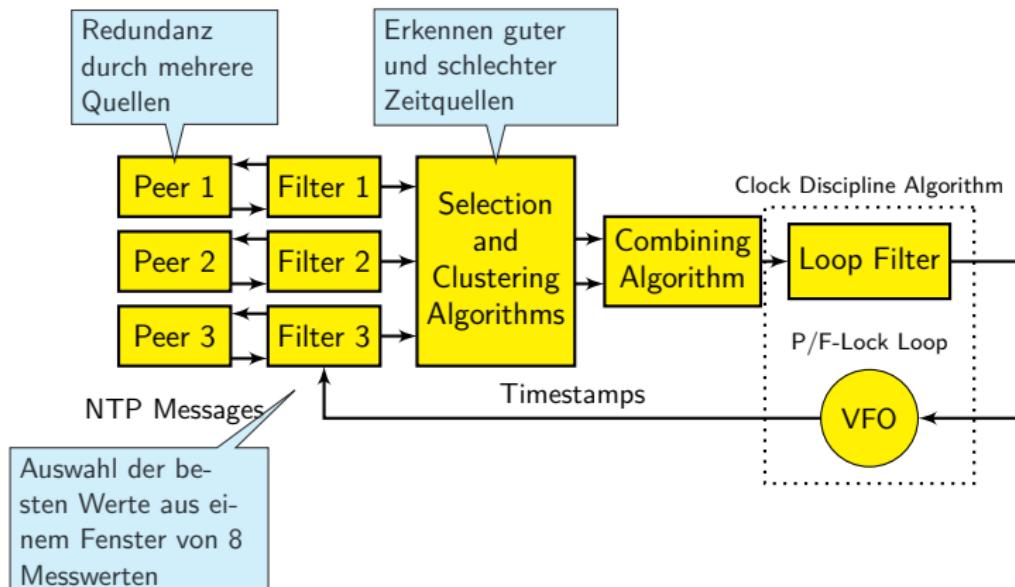
(Abbildung von Mills)

NTP(2)-Arbeitsweise



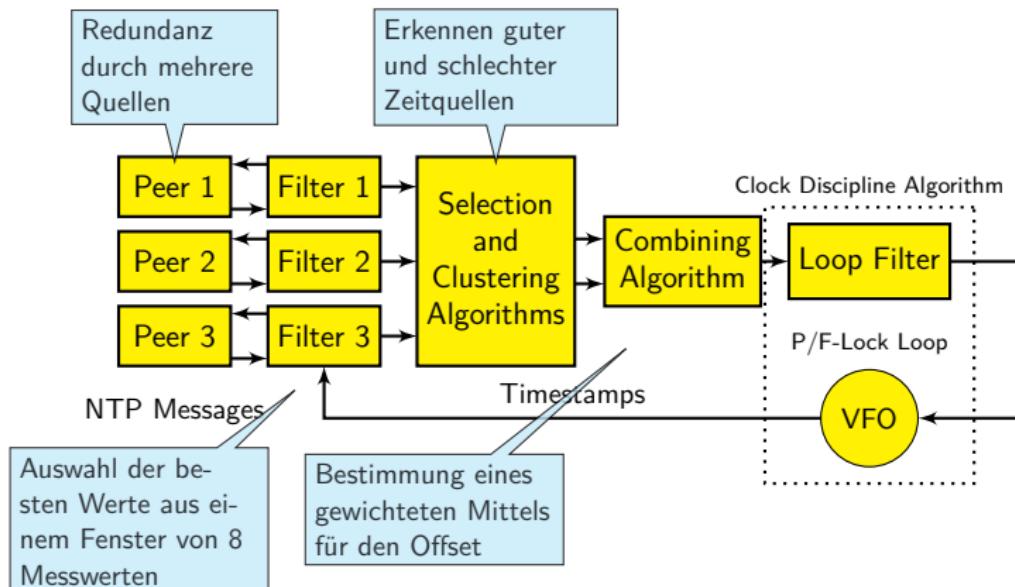
(Abbildung von Mills)

NTP(2)-Arbeitsweise



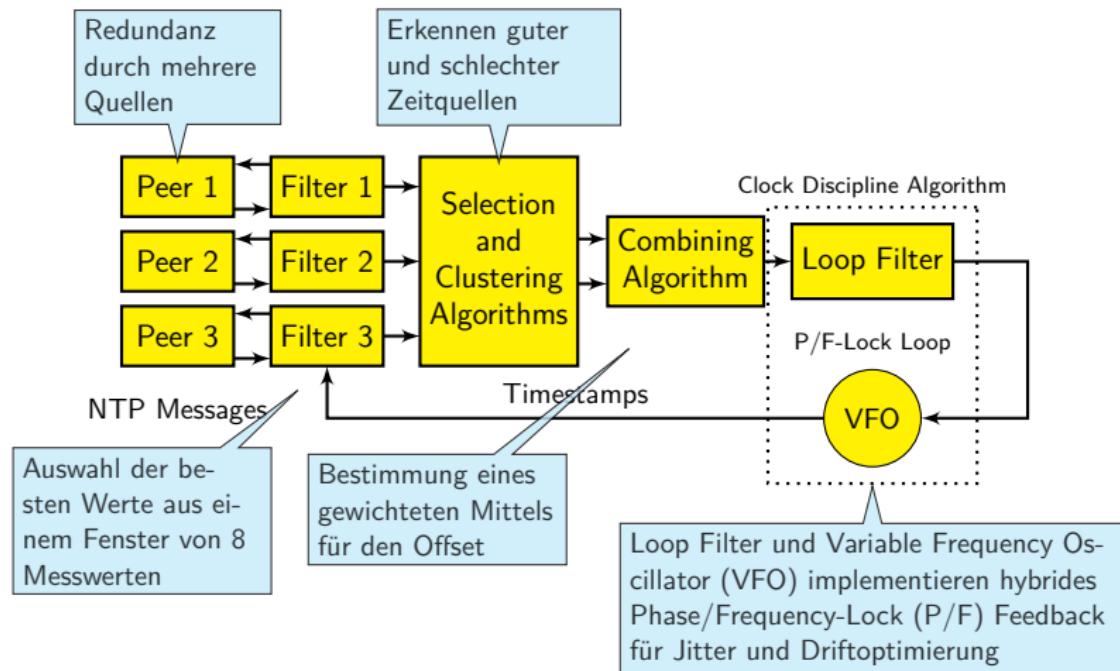
(Abbildung von Mills)

NTP(2)-Arbeitsweise



(Abbildung von Mills)

NTP(2)-Arbeitsweise

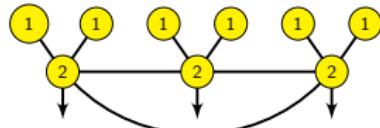


(Abbildung von Mills)

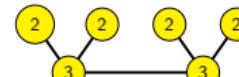
NTP(3)

Server legen Zeit fest, Clients beziehen Zeit
Hierarchiebildung der Server durch „Stratum“-Level

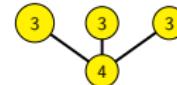
- Knoten mit externen Referenzzeitquellen bilden Stratum 1 -Server
 (Genauigkeit: $< 1 \mu\text{s}$ möglich)
- Stratum n - Server synchronisieren sich mit Stratum n-1 - Servern, usw.
- im Internet (2015)
 - ▶ Jeweils ca. 300 aktive Stratum-1 und Stratum-2 Server
<http://support.ntp.org/bin/view/Servers/StratumOneTimeServers>
 - ▶ Praktisch: 4-stufige Hierarchie, Lastausgleich durch regionale NTP Pool Server
- Typische Strukturen:



Unternehmens-Zeitserver
 (fehlertolerant)



Abteilungs-Zeitserver
 (fehlertolerant)



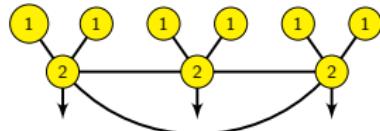
Workstation

NTP(3)

Server legen Zeit fest, Clients beziehen Zeit

Hierarchiebildung der Server durch „Stratum“-Level

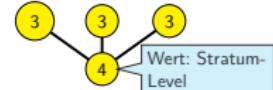
- Knoten mit externen Referenzzeitquellen bilden Stratum 1 -Server
(Genauigkeit: < 1 μ s möglich)
- Stratum n - Server synchronisieren sich mit Stratum n-1 - Servern, usw.
- im Internet (2015)
 - ▶ Jeweils ca. 300 aktive Stratum-1 und Stratum-2 Server
<http://support.ntp.org/bin/view/Servers/StratumOneTimeServers>
 - ▶ Praktisch: 4-stufige Hierarchie, Lastausgleich durch regionale NTP Pool Server
- Typische Strukturen:



Unternehmens-Zeitserver
(fehlertolerant)



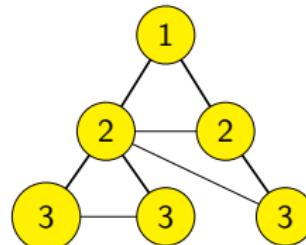
Abteilungs-Zeitserver
(fehlertolerant)



Workstation

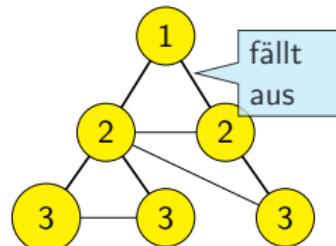
NTP(3)

- dynamisch festgelegte logische Verbindungsstruktur mit Backup-Verbindungen
 - ▶ spannende Bäume minimalen Gewichts basierend auf Server Level und Gesamtsynchronisationsverzögerung jedes Servers zu Primary Servern
- Beispiel Verbindungstopologie
- Nachrichtenaustausch zwischen Servern zwischen 64 sec und 1024 sec (17 min) je nach Qualität der Verbindung
- 64 Bit Zeitmarken
 - ▶ 32 Bit für Sekunden seit 1.1.1900 00:00:00
 - ▶ 32 Bit für Sekundenbruchteil
- Nutzung von `settimeofday()` und `adjtime()` zur Durchsetzung großer bzw. kleiner (<0.128 sec) Korrekturen.
- Kein Zurücksetzen der Uhr



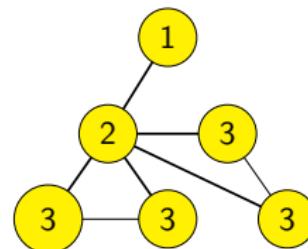
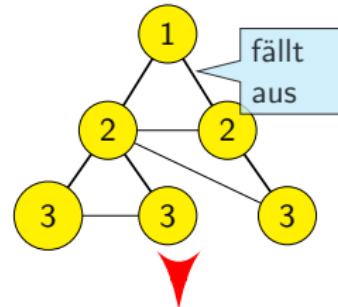
NTP(3)

- dynamisch festgelegte logische Verbindungsstruktur mit Backup-Verbindungen
 - ▶ spannende Bäume minimalen Gewichts basierend auf Server Level und Gesamtsynchronisationsverzögerung jedes Servers zu Primary Servern
- Beispiel Verbindungstopologie
- Nachrichtenaustausch zwischen Servern zwischen 64 sec und 1024 sec (17 min) je nach Qualität der Verbindung
- 64 Bit Zeitmarken
 - ▶ 32 Bit für Sekunden seit 1.1.1900 00:00:00
 - ▶ 32 Bit für Sekundenbruchteil
- Nutzung von `settimeofday()` und `adjtime()` zur Durchsetzung großer bzw. kleiner (<0.128 sec) Korrekturen.
- Kein Zurücksetzen der Uhr



NTP(3)

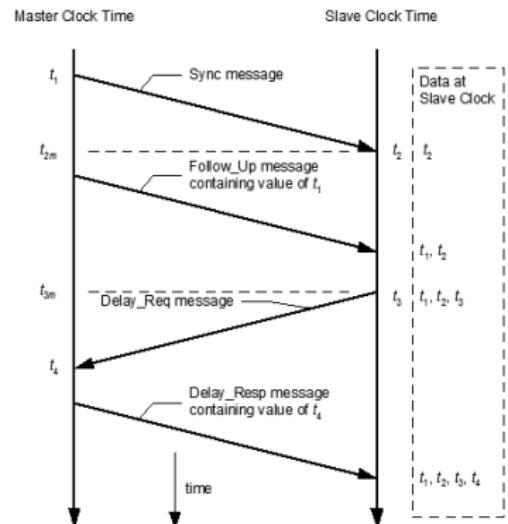
- dynamisch festgelegte logische Verbindungsstruktur mit Backup-Verbindungen
 - ▶ spannende Bäume minimalen Gewichts basierend auf Server Level und Gesamtsynchronisationsverzögerung jedes Servers zu Primary Servern
- Beispiel Verbindungstopologie
- Nachrichtenaustausch zwischen Servern zwischen 64 sec und 1024 sec (17 min) je nach Qualität der Verbindung
- 64 Bit Zeitmarken
 - ▶ 32 Bit für Sekunden seit 1.1.1900 00:00:00
 - ▶ 32 Bit für Sekundenbruchteil
- Nutzung von `settimeofday()` und `adjtime()` zur Durchsetzung großer bzw. kleiner (<0.128 sec) Korrekturen.
- Kein Zurücksetzen der Uhr



Precision Time Protocol (PTP, IEEE 1588)



- Hauptsächlich für mess- und regelungstechnische Anwendungen
 - Erreicht höhere Genauigkeit als NTP für Netze mit räumlich begrenzter Ausdehnung
 - Master-Slave-Verfahren
 - Automatische Wahl der besten Uhr als Grandmaster-Clock
 - Primär auf Ethernet-Netzen angewendet
 - Timestamping-Unit kann als Teil des Netzwerk-Controllers (in Hardware) implementiert sein
- ⇒ Genauigkeit im ns-Bereich, in Software im μs -Bereich
- Ptpd als freie Implementierung
 - Verbesserte Version IEEE 1588-2008



http://www.real-time-systems.com/ieee_1588/index.php

$$t_2 - t_1 = \text{offset} + d$$

$$t_4 - t_3 = -\text{offset} + d$$

$$\text{offset} = \frac{(t_2 - t_1 - t_4 + t_3)}{2}$$

Logische Zeitmarken

Realzeit ist nicht immer notwendig

Beispiele:

- Ordnen von Ereignissen (vor - nach)
- zeitmarkenbasiertes Concurrency Control in Datenbanken

Lamport Zeitstempel

Relation happens-before

- Notation: $a \rightarrow b$ (a passiert-vor b)
- Ereignisse im selben Prozess sind linear geordnet
- Nachrichtenversand:
 - ▶ a sei Ereignis des Versendens einer Nachricht m
 - ▶ b sei Empfang der Nachricht m in einem anderen Prozess
 - ▶ dann gilt: $a \rightarrow b$
- Relation ist transitiv:
 - ▶ $a \rightarrow b, b \rightarrow c \Rightarrow a \rightarrow c$
- Nebenläufigkeit:
 - ▶ falls weder $a \rightarrow b$ noch $b \rightarrow a$ gilt, heißen a und b nebenläufig

Uhrenbedingung

- $C(a)$ bezeichne die (logische) Zeit, zu der das Ereignis a stattfinde.
- $a \rightarrow b \Rightarrow C(a) < C(b)$

Lamport-Uhren

Algorithmus für logische Uhren nach Lamport (1978)

Annahmen:

- Prozesse kommunizieren über Nachrichten (und nur über Nachrichten) miteinander
- jeder Prozess P hat eine logische Uhr C_P
- jedes Ereignis e des Prozesses P erhält logischen Zeitstempel $C_P(e)$
- zwei aufeinander folgende Ereignisse e_i und e_{i+1} eines Prozesses haben nie den gleichen Zeitstempel: $C_P(e_i) < C_P(e_i + 1)$

Lamport-Uhren (2)

Beispiel:

A	B	C
0	0	0
6	8	10
12	16	20
18	24	30
24	32	40
30	40	50
36	48	60
42	56	70
48	64	80
54	72	90
60	80	100

Uhren mit unterschiedlichen

Geschwindigkeiten ohne Korrektur

A	B	C
0	0	0
6	8	10
12	16	20
18	24	30
24	32	40
30	40	50
36	48	60
42	61	70
48	69	80
70	77	90
76	85	100

Uhren mit unterschiedlichen

Geschwindigkeiten **mit** Korrektur

Lamport-Uhren (3)

Algorithmus:

- Berücksichtigung von Kausalität im Nachrichtenversand!
- Sendeereignis s einer Nachricht m in Prozess A:
 - ▶ Zeitmarke $C_A(s)$
 - ▶ Versende Nachricht m zusammen mit aktuellem Zeitstempel des sendenden Prozesses $t = C_A(s)$
- Empfangsereignis e der Nachricht m in Prozess B :
 - ▶ sei $C_B(\text{alt})$ die Zeitmarke des letzten Ereignisses in B
 - ▶ Setze $C_B(e) := \max\{C_B(\text{alt}), t\} + 1$
- Falls zwei Ereignisse in verschiedenen Prozessen die gleiche Zeitmarke haben sollten, ordne sie anhand der Prozessordnung
- Algorithmus erfüllt Uhrenbedingung
- Umkehrung gilt **nicht**:
 $C(a) < C(b) \Rightarrow a \rightarrow b$ ist falsch !
- Lamport-Uhren lösen nicht das Kausalitätsproblem

Vector Clocks

Vektor-Uhren, Mattern (Uni Kaiserslautern, 1989)

Vektor-Uhren lösen o.a. Kausalitätsproblem

Algorithmus:

- nachrichtenbasierte Kommunikation
- jeder Prozess P_i besitzt Uhr VC_i als Vektor von Zeitmarken
- lokales Ereignis in P_i :
 - ▶ $VC_i[i] := VC_i[i] + 1$, sonst unverändert
- Sendeereignis in P_i :
 - ▶ $VC_i[i] := VC_i[i] + 1$ (Erhöhe eigenen Ereigniszähler)
 - ▶ Versende Nachricht mit eigener Vektorzeit $vt = VC_i$
- Empfangsereignis in P_k :
 - ▶ $VC_k[j] := \max\{VC_k[j], vt[j]\}$ für alle j
 - ▶ $VC_k[k] := VC_k[k] + 1$ (Erhöhe eigenen Ereigniszähler)

Vector Clocks (2)

Vergleich von Zeitmarkenvektoren

- $S \leq T \Rightarrow S[i] \leq T[i]$ für alle i
- $S < T \Rightarrow S \leq T$ und $S \neq T$
- $S || T \Rightarrow \neg(S < T) \text{ und } \neg(T < S)$

Nebenläufigkeit

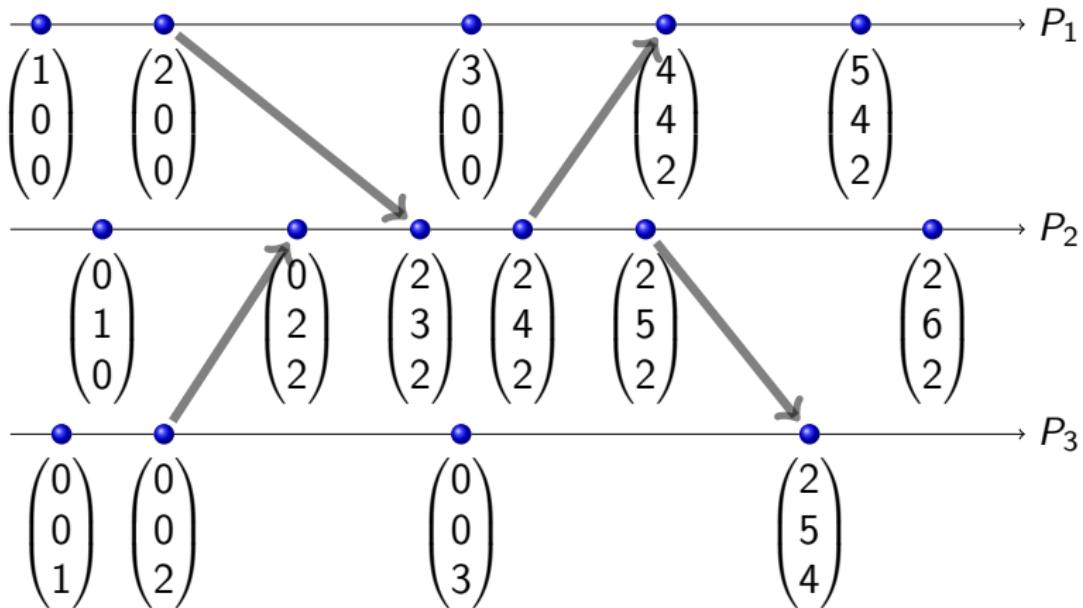
- Ereignisse a und b sind nebenläufig $\Leftrightarrow VC(a) || VC(b)$

Kausalität

- $a \rightarrow b \Leftrightarrow VC(a) < VC(b)$

Vector Clocks (3)

Beispiel



- kausal abhängige Ereignisse, z.B. $(0, 0, 1) \rightarrow (5, 4, 2)$, $(1, 0, 0) \rightarrow (2, 6, 2)$
- nebenläufige Ereignisse, z.B. $(0, 0, 3) \parallel (5, 4, 2)$

Zusammenfassung

- Zeiten lassen sich mit einer Referenzzeit hinsichtlich ihrer Stabilität, Genauigkeit und Auflösung vergleichen.
Dabei lassen sich Drift und Offset ermitteln.
- Um lokale Uhren in einem verteilten System mit einer Referenzzeitquelle zu synchronisieren bedarf es einen Zeit-Synchronisationsprotokolls.
- Lamport-Uhren und Vektor-Uhren können logische Zeitmarken realisieren.