

# Präzise Zeiten in Stromnetzen

**Hochgenaue Zeitverteilung nach IEC/IEEE 61850-9-3** | Schutz und Stabilität der Stromnetze beruhen auf zeitgenauen Messungen von Strom und Spannung an Knotenpunkten innerhalb eines Landes oder Kontinents. Diese Messwerte werden über ein Datennetzwerk ausgetauscht, dessen Verzug stark schwankt. Um diese Werte zu vergleichen, werden sie mit der absoluten Zeit ihrer Abtastung «gestempelt».

TEXT HUBERT KIRRMANN, ROMAN GRAF

Um eine solche Zeitstempelung durchführen zu können, braucht es im Stromnetz eine gemeinsame Zeit, die auf wenige Mikrosekunden genau ist. Obwohl Navigationssatelliten eine solche Genauigkeit bieten, wird eine Zeitverteilung über das Datennetzwerk bevorzugt. Die IEC hat deshalb in Zusammenarbeit mit der IEEE die Norm IEC/IEEE 61850-9-3 zur Zeitverteilung veröffentlicht, als Teil der Normreihe IEC 61850, die eine Synchronisierung unterhalb einer Mikrosekunde erlaubt.

Es gibt diverse Anwendungen im Elektrizitätsnetz, die auf eine präzise Zeit angewiesen sind. Diese umfassen:

## Ereignismelder

Die Aufzeichnung von Ereignissen im Netz verlangt, dass die Messwerte mit etwa 10 ms absoluter Zeit gestempelt werden. [3]

## Synchrophasoren

Um die Netzstabilität zu prüfen, wird die Phasenlage von Strom und Spannung an verschiedenen Stellen im Netz verglichen.

Die Phasemessgeräte (PMU, Phase Measurement Unit) senden über das Datennetz ihre Phasenlage zu Phasendatensammlern (PDC = Phasor Data Concentrator), die ihrerseits die gebündelten Werte zur Leitstelle übertragen, die die Netzstabilität berechnet.

Der Verzug im Netz ist nicht voraussehbar. Um Bündelung und Vergleich korrekt durchzuführen, werden die Phasenwerte mit dem genauen Zeitpunkt ihrer Messung übertragen. Danach können die Werte extrapoliert werden auf einen beliebigen Zeitpunkt.

Synchrophasoren verlangen eine absolute Zeit mit einer Genauigkeit von einigen Mikrosekunden. Ein Phasenfehler von  $0,1^\circ$  entspricht einem Zeitfehler von  $5 \mu\text{s}$ . [7] Die Anforderungen steigen noch bei Synchrophasoren in einem Verteilnetz. [1]

## Differenzialschutz

Der Schutz von Hochspannungsleitungen beruht auf der Messung von Strom und Spannung an den Enden eines Leiters. Der Differenzialschutz misst die momentanen Stromwerte und berechnet die Kirchhoffsche Gleichung, um

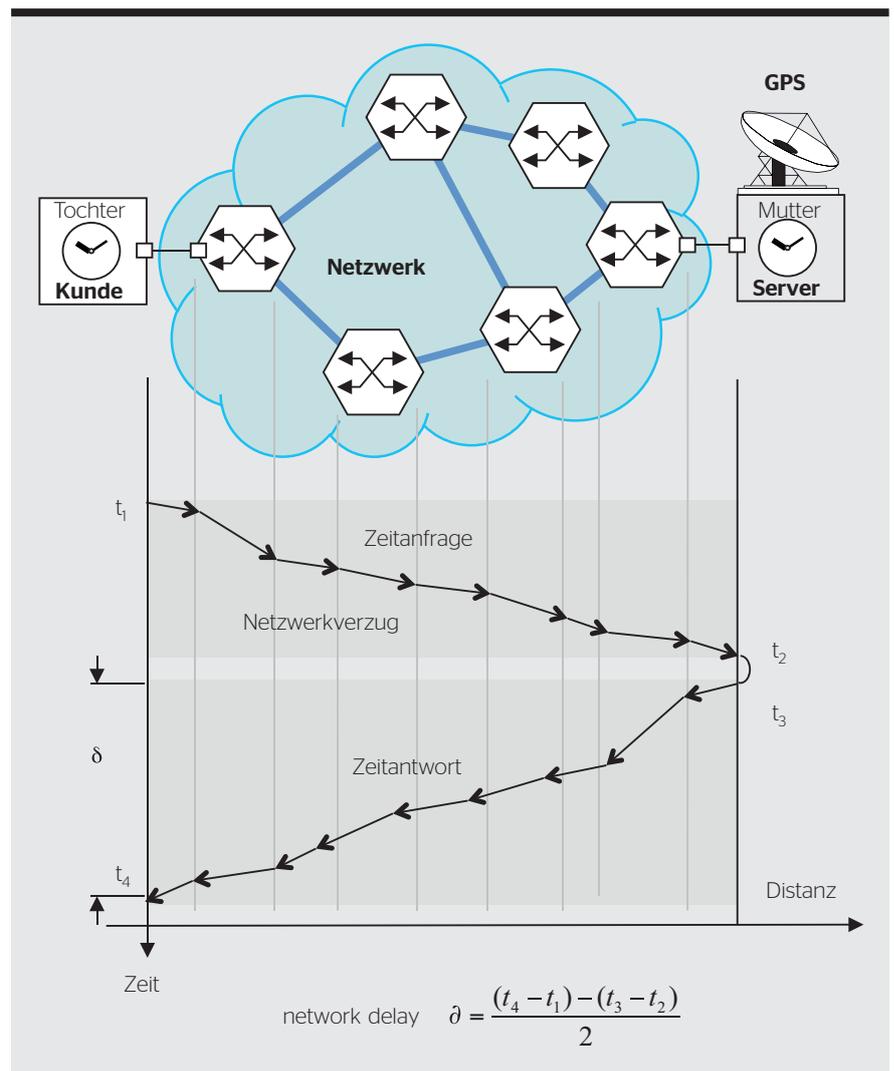


Bild 1 Beispiel einer SNTP-Zeitabfrage.

Erd- oder Kurzschlüsse zu entdecken. Der Abstand zwischen Leitungsenden kann wenige Meter bis mehrere Kilometer betragen. Diese Messwerte wurden über Telefonverbindungen mit einem bekannten Verzug geschickt. Die alten Telefonverbindungen werden durch Datennetze mit Paketvermittlung ersetzt, bei welcher der Verzug stark variiert. Darum versehen die Messgeräte die Messwerte mit der genauen Zeit ihrer Abtastung, danach extrapoliert das Schutzgerät die Messwerte auf eine künstliche Periode.

Der Differenzialschutz verlangt eine relative Genauigkeit von einigen Mikrosekunden.

### Sammelschienenschutz

Der Sammelschienenschutz beruht auf der gleichen Methode wie der Differenzialschutz, nur ist die Anzahl der Endpunkte viel höher.

Der Sammelschienenschutz verlangt eine relative Genauigkeit von einigen Mikrosekunden.

### Die Zeitverteilungsverfahren im Stromnetz

Das elektrische Netz war schon immer eng mit der Zeitverteilung verbunden. Seit über 80 Jahren vertrauen Synchronuhren (Töchteruhren) darauf, dass die **Netzfrequenz** genau 50 Hz beträgt, genauer, dass am Ende jedes Tages die Anzahl Perioden  $24 \times 3600 \times 50 = 4320\,000$  beträgt – dafür sorgen bis heute die Netzüberwacher. Die Genauigkeit dieser Frequenzübertragung ist aber für technische Zwecke ungenügend.

Die Zeit wird seit über hundert Jahren durch **Radiosender** verteilt. Heute werden die Radiosignale – und die Sendefrequenz – direkt von Atomuhren als Mutteruhren gesteuert. Zur Zeiteinstellung der Tochteruhr berücksichtigt jeder Empfänger die Laufzeit zu seinem Standort. Dies gelingt gut mit Langwellen, die der Erdkrümmung folgen. Kurzwellensignale können in der Ionosphäre unterschiedlich reflektiert werden und der Verzug variiert stark.

Die WWV-Kurzwellensender und der Langwellensender WWVB von Boulder, Colorado, können in der ganzen Welt empfangen werden und senden die Zeit im IRIG-H Code. In der Schweiz strahlte der Langwellensender Prangins HBG am Genfersee die

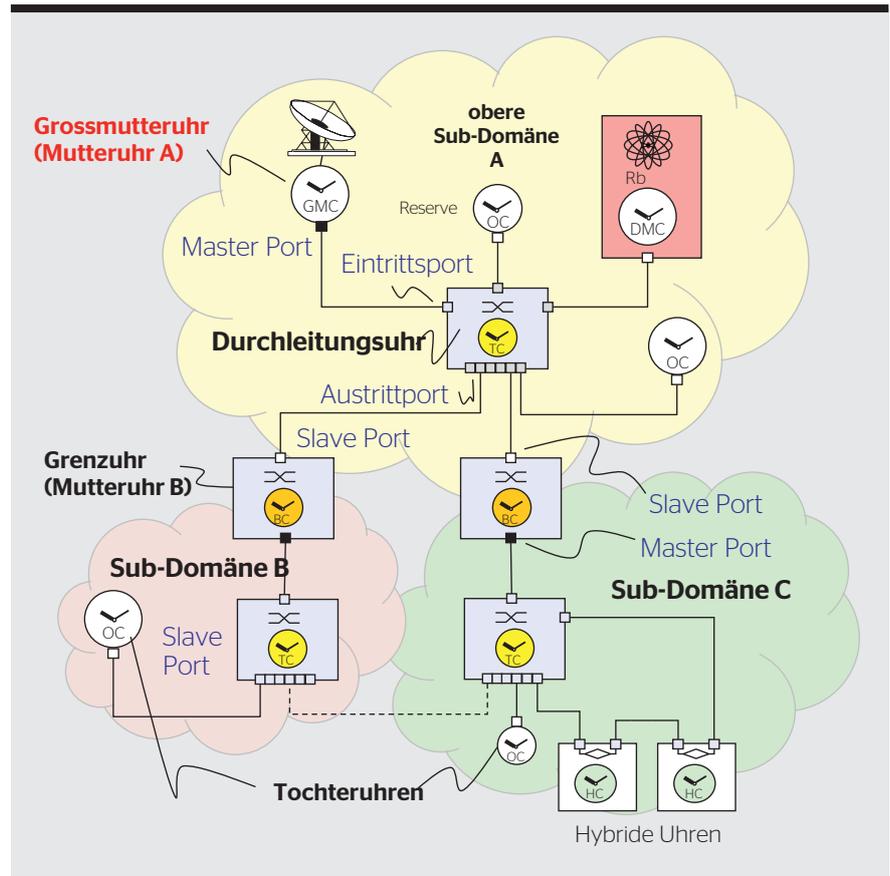


Bild 2 Elemente einer 1588-Zeitverteilung.

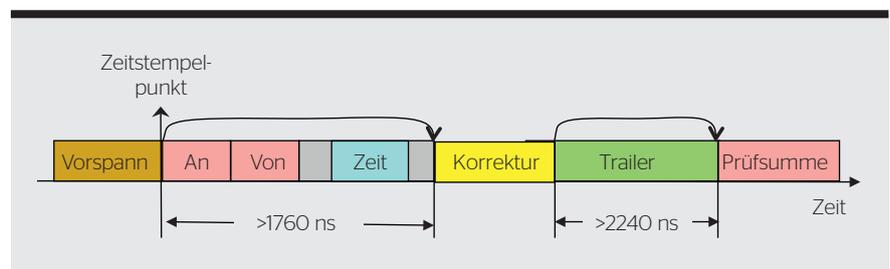


Bild 3 Synchronisationsmeldung in 1588.

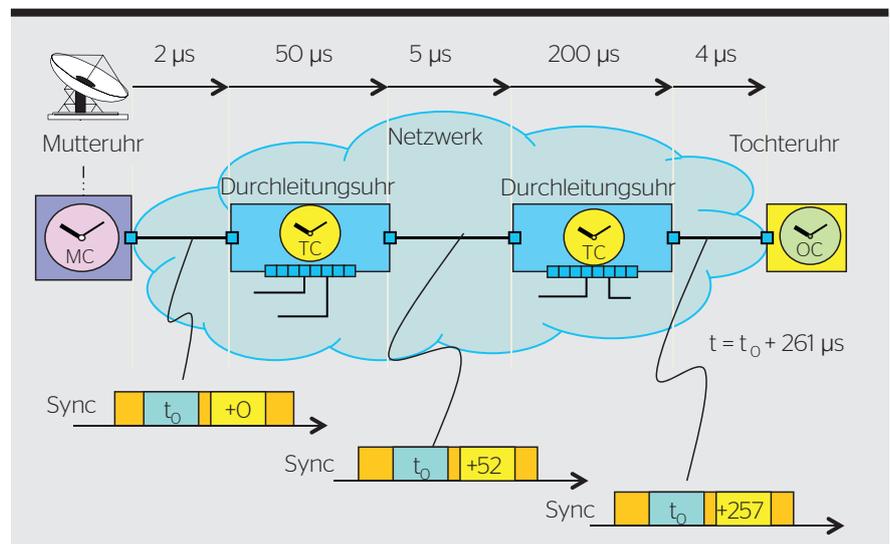
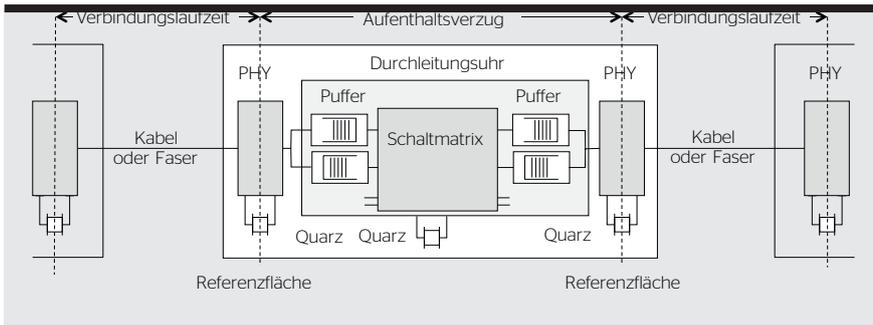
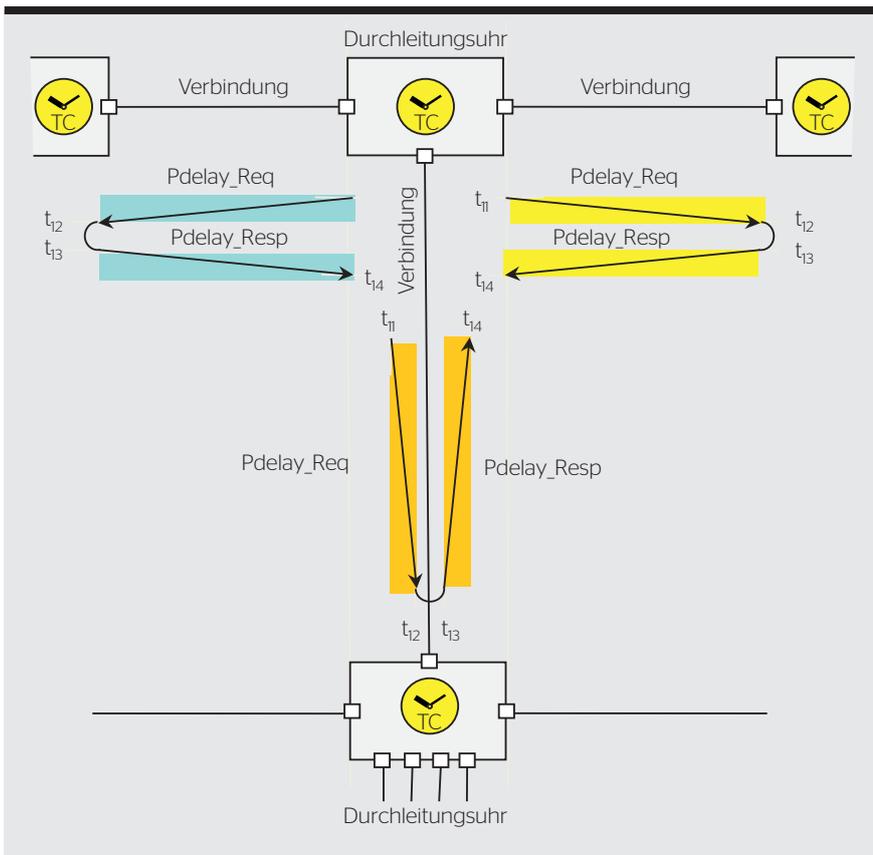


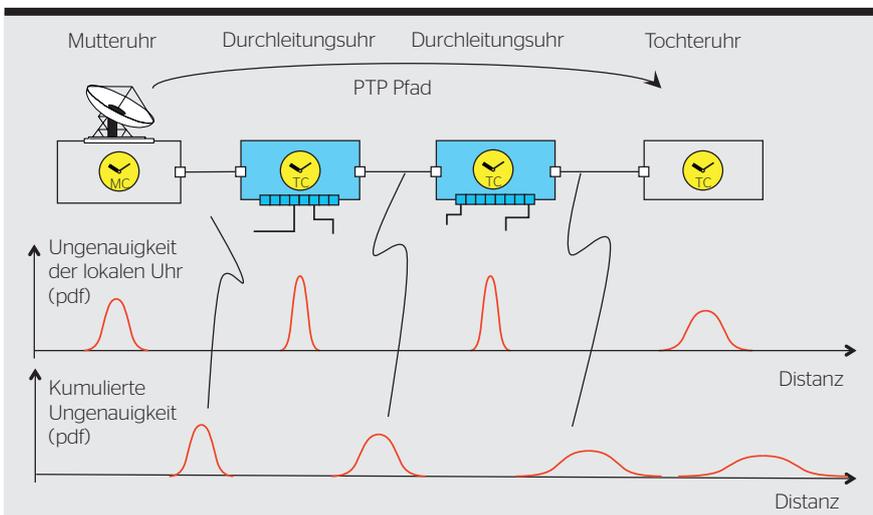
Bild 4 Prinzip der Zeitkorrektur in IEEE 1588.



**Bild 5** Prinzip der Zeitstempelung in einer TC (nur zwei Ports gezeichnet)



**Bild 6** Prinzip der Laufzeiterfassung bei TCs



**Bild 7** Abnahme der Genauigkeit entlang des Pfades.

Zeit aus. Aus Kostengründen wurde er 2011 eingestellt. Der Langwellensender Frankfurt (DCF-77) sendet weiter und dient den Funkuhren in Europa als Referenz. Funkempfänger für DCF-77 sind in vielen Unterstationen vorhanden. Sie werden vor allem gebraucht, um präzise Frequenzsignale in der Unterstation zu verteilen, d.h. die 1-PPS-Signale (1 Puls pro Sekunde).

Ein weiteres Verfahren verwendet **Navigationssatelliten**. Die Satelliten GPS (USA), Glonass (Russland), BeiDou (China) und Galileo (Europa) arbeiten mit Atomuhren und senden Zeitsignale mit einer Genauigkeit von etwa 100 ns. Zur Korrektur der Laufzeit wird die genaue Position von Satellit und Empfänger ermittelt. GPS-Empfänger sind in vielen Unterstationen eingebaut. Jedoch trauen einige EVUs den Satelliten nicht, weil einige Unterstationen kaum Sichtverbindung haben (z.B. in tiefen Tälern oder unterirdisch), weil sich zeigte, dass sich Satellitensignale durch eine einfache Verzögerung absichtlich fälschen lassen, oder weil Satelliten durch einen Sonnensturm ausgeschaltet werden können sowie aus politischen Gründen.[8]

Heute verfügen die meisten Unterstationen über eine **Mutteruhr**, die mit hochstabilem Quarz arbeitet, zum Beispiel mit Temperaturkompensation oder mit einem stabilisierten Ofen. Rubidium-Atomuhren sind billiger und beliebter geworden. Der Fehler dieser Uhren liegt bei wenigen Millisekunden pro Jahr. Sie sind also genau genug, um die relative Zeit innerhalb der Unterstation zu verteilen, aber sie müssen doch regelmässig wieder synchronisiert werden, um als Basis für Synchronphasen zu taugen. Eine tägliche Synchronisierung mit einer Referenzzeit ist ohnehin notwendig, um die Schaltsekunden der UTC-Zeit zu erfassen.

Das Signal der lokalen Uhren wird an alle Schutzgeräte verteilt, entweder in Form von 1 PPS oder mit dem seriellen Code IRIG-B über eine gesonderte Leitung.

Das **Zeitverteilungsprotokoll SNTP** (Simple Network Time Protocol) [14] des Internets wird in IEC 61850-8-1 [4] für die Synchronisierung des Stationsbusses angegeben. In SNTP fragen die Kunden die Zeit von einem Zeitserver ab, z.B. time.microsoft.com oder ch.

pool.ntp.org, der mit dem Weltnetzwerk der Atomuhren synchronisiert ist.

### Laufzeiten

Die Laufzeit in einem Paket-Vermittlungsnetzwerk wie IP variiert viel stärker als diejenige von Radiowellen oder optischen Signalen. Der Verzug stammt aus der Propagationszeit über die Leitungen, die einigermassen voraussehbar ist und aus der Aufenthaltsdauer der Pakete in den Netzwerkelementen, die vom Datenverkehr abhängt und nicht voraussehbar ist.

Die Korrektur der Laufzeit der Zeitmeldung durch das Netzwerk ist das Herzstück von SNTP (Bild 1).

Der Kunde berechnet die Laufzeit zwischen dem Zeitserver und sich selber, indem er den Zeitpunkt  $t_1$  misst, wann er die Zeitanfrage sendet, und den Zeitpunkt  $t_4$  misst, wann die Zeitanantwort des Servers bei ihm eintrifft. Der Zeitserver fügt in der Zeitanantwort die Zeitspanne  $(t_3 - t_2)$  zwischen Eintreffen der Zeitanfrage  $t_2$  und Senden der Zeitanantwort  $t_3$  ein. Der Server berechnet die Laufzeit gemäss der Formel in Bild 1 unten.

Diese Messmethode setzt voraus, dass Zeitanfrage und Zeitanantwort den gleichen Verzug erfahren. Dazu müssten Zeitanfrage und Zeitanantwort genau durch die gleichen Router fahren, die Knoten frei von Verkehr sein, die Knoten in beiden Richtungen gleich verzögern und die Verbindungen symmetrisch sein. Die Genauigkeit leidet insbesondere darunter, dass die Zeitstempelung der Meldungen in Software gemacht wird. Die Genauigkeit ist auf wenige Millisekunden innerhalb einer Unterstation begrenzt und auf etwa 10 ms in einem Langstreckennetz wie Internet. Diese Genauigkeit genügt für Ereignisfolgenmelder, nicht aber für Differenzialschutz oder Synchrophasoren.

### IEEE/IEC 1588

Eine genaue Messung der Laufzeit ist nur möglich, wenn der Beitrag aller Elemente im Netzwerk laufend gemessen wird.

Die IEEE/IEC 1588v2 Norm [2] sieht vor, dass der Zeitgeber nicht mehr abgefragt wird, sondern spontan die Zeit verteilt, wie bei Radiostationen. Darum redet man hier von Master/Slave und nicht von Zeitkunde/Zeitdiener (Client/Server) wie bei SNTP.

IEEE 1588v2 setzt also voraus, dass das

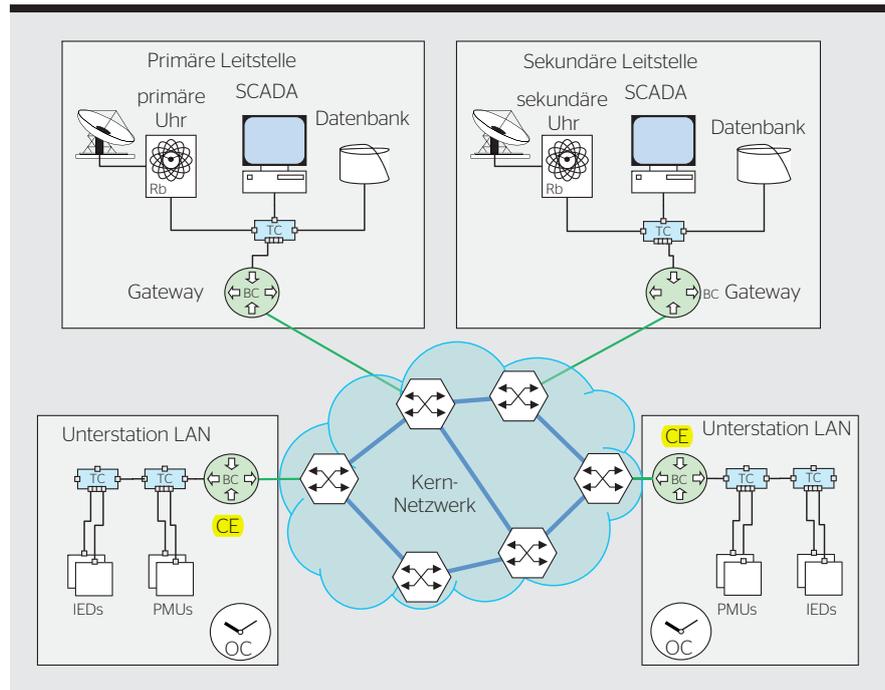


Bild 8 Zeitverteilung im WAN.

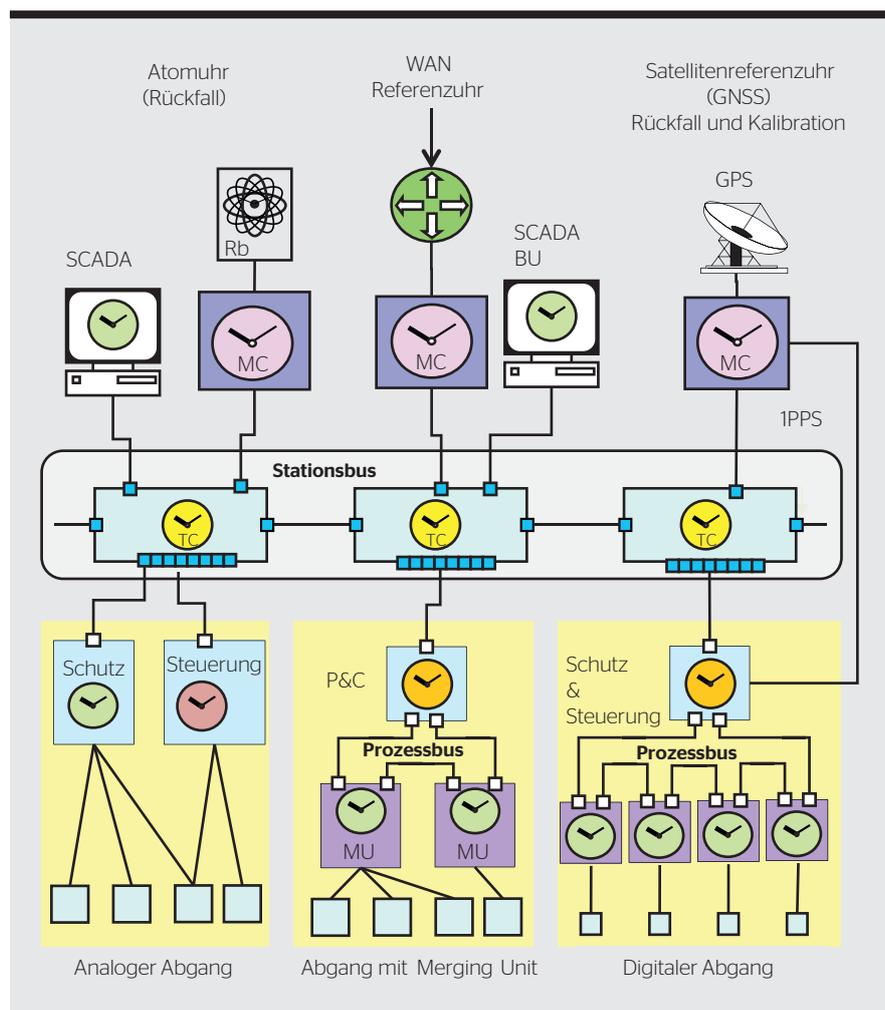
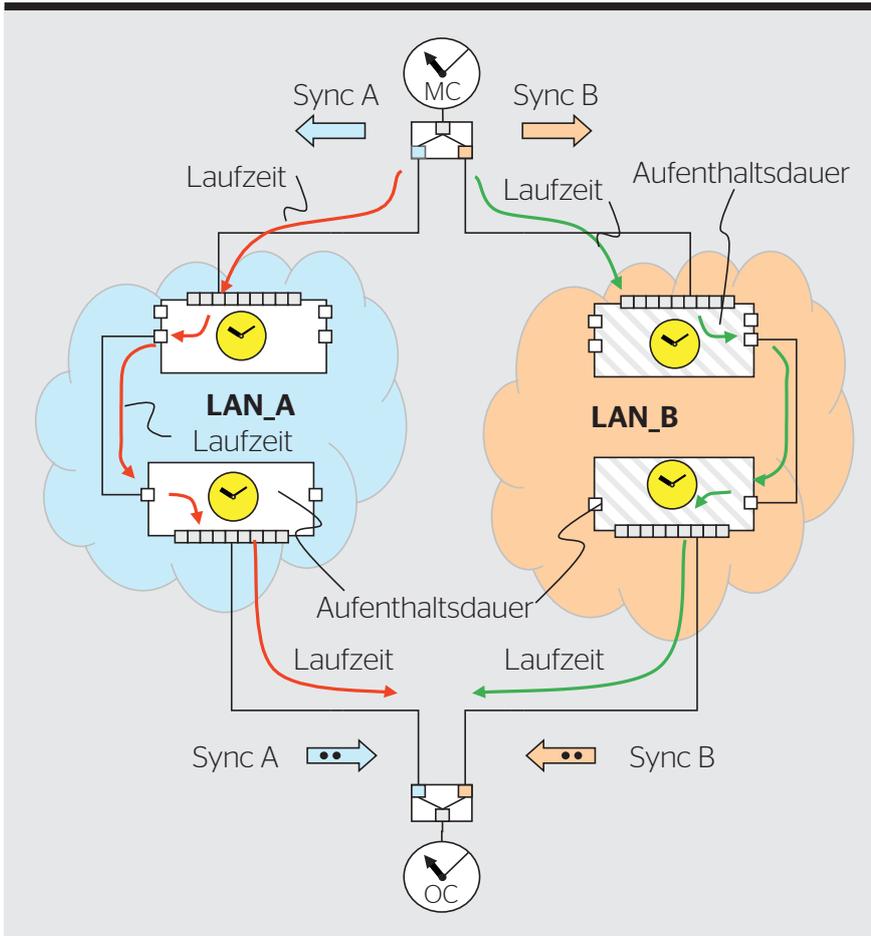


Bild 9 Zeitverteilung in einer Unterstation.



**Bild 10** Prinzip der parallelen Redundanz für Uhren.

Netzwerk eine Broadcastfunktion unterstützt. Das ist der Fall bei lokalen Netzwerken wie Ethernet. Die Broadcast-Funktion ist aber im Internet stark beschränkt und die Telefonie-Netzwerke (SDH/SONET) kennen sie gar nicht.

Darum ist IEEE 1588 eng mit Ethernet verbunden. Es gibt verschiedene Ausführungsformen von IEEE 1588, hier wird diejenige beschrieben, die die IEC für Unterstationen ausgewählt hat.

Die Zeitverteilung umfasst folgende Elemente (**Bild 2**):

- **GMC** «Grandmasterclock», Grossmutteruhr, die als Referenz für die Zeitdomäne dient,
- **MC** «Master Clock», Mutteruhren,
- **OC** «Ordinary Clocks», Tochteruhren,
- **TC** «Transparent Clocks», Durchleitungsuhrn als verbindende Netzwerkelemente,
- **BC** «Boundary Clocks, Grenzuhrn, trennende Netzwerkelemente,
- **HC** «Hybrid Clocks» sind gleichzeitig TC und OC.

### Master Clock

Die MCs schicken eine Sync (Synchronisationsmeldung), die zwei Felder enthält: die genaue Zeit, die die MC beim Senden ermittelte, und ein Korrekturfeld, wie **Bild 3** zeigt.

Es können verschiedene MCs in einem Netzwerk arbeiten, ein Algorithmus wählt die beste MC aus.

### Transparent Clocks

Die TCs sind in den Netzwerkbrücken (IEEE 802.1D -Bridges oder Switches [12]) eingebaut. Sie berechnen die Aufenthaltsdauer der Sync sowie den Verzug auf der Verbindung, woher sie die Sync bekommen.

Jede TC überschreibt das Korrekturfeld der Sync mit dem kumulierten Verzug (sein eigenes plus den gemeldeten Verzug), wie dies **Bild 4** zeigt.

Um die Aufenthaltsdauer zu berechnen, verwenden TCs eine lokale Uhr und eine genaue Zeitstempelung der Meldungen in Hardware. Die Ethernet-Transceivers (PHY) analysieren die Meldungen und generieren ein hochge-

naues Signal, wenn sie nach dem Vorspann den Synchronisierungspunkt entdecken (**Bild 5**).

Die TCs berechnen den Verzug aus der Richtung, woher Sync kommt, indem sie an ihren Nachbarn eine Abfrage/Antwort (Pdelay\_Req/Pdelay\_Resp) schicken, auch über Ports, die sonst durch RSTP (Spanning Tree) geschlossen sind. Pdelay\_Req und Pdelay\_Resp werden nie weitergeleitet.

Wie bei SNTP berechnen die Uhren den Leitungsverzug zu jedem Nachbarn als die Hälfte der gesamten Laufzeit, abzüglich der Aufenthaltsdauer im Nachbarknoten. Die Genauigkeit ist aber drei Größenordnungen besser als bei SNTP, da nur eine reine Signallaufzeit über eine optische Faser oder ein verdrehtes Aderpaar gemessen wird, und dies mit einer Zeitstempelung der Nachrichten in Hardware. Es wird angenommen, dass die Laufzeit in beiden Richtungen genau gleich ist, was für die erzielte Genauigkeit in Unterstationen genügend ist. Umsetzer zwischen Faser auf Kabel müssen deshalb speziell mit konstantem und symmetrischem Verzug gebaut werden.

Jede TC leitet eine empfangene Sync zu allen anderen aktiven Ports weiter und korrigiert die Sync für jeden Ausgangsport separat.

Die TCs fügen die Korrekturen während des Sendens der Sync ein. Eine TC hat also bei 100 Mbit/s 1760 ns, um die Korrektur zu berechnen und den Wert anstelle des früheren Wertes einzufügen. Danach hat die TC etwa 2240 ns, um die Prüfsumme (FCS) zu berechnen (**Bild 3**).

Das Einfügen während des Sendens heisst «1-Schritt»-Verfahren und setzt hohe Anforderungen an die Hardware. Im «2-Schritt»-Verfahren schicken TCs die Korrektur in einer nachfolgenden Meldung, die «Follow-Up». Wenn die Zeitstempelung in Hardware gemacht wird, ist die Genauigkeit gleich, aber der Datenverkehr steigt. Das «2-Schritt»-Verfahren gilt übrigens auch für Pdelay\_Resp, in Form einer Pdelay\_Resp\_Follow\_Up.

### Boundary Clocks

IEEE 1588 unterstützt neben TCs auch BCs. BCs waren auch die einzigen Uhren in IEEE 1588 v1, bevor die Vorteile der TC offensichtlich wurden.

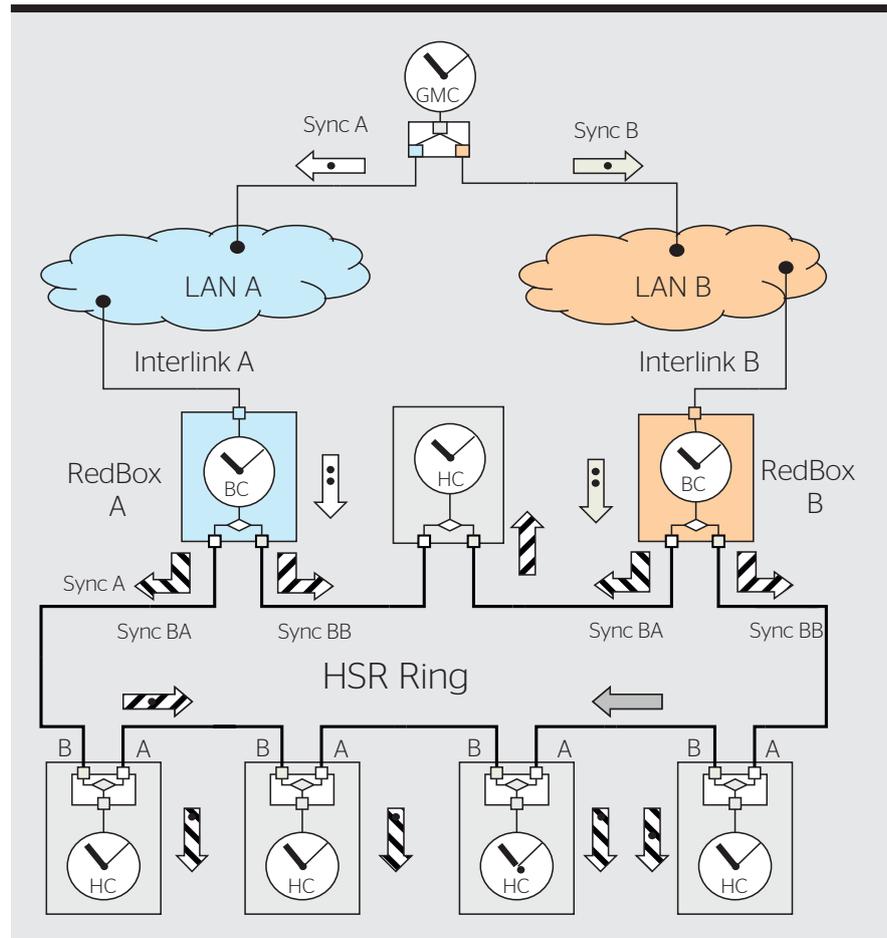
Parameter	Wert
Profil-Kennung	00-1B-19-00-02-00
Uhren	MC, BC, TC, OC
Media	Ethernet Layer 2
Topologie	voll-duplex IEEE 802.3
Übertragung	Multicast Meldungen
Destinationsadressen	01-1B-19-00-00-00 01-80-C2-00-00-0E (Pdelay)
VLAN	Erlaubt, nicht empfohlen
Ethertype	0x88F7 (1588)
Subtype	0 (IEEE 1588v2)
Laufzeitmessung	Port-zu-Port
Korrektur	1-Schritt oder 2-Schritt, mischbar
Zeitdomäne	0: Werkeinstellung, 93: empfohlen
Periode der Announce	1s
Periode der Sync	1 s
Periode von Pdelay_req	1 s
Timeout	3 s
Algorithmus zur Selektion des besten MC	Werkeinstellung nach 1588 IEC 62439-3 mit Redundanz
Ersatz-MC	Mehrere MCs dürfen gleichzeitig die Zeit verteilen, die Slave wählen aus.
Priority1	128
Priority2	128
Ungenauigkeit von Umsetzer	50 ns
Ungenauigkeit des GM	250 ns
Ungenauigkeit einer TC	50 ns
Ungenauigkeit des BCs	250 ns
Quarz-Stimmung	Implizit notwendig
Aushaltezeit	5 s
Geräteverwaltung	1) IEC62439-3 Annex E 2) IEC 61850-90-4 3) benutzerdefiniert
MIB	Gemäss IEC 62439-3 Annex E
TLVs	Optional ATOI (1588 16.3)
Datensicherheit	IEC 62351

**Tabelle 1** Hauptparameter von IEC/IEEE 61850-9-3.

Eine BC hat genau einen Port im Slave-Zustand, der die lokale Tochteruhr synchronisiert. Die BC arbeitet als MC auf den anderen Ports.

In Gegensatz zu TCs leiten BCs die Syncs nicht weiter, sondern verwenden sie, um die eigene Uhr zu synchronisieren. Sie senden die Zeit dieser Uhr mit einer eigenen Sync. Damit trennen sie die Zeitdomäne in Unterdomänen.

Mit BCs wird eine Hierarchie von Uhren gebildet, an deren Spitze die GMC steht, die an einer Referenzzeit (z.B. GPS oder Atomuhr) angeschlossen ist.



**Bild 11** Prinzip der parallelen Redundanz von Uhren mit PRP (oben) und HSR (unten).

Die BCs sind nicht so genau wie TCs, weil eine Kette aus vielen Uhren in Serie zu Instabilität neigt. Hingegen können BCs Zeitverteilungsdomänen unterteilen und bei Wegfallen der GMC ihre Subdomäne weiter synchronisieren.

### Uhrgenauigkeit

Jede Uhr in der Kette führt eine Ungenauigkeit ein. Die Genauigkeit einer MC hängt von der Qualität der Referenzzeit und von der Stabilität des Referenzoszillators ab.

Jede TC fügt eine Ungenauigkeit ein, weil die Zeitstempelung von einem Quarz-Oszillator gewonnen wird, der eine endliche Frequenz hat. Es gibt auch mehrere Quarze, normalerweise einen pro Port, und daher entstehen Quantifikationsfehler.

Die Ungenauigkeit wächst mit der Anzahl Uhren, wie **Bild 7** zeigt.

### Zeitverteilung in Unterstation

Die primäre Zeitreferenz kommt aus dem übergeordneten Datennetz

(WAN) z.B. SDH/SONET oder MPLS, wo eine Vielzahl von Atomuhren die absolute Zeit bildet (**Bild 8**). Sollte das WAN zusammenbrechen, übernimmt eine lokale Rubidium-Atomuhr, bis das WAN wieder funktioniert.

**Bild 9** zeigt die Zeitverteilung innerhalb einer Unterstation.

Eine GPS-Verbindung dient als Rückfall (Back-up) und Plausibilitätskontrolle. Die MCs generieren auch 1-PPS-Signale, mit denen die Inbetriebsetzung kontrolliert wird.

**Bild 8** zeigt verschiedene Abgänge, die Synchronisierung brauchen: links einen klassischen Abgang mit konventioneller analoger Messtechnik, rechts einen Abgang mit komplett digitaler Messtechnik und in der Mitte einen Abgang mit «Merging Units» (MU), welche die Messwerte der konventionellen Messinstrumente in IEC 61850-9-2 Meldungen packen.

### Die IEC-IEEE 61850-9-3 Norm

Die 1588 Norm erlaubt eine Vielzahl von Optionen, z.B. 1-Schritt- oder

2-Schritt-Korrektur, Laufzeitmessung von Ende zu Ende oder von Port zu Port, Betrieb auf Layer 2 oder Layer 3. Die Norm nennt hingegen keine Genauigkeitsmerkmale.

Die IEC TC 57 WG10 und SC 65C WG15 haben in Zusammenarbeit mit IEEE PSRC ein Profil (eine Unter- menge) der IEEE 1588v2 Norm erarbei- tet, das die Bedürfnisse von Untersta- tionen und Smart Grids deckt. Die

Spezifikationen dazu entstanden in der Schweiz in Zusammenarbeit von ABB Forschungszentrum mit der EPFL und mit der ZHAW. Mit IEC/IEEE 61850-9-3 [10] lässt sich in einem Netzwerk mit 15 TCs eine Genauigkeit von einer Mikrosekunde erreichen. Die Norm bietet nahtlose Redundanz gemäss IEC 62439-3.

Obwohl dies in IEC/IEEE 61850-9-3 nicht spezifiziert ist, kann IEC/IEEE

61850-9-3 auf allen Ethernet-basierten Netze verwendet werden, also auch in MPLS und Metro-Ethernet.

#### Autoren

**Prof. Dr. Hubert Kirrmann** ist Geschäftsführer von Solutil.

→ Solutil, 5405 Baden

→ hubert.kirrmann@solutil.ch

**Roman Graf** ist Projektleiter bei ABB.

→ ABB, 5400 Baden

→ roman.graf@ch.abb.com

## RÉSUMÉ

### Präzise Zeiten in Stromnetzen

Hochgenaue Zeitverteilung nach IEC/IEEE 61850-9-3

Schutz und Stabilität der elektrischen Netze beruhen auf zeitgenauen Messungen von Strom und Spannung an verschiedenen Knotenpunkten innerhalb eines Landes oder eines Kontinentes. Diese Messwerte werden über ein Datennetzwerk ausgetauscht, wobei der Netzwerkverzug stark schwankt. Um diese Werte zu vergleichen, werden sie mit der absoluten Zeit ihrer Abtastung «gestempelt». Dazu braucht es eine gemeinsame Zeit mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrosekunden.

Obwohl Navigationssatelliten eine solche Genauigkeit bieten, wird eine Zeitverteilung über das Datennetzwerk bevorzugt. Auch innerhalb der Unterstation wird eine ge-

naue Zeitverteilung verlangt, da die Laufzeit der digitalen Signale im Gegensatz zu analogen Signalen stark variiert. Die IEC hat deshalb in Zusammenarbeit mit der IEEE die Norm IEC/IEEE 61850-9-3 zur Zeitverteilung veröffentlicht, als Teil der Normreihe IEC 61850. Sie erlaubt eine Synchronisierung unterhalb einer Mikrosekunde. Die Spezifikationen dazu entstanden in der Schweiz in Zusammenar- beit von ABB Forschungszentrum mit der EPFL und mit der ZHAW.