

**DTS / NTP —  
Zeitsynchronisationsverfahren in  
verteilten Systemen**

F. Kardel

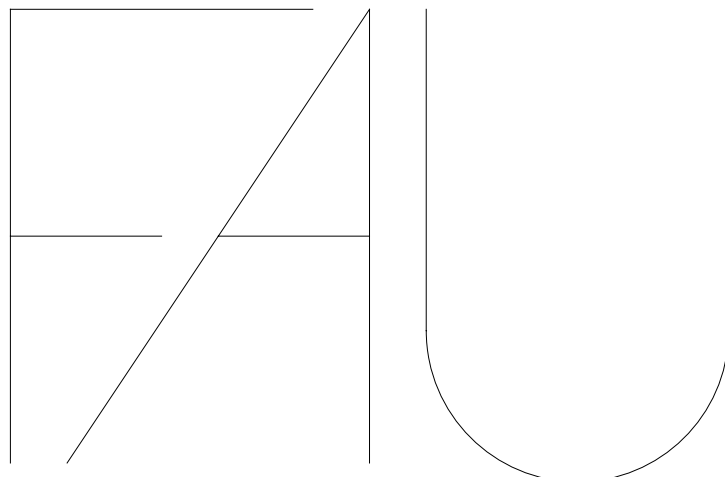
November 1993

TR-I4-13-93

**Interner Bericht**

Institut für  
Mathematische Maschinen  
und Datenverarbeitung  
der  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Informatik IV  
(Betriebssysteme)



Dieser Report wurde veröffentlicht in:

F. Kardel: "erscheint 1994

DTS / NTP — Zeitsynchronisationsverfahren in verteilten Systemen"; In: H. Wedekind  
[Hrsg.] *Verteilte Systeme*, Grundl. und zukünft. Entw. aus der Sicht des SFB 182;  
Bibliographisches Institut, Mannheim; erscheint 1994

# DTS / NTP — Zeitsynchronisationsverfahren in verteilten Systemen

Frank Kardel

E-Mail: kardel@informatik.uni-erlangen.de

Teilprojekt B2

Entwurf und Implementierung eines an Hardwarearchitektur und Aufgabenklassen  
adaptierbaren Multiprozessorsystems

## Zusammenfassung

Es gibt verschiedene Ansätze, den Begriff “Zeit” in verteilten Systemen zu definieren. Die ersten grundlegenden Untersuchungen wurden von Lamport [Lamp78] durchgeführt. Lamport hat das Zeitsynchronisationsproblem aus der Sicht der virtuellen Zeit zur Ereignisordnung betrachtet. Diese grundlegende Arbeit über logische Uhren hat viele Untersuchungen nach sich gezogen. Während die logischen Uhren sich sehr gut für Ereignisordnungen eignen, lassen sie doch den Aspekt der gesetzlichen Zeit[ZeitG78], mit der jeder täglich konfrontiert wird, unberücksichtigt. Die Behandlung dieser Thematik findet sich erst ab 1983 bei Marzullo/Owicki [Marz83] und wird von da an konkreter verfolgt.

Trotz der vielen Arbeiten zur logischen und gesetzlichen Zeitsynchronisation sind nur wenige wirklich verbreitete Implementierungen entstanden. Die Überlegungen zu logischer Zeit sind durchweg in Implementierungen von Koordinierungsverfahren und Transaktionssystemen eingeflossen.

Beim IMMD IV wird seit 1989 der NTP (Network Time Protocol) Zeitservice betrieben. Während der Betriebszeit sind mehrere Versionen des Protokolls von Dave L. Mills entwickelt worden und ständig von ihm an die Eigenschaften eines lokalen, wie auch eines Weitverkehrsnetzes angepaßt worden.

## 1 Einführung

In der Datenverarbeitung gibt es zwei unterschiedliche Begriffe der Zeitsynchronisation. Bei der logischen Zeitsynchronisation versucht man im verteilten System, eine gemeinsame “Zeit” zu etablieren, wobei es weniger auf eine Korrelation dieser Zeit mit einem offiziellen Zeitbegriff ankommt, als vielmehr auf die Möglichkeit, Ereignisse innerhalb eines verteilten Systems ordnen zu können. Ein Beispiel ist der Einsatz zur Ereignisordnung in Transaktionssystemen. Hier steht nicht mehr der Aspekt der Synchronisation im Sinne von Gleichzeitigkeit, sondern vielmehr der Koordinierungsaspekt im Vordergrund.

Der zweite Zeitbegriff dient zur Abbildung der offiziellen Zeit. Er wurde lange relativ stiefmütterlich behandelt und erlangt erst ab 1983 [POS83] größere Beachtung. Noch heute werden von

vielen Herstellern Rechnernetze mit vollkommen unzureichenden Systemen zur Zeitsynchronisation ausgeliefert. Meistens werden heutige Rechensysteme noch nach der “Armbanduhrmethode” synchronisiert.

Trotz der vielen Arbeiten zur logischen und gesetzlichen Zeitsynchronisation sind nur wenige wirklich verbreitete Implementierungen entstanden. Die Überlegungen zu logischer Zeit sind primär in Implementierungen von Koordinierungsverfahren und Transaktionssystemen eingeflossen.

Prinzipiell handelt es sich bei jeder Art von netzwerkweiter Zeitsynchronisation um ein byzantinisches Problem. Die Arbeiten zur logischen Zeit beziehen sich meist auf die Lösung des reinen byzantinischen Problems. Diese Vorgehensweise ist bei der gesetzlichen Zeit nicht mehr in voller Schärfe nötig, da hier im allgemeinen verlässliche bekannte Referenzen zur Verfügung stehen. Nichtsdestotrotz enthalten auch die Synchronisationsprotokolle für offizielle Zeit byzantinische Problembestandteile (Referenzauswahl, Netzwerkanomalien).

## **2 Zeitinterpretation**

Wie in der Einleitung schon erwähnt, gibt es zwei Interpretationen der Zeit. Die Zeit als Mittel zur Koordination und die Zeit zur Beschreibung periodischer physikalischer Vorgänge. Im folgenden Text wird das Hauptaugenmerk auf die Synchronisation von Rechnernetzen unter Verwendung der gesetzlichen Zeitbegriffs gerichtet, der sich aus der Beobachtung physikalischer Vorgänge ableitet.

### **2.1 Logische Zeit**

Für die meisten Koordinierungsprobleme ist es sinnvoll, einen logischen Zeitbegriff zu verwenden. Das Hauptanwendungsgebiet liegt deswegen im Bereich der Koordinierungsprobleme, weil hier die Reihenfolge von Ereignissen in einem verteilten System bestimmt werden muß [Hof92] oder sogar die Abfolge von Ereignissen nach bestimmten Kriterien vorzugeben ist. Lamport [Lamp78] hat gezeigt, daß das Konzept des “ein Ereignis passiert (logisch) vor einem Anderen” in einem verteiltem System eine partielle Ordnung definiert. Diese partielle Ordnung kann zu einer totalen Ordnung erweitert werden, die sich dann gut für Koordinierungsaufgaben im verteilten System verwenden läßt. Logische Uhren sind für Koordinierungsaufgaben unerläßlich. Es wird weiterhin gezeigt, wie sich logische Uhren für die Synchronisation von physikalischen Uhren (Oszillatoren) verwenden lassen und wie groß der maximale Fehler der Synchronisation ist. Dieser Ansatz führt zwar zu einem korrekt synchronisierten Netzwerk von Oszillatoren, doch leider bildet sich in diesem Netzwerk durch die Synchronisation eine mittlere Frequenz der Oszillatoren heraus. Dieses Ergebnis ist zwar immer noch für die Koordinierung und den Vergleich von Ereignissen brauchbar, aber kann nicht elementar zur Darstellung der gesetzlichen Zeit verwendet werden, da hier der Einfluß des Referenzoszillators fehlt.

## 2.2 Gesetzliche Zeit

Die gesetzliche Zeit leitet sich aus der Beobachtung von physikalischen Vorgängen ab. Da dies mit hoher Genauigkeit weltweit reproduzierbar ist, wurde dieses Vorgehen gewählt, um eine einheitliche Definition der gesetzlichen Zeit zu erhalten. Internationale Vereinbarungen sorgen für die weltweite Koordinierung der nationalen Zeitreferenzen und damit für eine gemeinsame, einheitliche Zeitskala.

Zeit spielt schon lange eine Rolle für den Ackerbau. Später wurde sie auch zur Navigation verwendet und heute wird Präzisionszeitmessung benötigt für die Bestimmung der Dichte des Universums [RAW87]. Die Vermessung der Erde und die Bestimmung von Kontinentaldrifts und damit auch die Klärung von Fragen zur Entstehung der Erde sind ohne genaue Zeitübermittlung oder Positionsbestimmung (die an die Zeit gekoppelt ist) nicht denkbar.

## 3 Darstellung gesetzlicher Zeit

### 3.1 Definition der Sekunde

Die Zeiteinheit der Sekunde wurde 1967 im SI Einheitensystem folgendermaßen definiert: *“Die Sekunde ist das 9 192 631 770 fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturenniveaus des Grundzustandes des Atoms des Nuklids <sup>133</sup>Cs entsprechenden Strahlung”* [SI67].

Diese neue Definition löste die historische, allein auf astronomischen Beobachtungen beruhende, Greenwich-Mean-Time-(GMT)-Definition ab.

### 3.2 Entwicklung von Kalendern

Die historische Zeiteinteilung beruht auf der Beobachtung von astronomischen Phänomenen. So leitet sich die Jahreseinteilung aus der Zeit eines Umlaufes der Erde um die Sonne ab und gibt somit einen Anhaltspunkt für jahreszeitlich bedingte Anbauzeitpunkte im Ackerbau. Viele Kulturen haben den Umlauf des Mondes auch für die Zeiteinteilung genutzt. Die Umdrehung der Erde um ihre Achse bestimmt den Tagesablauf. Eine ausführlichere Darstellung der verschiedenen Kalender und Zeitskalen findet sich in [Mills91].

Heutzutage wird hauptsächlich der Gregorianische Kalender verwendet.

Die Astronomie verwendet zur Beschreibung von astronomischen Ereignissen die Standardsekunde und die Julianische Tagnummer (Julianisches Datum – JD). Ein Standardtag hat 86400 Standardsekunden und ein Standardjahr 365,25 Standardtage. Die Zählung beginnt am 1. Januar 4713 v. Chr. und zählt in Tagen und deren Bruchteilen. Tage nahe der jetzigen Zeit werden im modifizierten julianischen Datum (MJD) angegeben, das sich wie folgt berechnet:  $MJD = JD - 2.40000,5$ . Mit dieser Konvention wird vermieden, daß allzu große Zahlenwerte auftreten. Es

ist zu beachten, daß die Jahreseinteilung des julianischen Datums nicht mit dem astronomischen Jahr übereinstimmt, da die Erde sich etwas langsamer um die Sonne dreht als in der Julianischen Zeitrechnung angenommen.

### **3.3 Aktuelle Zeitskala**

Es gilt seit 1972 die Atomzeitskala (TAI - Internationale Atom Zeit) entsprechend der Definition der Sekunde von 1967. Diese Definition bildet ein sehr präzise Zeitbasis (Genauigkeiten in Bereich von  $10^{-13}$ ). TAI wird durch mehrere Cäsium Oszillatoren definiert und bildet die Basis für Frequenzstandards. UTC basiert auf der TAI Zeitskala. Um ein Abwandern von UTC von astronomischen Begebenheiten zu vermeiden, werden Schaltsekunden eingeführt. Immer wenn sich die astronomische Zeit (UT1) um mehr als 0,9 Sekunden von UTC entfernt, wird in UTC eine Schaltsekunde eingefügt oder ausgelassen. Diese Schaltsekunden werden in Tabellen vermerkt, um eine Korrelation der Zeitskalen zu ermöglichen. Gewöhnlich werden momentan Schaltsekunden eingefügt, da sich die Erde langsamer dreht als durch das Standardjahr mit 365.25 Standardtagen vorgegeben.

### **3.4 Zeitauftrag der PTB**

Laut Gesetz vom 25. Juli 1978 [ZeitG78] wird die gesetzliche Zeit im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) dargestellt und verbreitet.

Dieser gesetzliche Auftrag zur Darstellung und Verbreitung der Zeit findet sich in den meisten Ländern und wird dort meist auch von den nationalen Behörden realisiert. Es gibt internationale Vereinbarungen, mit denen die nationalen Zeitbasen untereinander synchronisiert werden. Die sich hieraus ergebende Zeitskala wird Universal Time Coordinated (UTC) genannt und ist die Basis der meisten heutigen gesetzlichen Zeitskalen.

### **3.5 DCF 77 - Das Zeitsignal der PTB**

Die PTB hat zur Darstellung der Zeit zwei hochgenaue Cäsium-Atomuhren gebaut und leitet aus diesen Uhren die gesetzliche Zeit der Bundesrepublik Deutschland ab. Die Zeit wird mit Hilfe des Zeitzeichensenders DCF77 (Standort Mainflingen/Frankfurt 50° 01' Nord, 09° 00' Ost) verbreitet. Dieses Signal ist in der ganzen Bundesrepublik zu empfangen. Der Zeitcode enthält das Datum, wobei das Jahr nur 2-stellig angegeben wird, den Wochentag sowie die Zeit in Minutenauflösung. Der Zeitcode ist BCD codiert und pro Sekunde wird 1 Bit der Zeitinformation übertragen. Die Sekundeninformation kann während der Übertragung aufgrund der Minutensynchronisation rekonstruiert werden. Zusätzlich zu der Zeitinformation werden noch Daten über die verwendete Antenne, Sommerzeit und bevorstehende Schaltsekunden übertragen. Der Sender DCF77 erfüllt mit der Verbreitung des Zeitcodes und der Bereitstellung einer Normalfrequenzhat zwei Aufgaben[Zeit89].

Die Trägerfrequenz von DCF77 ist 77.5 KHz und wird von den Atomuhren der PTB abgeleitet. Die relative Abweichung der Trägerfrequenz vom Nennwert ist  $\leq 1 \cdot 10^{-12}$  pro Tag. Die Trägerfrequenz stellt die Normalfrequenz dar.

Der Zeitkode wird auf die Trägerfrequenz mit zwei Verfahren aufmoduliert. Das ursprüngliche Verfahren ist die Amplitudenmodulation. Hierbei wird der Träger am Anfang jeder Sekunde (bis auf die 59.) auf 25% seiner Amplitude für 100 bzw. 200 ms abgesenkt. Kurze Marken stellen für den Zeitkode binäre Nullen dar, während lange Absenkungen die Einsen darstellen. Das Signal ist leicht zu demodulieren und wird heutzutage in vielen preisgünstigen Empfängern genutzt. Allerdings erlaubt die AM-Demodulation nur eine Genauigkeit im Bereich von 1 ms. Die zweite Zeitkodemodulationsart ist das Phasenrauschen. Hierbei wird die Phase des DCF77 Signals entsprechend eines vorgegebenen Musters um  $\pm 10^\circ$  verschoben. Mit Hilfe der Kreuzkorrelation können die Ankunftszeitpunkte wesentlich besser bestimmt werden, und man erreicht so eine Zeitauflösung von ca. 10–20  $\mu$ s. Das Phasenrauschen beeinflusst die Qualität von DCF77 als Normalfrequenzsender nicht nennenswert.

### 3.6 Transport gesetzlicher Zeit

Gesetzliche Zeit setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Einerseits die Frequenz und andererseits die Epocheninformation. Die Anleitung zur Darstellung der Frequenz ist der Definition der Sekunde zu entnehmen. Die Epocheninformation (UTC) leitet sich aus dem Zählen der Schwingungen des Frequenznormals sowie der Epochendefinition 1972 der TAI Zeitskala sowie einem Korrekturfaktor ab.

Bei der Übertragung der gesetzlichen Zeitinformaton müssen zwei Komponenten, nämlich Frequenz und Phase (Epocheninformation), übertragen werden. Nicht überall können die nach der Definition der Sekunde erforderlichen Cs-Oszillatoren als Frequenznormal eingesetzt werden. Aus diesem Grunde wird auf erheblich einfachere Oszillatoren (Quarz) zurückgegriffen. Diese Oszillatoren weisen aufgrund ihres Funktionsprinzips teilweise erhebliche Abweichungen von der Sollfrequenz auf. Eine produktionsmäßige Kalibrierung ist wegen physikalisch bedingter Temperaturdrifts und Alterungserscheinungen nicht sinnvoll. Es bietet sich also nur eine kontinuierliche Frequenzkorrektur während des Betriebs an, wenn der Aufwand innerhalb vertretbarer Grenzen gehalten werden soll. Mit der Bereitstellung einer Frequenz ist es in einem verteilten System möglich, relative Zeitaussagen zu machen; die Relation zur gesetzlichen Zeit im Sinne der Epocheninformation ist aber immer noch nicht gegeben.

Die Epocheninformation wird durch nationale Institute bestimmt und verbreitet. Die Qualität der Verbreitung der Epocheninformation hängt stark von dem verwendeten Verbreitungsmedium ab. Nicht überall wird es möglich sein, ein *kalibriertes* Cs-Frequenz-/Zeitnormal einzusetzen. Innerhalb Deutschlands wird also auf den Langwellensender DCF77 zurückgegriffen. Der Vorteil eines Langwellensenders liegt in der großen Verbreitung des Signals. Wegen der physikalischen Einschränkungen in der Ausbreitung des Signals ist eine Unsicherheit der Epocheninformation in dem empfangenen Signal vorhanden. Alle Verbreitungsverfahren weisen das

Problem auf, daß die Epocheninformation nur innerhalb einer gewissen Genauigkeit bestimmt werden kann. Bei Vorhandensein von sehr guten Oszillatoren ist es durch lange Beobachtung möglich, die Epocheninformation genauer zu bestimmen.

Generell kann man sagen, daß die Bestimmung der Epocheninformation erheblich höhere Ungenauigkeiten aufweist als die Bestimmung der Frequenz. Einen großen Beitrag zur Unsicherheit der Epochenbestimmung liefern hierbei schwer bestimmbare Unterschiede bei Signallaufzeiten. Atmosphärische Effekte (z. B. die Überlagerung von Raum- und Bodenwelle[Hetzel93]) führen zu unterschiedlichen Laufzeiten des verbreiteten Signals. Weiterhin gibt es unterschiedliche Laufzeiten bei der Datenverarbeitung innerhalb eines Rechners.

## **4 Zeitsynchronisationsverfahren**

Von den vielen realisierten Zeitsynchronisationsverfahren haben nur wenige Verfahren größere Verbreitung erlangt. Neben den ganz einfachen Verfahren, die über das Netz die Zeit in Sekunden seit 1. Jan 1900 00:00 Uhr übermitteln (time [POS83]), und Verfahren, die versuchen, den Rechner anhand eines Referenzrechners ohne besondere Berücksichtigung der Netzeigenschaften und fehlerhaften Referenzen (BSD timed), gibt es auch ausgefeiltere Verfahren, die bei der Synchronisation Uhrenqualitäten, Ablesefehler und statistische Netzwerkeigenschaften berücksichtigen (DEC DTS [DEC89] und NTP[Mills90]).

Die einfachen Verfahren leiden darunter, daß sie keine Möglichkeit haben, fehlerhafte Zeitinformation durch Vergleich mit anderen Zeitquellen zu entdecken, und meist auch kein Verfahren haben, um Netzwerkverzögerungen zu bestimmen und zu berücksichtigen. Die ausgefeilteren Verfahren versuchen unter Berücksichtigung von statistischen Eigenschaften und Konfigurationsparametern, die Rechneruhren innerhalb eines tolerierbaren Zeitintervalls an der gesetzlichen Zeit zu halten.

Die meisten der derzeit im Einsatz befindlichen Synchronisationsverfahren sind Master-Slave-Verfahren. Diese Vorgehensweise ist unabdingbar, weil das Ziel die Synchronisation der Rechneruhren mit der gesetzlichen Zeit ist. Diese Zeitreferenz wird von nationalen Labors über Zeitzeichensender (erdgebunden oder über Satelliten) verbreitet.

Von den derzeit verwendeten Synchronisationsverfahren sind zwei hierbei besonders hervorzuheben: DTS und NTP. Beide Verfahren arbeiten nach dem Master-Slave Prinzip und beziehen zusätzlich noch das Vorhandensein von Referenzzeitgebern (Zeitzeichenempfänger oder Zeitnormale) ein. Sie verhindern somit weitgehend eine Abweichung von der konkreten gesetzlichen Zeit. Beide Protokolle berücksichtigen Netzwerkeigenschaften und versuchen die statistischen Fehler weitgehend zu eliminieren.



## 4.1 Zeitsynchronisation innerhalb eines Netzwerkes

Trotz der ständig fallenden Preise für Zeitzeichenempfänger ist es nicht immer sinnvoll oder möglich, jeden vernetzten Rechner mit einem Zeitzeichenempfänger auszustatten. Einerseits bedeutet dies einen erhöhten Installationsaufwand, und andererseits ist eine Softwarelösung immer noch preiswerter. Nicht immer ist auch ein Anschluß von Zeitzeichenempfängern möglich, weil zum Beispiel alle Anschlüsse belegt sind und man nicht um der Zeitsynchronisation willen auf Anschlüsse verzichten möchte. Nur bei extrem hohen Verfügbarkeitsanforderungen erscheint eine Installation von einzelnen Zeitzeichenempfängern sinnvoll. Selbst hier sollte dann auch noch eine Synchronisation übers Netz vorgesehen werden, um auch einem möglichen Ausfall des rechnerlokalen Zeitzeichenempfängers Rechnung zu tragen.

## 4.2 Laufzeit und Zeitdifferenzbestimmung

Die Grundidee der Zeitdifferenzbestimmung beruht auf dem Austausch einer Mitteilung zwischen zwei Rechnern. Hierbei werden vier Zeiten bestimmt. Die erste Absendezeit ( $t_1$ ), die erste Empfangszeit ( $t_2$ ), die zweite Absendezeit ( $t_3$ ) und die zweite Empfangszeit ( $t_4$ ). Man kann nur die Zeiten, die auf demselben Rechner gemessen wurden, vergleichen, weil die beiden Zeitskalen gegeneinander verschoben sind. Dennoch kann man zwei Werte bestimmen: Die Zeitdifferenz und die Laufzeit der Mitteilung im Kommunikationssystem.

Die Laufzeit bestimmt sich zu:

$$d = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)$$

Die Zeitdifferenz errechnet sich aus:

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

Abbildung 4.1 verdeutlicht die von Rechner B mit A ausgetauschten Nachrichten.

Bei dieser Form des Transfers der Epocheninformation ist zu beachten, daß nur die Gesamtlaufzeit der Nachricht im Kommunikationssystem (wozu auch die Verarbeitungsstufen im Betriebssystem gehören) zu bestimmen ist. Es ist nicht möglich, die Hin- oder Rücklaufzeiten zu bestimmen. Dies hat zu Folge, daß die Zeitdifferenz nur dann genau bestimmt werden kann, wenn die Hin- und die Rücklaufzeit gleich lang sind. Ist dies nicht der Fall, so ergibt sich bei der Zeitdifferenzbestimmung ein Fehler bis zu maximal der Hälfte der Laufzeitdifferenz. Eine genaue Bestimmung wäre nur dann möglich, wenn die beiden beteiligten Rechner synchronisierte Uhren hätten.

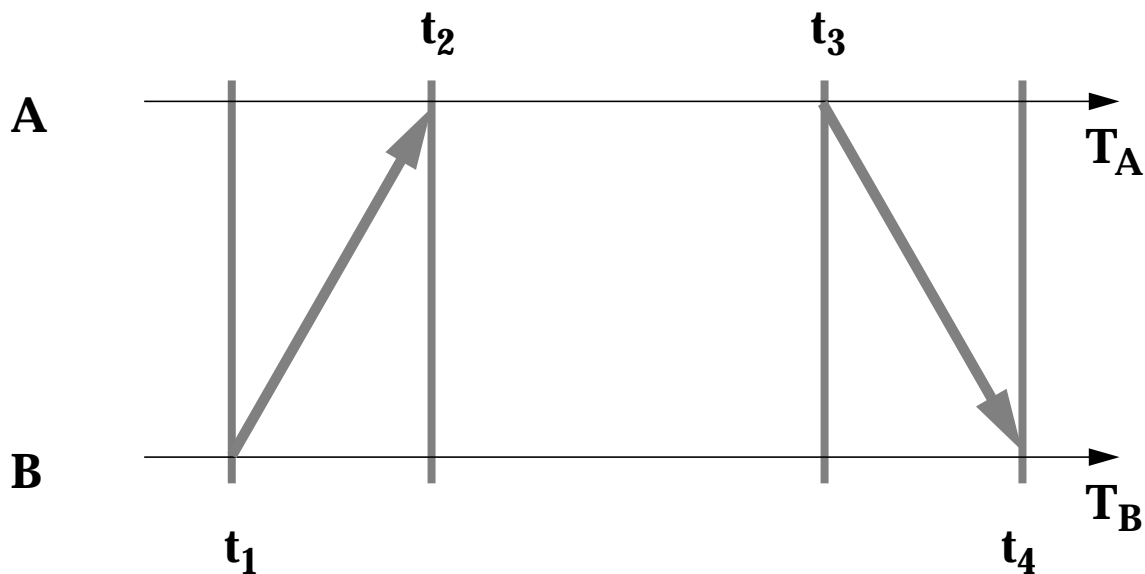


Abb. 4.1 Nachrichtenaustausch zum Zeittransport

### 4.3 DTS – Distributed Time Service

DTS steht für Distributed Time Service. Dieser Dienst ist bei der OSF (Open Software Foundation) für Zeitsynchronisation vorgeschlagen. Hauptaugenmerk bei der Entwicklung wurde auf Verifizierbarkeit der erreichten Synchronisation gelegt.

DTS verwendet drei Typen von Diensten:

- Time Provider  
Referenzzeitquellen
- Couriers  
Übernahme der Zeit von einer oder mehreren entfernten Referenzzeitquellen
- Server  
versorgen eine unter Umständen große Population von “Clerks” mit der Zeit
- Clerks  
synchronisieren sich mit den “Servern”

DTS ist primär für die Anwendung im LAN entworfen worden, und bei dem Entwurf der Protokolls wurde besonders auf einfache (Auto-)Konfiguration, Verifizierbarkeit und Angabe von Fehlerschranken geachtet.

Das Zeitsynchronisationsprotokoll mißt die Laufzeit der Mitteilungen, berechnet den Zeitunterschied zwischen den beteiligten Rechnern und berücksichtigt das Fehlerintervall, das von den Servern angegeben wird und durch die Nachrichtenlaufzeit entsteht. Bei jeder Synchronisationsphase, die bei einem clerk alle 15 Minuten durchlaufen wird, wird eine Menge von Servern befragt. Diese Meßwerte von Zeitdifferenzen zu den Zeitservern plus/minus den jeweiligen Fehlerschranken erlauben das Zeitintervall, das UTC enthält, zu extrahieren [MAR85]. Der Mit-

telpunkt dieses Intervals gibt den Zeitpunkt an auf den dann synchronisiert wird. Es werden keine vorherigen Meßwerte berücksichtigt, d.h. jede Meßphase beginnt neu. DTS macht keine Versuche, den Frequenzfehler der lokalen Uhr dauerhaft zu bestimmen und zu korrigieren. Demnach entfernen sich die lokalen Rechneruhren nach Ausfall der Synchronisation und damit des Korrektursignals mit dem ihnen innewohnenden Frequenzfehler von UTC. Die Regelung von DTS entspricht einer Typ I Phase Locked Loop. Dieser Typ PLL hat den Vorteil, das sie stabil ist [Ogata70].

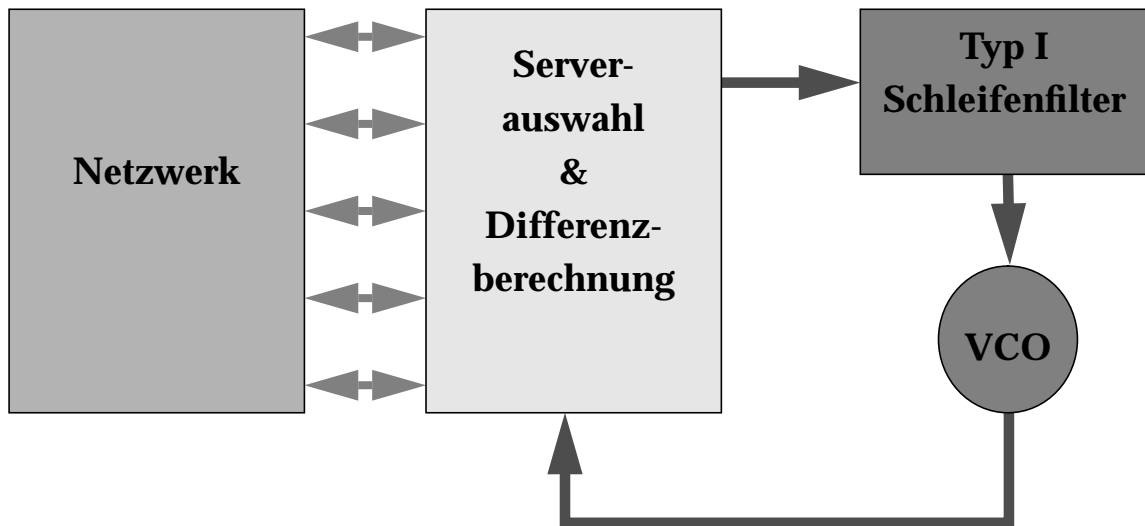


Abb. 4.2 Prinzip des Distributed Time Service

#### 4.4 NTP – Network Time Protocol

NTP (Network Time Protocol) existiert in drei Versionen. Version 1 [Mills88] wurde 1988 als RFC (Request for comments) veröffentlicht. 1989 entstand Version 2 [Mills89]. Diese Version berücksichtigte viele praktische Erfahrungen aus dem Einsatz von NTP im Internet. Die dritte Version [Mills90] ist die aktuelle NTP Protokollspezifikation. Dieses Protokoll enthält weitere Verbesserungen aufgrund von Erfahrungen im Internet und Erweiterungen, die durch die Korrektheitsansprüche des DTS Protokolls initiiert wurden.

NTP realisiert ein hierarchisches Synchronisationsverfahren, bei dem sich das Synchronisationsnetzwerk bei Ausfällen oder Verschlechterungen von Netzwerkpfeilen dynamisch nach dem Bellman-Ford Algorithmus rekonfiguriert.

NTP mißt zur Zeitsynchronisation die Umlaufzeit zwischen Klienten(Slave) und Server(Master) und bestimmt die Zeitdifferenz. Der Server liefert zusätzlich zu den benötigten Zeitstempel noch Information über das von der Referenz bis zum Server akkumulierte Fehlerintervall. Außerdem wird auch noch die Schaltsekundenwarnung übertragen. Aus diesen Werten, die von NTP periodisch (mit dynamisch angepasster Rate) ermittelt werden, erstellt NTP eine Statistik über die letzten 8 Messungen. Aufgrund der Beobachtung, daß die kürzeste Umlaufzeit die be-

sten Zeitdifferenzabschätzungen ergibt, wird von NTP unter Verwendung mehrerer Zeitserver eine synthetische Zeitdifferenz berechnet, die zur Korrektur der lokalen Uhr verwendet wird. In die synthetischen Zeitdifferenz gehen Faktoren wie Distanz zur Referenz und Fehlerintervall ein. Der Vorteil der Berechnung einer synthetischen Zeitdifferenz liegt darin, daß Fehler, die durch asymmetrische Nachrichtenlaufzeiten zu unterschiedlichen Zeitservern entstehen, minimiert werden, da mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht alle beteiligten Referenzzeitquellen dieselben asymmetrischen Verzögerungen in der Nachrichtenübermittlung erfahren.

Das Uhrenmodell von NTP ist eine Typ II PLL. Dieser Typ PLL bestimmt zusätzlich zur ständigen Frequenzkorrektur den inhärenten Frequenzfehler der lokalen Uhr. Der Vorteil dieser PLL liegt in der Möglichkeit, die Frequenz der lokalen Uhr auch dann noch zu korrigieren, wenn das Korrektursignal (Synchronisation) ausfällt. Die lokale Uhr wird durch langfristige Beobachtung an die vorgegebene Referenzfrequenz angepaßt und kann somit Synchronisationsausfälle erheblich besser überstehen, als Typ I PLL regulierte Uhren.

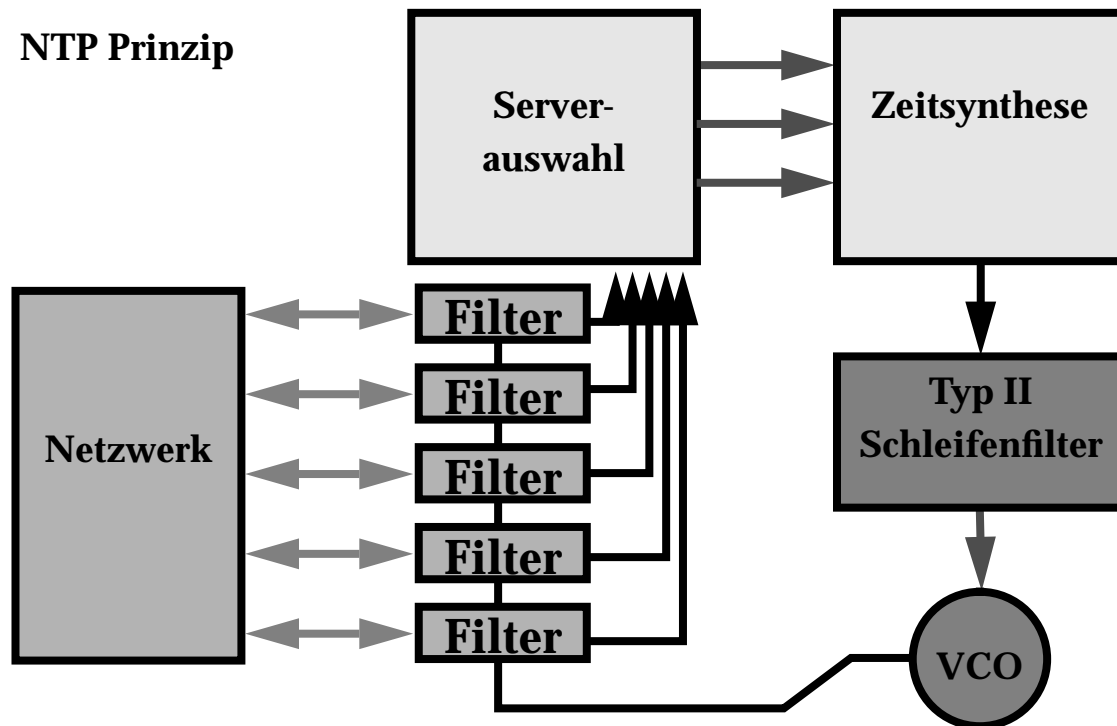


Abb. 4.3 Prinzip des Network Time Protocol

## 4.5 DTS und NTP

Die beiden Verfahren DTS und NTP haben verschiedene Zielrichtungen. DTS verfolgt eine einfache Konfigurierbarkeit und korrekte Angabe des aktuellen Fehlers. Frequenzfehler der lokalen Uhr werden allerdings bei Ausfall der Synchronisation nicht kompensiert, so daß bei Ausfall der Synchronisation sehr schnell die Korrelation zur gesetzlichen Zeit verlorengehen kann. Die Hauptziele von NTP sind in dem Aufbau eines lokalen Frequenznormals und damit die Tolerierung von Netzwerkfehlern. NTP ist zur Zeit noch nicht einfach konfigurierbar. Dies ist in der Tatsache begründet, daß die Konfiguration nicht Bestandteil der Protokolls ist. Das Problem der

Konfiguration ist nicht nur NTP zu eigen, sondern findet sich bei vielen der heutzutage eingesetzten Netzwerkprotokolle. Hier sollte man auf umfassendere Lösungen im Rahmen des Netzwerkmanagements zurückgreifen können.

Im praktischen Betrieb hat NTP die Verwendbarkeit im Internet schon bewiesen, während DTS als OSF DCE (Distributed Computing Environment) Protokoll diesen Beweis noch erbringen muß. In wie weit sich Designentscheidungen, wie zum Beispiel Typ I PLL versus Typ II PLL, auswirken, muß sich noch zeigen.

## 5 Erfahrungen beim Betrieb einer Referenzquelle

Beim Betrieb einer Referenzzeitquelle stehen drei Aspekte im Vordergrund. Hohe Genauigkeit bietet eine Basis, um die guten Eigenschaften des Zeitempfinders nicht gleich bei der Einspeisung in das Zeitsynchronisationsnetz zu verlieren. Es sollte natürlich auch eine hohe Verfügbarkeit gegeben sein, was Rechner, die über Nacht ausgeschaltet werden, oder deren Betriebssystem unzuverlässig ist, ausschließt. Um die netzwerkbedingten Verzögerungen zu minimieren, sollte der Rechner, der die Zeitreferenz bildet, möglichst zentral innerhalb des Netzwerkes installiert sein.

### 5.1 Rechner- und Betriebssystemanforderungen

Besonders für Rechner, die die Zeit weiterverbreiten ist eine hohe Genauigkeit der lokalen Rechneruhr nötig. Die Qualität der Rechneruhr wird durch das Betriebssystem und die Hardware bestimmt. Einfache Systeme nutzen einen periodischen Interrupt um die Rechneruhr nachzuführen. Um das System nicht übermäßig mit der Uhrenimplementierung zu belasten, muß ein Kompromiß für die Interruptrate gefunden werden. Dieser Kompromiß liegt heutzutage bei einer Interruptrate von 100Hz. Damit ist eine Uhrenauflösung von 10ms erreichbar. Dies ist nicht immer befriedigend und für Referenzzeitquellen nicht tragbar, zumal die Kommunikationszeiten heute schon deutlich unter 10ms liegen. Um dieses Problem zu lösen wird häufig eine Hardwarelösung verwendet, die bei handelsüblichen Rechnern (Workstations) eine Auflösung von 1µs erreicht. Dies erscheint im Moment als ausreichend, zumal die derzeit nutzbaren Zeittransferverfahren auch in diesem Auflösungsbereich liegen, wenn man besonders aufwendige (teure) Verfahren außer Acht läßt.

Voraussetzung für eine gute Synchronisation ist allerdings eine gute Implementierung der Rechneruhr. Diese ist leider meist nur in BSD Systemen gegeben. Bei System V Systemen (bis System V Release 3) fehlt meist noch die Unterstützung zur Frequenzanpassung der lokalen Uhr (`adjtime()`) sowie eine hinreichend hohe Auflösung der Rechneruhr. Dieser Umstand scheint sich mit der Einführung von System V Release 4 zu bessern (`adjtime()` Einführung). Leider ist es in System V Release 4 bei vielen Portierungen immer noch nicht möglich, die Uhr mit einer Genauigkeit, die besser als Sekundenauflösung ist, zu setzen. Der Hinweis, daß dafür `adjtime()` verwendet werden kann, kann nur als schlechter "Workaround" betrachtet werden.

Wichtig ist auch, das der Uhreninterrupt nicht (oder zumindest nicht häufig) verloren geht. Wird diese Forderung nicht eingehalten, so ist Uhrensynchronisation schlecht, bzw. gar nicht möglich.

## **5.2 Referenzuhren**

Es gibt viele Empfänger für die gesetzliche Zeit. Die Auswahl richtet sich nach den Anforderungen für Preis und Genauigkeit. In Anbetracht der mit handelsüblichen Rechnern erreichbaren Genauigkeiten hat es wenig Sinn, extrem genaue Systeme (besser als 100ns) zu verwenden. Derzeit werden satellitenbasierte (GPS, GOES, LORAN C) Empfänger und Empfänger für terrestrische Sender eingesetzt (CHU, DCF77, MSF, TDF, WWV, ...). Diese Systeme haben Genauigkeiten von einigen Millisekunden bis zu wenigen 100 Nanosekunden. Diese Systeme bieten eine ausreichende Genauigkeit, um als Referenz für die Zeitsynchronisation im Netzwerk eingesetzt werden zu können. Die Preise für diese Empfänger bewegen sich von unter 100 DM (DCF AM Demodulator, PC Einsteckkarte) bis in Bereiche von mehreren 10.000 DM. Der Vorteil der teureren Geräte liegt in der erhöhten Genauigkeit und einem sehr stabilen Referenzoszillator, der auch bei Verlust des Empfangs für einen längeren Zeitraum die Zeitreferenz bilden kann. Die Wahl einer entsprechenden Zeitreferenz hängt zum einen von den finanziellen Möglichkeiten und zum anderen von den Anforderungen an die Genauigkeit und Verfügbarkeit ab. Im Allgemeinen wird schon eine relativ preiswerte Lösung (im Bereich von unter 1000DM für den Empfänger) vollkommen ausreichend sein.

## **5.3 Einbindung in Zeitprotokolle**

Die Anbindung der verschiedenen Referenzzeitempfänger stößt auf mehrere Hürden. Ein großes Problem stellt hierbei die möglichst exakte Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen der Referenz und der lokalen Rechneruhr dar oder die schnelle Übertragung der Referenzzeit zu dem Programmsystem, das das Zeitprotokoll realisiert. Hier ist häufig Betriebssystemunterstützung gefordert. Bei den gebräuchlichen Betriebssystemen erfordert dies meist spezielle Gerätetreiber, um die Genauigkeit der Referenzzeitquelle dem Programmsystem nutzbar zu machen. Die Referenzzeitempfänger sind über verschiedene Schnittstellen (Sekundenimpuls, RS232 oder auch IRIG Zeitcodesysteme) an Rechner anschließbar. Die am einfachsten zu verwendenden Schnittstellen sind hier der RS232 Anschluß und der Sekundenimpuls, der häufig als separates Signal von den Empfängern zur Verfügung gestellt wird. Der RS232 Anschluß wird zur Übertragung der Epocheninformation verwendet, während sich der Sekundenimpuls dazu eignet, die Epoche bis auf Mikrosekundenauflösung oder besser zu bestimmen. Nicht immer ist der Sekundenimpuls nutzbar. Dies ist der Fall wenn die Betriebssystemanbindung nicht möglich ist, oder die entsprechende Hardware fehlt. In diesem Fall bleibt nur das Zeittelegram über die RS232 Schnittstelle, und man muß sich auf Zeitbeziehungen (so vorhanden) zwischen dem Zeittelegram und der gesetzlichen Zeit verlassen.

Im praktischen Einsatz hat sich gezeigt, daß neben der Qualität des Empfängers auch Eigenschaften des Betriebssystems (Uhrenimplementierung) und Eigenschaften der vom Betriebssystem genutzten Interruptquelle (Oszillator) einen wesentlichen Einfluß auf die Synchronisation haben. So werden bei den heutigen Rechnern durchweg unkompensierte Quarzoszillatoren verwendet. Diese Oszillatoren reagieren merklich auf Temperaturunterschiede, so daß eine kontinuierliche Synchronisation angebracht ist.

## Literatur

- [DEC89] Digital Time Service Functional Specification Version T.1.0.5., Digital Equipment Corporation, 1989
- [Hofm94] R. Hofmann. Kausalität und Zeit in parallelen und verteilten Systemen. In: H. Wedekind [Hrsg.] *Verteilte Systeme*, Grndl. und zukünft. Entw. aus der Sicht des SFB 182; Bibliographisches Institut, Mannheim; 1994
- [Lamp78] Leslie Lamport, Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System, *Communications of the ACM*, July 1978, Vol 21, No. 7
- [Hetzel93] Peter Hetzel, Zeitinformation und Normalfrequenz, *telekom praxis*, Heft 1/1993, S. 25-36
- [MaOw83] Keith Marzullo and Susan Owicki, Maintaining the time in a Distributed System, *Proceedings of the Second Symposium on Principles of Distributed Computing*, ACM SIGPLAN/SIGOPS, 1983, pp. 295 - 305
- [MaOw85] K. Marzullo and S. Owicki. Maintaining the time in a distributed system, *ACM Operating Systems Review*, 19, 3 (July 1985), 44-54
- [Mill88] Mills, D. L., Network Time Protocol (Version 1) - specification and implementation, *DARPA Network Working Group Report RFC-1059*, University of Delaware, July 1988
- [Mill89] Mills, D. L., Network Time Protocol (Version 2) - specification and implementation, *DARPA Network Working Group Report RFC-1119*, University of Delaware, September 1989
- [Mill90] Mills, D. L. Network Time Protocol (Version 3) - specification, implementation and analysis, *Electrical Engineering Department Report 90-6-1*, University of Delaware, June 1990
- [Mill91] Mills, D. L. On the chronometry and metrology of computer network timescales and their application the the Network Time Protocol", *ACM Computer Communication Review*, (to appear)
- [Ogat70] Ogata, K., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1970

*Erfahrungen beim Betrieb einer Referenzquelle*

- [Post83] Postel, J. Time Protocol, *DARPA Network Working Group Report RFC-868*, USC Information Sciences Institute, May 1983
- [RTDA87] Rawley, L. A., J. H. Taylor, M.M. Davis and D. W. Allan. Millisecond pulsar PSR 1937+21: a highly stable clock, *Science* 238 (6 November 1987), 761 - 765
- [SI67] SI Einheitendefinition, 1967, 13. *CGPM*, Resolution 1
- [Zeit89] PTB (Braunschweig), *Zur Zeit*, Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, März 1989
- [ZeitG78] Zeitgesetz - ZeitG, Bundesgesetzblatt 1978, Teil I, Seiten 1110 - 1111