

**Zeitschrift:** Comtec : Informations- und Telekommunikationstechnologie = information and telecommunication technology  
**Herausgeber:** Swisscom  
**Band:** 83 (2005)  
**Heft:** 2

**Artikel:** IEEE 1588 : Verteilung von Zeit und Frequenz  
**Autor:** Weibel, Hans  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-877108>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# IEEE 1588 – Verteilung von Zeit und Frequenz

**HANS WEIBEL** Das in IEEE 1588 spezifizierte Precision Time Protocol (PTP) ermöglicht die Synchronisation von Uhren in einem verteilten System, um eine gemeinsame Zeitbasis zu schaffen. Dank einer Synchronisationsgenauigkeit im Sub-Mikrosekundenbereich ergeben sich durch dieses Verfahren neue Lösungsansätze für eine Vielzahl von Anwendungsgebieten.

Das Protokoll eignet sich nicht nur zur Verteilung der Zeit, sondern auch der Frequenz. Damit wird es auch für die Telekommunikation interessant, nämlich dann, wenn Standorte nur über ein Paketnetz so erschlossen werden, dass sie vom traditionellen Taktnetz isoliert bleiben. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Arbeitsweise und praktische Umsetzung sowie die Anwendungsmöglichkeiten des PTP.

## Generelle Bedeutung der Synchronisation

Das Wort «Synchron» hat mehrere Bedeutungen, so unter anderem «gleichzeitig», «im selben Takt» oder auch einfach «zeitlich koordiniert». All diese Bedeutungen sind in diesem Beitrag relevant, weil sie voneinander abhängen.

Viele technische Systeme verfügen über einen Zeitbegriff, sei er implizit oder explizit. Die Systemzeit dient dabei für folgende Problemstellungen als Bezugsgrösse:

- zur Feststellung der Reihenfolge (Zeitstempel ermöglicht Einordnung von Ereignissen, Unterscheidung von Ursache und Wirkung, Kausalität)
- zur Feststellung des Alters von Daten in verteilten Datenbeständen (Datenabgleich, Replikationsvorgänge)
- zur Koordination von Messungen (Trigger)
- zur Messung von Zeiten und zur Berechnung von daraus abgeleiteten Grössen
- als Basis zur Ausführung koordinierter Aktionen («Time based Behaviour», zeitlich gesteuerte Ausführung von Instruktionen)
- zur Steuerung von Mechanismen für einen gegenseitigen Ausschluss
- zur Entkopplung von Kommunikation und Ausführung
- zur Generierung von periodischen Signalen (Takt)

In verteilten Systemen wird eine gemeinsame Zeitbasis durch Kommunikationsvorgänge ermöglicht. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen:

## Taktverteilnetz

Das Netz verteilt ein Taktsignal über eine dedizierte Verdrahtung (z. B. IRIG-B), ein Funknetz (z. B. DCF 77 oder GPS) oder zusammen mit einem Nutzsinal (z. B. PDH oder SDH). In gewissen Systemen erfordert das eine zusätzliche aufwändige Verdrahtung.

## Meldungsgesteuert

Aktionen werden ausgelöst beim Empfang einer entsprechenden Meldung. Die Laufzeiten und die Varianz der Laufzeiten durch das Kommunikationssystem limitieren die Anwendbarkeit.

## Zyklisches Protokoll

Das periodische Timing wird durch ein zyklisches Kommunikationsprotokoll realisiert. Die Synchronisation erfolgt durch Meldungen, die nach einem festen Zeitraster verschickt werden.

## Zeitgesteuert

Es wird ein systemweiter Zeitbegriff geschaffen, in dem jeder Knoten mit einer synchronisierten Uhr ausgestattet wird. Das ist die flexibelste Variante. Methoden zur Abgleichung von Uhren sind z. B. Funksignale (insbesondere GPS), das Network Time Protocol (NTP) oder das im vorliegenden Artikel behandelte Precision Time Protocol (PTP).

## Bedeutung der Synchronisation in Kommunikationsnetzen

Die Synchronisation von Kommunikationsnetzen ist eine wichtige Voraussetzung für deren Funktionalität und Leistungsfähigkeit:

### Isochrone Dienste

Der Takt des sendenden Knotens steuert die Rate, mit der Bits, Time Slots und Frames gesendet werden. Der Takt des empfangenden Knotens steuert den Lesevorgang von Bits, Time Slots und Frames. Die Netzsynchrisation muss sicherstellen, dass Sende- und Empfangstakt «gleich ticken». Ist das nicht der Fall, treten Slips auf, bei denen Information verloren geht oder zweimal gelesen wird. Die Häufigkeit der Slips steigt mit der Abweichung zwischen Sende- und Empfangstakt. Die Auswirkungen von Slips hängen vom Dienst und vom Protokoll ab: Bei G.711-codierter Sprache führt nur ein geringer Anteil der Slips zu einem hörbaren Knacken. Bei der Übertragung von Faxnachrichten können einige Bildzeilen verloren gehen. Werden Daten übertragen, dann reduzieren Slips die Leistungsfähigkeit oder führen bei empfindlichen Protokollen gar zum Abbruch der Kommunikation. Auch verschlüsselte Kommunikationsverbindungen können auf Slips empfindlich reagieren.

### Handover in Funknetzen

Muss eine bestehende Funkverbindung von einer Basisstation zur anderen übergeben werden, ist ein exaktes Timing

zwingende Voraussetzung. Mangelhafte Synchronisation führt zu einem Verbindungsabbruch. Zellulare Netze wie GSM, UMTS oder auch DECT stellen diesbezüglich hohe Anforderungen.

**Single Frequency Networks**

Sendestationen von Betriebsfunksystemen und auch von DVB-T werden aus Gründen der Frequenzökonomie teilweise so betrieben, dass benachbarte Zellen synchron mit demselben Signal auf dieselbe Trägerfrequenz moduliert werden. Ohne entsprechende Synchronisation lässt sich diese Betriebsart nicht verwirklichen.

**Operations Support Systems**

Beim Betrieb von Kommunikationsnetzen ist eine systemweite Zeit wichtig für Billing, Verkehrsmessungen, Problemanalyse (Reihenfolge von Ereignissen) oder SLA Compliance Checking.

**Anwendungen von Zeitsynchronisationsprotokollen**

Das in IEEE 1588 definierte Precision Time Protocol (PTP) stösst in verschiedensten Anwendungsbereichen auf grosses Interesse. Weil Datenübertragung und Synchronisation über dasselbe paketorientierte Netz erfolgen können, bieten solche Lösungen ein grosses Einsparungspotenzial.

**Test- und Messtechnik**

In vielen Messsystemen werden Daten durch Pollen der Sensoren abgefragt. Diese Abfrage ist stark abhängig vom zeitlichen Verhalten vom Kommunikationssystem und von der System- und Anwendungs-Software. Mehr Flexibilität kann erzielt werden, wenn die Sensoren mit einer synchronisierten Uhr ausgestattet werden. So werden Kommunikation und Ausführung voneinander entkoppelt. Messungen können zu einer vorbestimmten Zeit ausgeführt und/oder zur späteren Auswertung mit einem Zeitstempel versehen werden.

**Industrielle Automatisierungstechnik**

Mehrachsiges Antriebssysteme erfordern eine genaue zeitliche Koordination. Die Regelalgorithmen müssen periodisch und mit hoher Genauigkeit (<1 µs) ausgeführt werden. Auch andere Steuer- und Regelungssysteme ziehen grossen Nutzen aus einer gemeinsamen Systemzeit.

**Energietechnik**

Bei der Erzeugung, Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie werden komplexe Steuer- und Überwachungssysteme eingesetzt, die kritische Netzzustände schnell und sicher erkennen und entsprechende Massnahmen treffen müssen (d. h. Abschaltung von gefährdeten Anlageteilen). Exakte Zeitstempel für Messdaten und Ereignisse erleichtern zudem die Unterscheidung von Ursache und Wirkung und damit die Diagnose und die Lokalisierung von Fehlern.

**Navigation und Telemetrie**

In Radar- und Sonarsystemen werden verteilte Sensoren verwendet. Ortung auf Basis von Laufzeitunterschieden erfordert möglichst genau synchronisierte Uhren. Auch GPS beruht auf Laufzeitunterschieden.

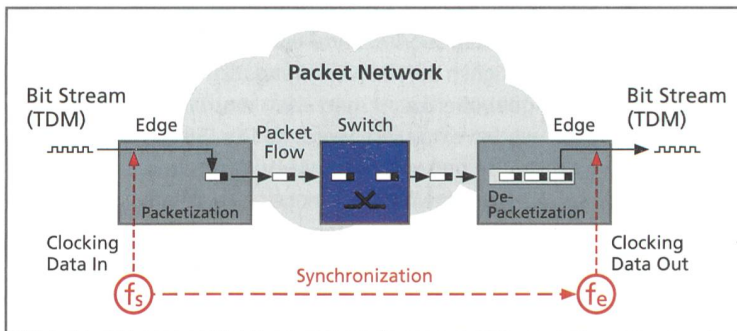


Bild 1. Prinzip der Nachbildung von TDM-Leitungen durch ein Paketnetz (in der Regel Duplex, es ist aber nur eine Richtung dargestellt). Ziel ist es, beim Empfänger den Service-Takt  $f_e$  möglichst genau dem Takt  $f_s$  des Senders nachzuführen.

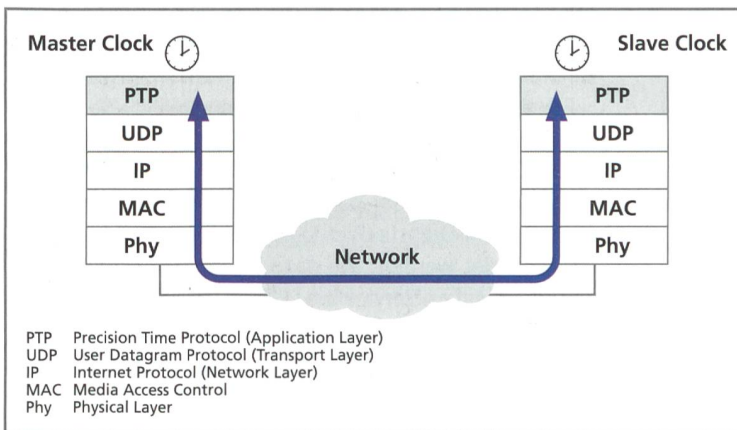


Bild 2. Kommunikation zwischen Master und Slave.

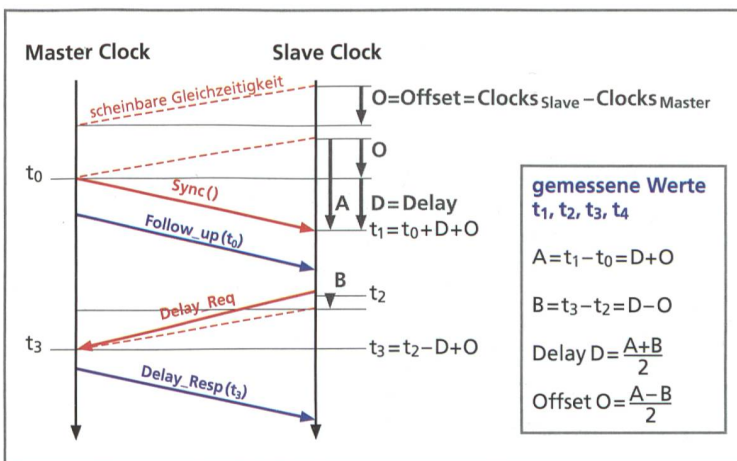


Bild 3. Ermittlung von Delay und Offset.

**Heimnetzwerke**

Ethernet wird als Heimnetzwerk zur Übermittlung von Audio, Video und Daten in Erwägung gezogen (Residential Ethernet Working Group im IEEE). Multi-Channel-Sound-Systeme verlangen nach einer präzisen Synchronisation der einzelnen Kanäle, um den erwünschten Raumklang zu erzielen.

**Kommunikationsnetze**

Funktion und Dienstqualität hängen weitgehend von einer ausreichenden Synchronisation ab.

### Synchronisation in Kommunikationsnetzen

Traditionelle auf SDH beruhende Transportnetze eignen sich vorzüglich zur Taktverteilung. Der Takt wird mit dem Nutzsignal übertragen und kann empfangsseitig aus diesem wieder extrahiert werden. Die Taktrückgewinnung wird durch einen geeigneten Leitungscode ermöglicht. Mit dem S1-Byte im Multiplex Section Overhead wird die Taktqualität des entsprechenden Abschnitts angezeigt. So wird einem SDH-Knoten ermöglicht, seinen Takt aus dem am besten geeigneten Zubringersignal zu extrahieren und Taktschleifen zu vermeiden.

Mit dem markanten Wachstum des IP-Verkehrs erscheint es vorteilhaft, die Netzinfrastruktur für IP zu optimieren und so Investitions- und Betriebskosten zu minimieren. IP-zentrierte Netzwerke müssen aber trotzdem in der Lage sein, TDM-Dienste anzubieten. Noch steht eine erhebliche Zahl von TDM-Ausrüstungen im Feld, und mit TDM-Diensten wird immer noch ein bedeutender Umsatzanteil generiert.

Elemente IP-optimierter Netze sind MPLS-Backbone, Metro Ethernet und Breitbandzugangnetze (DSL und/oder Fibre). Dabei werden möglichst schlanke Protokoll-Stacks verwendet. Auf dieser paketorientierten Infrastruktur lassen sich TDM-Dienste (Bild 1) realisieren, indem Leitungen nachgebildet werden. Die dazu benötigte Technik heisst Circuit Emulation Service over Packet (CEP) oder TDM over Packet (TDMoP). Dazu werden die TDM-Signale in Multi-Service Edge Devices in Paketströme gewandelt, über das Paketnetz versandt und im terminierenden Edge Device wieder rekonstruiert. Im ITU-T, IETF, MFA (MPLS and Frame Relay Alliance) und Metro-Ethernet-Forum (MEF) wird an entsprechenden Standards gearbeitet. Die Ansätze sind sich sehr ähnlich und unterscheiden sich insbesondere darin, ob auf IP, MPLS oder Ethernet aufgesetzt wird. Der Empfänger eines CEP-Paketstroms muss den Sendetakt reproduzieren. Dazu gibt es verschiedene Methoden:

#### Synchronous Clocking

Der Service-Takt steht an beiden Enden einer Verbindung zur Verfügung. In IP-optimierten Netzen gibt es Bereiche,

die nicht mehr durch eine Übertragungsstrecke erschlossen sind, die den Takt auf traditionelle Weise liefern könnte. Hier sind Lösungen gefragt, die es erlauben, nebst den Nutzdaten auch Timing-Information über das Paketnetz zu transportieren.

#### Adaptive Clock Recovery

Der Ankunftsrythmus der Pakete (bzw. der Füllgrad der Empfangs-Queue) wird verwendet, um die Rate des Service-Takts zu regeln. Diese Methode reagiert empfindlich auf Paketverlust und ist träge (es dauert lange bis zum Einrasten).

#### Differential Clock Recovery

Verfügen Sender und Empfänger über einen gemeinsamen Referenztakt, so kann die Differenz des Service-Takts zu diesem Referenztakt mit übertragen werden. IEEE 1588 kann dazu verwendet werden, einen solchen Referenztakt bereitzustellen.

#### Prinzipielle Arbeitsweise von IEEE 1588

Das in IEEE 1588 normierte Verfahren ist unabhängig von einer Netzwerktechnik spezifiziert. In einem Anhang ist die Anwendung für Ethernet beschrieben, auf die sich der vorliegende Beitrag beschränkt.

Von den im Netzwerk vorhandenen Uhren wird die beste verfügbare Uhr als Referenz ausgewählt (Best-Master-Clock-Algorithmus). Sie beliefert die anderen Uhren (Slave Clocks) mit Synchronisationsmeldungen. Die im Netzwerk entstehenden Meldungsverzögerungen werden gemessen und beim Abgleich der einzelnen Uhren berücksichtigt.

Bild 2 zeigt eine einfache Konfiguration mit einem Master Clock und einem Slave Clock. Die für den Uhrenabgleich verantwortlichen PTP-Instanzen tauschen Meldungen über die in den Knoten implementierten Protokoll-Stacks aus.

Bild 3 zeigt, wie Uhren prinzipiell abgeglichen werden. Der Master sendet eine Sync-Meldung an den Slave. Die Sende- und Empfangszeit wird mit den lokalen Uhren so genau wie möglich ermittelt. Anschliessend wird mittels der Follow-up-Meldung die Sendezeit  $t_0$  an den Slave geschickt. Aus der Differenz  $t_0 - t_1$  aufeinanderfolgenden Sync-Intervalle lässt sich die Drift der Slave-Uhr ermitteln und kompensieren. Damit reproduziert der Slave-Oszillator die Frequenz des Master-Oszillators mit hoher Genauigkeit. Je stabiler der Slave-Oszillator ist, desto länger kann das Sync-Intervall gewählt werden. Der Standard sieht Intervalle von 1, 2, 8, 16 und 64 Sekunden vor.

Stellt der Slave seine Uhrzeit auf  $t_0$ , so hinkt er so viel hinter dem Master her, wie die Übertragung der Meldung gedauert hat. Um diese Übertragungszeit zu messen und anschliessend zu kompensieren, sendet der Slave eine Delay-Req-Meldung an den Master, die ebenfalls vermessen wird. Die vom Master ermittelte Empfangszeit  $t_3$  wird mit einer Delay-Resp-Meldung an den Slave zurückgeschickt. Aus den Sendezeiten  $t_0$  und  $t_2$  sowie den Empfangszeiten  $t_1$  und  $t_3$  berechnet der Slave die Übertragungszeit (Delay) und die Abweichung zwischen Master- und Slave-Zeit (Offset). Der Offset wird verwendet, um die Uhrzeit zu korrigieren. Da sich der Delay nur sehr langsam ändert, wird die Delay-Messung mit wesentlich geringerer Rate als Sync wiederholt.

#### CEP im Vergleich mit VoIP

Voice over IP (VoIP) ist nur für Sprache- und Fax-Verbindungen über IP-Netze anwendbar. In der Regel wird pro Verbindung ein separater Kanal bereitgestellt, der einen relativ hohen Paketisierungsdelay bewirkt. Die Synchronisation ist unkritisch und wird über die RTP-Zeitstempel erzielt. Es handelt sich um einen Vermittlungsdienst, der entsprechende Signalisierungsprotokolle einbezieht.

Circuit Emulation over Packet (CEP) bietet einen fest geschalteten Trunking-Dienst für beliebige Inhalte (Sprache, Video, Daten). Dabei kann auf IP, MPLS oder Ethernet aufgesetzt werden. Die Anforderungen an die Synchronisation sind hoch (die selben wie bei leitungsvermitteltem TDM). Weil die Bitrate des Kanals meist deutlich höher ist als die einer einzigen Sprachverbindung, resultiert ein entsprechend geringerer Paketisierungs-Delay.

Die beiden Techniken stehen nicht in Konkurrenz zueinander: Bei VoIP stehen die Dienste der Sprachvermittlung im Vordergrund. CEP hingegen ist als Übertragungstechnik anzusehen, die beispielsweise dazu verwendet wird, Teilnehmervermittlungsanlagen zu vernetzen.

Ein derartiger Abgleich ist dann genau, wenn die Übertragungssymmetrisch ist (d. h. wenn der Hin- und der Rückweg genau gleich lange dauern) und die Sende- und Empfangszeiten exakt erfasst werden.

Der gesamte Ablauf wird von den PTP-Instanzen gesteuert. Die Meldungen laufen über einen Protokoll-Stack, der eine relativ grosse und variierende Durchlaufzeit aufweist. Sende- und Empfangszeiten werden möglichst nahe der Stelle gemessen, an der die Meldungen die Endknoten verlassen bzw. erreichen. Ohne spezielle Hardware-Unterstützung können Sende- und Empfangszeiten wegen der Arbeitsweise der Kommunikationsbausteine und der Variation der Interrupt-Latenz nur ungenau erfasst werden. Um eine hohe Synchronisationsgenauigkeit zu erreichen, ist eine Zeitstempel-Hardware vorzusehen. Eine solche wird möglichst nahe an der physikalischen Schicht angebracht. Die Zeitstempelinheit filtert ankommende und abgehende Meldungen und erfasst für jede Sync- bzw. Delay-Req-Meldung einen Zeitstempel.

Die Übertragung ist in vielen Netzwerken prinzipiell symmetrisch. Netzknoten, die nach dem Store-and-forward-Verfahren arbeiten, verursachen jedoch eine starke Variation der Übertragungszeit. Dieser kann man auf zwei Arten begegnen: Durch die Verwendung spezieller Netzknoten oder durch statistische Methoden.

In spezialisierten Netzen der Automatisierungs- oder Messtechnik wird mit Switches gearbeitet, die selbst eine Uhr enthalten (so genannte Boundary Clocks). Sie spielen

gegenüber dem Master die Slave- und gegenüber den Slaves die Master-Rolle. Die zu vermessenden Teilnetze sind dann auf die Kabel reduziert.

Die Fluktuationen der Übertragungszeit können auch durch statistische Methoden ausgeglichen werden. Weil dazu lange Beobachtungsperioden nötig sind, müssen die Slave-Oszillatoren eine entsprechend höhere Stabilität aufweisen.

#### Fazit

Die Möglichkeit, in verteilten Systemen eine präzise Zeitbasis bereitzustellen, schafft in vielen Anwendungsbereichen neue und innovative Lösungsmöglichkeiten. Mit dem PTP steht ein Verfahren zur Verfügung, das Frequenz und Zeit mit hoher Genauigkeit über ein Paketnetz verteilt. Die Ansprüche an die lokalen Uhren und an die Netz- und Rechenkapazität sind vergleichsweise bescheiden. ■

Prof. Hans Weibel unterrichtet an der Zürcher Hochschule Winterthur (ZHAW) kommunikationstechnische Fächer. Am Institute of Embedded Systems (InES) der ZHAW betreut er unter anderem mit Projekten, die sich mit der Implementierung, Anwendung und Weiterentwicklung des IEEE-1588-Standards befassen. Tel. 052 267 75 52, hans.weibel@zhwin.ch, www.zhwin.ch

Die ZHAW führt im Herbst die «IEEE 1588 Conference 2005» durch (Veranstaltungshinweis S. 46).

Eine Referenzliste zu diesem Beitrag ist bei der Redaktion Comtec erhältlich: mediakom@bluewin.ch

# EXANOVIS

## your gateway to advanced solutions



#### Lösungen für Technologien der Telecom

Unser Ziel ist das umfassende Angebot von zukunftsweisenden Technologien und kundenorientierten Dienstleistungen, welches unseren Kunden den Zugang zu zuverlässigen Anwendungen ermöglicht und zum Geschäftserfolg auf der Basis einer langfristigen Partnerschaft führt. Unsere Partner sind innovative Unternehmen in der Test- und Messtechnik.

#### GSM? UMTS? DSL? QoS? FTTx? HSDPA? MPLS?

Begriffe prägen die Umgangssprache in der Welt der Informationstechnik und Telecom - dank einem grundlegenden Know-how sprechen wir gemeinsame Sprache und verstehen Ihre technischen Anforderungen und Bedürfnisse! ...und mit welchen Themen beschäftigen Sie sich heute und in der Zukunft?

#### Beratung und vielseitiges Engagement

EXANOVIS bietet den Informations- und Telecommunternehmen der Schweiz vielseitige Dienstleistungen von der Beratung bis zum Support der Produkte. Die jahrelange Erfahrung und enge Zusammenarbeit mit unseren Teams sichert auch Ihnen einen langfristigen Erfolg!

EXANOVIS AG  
Moosstrasse 8A  
CH-3322 Schönbühl  
Telefon 0041-(0)31-850 25 25  
Telefax 0041-(0)31-850 25 20  
info@exanovis.com  
www.exanovis.com

**Anritsu**  
Discover What's Possible™