

EMES: Eigenschaften mobiler und eingebetteter Systeme

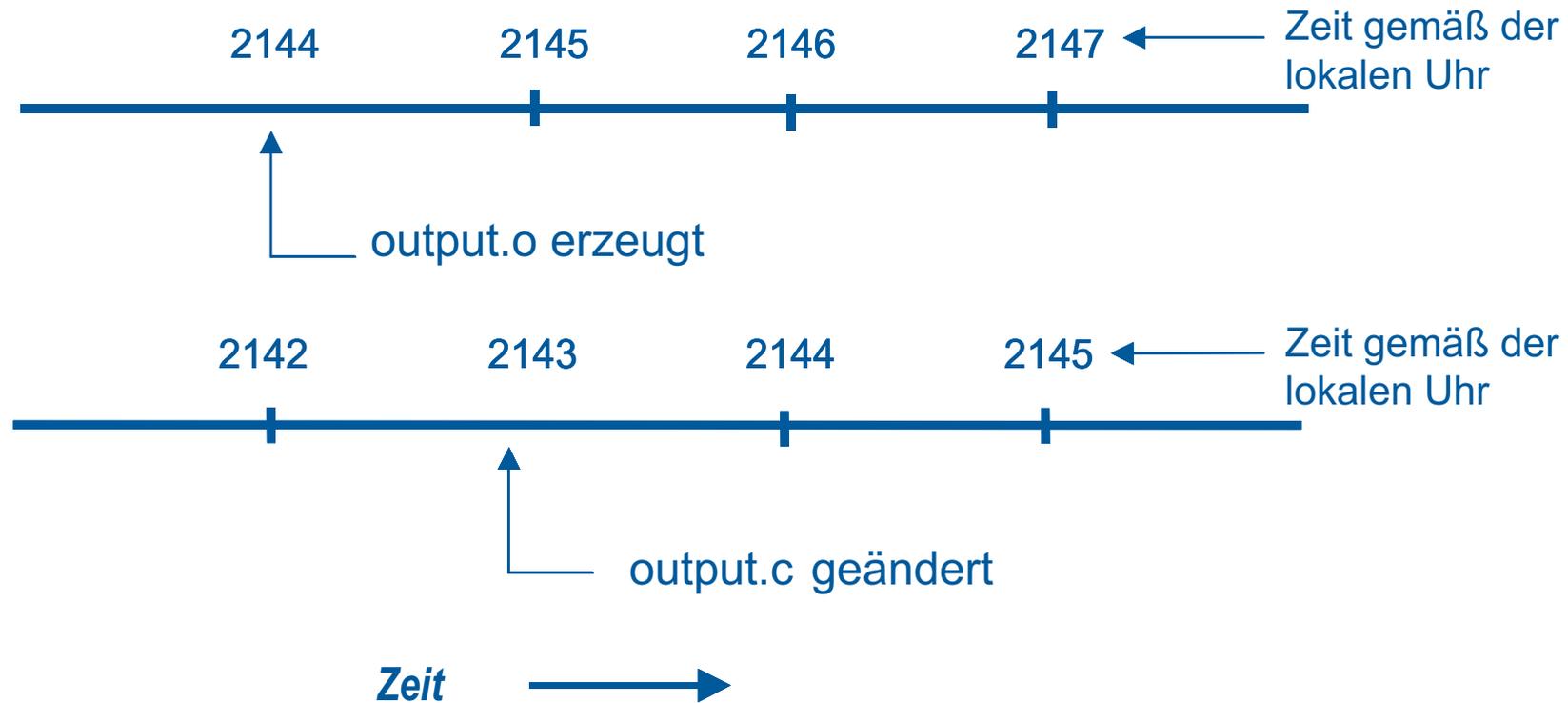
Uhrensynchronisation

Dr. Siegmar Sommer, Dr. Peter Tröger
Wintersemester 2009/2010



- Zeit kann in Anwendungen eine große Rolle spielen, insbesondere bei Echtzeitsystemen
- Häufig wichtiger noch als korrekte Zeit: konsistente Zeit
- Einprozessorsystem:
Eine zentrale Uhr (shared memory bei mehreren Prozessen)
- Verteiltes System
 - meist kein gemeinsamer Speicher vorhanden
 - Problem mit der Ereignisreihenfolge (verschiedene Ereignishorizonte)
 - Verwendung von verteilten Algorithmen

Beispiel: Verteiltes make



- Make ruft den Compiler trotz Änderung nicht auf.

Zeitmessung allgemein

- Vergleich der Dauer des zu messenden Vorgangs mit der Dauer eines bekannten Vorgangs
 - Sand in einer Sanduhr
 - Biologische Vorgänge
 - Erdrotation
 - Mondumlauf
 - Periodendauer eines Pendels
 - Periodendauer eines Oszillators
 - Dauer der Zustandsübergänge von Atomen
- Annahme: Diese Zeitdauern sind jeweils unveränderlich
- Problem: Gilt so nicht!
- Aber: Je nach angestrebter Genauigkeit ausreichend

Kurze Geschichte der Zeit(messung): Kalender

- Vor 35000 Jahren: Zählung von Tagen eines Mondzyklus
- Sumerer (vor etwa 5000 Jahren): Ackerbau und Bewässerung als Triebkraft, 12 Monate mit jeweils 30 Tagen
- Kalenderkorrekturen im Verlauf von 5000 Jahren
 - Nach 1000 Jahren erkannt: 19 Sonnenjahre = 235 Mondmonate
 - Lösungen:
 - * Monate variabler Länge (u.a. Römer)
 - * Fünf besondere Tage am Jahresende (u.a. Ägypter)
 - * Schaltjahre zur Feinjustage
 - * Aktuell: Gregorianer Kalender seit 1582 (ein Tag auf 3323 Jahre)

Kurze Geschichte der Zeit(messung): Kleine Zeiträume

- Ägypter: Uhr nach Schattenlänge mit 10 Tagesstunden, 2 Zwiellichtstunden und 12 Nachtstunden entsprechend Aufgang von Sternbildern
- Später: Sonnenuhr mit Winkeleinteilung für Stunden
 - Problem: Ausgleich der Erdneigung
 - Problem: Wetterabhängig
 - “Professionelle” Version: Zenit-Teleskop zur Bestimmung der Durchgangszeit von Gestirnen durch den Bahnscheitel
- Mechanische Uhren als Antwort auf das Problem der Bestimmung des Längengrades in der Navigation
 - Harrisons Schiffschronometer (1735-1762): 5 Sekunden Fehler nach 81 Tagen auf See
 - Feder- oder Gewichtswerk mit Hemmung durch Pendel bzw. Unruh
 - Präzise Mechanik mit Ausgleich thermisch bedingter Änderungen

Kurze Geschichte der Zeit(messung): Standardisierung

- Ziel: Sinnvoller Bezug zur natürlichen Umwelt
 - Sonnentag: Intervall zwischen zwei Sonnendurchgängen
 - Sonnensekunde: $\frac{1}{86400}$ eines Sonnentages
- Sonnentage sind nicht gleich lang \Rightarrow Mittelwertbildung über eine größere Zahl von Tagen
- 1948 Atomuhr
 - 1 Sekunde = Zeit für 9.192.631.770 Zustandsübergänge des Cäsium-133-Atoms
 - 1 Atomsekunde = mittlere Sonnensekunde im Jahr der Einführung
- Bureau International de l'Heure (BHI) bestimmt die internationale Atomzeit (TAI)



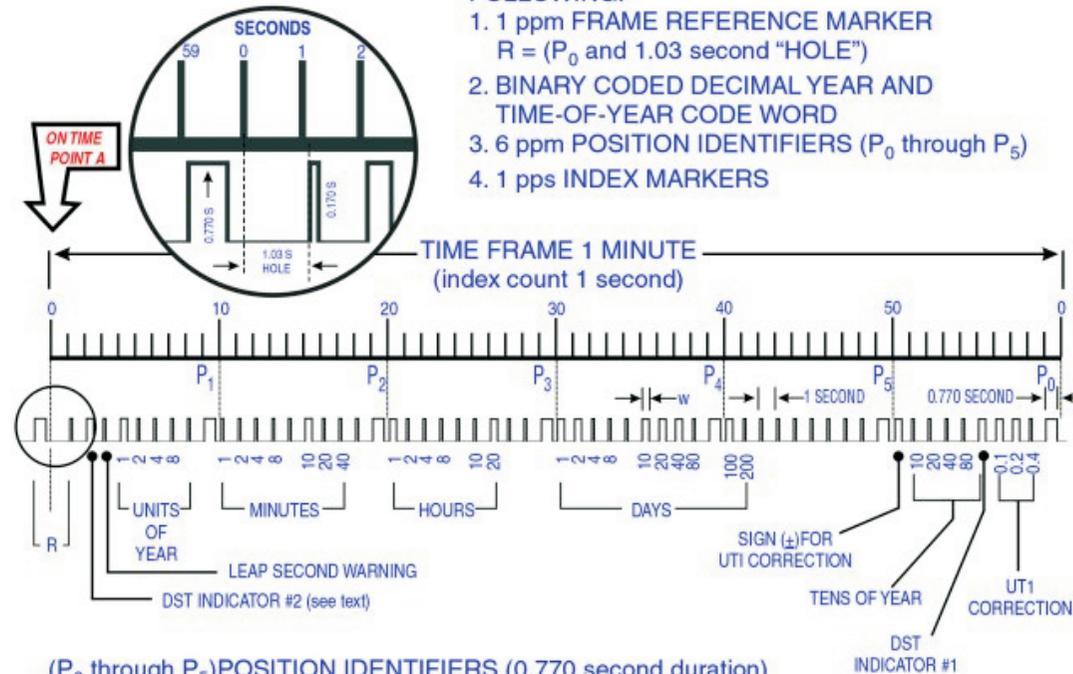
- Problem: Atomzeit nicht genau Sonnenzeit
- Einführung einer *Universellen Koordinierten Zeit* (UTC) mit Schaltsekunden
- Schaltsekunden werden immer dann eingefügt (herausgenommen), wenn die Differenz zwischen Sonnenzeit und UTC größer als 800 ms wird.
- UTC wird von Kurzwellensender (WWV) ausgestrahlt (Fort Colling, ca. 100km nördlich von Denver)

WWV Time Code Format

WWV and WWVH TIME CODE FORMAT

MODIFIED IRIG H FORMAT IS COMPOSED OF THE FOLLOWING:

1. 1 ppm FRAME REFERENCE MARKER
R = (P_0 and 1.03 second "HOLE")
2. BINARY CODED DECIMAL YEAR AND TIME-OF-YEAR CODE WORD
3. 6 ppm POSITION IDENTIFIERS (P_0 through P_5)
4. 1 pps INDEX MARKERS



(P_0 through P_5) POSITION IDENTIFIERS (0.770 second duration)

W WEIGHTED CODE DIGIT (0.470 second duration)

DURATION OF INDEX MARKERS, UNWEIGHTED CODE, AND UNWEIGHTED CONTROL ELEMENTS = 0.170 SECONDS

NOTE: BEGINNING OF PULSE IS REPRESENTED BY POSITIVE-GOING EDGE.

UTC AT POINT A = 2001, 173 DAYS, 21 HOURS, 10 MINUTES

UT1 AT POINT A = 2001, 173 DAYS, 21 HOURS, 10 MINUTES, 0.3 SECONDS

Zeitmessung und Konsequenzen in Rechnersystemen

- Lokale Zeitmessung erfolgt in einem Rechner durch einen Timer (Zähler = Speicheradresse + Ticker)
- Problem: Unterschiedliche Tickfrequenzen führen zu Abweichungen sowohl von der realen Zeit, als auch untereinander
- Ursachen
 - Ungenaue Quarze
 - Gesperrte Interrupts
 - Nichtkonsistente Umweltbedingungen
- Im Einprozessorsystem meist unkritisch, da Ereignisreihenfolge konsistent bleibt
- Problem im verteilten System \Rightarrow Ziel: ein einziger, eindeutiger Zustand



Synchronisation

Wie sind Uhren in verteilten Systemen miteinander synchronisierbar?

Zwei Aspekte:

- **Logische Uhren**

- relative Zeit im verteilten System
- interne Konsistenz
- keine Berücksichtigung der Realzeit

- **Physikalische Uhren**

- Verwendung realer Zeit bzw. Abbildungen realer Zeit



Logische Uhren

- Eine Reihe von Problemen ist unabhängig von der realen Zeit
- Wichtig: Konsistente Zeitsicht
- Zeit wird als Abfolge von Ereignissen betrachtet, die für alle Prozesse die gleiche Ordnung haben (siehe Gruppenkommunikation)
- Beispiellösung: Algorithmus von LAMPORT

Wiederholung: *Happens-before-Relation*

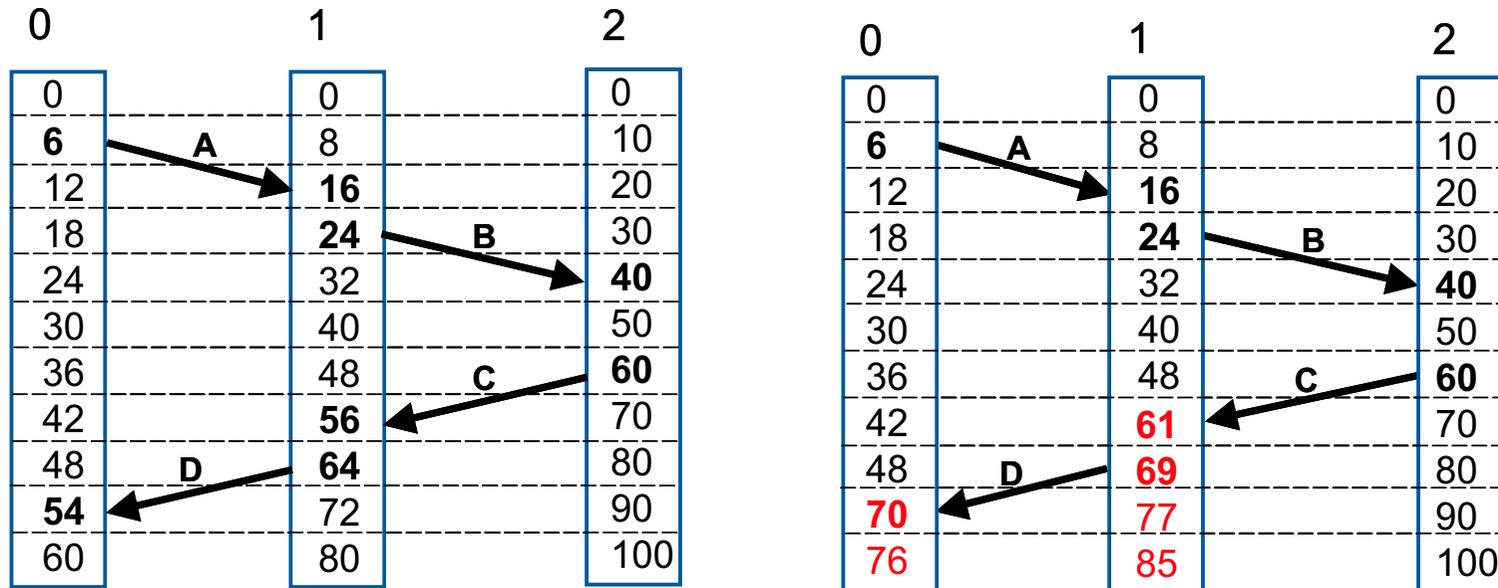
- LAMPORT benutzt die Relation „*happens before*“ (\prec)
- Zwei Ereignisse e_1 und e_2 erfüllen die *Happens-before-Relation* ($e_1 \prec e_2$), wenn folgendes gilt:
 - e_1 und e_2 treten bei einem Prozeß genau in dieser Reihenfolge auf, oder
 - e_1 ist das Senden einer Nachricht und e_2 ihr Empfang, oder
 - es gibt ein Ereignis e' , so daß $e_1 \prec e'$ und $e' \prec e_2$ gilt
- Wenn für zwei Ereignisse e_1 und e_2 weder $e_1 \prec e_2$ noch $e_2 \prec e_1$ gilt, so heißen e_1 und e_2 *nebenläufig* (Notation: $e_1 || e_2$)

LAMPORT-Algorithmus (I)

- Anforderungen:
 - Für jedes Ereignis e wird ein Zeitwert $C(e)$ angegeben, über den sich alle Prozesse einig sind ($C(e)$ soll unabhängig vom Prozeß gelten)
 - Es soll gelten: $e_1 \prec e_2 \Rightarrow C(e_1) < C(e_2)$
 - C soll (streng) monoton steigend sein
 - \rightarrow Korrektur der Zeit nur durch Addition eines positiven Wertes möglich
- Ansatz:
 - Jedes Ereignis e bekommt einen Zeitstempel (bzgl. der lokalen Uhr)
 - Bearbeitet ein Prozeß ein Ereignis, dessen Zeitstempel s_t größer oder gleich der lokalen Zeit c_l ist, so wird zunächst die lokale Zeit verstellt: $c_l := s_t + 1$

Beispiel für LAMPORT-Zeit

- Drei Prozesse mit lokalen Uhren
- Uhren laufen mit unterschiedlichen Raten



Physikalische Uhren

- Auch physikalische Uhren werden in der Regel nur „ungefähr“ die genaue Zeit anzeigen
- Aber: Im Gegensatz zu logischen Uhren werden strengere Anforderungen an die Beziehung der lokalen Uhrzeit zur tatsächlichen Uhrzeit gestellt
- Abweichung einer lokalen Zeit von der tatsächlichen Zeit: *Drift*
- Angezeigte Uhrzeit: $C(t)$

Korrekte und perfekte Uhren

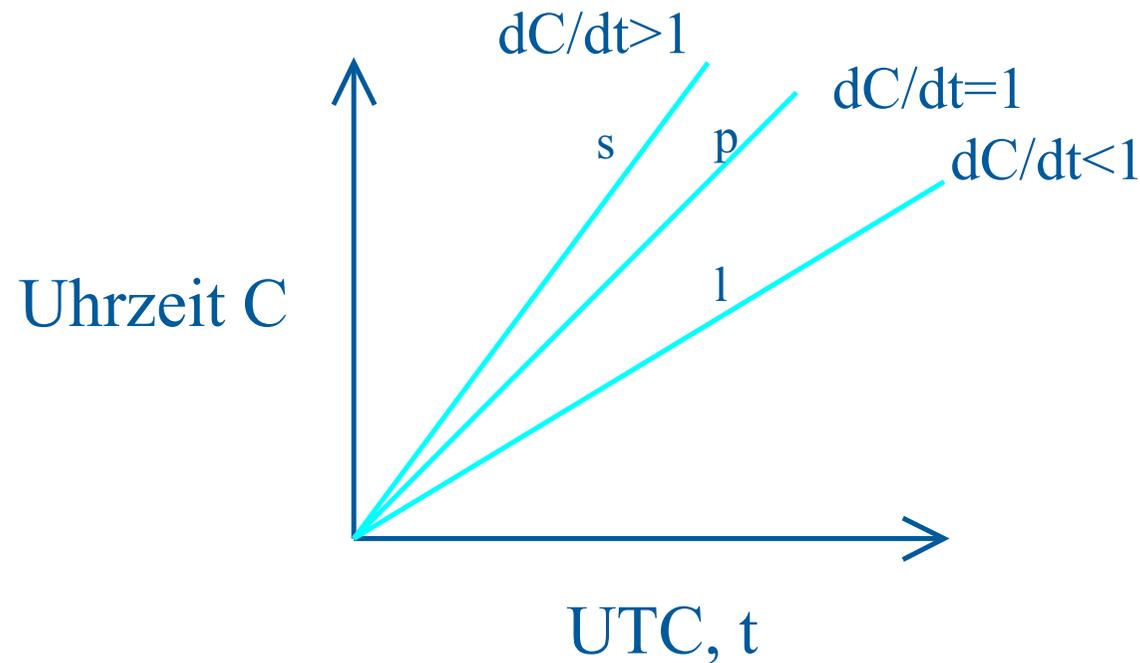
- Idealerweise hat eine Uhr keine Drift
⇒ perfekte Uhr: $C(t) = t$
- Echte Uhren sind nicht perfekt, Driftrate: p
- Nichtideale Uhren können *korrekt* sein
- Korrekte Uhr:

$$\frac{1}{1+p} \leq \frac{dC(t)}{dt} \leq 1 + p$$

- Achtung: Eine korrekte Uhr kann stark falsch gehen (Korrektheitsannahme sagt nur etwas über die Drift, nicht über die angezeigte Zeit)
- Unkorrekte Uhren verletzen z.B. die Driftannahme, gehen rückwärts oder zeigen willkürliche Zeiten an

Vor- und nachgehende Uhren

- Selbst wenn eine korrekte Uhr zu einem Zeitpunkt die richtige Zeit anzeigt, wird sie später vor- oder nachgehen
- Synchronisation ist nötig



Synchronisationsintervall (I)

- Zwei korrekte Uhren mit der Drift p sollen nicht mehr als Δ auseinanderlaufen.

Wie groß ist das maximal erlaubte Synchronisationsintervall?

- Annahmen:

zu $t = 0$ seien die Uhren synchron, worst case: $\frac{C_1(t)}{t} = 1 + p$,
 $\frac{C_2(t)}{t} = \frac{1}{1+p}$

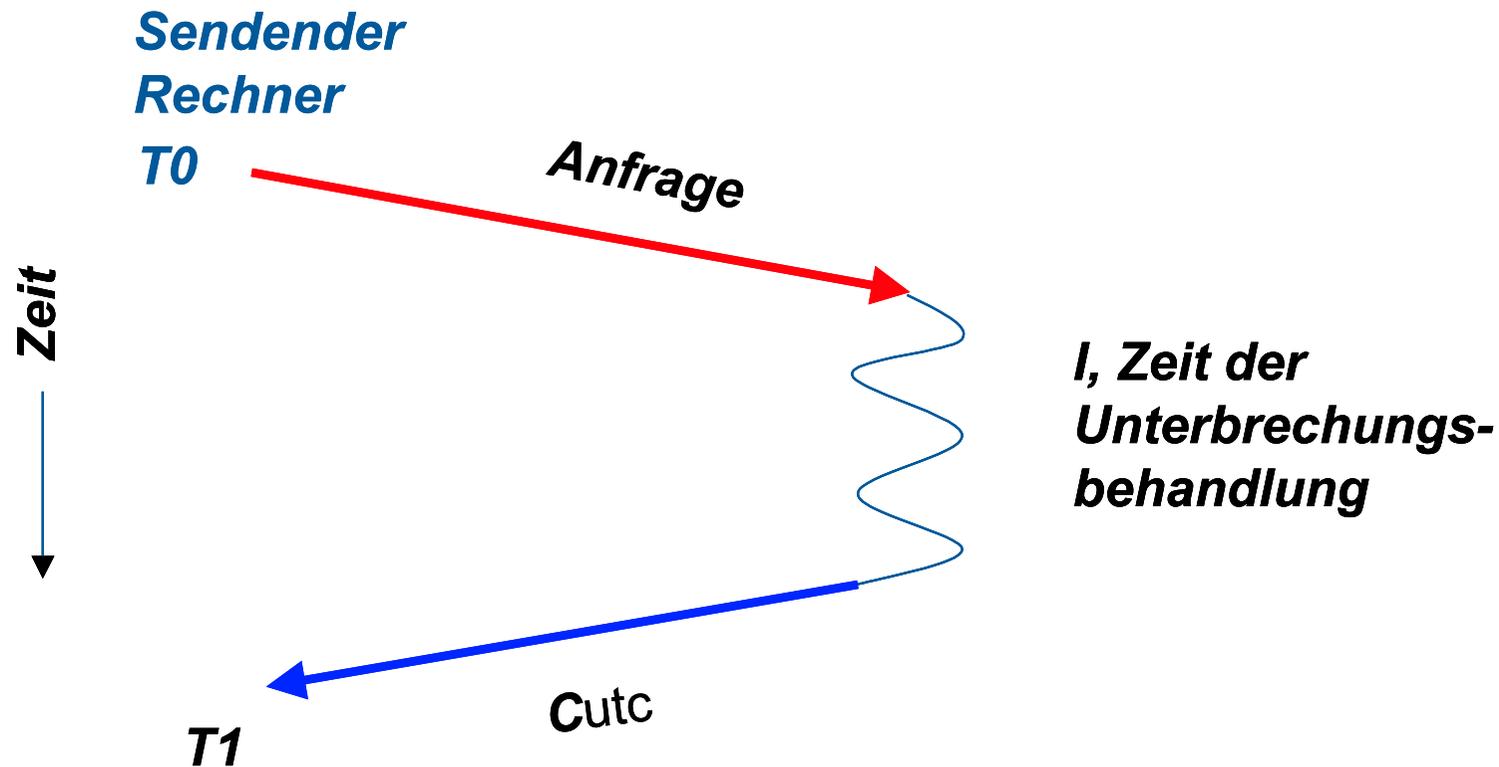
Synchronisationsintervall (II)

- Wenn zu $t = 0$ synchron, dann $C_1(t) = (1 + p)t$ und $C_2(t) = \frac{t}{1+p}$
- $(1 + p)t - \frac{t}{1+p} \leq \Delta$
- $\frac{(1+p)^2 t - t}{1+p} \leq \Delta$
- $t \frac{2p+p^2}{1+p} \leq \Delta$
- $t \leq \Delta \frac{1+p}{2p+p^2}$
- Die Uhren müssen nach spätestens $\Delta \frac{1+p}{2p+p^2}$ synchronisiert werden
- Für sehr kleine p : $t \approx \frac{1}{2p} \Delta$

Uhrenynchronisation nach CRISTIAN (I)

- Algorithmus von CRISTIAN (1989)
- Annahme: Ein Rechner ist mit einem WWV-Empfänger ausgestattet
- Ziel: alle Rechner sollen mit dem Zeit-Server synchronisiert werden
- Es werden korrekte Uhren angenommen
- Ansatz: Eine Uhr schickt genügend häufig einen Request an den Zeitserver. Dieser antwortet so schnell wie möglich mit der Zeit C_{UTC}
- Erste Näherung: $C = C_{UTC}$

Uhrenynchronisation nach CRISTIAN (II)



Uhrenynchronisation nach CRISTIAN (III)

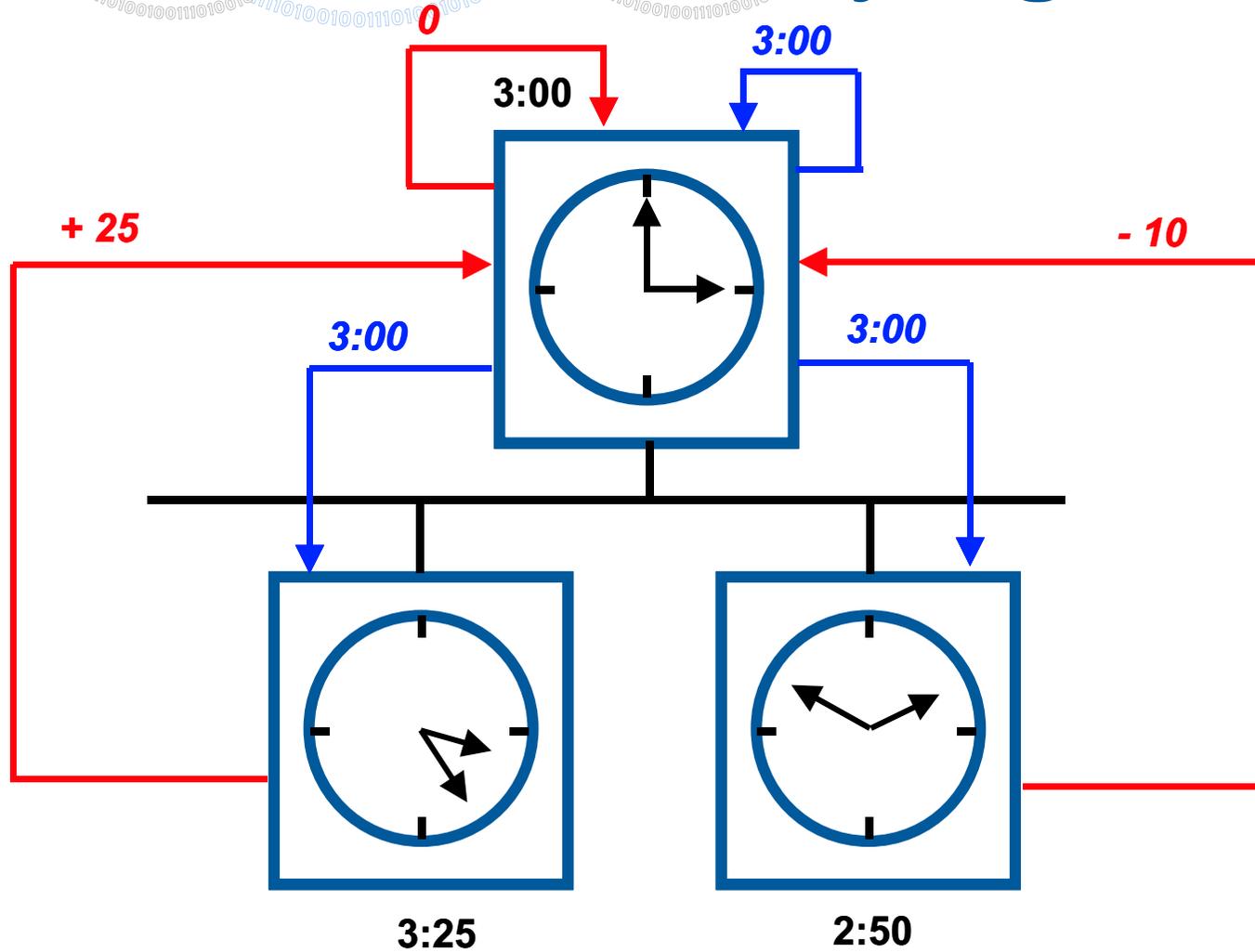
Probleme:

- **Problem 1:** Zeit darf niemals rückwärts laufen
 - Es könnte sein, daß die Uhr des Klienten vorgeht
- Lösung:
 - Der Klient ändert seine Uhr in mehreren Schritten
 - Z.B.: Normalerweise wird pro Tick um 10 ms erhöht, nun nur um 9 ms
- **Problem 2:** Es vergeht eine gewisse Zeit, bis der Zeitserver antwortet
- Lösung: Einrechnen der Verzögerung
 - Wenn Verzögerung bekannt, berücksichtigen
 - Sonst: $(T_1 - T_0)/2$ als Verzögerung annehmen
 - Mehrere Messungen; Mittelwertbildung (Verwerfen von Ausreißern)

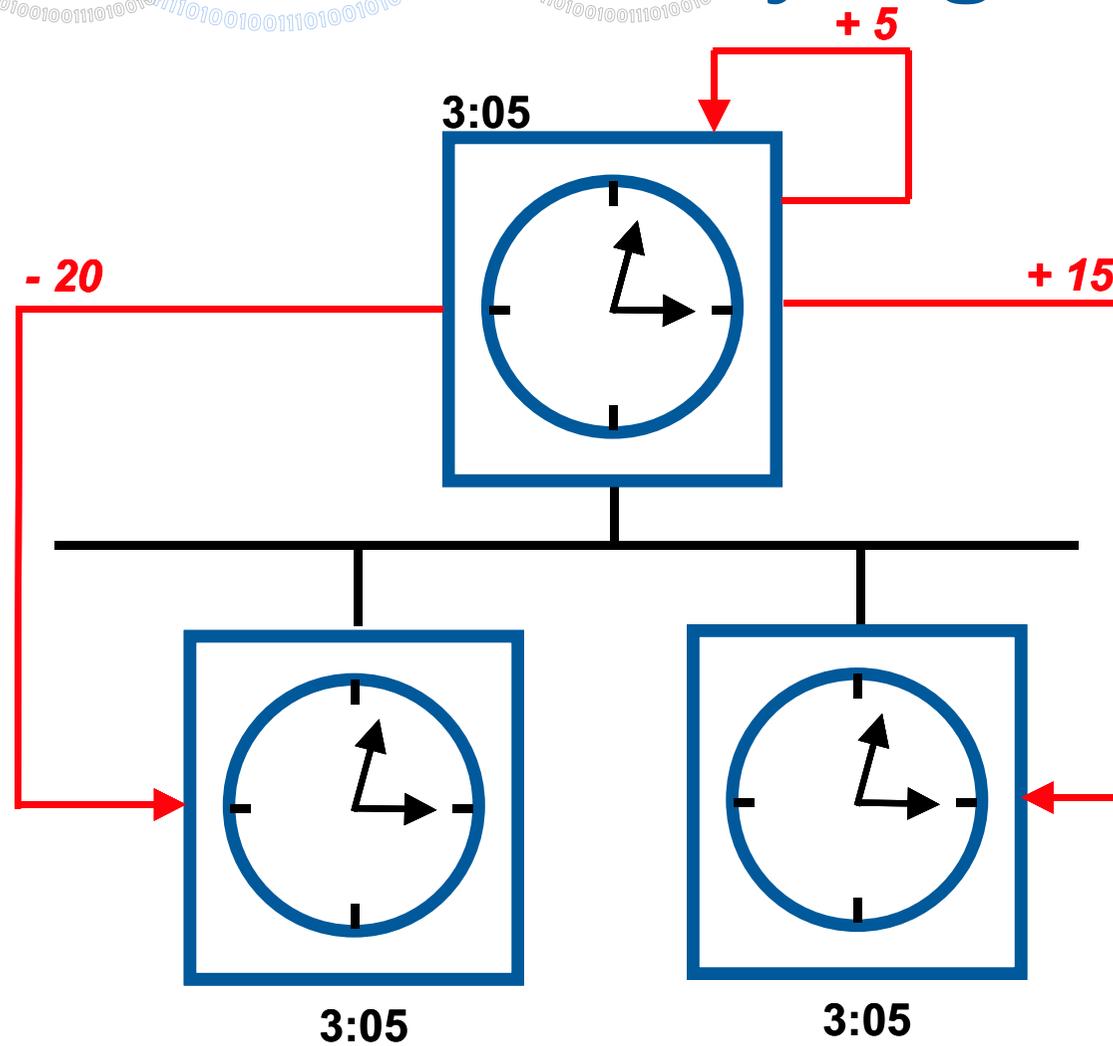
Berkley-Algorithmus (I)

- 1988 entwickelt an der Berkley University
- verzichtet auf WWV-Empfänger
- Entgegengesetzter Ansatz: statt passiven Zeitserver aktiver Zeit-Daemon, der alle Zeiten abfragt
- Daemon ändert die Zeit im System, auch bei sich selbst

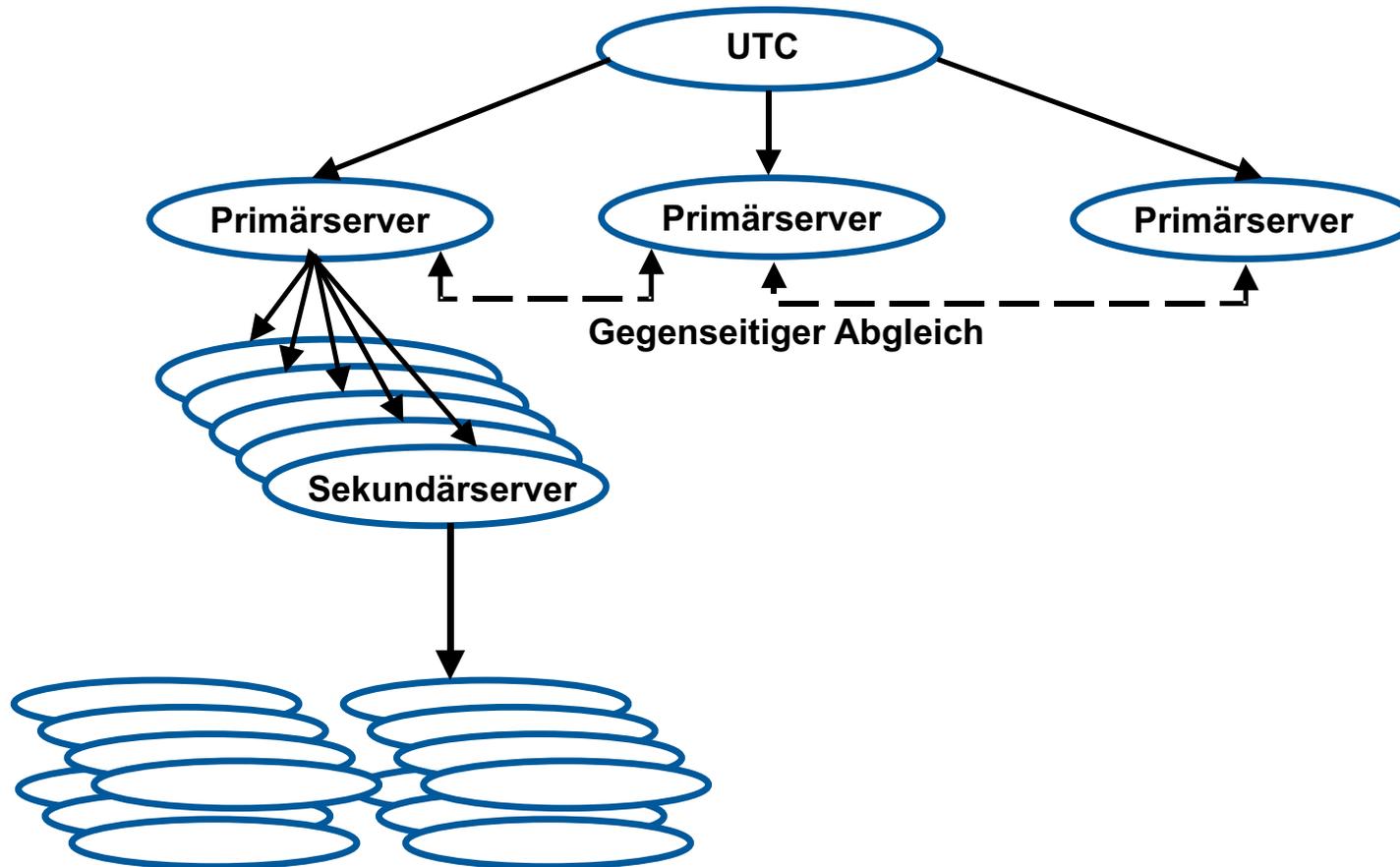
Berkeley-Algorithmus (II)



Berkeley-Algorithmus (III)



Network Time Protokoll - NTP



Grenze für Uhrensynchronisation

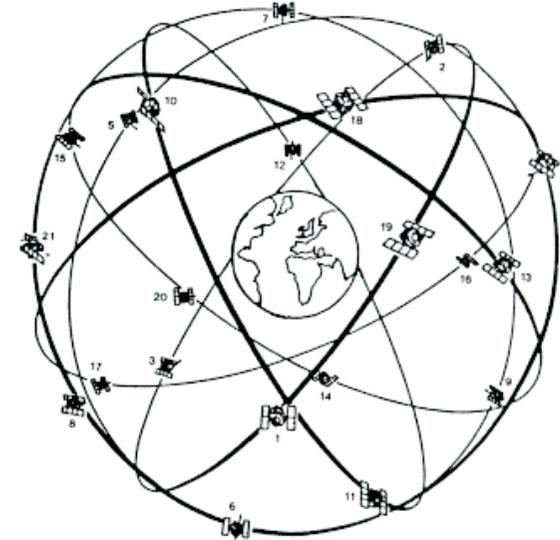
- Wie genau lassen sich n Uhren synchronisieren?
- Vereinfachte Annahmen:
 - Perfekte Uhren (keine Drift)
 - Schwankende Verzögerung der Nachrichtenübermittlung:
Unsicherheit ϵ
 - Stand der einzelnen Uhren anfangs unbekannt

Theorem 12.1. *Es gibt keinen Algorithmus, der n Uhren enger als auf ein Intervall der Größe $\epsilon \left(1 - \frac{1}{n}\right)$ garantiert synchronisiert.*

- Diese Grenze ist hart, da es Algorithmen gibt, die sie erreichen
- Beweis siehe LUDELIUS und LYNCH, *Information and Control*, Vol. 62, 1984 (Semesterapparat)

Mobile Zeitsynchronisation - GPS

- GPS - Global Positioning System dient normalerweise zur Positionsbestimmung
- Bei bekannter Zeit kann Entfernung zum Satelliten bestimmt werden
- 3 Entfernungen legen Punkt fest
- Bei unbekannter Zeit: 4 Entfernungen
- Durch Überbestimmung kann Zeit ermittelt werden
- Problem: Willkürlich falsche Zeiten aus taktischen Gründen
- Mögliche Lösung: Differenzen-GPS



Inkorrekte Uhren

- Inkorrekte Uhren können jede beliebige Zeit anzeigen - und das bei jeder Abfrage!
- Mittelwertbildung schlägt fehl
- Lösung: Byzantinisches Agreement
- \Rightarrow weniger als ein Drittel aller Uhren im System dürfen inkorrekt sein