

# Plug and Work für verteilte Echtzeitsysteme mit Zeitsynchronisation

Sebastian Schriegel, Jürgen Jasperneite und Oliver Niggemann

Fraunhofer-Anwendungszentrum Industrial Automation IOSB-INA  
32657 Lemgo

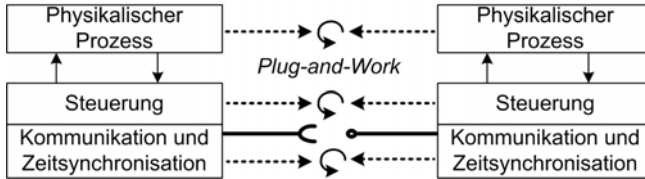
{sebastian.schriegel|juergen.jasperneite|oliver.niggemann}  
@iosb-ina.fraunhofer.de

**Zusammenfassung.** Die in der industriellen Automation verwendeten Echtzeitsysteme zeichnen sich heute durch einen hohen Aufwand an manueller Konfiguration aus. Industrie 4.0 beschreibt hingegen flexible Produktionssysteme, die schnell und einfach umgebaut und an neue Anforderungen angepasst werden können. Hier sollen in Zukunft automatische Konfigurationstechnologien Basis für adaptive Echtzeitsysteme und somit für wandlungsfähige Produktionssysteme sein, was auch als Plug and Work bezeichnet wird. Für die Konfiguration von Echtzeitanwendungen wie z.B. Motion Control ist unter anderem die Zeitsynchronisationsgenauigkeit von Bedeutung. Es entsteht die Frage, wie Genauigkeit eines verteilten Systems automatisch, also Plug-and-Work-fähig, bestimmt werden kann. Ein neuer Ansatz ist eine adaptive Ungenauigkeitsbestimmung auf Basis intelligenter Netzwerkknoten, welche Parameter wie Zeitsignaljitter und Oszillatorstabilität selbständig messen und zur Parametrisierung von Gerätemodellen, welche die Synchronisationscharakteristik beschreiben, nutzen. Die Modelle werden dann zur Bestimmung der in dem jeweiligen aktuellen Arbeitspunkten erzeugten Ungenauigkeiten verwendet.

## 1 Einleitung

Industrie 4.0 und dessen internationale Entsprechung Cyber Physical Production System (CPPS) stehen für eine neue Generation von Produktionssystemen, welche sich durch Adaptivität, Effizienz und Ergonomie auszeichnen. Adaptivität für Produktionssysteme bedeutet, dass diese schnell und einfach auf neue Anforderungen, wie z.B. neue Produkte oder Produktvarianten, angepasst werden können [1]. Heutige in der industriellen Automation verwendete Echtzeitsysteme zeichnen sich aber durch einen hohen Aufwand an manueller Konfiguration aus [1]. Hier sollen in Zukunft automatische Konfigurationstechnologien Basis für adaptive Echtzeitsysteme und somit für wandlungsfähige Produktionssysteme sein [2]. In Anlehnung an die Bezeichnung Plug and Play für Autokonfigurationstechnologien aus der Büro-IT (automatische Vergabe von IP-Adressen mit DHCP oder Selbstbeschreibung der Funktionsressource von USB-Geräten) spricht man in der Produktionsautomation auch von Plug and Work [2]. Abbildung 1 zeigt, wie zwei Produktionsprozesse verbunden werden. Neben der

physikalischen Prozesskopplung müssen die Applikation bzw. das Steuerungsprogramm sowie die Echtzeitkommunikation inklusive der Zeitsynchronisation konfiguriert werden.



**Abb. 1.** Plug and Work: Kommunikation und Applikation müssen konfiguriert werden

In diesem Beitrag liegt der Fokus auf hochgenauer Zeitsynchronisation in Kombination mit Plug and Work. Im Laufe des Einzuges von Echtzeit-Ethernet in die Automatisierungstechnik sind neben Zeitsynchronisationsprotokollen der IEEE wie NTP (Network Time Protocol) und PTP (Precision Time Protocol) viele, meist Kommunikationsprofil-spezifische Derivate wie PTCP (PROFINET IRT), DC (Distributed Clocks, EtherCAT) oder CipSync (Ethernet/IP) entstanden. Alle Protokolle haben gemeinsam, dass verteilte Uhren (Slave Clocks) auf Masteruhren (sog. Grandmaster Clocks GM) über ein Kommunikationsnetz synchronisiert werden. In Verbindung mit Plug and Work entstehen für die Zeitsynchronisation drei Fragen [3]:

1. Welche Zeitquelle bzw. welcher Zeitmaster (GM) ist der richtige?
2. Wie genau ist die Zeitsynchronisation?
3. Wie muss die verteilte, zeitsynchronisierte Applikation konfiguriert werden?

Für die automatische Auswahl des Zeitmaster stehen Technologien wie z.B. der BMCA (Best Master Clock Algorithm) [4] zur Verfügung. Die Bestimmung der Zeitsynchronisationsgenauigkeit ist dagegen ein großes Problem, da sie vielen Einflussfaktoren unterliegt. Diese sind die Leistungsfähigkeit der Komponenten (Qualität der Taktquelle, Zeitstempelauflösung, Filter, Zeitregler, usw.), die Netzwerktopologie (jede Netzwerkkomponente vergrößert die Ungenauigkeit der Zeitinformationen) und die Betriebsbedingungen (Temperatur, Netzlast, usw.) des Kommunikationssystems [5]. Für Systeme wie z.B. PROFINET oder EtherCAT werden heute teilweise Zeitsynchronisationsgenauigkeitsgarantien durch Systemhersteller gegeben [6, 9], die unter Einhaltung definierter Installationsrichtlinien (Topologie), dem Einsatz speziell qualifizierter Komponenten und definierten Betriebsbedingungen gelten [7]. Die garantierte Leistung wird dabei nicht skaliert und liegt in vielen Applikation weit unter der tatsächlichen Leistung. Dieses Leistungspotential kann für die Applikationen entsprechend nicht genutzt werden. Andere Applikationen können aufgrund der definierten Systemgrenzen gar nicht realisiert werden. Plug and Work kann unter einer automatischen Prüfung und Einhaltung nur innerhalb der Systemgrenzen genutzt werden.

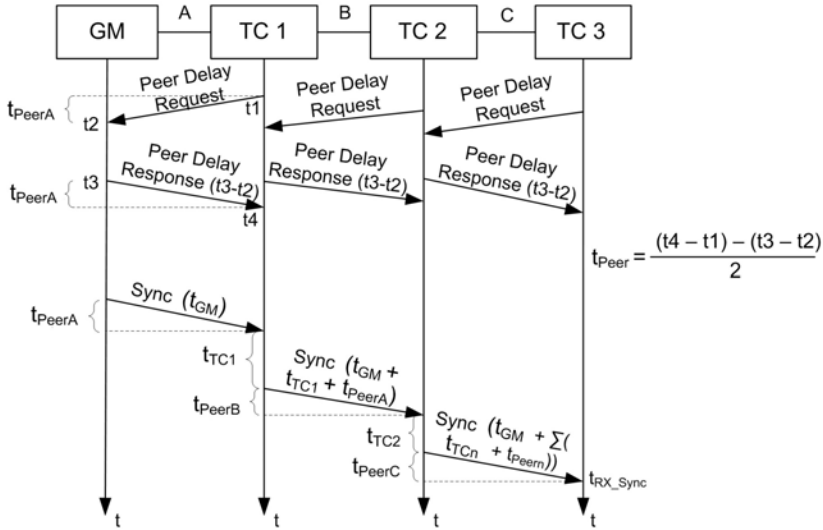
Für eine frei skalierbare Vernetzung (Netzwerktopologie, Übertragungsmedien, Leistung eingesetzter Komponenten, Betriebsbedingungen, usw.) ist eine spezifische Bestimmung der Zeitsynchronisationsgenauigkeit erforderlich. Diese Bestimmung der Zeitsynchronisationsgenauigkeit kann an der realen Netzwerktopologie mit einem Oszilloskop durch Messung oder durch Simulationstechnik erfolgen. Beide Ansätze sind in dieser Form für Plug and Work aber unbrauchbar, da die Methoden menschlichen Eingriff erfordern. Es besteht weiterhin eine Vielzahl an Arbeiten und Geräten, welche die Synchronisationsleistung von Komponenten [7,8] bestimmen. Dies hilft bei der automatischen Bewertung eines Synchronisationspfades im Sinne eines Plug and Work aber auch nicht weiter, da nur einzelne Komponenten qualifiziert werden.

Es folgt, dass zur Erreichung von Plug and Work für zukünftige, verteilte Echtzeitsysteme mit Zeitsynchronisation eine automatische Bestimmung der Zeitsynchronisationsgenauigkeit erforderlich ist. Dieser Beitrag untersucht dieses Themenfeld und ist dazu wie folgt strukturiert: Kapitel 2 beschreibt die Zeitsynchronisation nach dem Standard PTP und erläutert die Einflussfaktoren auf die erreichbare Genauigkeit. Kapitel 3 zeigt in Anlehnung an [3] eine Übersicht der Methoden, mit denen die Zeitsynchronisationsgenauigkeit bestimmt werden kann. Aufbauend auf Ansätzen aus [3] wird in Kapitel 5 das Verfahren einer adaptiven Ungenauigkeitsberechnung mit Hilfe intelligenter Netzwerkkomponenten vorgestellt.

## 2 Zeitsynchronisation mit dem Precision-Time-Protokoll

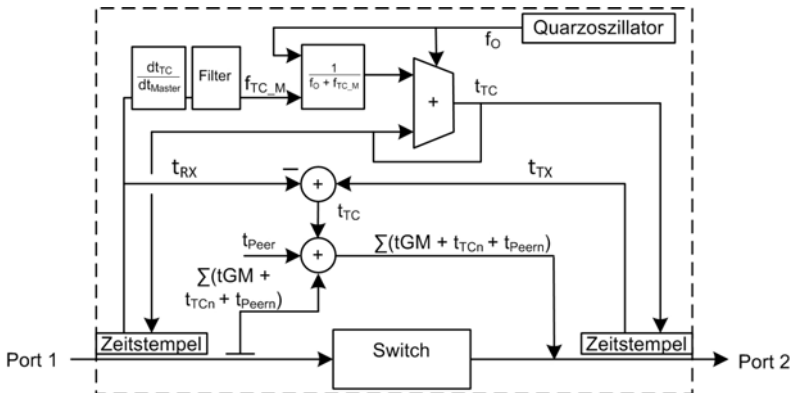
Das Precision-Time-Protokoll, kurz PTP, ist ein im Standard IEEE 1588 definiertes Zeitsynchronisationsprotokoll für die Verwendung in paketvermittelnden Netzen [4]. Die erste Version wurde 2002 verabschiedet. Ziel war eine höhere Zeitsynchronisationsgenauigkeit als mit NTP (Network Time Protocol) erreichbar war und die speziell in lokalen Netzen eingesetzt werden sollte. Die Technologien, mit denen dies erreicht werden sollte, waren die Verwendung von Hardwarezeitstempeln, ein Ausgleich der Übertragungsverzögerung für jede einzelne Komponente sowie zyklisches Senden von Synchronisationsframes durch Zeitmaster (Push-Betrieb). Im Jahr 2008 wurde eine Weiterentwicklung als PTPv2 mit dem Ziel einer höheren Präzision verabschiedet [4]. Eine Kerntechnologie war dabei die Einführung sogenannter Transparent Clocks (TC). Abbildung 2 zeigt das Protokoll mit der Bestimmung der Signalverzögerung der Ethernet-Leitung (sog. Peer Delay  $t_{peer}$ ) sowie der Korrektur der Masterzeit ( $t_{GM}$ ) der Synchronisationsframes bei Weiterleiten durch die TC.

Abbildung 3 zeigt, wie eine TC aufgebaut ist. Ein aus diskreter Hardware aufgebauter Addierer bildet eine fortlaufende Zeit. Die Schaltung entspricht mathematisch einer Integration der Oszillatorfrequenz, mit der die Schaltung betrieben wird. Die fortlaufende Zeit wird zur Zeitstempelung der eingehenden und ausgehenden Ethernet-Frames verwendet. Mit Hilfe dieser Zeitstempel werden die Aufenthaltszeit (Bridge Delay  $t_{TC}$ ) der Frames in den TCs sowie die



**Abb. 2.** Protokoll: Peer-Delay-Messung und Transparent Clock Bridging

Differenz der Laufgeschwindigkeit der lokalen Uhr zur Masteruhr  $dt_{TC}/dt_{GM}$  bestimmt und zur Korrektur verwendet.



**Abb. 3.** Aufbau einer Transparent Clock [3]

Im Jahr 2013 haben die Arbeiten an einer weiteren Revision von PTP mit einem Arbeitsgruppentreffen in Lemgo gestartet. Ziele sind unter anderem eine Verbesserung der Genauigkeit auf  $1\text{ ns}$ , der Sicherheit und der Verfügbarkeit.

## 2.1 Zeitsynchronisationsgenauigkeit

PTP erlaubt hochpräzise Zeitsynchronisation; das Protokoll selbst garantiert aber keine Genauigkeit. Die spezifische Synchronisationsgenauigkeit entsteht durch die Eigenschaften der Geräte, die verwendeten Übertragungsmedien, die Netzwerktopologie und den Umgebungsbedingungen [7]. Im letzten Kapitel wurde der Aufbau einer TC bereits erläutert. Auf die Genauigkeit wirken dabei unter anderem die Auflösung der Zeitstempel ( $t_{TX}, t_{RX}$ ), die Auslegung von Filtern und Reglern der Uhrgeschwindigkeitsregelung und die Frequenzstabilität des eingesetzten Oszillators  $f_O$ . Frequenzstabilität wird als so genannte Allan-Varianz  $\sigma^2$  angegeben, welche als Differenz der mittleren Frequenz von mindestens zwei Messintervallen  $\tau$  definiert ist. Die Darstellung erfolgt in einem doppelt-logarithmischen Sigma-Tau-Diagramm (siehe Abb. 4). Ab einem  $\tau$  von ca. 0,1 s ist die Frequenz je nach Oszillatortyp häufig zusätzlich stark temperaturabhängig [5].

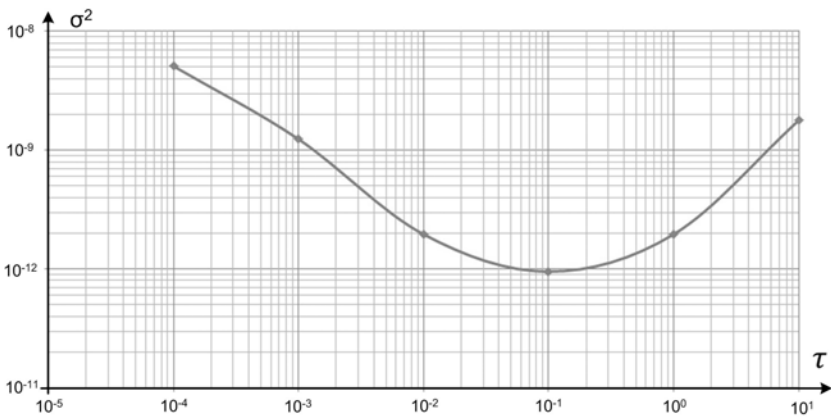


Abb. 4. Allan-Varianz im Sigma-Tau-Diagramm

Innerhalb einer Netzwerktopologie bzw. entlang des Synchronisationspfades vom GM zu den Slaves akkumuliert sich nun der Synchronisationsfehler, welcher durch die einzelnen Ungenauigkeiten der TCs entsteht, auf. Die physikalischen Einflussfaktoren sind dabei so vielfältig, dass mathematisch geschlossene Systembeschreibungen nicht möglich sind und auch Simulationen nicht allgemein angewandt werden können, sondern von Experten spezifisch angepasst werden müssen. Die Bestimmung von Synchronisationsgenauigkeit ist also keine einfache Aufgabe. Aufgrund dessen werden im folgenden Kapitel die allgemeinen Methoden zur Bestimmung der Zeitsynchronisationsgenauigkeit, welche heute zur Verfügung stehen, strukturiert und bewertet.

### 3 Bestimmung der Zeitsynchronisationsgenauigkeit

Synchronisationsgenauigkeit kann mit Messgeräten wie z.B. Oszilloskopen bestimmt werden. Voraussetzung ist ein bereits implementiertes und aktives Kommunikationsnetz mit Zeitsynchronisation. Die Messergebnisse sind jeweils nur für den aktuellen Betriebspunkt (Netzlast, Temperatur, Topologie) gültig und werden durch einen Experten durchgeführt. Die Methode ist für den Einsatz in Plug-and-Work-Szenarien entsprechend ungeeignet. Bestimmte Synchronisationsparameter können weiterhin mit in die TCs integrierten Messmitteln überwacht werden. So wird bei PROFINET zum Beispiel der Jitter zwischen der lokalen Zeit und dem empfangenen Zeitsignal überwacht. Es können so grundsätzliche Fehler in der Synchronisation, aber keine systematischen Offsets zwischen Slave und GM festgestellt werden. Eine weitere Möglichkeit der Überwachung der lokalen (primären) Taktquelle  $f_{Op}$  ist der Vergleich der Frequenz mit Sekundärtaktquellen wie zusätzlichen Oszillatoren  $f_{Os}$  oder den über die Ethernetphysik zurückgewonnenen Frequenz der Linknachbargate  $f_{RX}$ .

Eine andere, insbesondere offline einsetzbare Methode ist Simulation [10, 11]. Abbildung 5 zeigt, dass dafür ein Simulationsmodell des physikalischen Systems notwendig ist. Die Methode ist für den Einsatz in Plug-and-Work-Szenarien entsprechend ungeeignet, da Simulationsmodelle heute nicht automatisch generiert werden können, die Simulationsparameter häufig unbekannt sind und eine Simulation hohe Laufzeiten aufweisen kann.

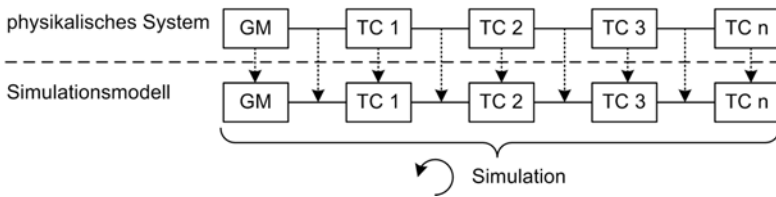


Abb. 5. Simulationsmodell und Simulation

Synchronisationsgenauigkeit kann durch Formeln angenähert werden (Abb. 5).

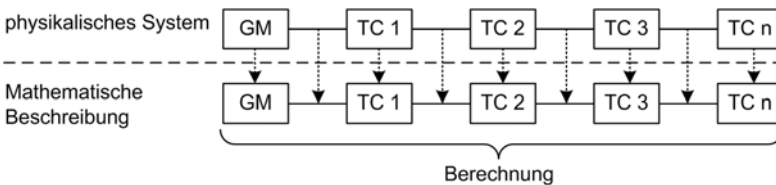


Abb. 6. Mathematisches Modell und Berechnung

Formel 1 zeigt ein einfaches Beispiel, wie eine mathematische Annäherung an die wahre Synchronisationsungenauigkeit möglich ist.  $\Delta t$  wird als Summe der (Worst Case) Ungenauigkeiten des GM und der einzelnen TCs entlang des Synchronisationspfades beschrieben. Die Teilungenauigkeiten werden also vollständig unabhängig voneinander und für den schlechtest anzunehmenden Fall (hohe Temperaturschwankungen, hohe Netzlast, keine Mittelungseffekte, welche die Zeitstempelauflösung kompensieren) modelliert.

$$\Delta t = \Delta t_{GM} + \sum_{i=0}^n \Delta t_{TCi} \quad (1)$$

Diese mathematische Methode ist im PTP Power Profile abgebildet (IEEE C37 238 [12]). Dabei geschieht eine Akkumulation der Ungenauigkeiten  $\Delta t$  in einem zu diesem Zweck vorgesehenen Feld TimeInaccuracy eines Frame, welches den Synchronisationspfad durchläuft (siehe Abbildung 7).



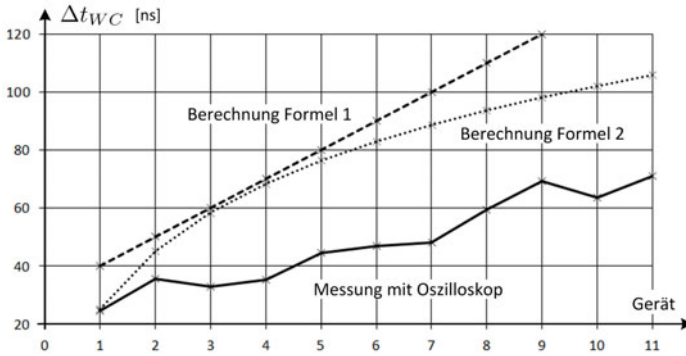
**Abb. 7.** Akkumulation der TC-Ungenauigkeiten im Feld TimeInaccuracy

Eine verbesserte formale Annäherung wurde in [3] vorgestellt, wo ein Faktor  $\xi(n)$  eine individuelle Beschreibung der Leistungsfähigkeit der einzelnen TC und ein Faktor  $i$  die topologische Abhängigkeit der Ungenauigkeitsakkumulation (Jitter, Mittelungseffekte welche die Zeitstempelauflösung kompensieren) abbildet und so das reale Systemverhalten besser annähern soll (siehe Formel 2).

$$\Delta t = \Delta t_{GM} + \sum_{i=0}^n \frac{\xi}{i} \Delta t_{TCi} \quad (2)$$

## 4 Vergleich der Methoden

In [3] wurden die Vorteile, die Nachteile und die Leistungsfähigkeit der Synchronisationsgenauigkeitsbestimmungsmethoden an einer Fallstudie verglichen. Es wurde dazu eine Linientopologie aus 11 Transparent Clocks des gleichen Types aufgebaut. Die Testreihen wurden ohne zusätzliche Netzlast und unter konstanten Raumtemperaturen durchgeführt. Die Zeitstempelauflösung betrug  $2,5\text{ ns}$  und es wurde mit einer Synchronisationsperiode von  $30\text{ ms}$  gearbeitet. Die Synchronisationsframes wurden im Cut-Through-Verfahren mit höchster Priorität und ohne Follow Up Frames weitergeleitet. Das Peer Delay wurde als Mittel über 6 Messungen bestimmt. Diagramm 8 zeigt die Ergebnisse der Synchronisationsungenauigkeit  $\Delta t$  für die beiden Formeln 1 und 2 im Bezug auf die Messung mit einem Oszilloskop.



**Abb. 8.** Vergleich der Bestimmungsmethoden zur maximalen Synchronisationsabweichung [3]

Die formale Berechnung mit den Formeln 1 und 2 zeigt eine bessere Genauigkeit in Bezug zu den realen Messungen als Herstellerangaben und Zertifizierung dies global für ein Gesamtsystem leisten können. Die Anwendung der sehr einfachen Formel 1 (PTP Power Profile TimeInaccuracy TLV [12]) zeigt ebenfalls ein Ergebnis, dass um ein Vielfaches von der realen Synchronisationsgenauigkeit abweicht. Formel 2 zeigt eine bessere Genauigkeit. Es stellt sich aber die Frage, wie die Topologiekenntnis  $i$  und der Approximationsfaktor  $\xi$  für die einzelnen TCs erzeugt werden können. Es fehlt also an einer Methode, die sich dynamisch adaptieren kann und die es ermöglicht, die maximale Synchronisationsabweichung präzise zu bestimmen.

## 5 Adaptive, verteilte Bestimmung von Synchronisationsgenauigkeit durch intelligente TCs

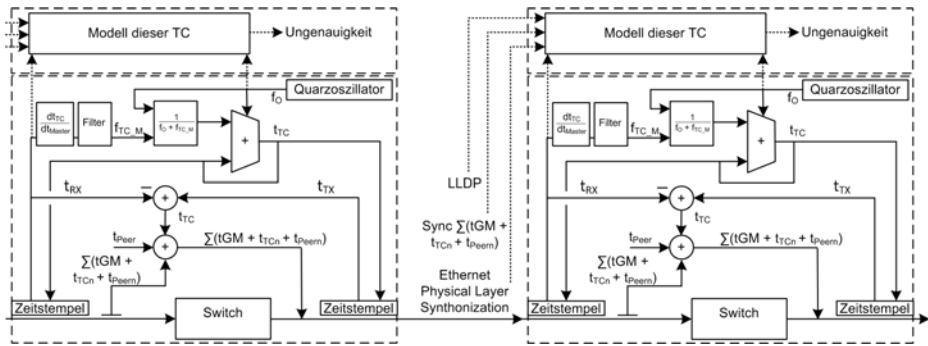
In diesem Kapitel soll der Ansatz einer adaptiven, verteilten Bestimmung von Synchronisationsgenauigkeit durch intelligente TCs vorgestellt werden. Im Gegensatz zum ebenfalls adaptiven Ansatz aus [3] soll der Ansatz ohne Protokollerweiterungen auskommen. Es werden also keine zusätzlichen Informationen (z.B. in den TimeInaccuracy TLV) ergänzt. Der Ansatz zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

1. *Aufbauend auf dem Ansatz der verteilten Ungenauigkeitsakkumulation in einem TimeInaccuracy TLV*
2. *Jede TC enthält ein Modell ihrer eigenen synchronisationsleistungsbestimmenden Eigenschaften*
3. *Nutzung von lokalen Messeinrichtungen für Oszillatorfrequenzstabilität, Topologie und Zeitsignaljitter*
4. *Berechnung der aktuellen Ungenauigkeiten der TC auf Basis der genannten Mittel*



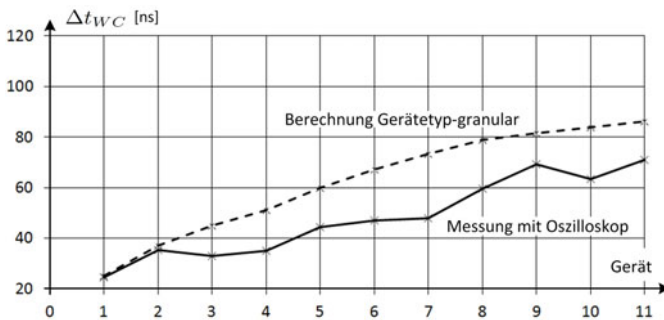
### 5. Akkumulation von dynamisch adaptierten Ungenauigkeiten anstatt von Worst Case Ungenauigkeiten

Abbildung 9 zeigt die Architektur der TC aufbauend auf der Architektur aus Abb. 3 und in Anlehnung an die in [3] dargestellte Architektur. Die intelligente TC nutzt ein Modell ihrer eigenen synchronisationsleistungsbestimmenden Eigenschaften. Weiterhin werden Daten zum aktuellen Betriebszustand aufgenommen. Mit diesen Daten und dem Modell wird eine resultierende Ungenauigkeit berechnet.



**Abb. 9.** Adaptive, verteilte Bestimmung von Synchronisationsgenauigkeit durch intelligente TCs

Diagramm 10 zeigt die Wirkung der Adaption der verteilten Berechnung an einem Beispiel. Die Geräteungenauigkeit wird mit Hilfe des Faktors  $\xi(n)$  (TCs 5 bis 8:  $\xi(n) = 1,1$ ; TCs 1 bis 4 und 9 bis 11:  $\xi(n) = 0,6$ ), der zur Laufzeit berechnet wird, beschrieben und zeigt eine leistungsfähigere Bestimmung der Synchronisationsgenauigkeit im Bezug zu [3] bzw. den Verfahren aus den vorherigen Kapiteln.



**Abb. 10.** Adaption der Berechnung an das spezifische System

## 6 Zusammenfassung

Dieser Aufsatz hat Methoden vorgestellt und verglichen, mit denen die Genauigkeit von Zeitsynchronisationsnetzwerken bestimmt werden kann. Der besondere Fokus lag dabei auf der Adaptivität der Algorithmen, um im Sinne von wandelbaren Echtzeitsystemen Plug and Work zu ermöglichen. Der Ansatz einer adaptiven Ungenauigkeits-Betrachtung mit intelligenten TCs wurde vorgestellt. Im nächsten Schritt sollen die Verfahren durch mehr Messreihen und auf den Daten aufbauenden Simulationen evaluiert und bewertbar gemacht werden.

## Literaturverzeichnis

1. Dürkop, Lars; Trsek, Henning; Otto, Jens and Jasperneite, Jürgen: A field level architecture for reconfigurable SOA-based real-time automation systems. In: 10th IEEE Workshop on Factory Communication Systems, 2014
2. Dürkop, Lars; Trsek, Henning; Jasperneite, Jürgen and Wisniewski, Lukasz: Towards Autoconfiguration of Industrial Automation Systems: A Case Study Using PROFINET IO. In: 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2012), 2012
3. Schriegel, S. and Jasperneite, J.: Investigation in Automatic Determination of Time Synchronization Accuracy of PTP Networks with the Objective of Plug-and-Work. In: International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), Austin, USA, Sept 2014
4. Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control System, IEEE Standard 1588-2008, 2008
5. Schriegel, S. and Jasperneite, J.: Investigation of industrial environmental influences on clock sources and their effect on the synchronization accuracy of IEEE 1588 International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), Viena, Austria, 2007
6. Profibus International, PROFINET IO Netload Test Specification, 2010
7. Schriegel, S.; Kirschberger, D. and Trsek, H.: Reproducible IEEE 1588-performance tests with emulated environmental influences. In: International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), Portsmouth, USA, Spet 2010
8. Schriegel, S. and Gerstung, H.: IEEE 1588 Test Handbook, IEEE 1588 Spring Plugfest, Lemgo, 2011
9. PROFINET Test Specification for IO-Devices, 2010
10. Choingning, N.; Obradovic, D.; Scheiterer, R.; Steindl, G. and Goetz, F.: Synchronization Performance of the Precision Time Protocol. In: International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), Viena, Austria, 2007
11. Fontanelli, D.; Macii, D.; Wolfrum, P.; Obradovic, D. and Steindl, G.: A clock state estimator for PTP time synchronization in harsh environment conditions, International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), Viena, Austria, 2007
12. C37.238-2011 – IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications, 2011

Industrie 4.0 und Echtzeit

Echtzeit 2014

Halang, W.A.; Unger, H. (Hrsg.)

2014, VIII, 128 S. 20 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-45108-3