



# Kapitel 7

## Uhren & Synchronisation



## Inhalt

- Motivation
  - Definition Zeit
- Uhren
- Synchronisation
  - Algorithmus von Cristian
  - Algorithmus aus Berkeley
  - NTP-Protokoll
  - Synchronisation bei fehlerbehafteten Uhren



## Literatur

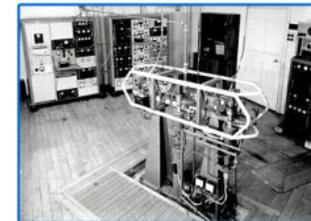
- Links zum Thema Zeit:
  - <http://www.ptb.de/de/zeit/uhrzeit.html>
  - [http://www.maa.mhn.de/Scholar/dt\\_times.html](http://www.maa.mhn.de/Scholar/dt_times.html)
- Uhrensynchronisation:
  - Leslie Lamport: Synchronizing clocks in the presence of faults, 1985
  - <http://www.ntp.org/>

## Definition Zeit

- Historisch:
  - Jeden Tag gegen Mittag erreicht die Sonne ihren höchsten Punkt am Himmel.
  - Die Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Ereignissen dieses Typs heißt Tag (genauer gesagt: ein Sonnentag).
  - Eine Sonnensekunde ist  $1/86400$  dieser Spanne.
- Zeitmessung heute:
  - Verwendung von Atomuhren: eine Sekunde ist die 9.192.631.770-fache Periodendauer, der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von  $^{133}\text{Cäsium}$ -Atomen entsprechenden Strahlung.
  - Am 01.01.1958 entsprach die Atomsekunde genau einer Sonnensekunde.
  - Aufgrund von unregelmäßigen Schwankungen, sowie einer langfristigen Verlangsamung der Erdrotation unterscheiden sich die Atomsekunde und die Sonnensekunde.



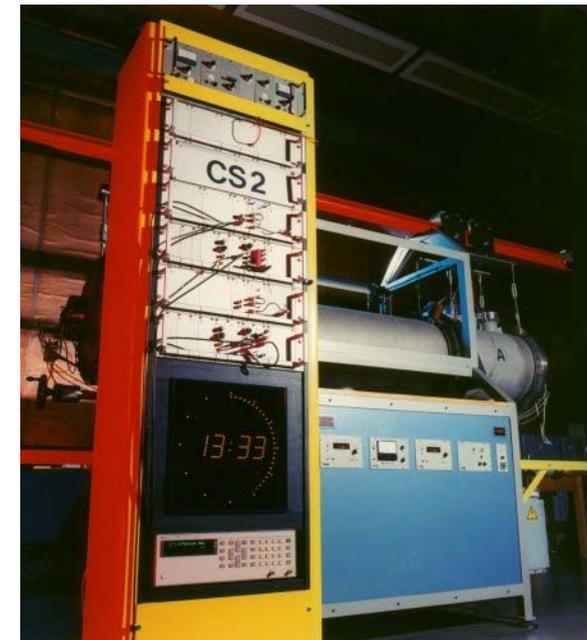
*Sonnenuhr  
Deutsches Museum*



*Erste Cäsiumatomuhr*

## TAI (Temps Atomique International)

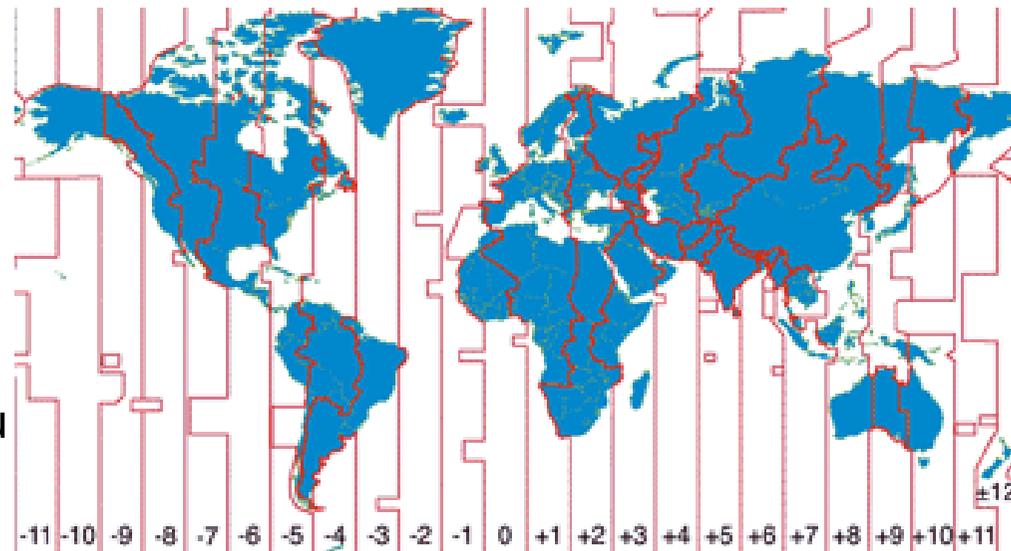
- TAI: Atomzeitskala, die zur Koordination nationaler Atomzeiten ermittelt wird:
  - Beteiligung von 50 verschiedene Zeitinstitute mit ca. 250 Atomuhren
  - Zeit basiert auf der Atomsekunde
  - Referenzzeitpunkt ist der 1. Januar 1970
  - relative Genauigkeit von  $\pm 10^{-15}$ , aber keine exakte Übereinstimmung mit der Sonnenzeit



*Atomuhr der Physikalisch-  
Technischen Bundesanstalt in  
Braunschweig*

## UTC (Coordinated Universal Time)

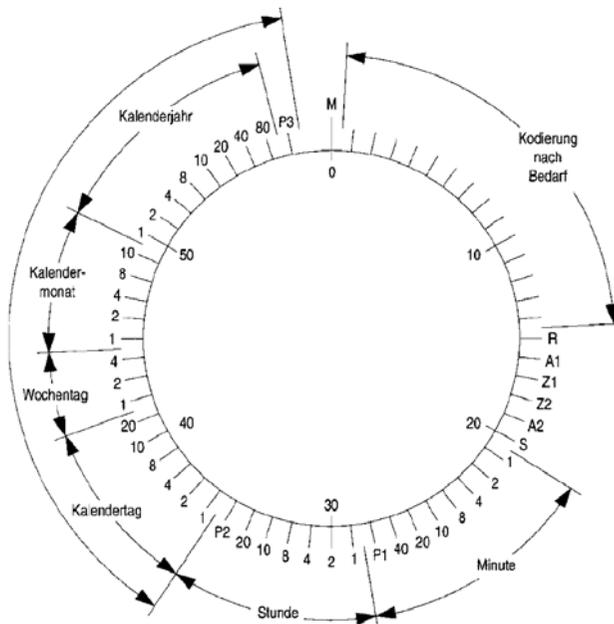
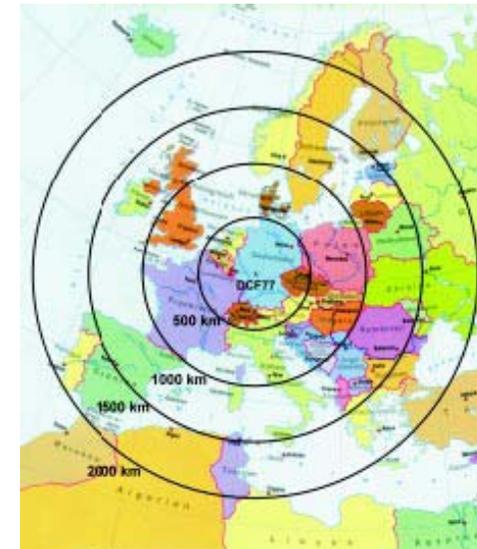
- eigentlicher Nachfolger der Greenwichzeit
- realisiert durch Atomuhren, die Zeiteinheit ist die SI-Sekunde  
⇒ hochkonstante Zeiteinheit
- zusätzlich Übereinstimmung mit dem Sonnenlauf  
⇒ einheitliche Grundlage zur Zeitbestimmung im täglichen Leben
- Durch Einfügen von Schaltsekunden wird die UTC mit der universellen Sonnenzeit (UT1) synchronisiert
- Anpassung erfolgt zumeist zu Ende oder Mitte des Jahres (typischer Abstand: alle 18 Monate)



Zeitzone

## DCF77

- Das PTB überträgt die aktuelle Uhrzeit über den Langwellensender DCF77
- Die Zeitinformationen werden als digitales Signal (negative Modulation  $\Rightarrow$  Absenkung der Trägeramplitude) im Sekunden-takt übertragen.



- '0' und '1' werden durch eine Absenkung um 100ms bzw. 200 ms codiert. In der Sekunde 59 erfolgt keine Absenkung  $\Rightarrow$  Markierung der Beginn einer neuen Minute bei nächster Amplitudenabsenkung.
- Pro Minute stehen somit 59 Bit zur Verfügung (wobei Bit 0-14 für Betriebsinformationen verwendet werden)



# Uhren und Synchronisation

## Uhren

## Aufgaben

- Absolutzeitgeber
  - Datum, Uhrzeit
  - zeitabhängige Aufträge
  - Zeitstempel, Logbuch
  - Ursache-Wirkung-Feststellung
- Relativzeitgeber
  - Verzögerungen
  - Messen von Zeitabständen
  - Zyklische Ausführung, Messungen
  - Zeitüberwachung von Wartezuständen





## Genauigkeit von Uhren

- Eine Uhr arbeitet korrekt, wenn sie die vom Hersteller angegebene maximale Driftrate  $\tau$  einhält, auch wenn sie dann etwas zu schnell oder zu langsam ist.
- Typische Driftraten:

Uhrentyp	Driftrate $\tau$	Abweichung pro Jahr
Quarzuhr	$10^{-5}$	$\pm 300$ sec
Pendeluhr	$10^{-6}$	$\pm 30$ sec
Atomuhr	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$\pm 0,5$ Mikrosekunden
Atomuhr (lasergekühlte Atome)	$10^{-15}$	$\pm 0.03$ Mikrosekunden



## Uhrenverhalten

- Korrekt:
    1. Absolutwert der Abweichung kleiner der zugesicherten Gangabweichung
  - Fehlerbehaftet:
    2. Überschreiten der zugesicherten Gangabweichung
    3. Zustandsfehler (z.B. Sprung im Zählerwert)
    4. Stehenbleiben der Uhr
  - Unmöglich:
    5. Rückwärtslaufende Uhr
    6. Unendlich schnell laufende Uhr
- ⇒ Die Gangabweichung zweier korrekter Uhren kann beliebig groß werden, wenn die Uhren nicht synchronisiert sind.



# Uhren und Synchronisation

## Synchronisation



## Grundlagen

- Folgende Annahmen werden im Zusammenhang mit der Synchronisation gemacht:
  1. Alle Uhren besitzen zu Beginn in etwa die gleiche Zeit.
  2. Die Uhren fehlerfreier Prozesse gehen annähernd richtig, d.h. sie besitzen eine ähnliche Ganggenauigkeit.
  3. Ein fehlerfreier Prozess  $p$  kann die Differenz seiner Uhr von der Uhr von Prozess  $q$  mit einer Genauigkeit  $\varepsilon$  bestimmen.
- Anforderungen an die Synchronisation:
  1. Zu jedem Zeitpunkt zeigen die Uhren zweier fehlerfreier Prozesse ungefähr den gleichen Wert.
  2. Durch die Synchronisation entstehen keine bzw. nur sehr kleine Zeitsprünge
  3. Insbesondere darf die Kausalität nicht verletzt werden (z.B. Zurückstellen der Zeit)  
⇒ Notwendig, da sonst keine konsistente Ausführung (z.B. wegen Anweisungen mit absoluten Zeitangaben) garantiert werden kann.



## Arten der Synchronisation

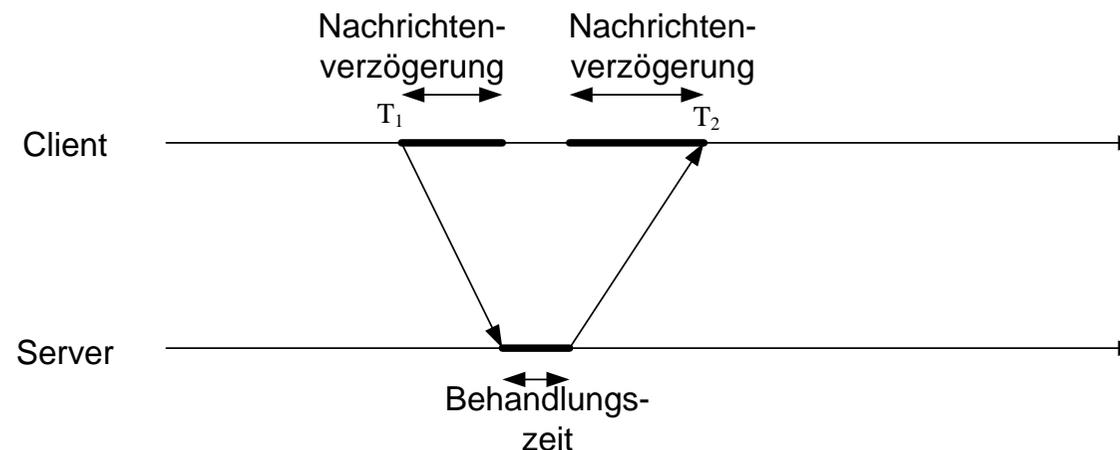
- Zeitpunkt: typischerweise erfolgt die Synchronisation periodisch
- Rollen der Knoten:
  - externe Synchronisation: die Synchronisation erfolgt anhand einer externen, als perfekt angenommenen Uhr
  - interne Synchronisation: die Uhren ermitteln basierend auf den einzelnen Zeitwerten eine korrekte, globale Zeitbasis

Vorteil der externen Synchronisation: der maximal tolerierte Fehler kann halb so groß wie bei der internen Synchronisation gewählt werden.

- Ort der Synchronisation:
  - zentrale Synchronisation: Synchronisation wird von einer Einheit koordiniert  $\Rightarrow$  fehleranfällig
  - verteilte Synchronisation: alle Einheiten berechnen die globale Zeitbasis  $\Rightarrow$  hohes Datenaufkommen

## Algorithmus von Cristian (1989)

- Das Verfahren basiert auf verteilter, externer Synchronisation.
- Innerhalb des Systems existiert ein Time-Server, zumeist ein UTC-Empfänger.
- In regelmäßigen Abständen senden die anderen Einheiten einen Time-Request, der so schnell wie möglich vom Server beantwortet wird.



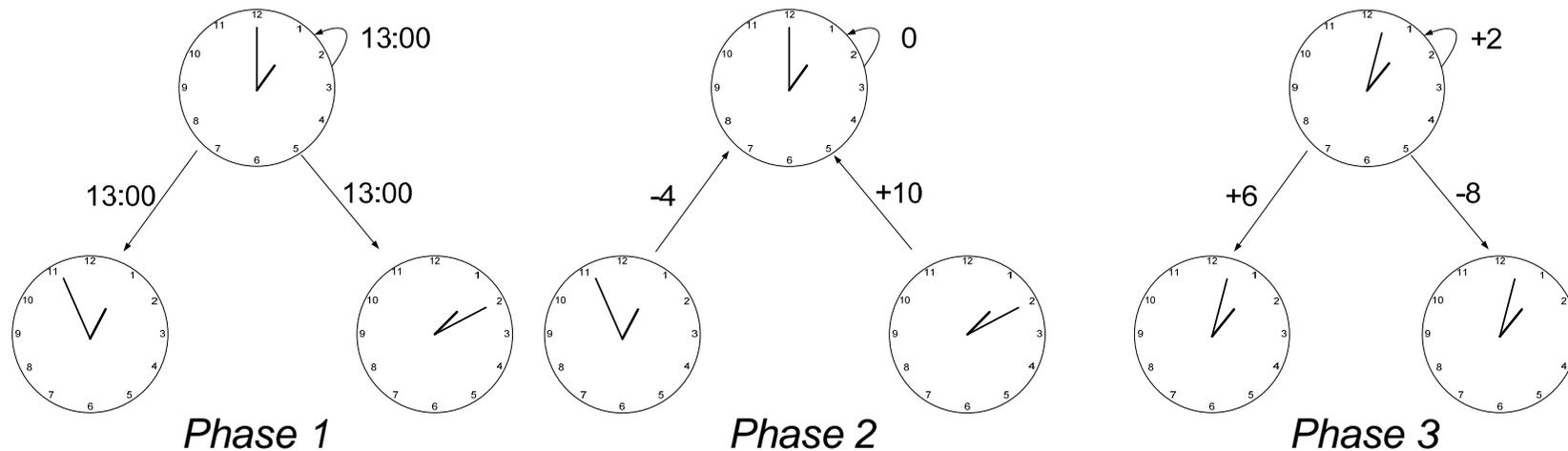


## Algorithmus von Cristian

- Nach Empfang kann die Uhr auf die empfangene Uhrzeit gesetzt werden.
- **1. Problem:** Zeitsprünge würden entstehen.
- **Lösung:** Die Uhr wird graduell angepasst (Beispiel: Herabsetzung des Intervalls zwischen zwei Uhrenticks von 1ms auf 0.9ms, falls lokale Uhr zu langsam war).
- **2. Problem:** Nachricht ist veraltet, wenn die Nachrichtenverzögerung nicht vernachlässigbar ist.
- **Lösung:** Messung der Nachrichtenverzögerung
  - Abschätzung, falls Informationen fehlen:  $(T_1 - T_2)/2$
  - Falls die Bearbeitungszeit bekannt ist, kann das Ergebnis weiter verbessert werden.
  - Zusätzliche Verbesserung: Ermittlung eines Durchschnittswertes, Ausreißer müssen dabei außer acht gelassen werden.

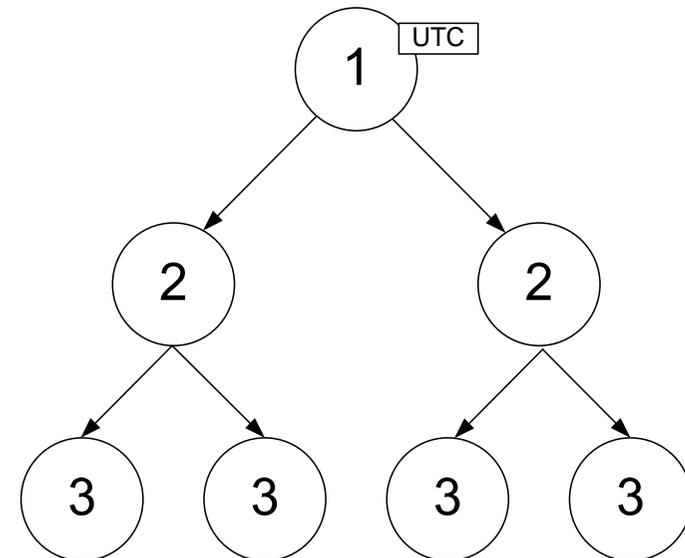
## Algorithmus von Berkeley (1989)

- Annahme: kein UTC-Empfänger verfügbar
- Algorithmus (zentral, intern):
  - ein Rechner agiert als aktiver Time-Server.
  - Der Server fragt periodisch die Zeiten/Unterschiede aller anderen Rechner ab (Phase 1) und ermittelt den Durchschnittswert (Phase 2).
  - In Phase 3 wird der errechnete Wert an alle anderen Uhren ausgegeben.



## NTP: Network Time Protocol (1982)

- Problem: Die angegebenen Algorithmen funktionieren nur in kleinen statischen Netzen.
- Das NTP Protokoll bietet eine Möglichkeit in großen Netzen eine Synchronisation zu gewährleisten.
- Die Netze können dabei dynamisch konfiguriert werden, um eine zuverlässige Synchronisation zu gewährleisten.
- Die Grundstruktur von NTP ist ein hierarchisches Modell (mit verschiedenen Strata/Schichten).
  - Der Dienst wird durch ein verteiltes Serversystem geleistet.
  - Primäre Server sind direkt mit einer UTC-Quelle verbunden.
  - Sekundäre Server synchronisieren sich mit primären Servern usw.
  - Jede zusätzliche Schicht verursacht einen zusätzlichen Zeitversatz von 10-100ms.





# Uhren und Synchronisation

Synchronisation bei fehlerbehafteten Uhren



## Problemstellung

- Die bisherigen Algorithmen basierten alle auf der Annahme von fehlerfreien Uhren.
- Im Folgenden werden Algorithmen betrachtet, die mit einer maximalen Anzahl von  $m$  fehlerbehafteten Uhren umgehen können.
- Insgesamt soll das System aus  $n$  Uhren bestehen. Betrachtet werden im Besonderen auch byzantinische Fehler (die fehlerhafte Einheit kann beliebige Ausgaben produzieren).
- Die maximal zulässige Abweichung zweier Uhren bezeichnen wir mit  $\varepsilon$ .
- In Frage kommen dabei nur verteilte Algorithmen, um einen Single-Point-of-Failure auszuschließen.



## Konvergenzalgorithmus (Leslie Lamport, 1985)

- Algorithmus:
  - Jede Einheit liest die Uhr der anderen Rechner und berechnet den Mittelwert.
  - Ist die Abweichung einer Uhr größer als  $\varepsilon$ , so verwendet der Algorithmus stattdessen den Wert der eigenen Uhr.
- Aussage:
  - Der Algorithmus arbeitet erfolgreich, falls gilt:  $n \geq 3m$ .
- Annahmen:
  - vernachlässigbare Ausführungszeit
  - Einheiten lesen zeitgleich die Uhren ab bzw. Unterschiede sind vernachlässigbar



## Konvergenzalgorithmus (Leslie Lamport, 1985)

- Beweis:
  - Seien  $p, q$  zwei fehlerfreie Einheiten,  $r$  eine beliebige Einheit.
  - Sei  $t(p, r)$  die Uhrzeit, die die Einheit  $p$  für die Mittelwertsberechnung verwendet.
    - $\Rightarrow r$  fehlerfrei:  $t(p, r) \approx t(q, r)$
    - $\Rightarrow r$  fehlerbehaftet  $|t(p, r) - t(q, r)| < 3\varepsilon$
  - Einheit  $p$  stellt seine Uhr auf:  $1/n * \sum_r t(p, r)$
  - Einheit  $q$  stellt seine Uhr auf:  $1/n * \sum_r t(q, r)$
  - Schlechtester Fall:
    - $(n-m)$  Uhren fehlerfrei:  $t(p, r) \approx t(q, r)$
    - $m$  Uhren fehlerbehaftet  $|t(p, r) - t(q, r)| < 3\varepsilon$
  - $\Rightarrow$  Differenz beider Uhren:  $\Delta(p, q) = 1/n |\sum_r t(p, r) - \sum_r t(q, r)| \leq m/n * 3\varepsilon < \varepsilon$