

Verteilte Systeme – Übung

Zeit in verteilten Systemen

Sommersemester 2025

Harald Böhm, Christian Berger, Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Informatik 4 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Zeit in verteilten Systemen

Echtzeit-basierte Uhren

Logische Uhren

- Ist Ereignis A auf Knoten X passiert, bevor Ereignis B auf Knoten Y passiert ist?

Beispiele: Internet-Auktionen, Industriesteuerungen, ...

- Prinzipiell keine konsistente Sicht auf Gesamtsystem möglich

- Unabhängigkeit von Ereignissen
- Informationsaustausch mit Latenzen verbunden

⇒ Nur näherungsweise Lösungen möglich

- Bestes Verfahren abhängig von Einsatzgebiet und notwendigen Eigenschaften

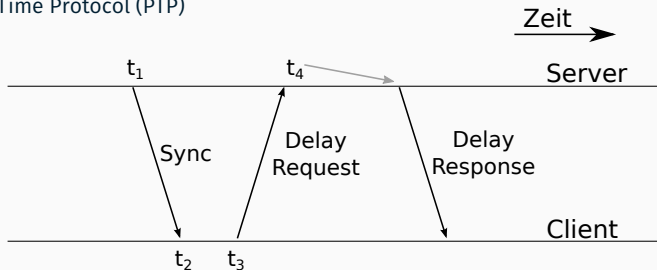
Zeit in verteilten Systemen

Echtzeit-basierte Uhren

- Nutzung eines gemeinsamen Zeitsignals
 - Auflösung beschränkt
 - Schwierig über größere Entfernungen
 - Ausbreitungsgeschwindigkeit: max. 30 cm/ns
- Nachrichten mit Zeitstempel lokaler, physikalischer Uhren versehen
 - Wenig Kommunikationsaufwand
 - Ohne Synchronisation: Zunehmende Abweichungen
- Kombination verschiedener Verfahren zur Verbesserung der Genauigkeit

Synchronisation von Echtzeituhren: NTP, PTP

- Stellen lokaler Uhr basierend auf Referenzuhr
- In der Praxis verwendete Protokolle:
 - Network Time Protocol (NTP)
 - Precision Time Protocol (PTP)



- Berechnung von Umlaufzeit & Verzögerung anhand von Zeitstempel
- Annahmen: Laufzeiten symmetrisch und stabil
- Genauigkeit über Internet in der Größenordnung 10 ms

- Messung von Neutrino-Flugzeit zwischen CERN und LNGS (732 km)
- Möglichst genaue Zeitsynchronisation zwischen Standorten
- White Rabbit: Kombination verschiedener Techniken
 - Synchronous Ethernet über Glasfaser
 - Atomuhren als Taktgeber
 - Precision Time Protocol (PTP) mit Hardware-Unterstützung
 - Global Positioning System (GPS)
- Ausgleich von Temperaturschwankungen durch ständige Phasen-Messung
- Genauigkeit: 0.5 ns, Präzision: 10 ps (5 km Teststrecke)



M. Lipiński, T. Włostowski, J. Serrano, and P. Alvarez.

White Rabbit: a PTP Application for Robust Sub-nanosecond Synchronization.

2011 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS'11), p. 25–30, September 2011.

Zeit in verteilten Systemen

Logische Uhren

Grundidee

Kausale Zusammenhänge entstehen durch gegenseitige Beeinflussung, d. h. Nachrichtenaustausch in verteiltem System

Modell

Kommunizierende Prozesse P_i versehen Ereignisse a mit logischem Zeitstempel $C_i\langle a \rangle$

Uhrenbedingung

Wenn Ereignis b aufgrund von a aufgetreten ist ($a \rightarrow b$), muss die Relation $C_i\langle a \rangle < C_j\langle b \rangle$ gelten

- Eigenschaften: transitiv, asymmetrisch $\Rightarrow$ Striktordnung
 - $\rightarrow$ Umkehrschluss **nicht** möglich: Aus $C_i\langle a \rangle < C_j\langle b \rangle$ folgt nicht $a \rightarrow b$!
- Erweiterte Ansätze können zusätzliche Eigenschaften garantieren
 - Totalordnung
 - Zuverlässige Unterscheidung abhängiger Ereignisse ($\rightarrow$ Vektoruhr)

■ Uhrenbedingung im Kontext von kommunizierenden Prozessen

1. Aufeinanderfolgende Ereignisse innerhalb eines Prozesses erhalten streng monoton steigende Zeitstempel
2. Senden einer Nachricht muss vor deren Empfang passiert sein, daher muss gelten:

$$C_i\langle\text{Senden}\rangle < C_j\langle\text{Empfang}\rangle$$

■ Regeln für Implementierung

1. Die logische Uhr C_i eines Prozesses P_i muss zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ereignissen immer inkrementiert werden
2. Erhält ein Prozess P_j eine Nachricht und deren Zeitstempel $C_i\langle\text{Senden}\rangle$ ist größer oder gleich dem Wert der Uhr C_j des Prozesses P_j , muss die Uhr auf einen Wert größer $C_i\langle\text{Senden}\rangle$ erhöht werden



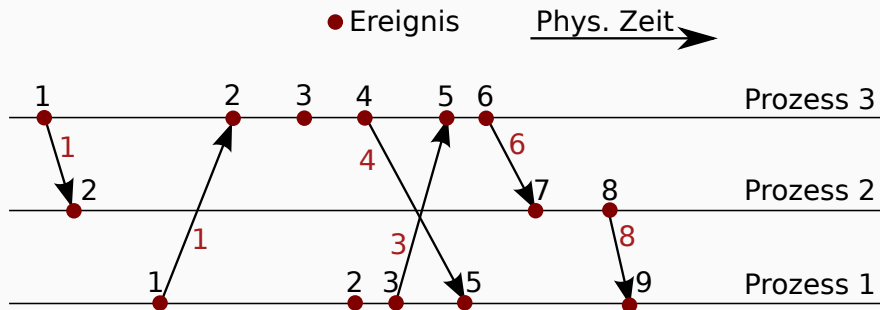
Leslie Lamport.

Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System.

Communications of the ACM, 21:558–565, July 1978.

Uhrenbedingung von Lamport

- Kein genereller Zusammenhang mit Ablauf physikalischer Zeit
 - Kein gleichmäßiger Verlauf
 - Folge von Ereignissen nach logischer Zeit nicht zwangsläufig identisch mit physikalischem Auftreten



- Für viele Anwendungen Totalordnung wünschenswert
 - Wenn Zeitstempel $C_i\langle a \rangle$ und $C_j\langle b \rangle$ gleich, gilt weder $C_i\langle a \rangle < C_j\langle b \rangle$, noch $C_j\langle b \rangle < C_i\langle a \rangle$
 - Beliebiges **determiniertes** Verfahren zur Festlegung möglich
 - Am einfachsten: Global eindeutige Prozess-ID entscheidet
 - Keine Beeinflussung der Aussage bezüglich kausaler Zusammenhänge
- Implementierung von Relationen in Java mittels Comparable

```
public interface Comparable<T> {  
    public int compareTo(T obj);  
}
```

- Methode `compareTo()` liefert Zahl abhängig von Relation
 - Negativ** : $\text{this} < \text{obj}$
 - „Null“** : $\text{this} = \text{obj}$, entspricht `equals()`
 - Positiv** : $\text{this} > \text{obj}$