

Zeitsynchronisation mit PTP

Eine Einführung in die PTP-Versionen

Inhalt

PTP IEEE-1588.....	1
Begriffsdefinition.....	1
Synchronisation vs. Syntonisierung.....	2
Funktionsweise von PTP.....	4
IEEE 1588-2002.....	5
WRPTP.....	6
SyncE.....	7
Funktionsweise von White Rabbit.....	8
High Accuracy Profile.....	11
Zusammenfassung.....	12
Literaturverzeichnis.....	13

PTP IEEE-1588

Das Precision Time Protocol (PTP) – IEEE 1588 Standard – ist ein auf Paketen und dem Master-Slave Prinzip basierendes Protokoll, das bei Bedarf zur hochgenauen Synchronisation von Geräten in einem Netzwerk dient. Mit Standard PTPv1 kann man eine Genauigkeit im Mikrosekundenbereich erreichen, mit der neuesten Revision v2.1 sogar eine Genauigkeit bis in den Sub-Nanosekundenbereich.

Im Folgenden ein kurzer Überblick über die Versionierungsgeschichte:

Bei IEEE 1588-2002 bzw. „v1“ handelt es sich um die ursprüngliche Form des PTP-Protokolls, welches durch IEEE 1588-2008, auch bekannt als v2 abgelöst wurde. Zu diesem Zeitpunkt war keine Rückwärtskompatibilität zu v1 gegeben. In der neuesten Revision IEEE1588-2019, welche als PTP v2.1 bezeichnet wird, wurde die Kompatibilität im Vergleich zur Revision 2008 verbessert, indem ein Mischbetrieb aus v2 und v2.1 ermöglicht wird.

Begriffsdefinition

Im Kontext von Zeitmessung im Netz sind folgende Begriffe u.a. auch bei PTP von Bedeutung:

- **Offset:** Der Offset ist die Differenz zwischen der Zeit einer Master-Clock und der Zeit eines Slaves. Größere Offsets können mit Zeitstempeln und der Kenntnis über die Laufzeit dieser Zeitstempel durch das Netzwerk (Verzögerung/Delay) korrigiert werden. Ist jedoch eine hochpräzise Synchronisierung notwendig, so müssen Zeitdifferenzen kleiner als das Taktsignal/Taktgeber (Phase) verglichen werden.
- **Phase:** Die Phase bezieht sich auf die Ausrichtung der Taktflanken zwischen dem Master- und dem Slave. Ein perfekt synchronisierter Slave würde eine Phase von Null haben.

- **Verzögerung/Delay:** Delay bezieht sich auf die Zeit, die benötigt wird, um eine Nachricht vom Master zum Slave zu übertragen. Das Delay ist ein wichtiger Faktor für die Genauigkeit der Zeitmessung, da es einen großen Anteil bei der Synchronisation der Uhren darstellt.
- **Frequenz:** Damit Uhren eine gemeinsame Taktbasis besitzen und idealerweise gleich schnell laufen, müssen diese mit der gleichen Frequenz betrieben werden. Um ein Abdriften, also ein schneller oder langsamer Laufen einer Uhr zu verhindern, ist eine regelmäßige Frequenzanpassung, das Syntonisieren, nötig. Die Taktgeber von Uhren sind Oszillatoren, die die Auflösung und Güte einer Uhr bestimmen. Mit Auflösung ist hierbei die kleinstmöglich messbare Frequenzeinheit gemeint.
- **Präzision (Precision):** Präzision bzw. Wiederholgenauigkeit beschreibt, wie eng aufeinander folgende Messungen liegen, bzw. wie weit eine Messung vom Mittelwert eines Satzes von Messungen entfernt liegt. [1] Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Präzision und Genauigkeit gerne synonym verwendet. Eine lediglich präzise Uhr würde immer die gleichen Werte ausgeben, auch wenn diese falsch sind und nicht die richtige Uhrzeit wiedergeben.
- **Genauigkeit (Accuracy)/Richtigkeit:** Als Genauigkeit wird das Ausmaß bezeichnet, das beschreibt, wie nahe eine Messung an den wahren Wert heranreicht. Sie ist sozusagen der Grad der "Korrektheit" einer Größe. [1] Allerdings gibt es in der Literatur und im allgemeinen Sprachgebrauch ebenfalls die Definition, wonach „Genauigkeit“ aus den Begriffen „Präzision“ und „Richtigkeit“ besteht, bzw. „Richtigkeit“ in diesem Kontext der oben beschrieben „Genauigkeit“ entspricht. Somit wäre die Genauigkeit um die Eigenschaft der Präzision erweitert.
- **Stabilität (Stability):** Die Stabilität beschreibt das Ausmaß, in dem sich etwas in Abhängigkeit von Parametern wie Zeit, Temperatur, Schock usw. verändert. [1] Wie Präzision und Genauigkeit ist auch die Stabilität eine Eigenschaft, die man einem Oszillator zuschreibt und somit die Güte einer Uhr vorgibt.

Zusammen bilden diese Begriffe die wichtigsten Aspekte der Synchronisation von Uhren mit PTP.

Synchronisation vs. Syntonisierung

Synchronisation und Syntonisierung sind zwei Begriffe, die in der Signalverarbeitung verwendet werden und auf den ersten Blick etwas Ähnliches beschreiben, sich jedoch auf unterschiedliche physikalische Aspekte beziehen.

Synchronisation bezieht sich auf die Koordination von Ereignissen oder Signalen, um eine zeitliche Übereinstimmung herzustellen. Das Ziel der Synchronisation besteht darin, die Zeitbasis von mehreren Signalen oder Systemen zu vereinheitlichen. In Abbildung 1 ist zu sehen, wie eine „Uhr 1“ mit einer „Referenzuhr 2“ synchronisiert wird. Schon kurz nach der Synchronisierung driftet „Uhr 1“ vom Referenzwert ab, sodass sich ein immer größer werdendes „dt“ einstellt.

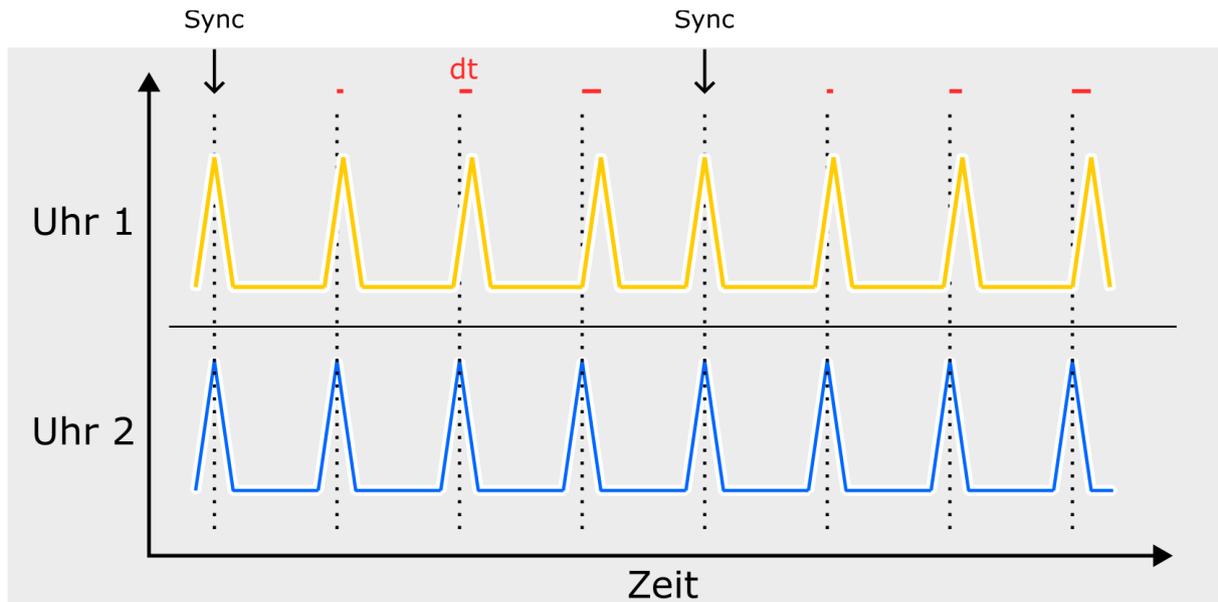


Abbildung 1: Schaubild einer Synchronisierung zweier Uhren (ohne Syntonisierung)

Syntonisierung bezieht sich auf die Anpassung der Frequenz eines Signals, um eine Übereinstimmung mit einer Referenzfrequenz herzustellen. Das Ziel der Syntonisierung besteht darin, die Empfangsfrequenz eines Signals so genau wie möglich an die Sendefrequenz anzupassen, um eine fehlerfreie Übertragung zu gewährleisten. Syntonisierung wird beispielsweise in der Radio- oder Fernsehübertragung, sowie bei der Übertragung von drahtlosen Signalen wie WLAN oder Bluetooth eingesetzt. Abbildung 2 zeigt die Syntonisierung zweier Uhren, sodass diese mit der gleichen Frequenz laufen. Es ist zwar kein Drift zu beobachten, jedoch geht „Uhr 1“ konstant um den Wert „ dt “ nach, da bei einer Frequenzgleichheit nicht zwangsläufig ebenfalls die Phase übereinstimmen muss.

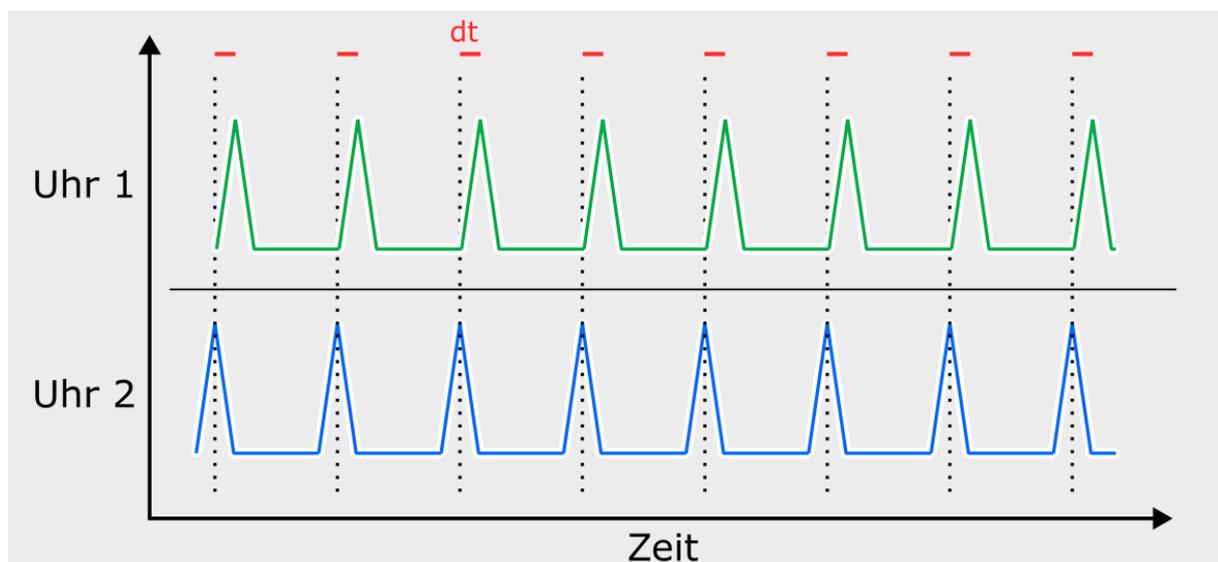


Abbildung 2: Schaubild einer Syntonisierung zweier Uhren (ohne Synchronisierung)

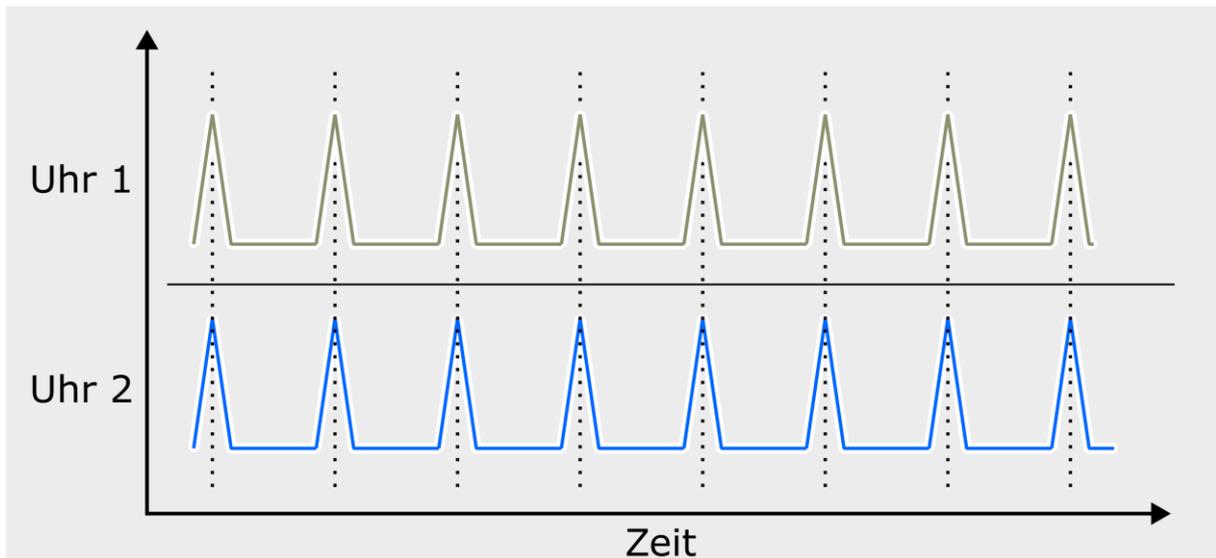


Abbildung 3: Schaubild zweier synchroner Uhren ohne Drift (synchronisiert und syntonisiert)

In Abbildung 3 sind zwei Uhren zu sehen, die absolut synchron laufen. D.h. wir beobachten, dass hier Frequenz und Phase übereinstimmen.

Funktionsweise von PTP

Die Synchronisation der Zeit zwischen Master und Slave erfolgt bei PTP über "Event Messages". Diese Messages werden vom Master über UDP verteilt und von den Slaves beantwortet.

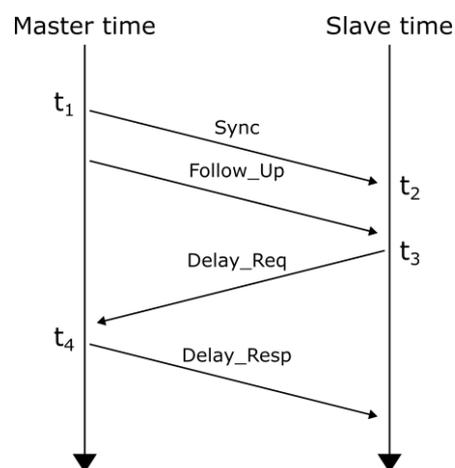


Abbildung 4: Ablauf und Austausch von Nachrichten in PTP

In Abbildung 4 ist der PTP-Ablauf nach dem sog. *Delay request-response* Schema dargestellt. Der Ablauf besteht aus folgenden Schritten:

1. Master sendet eine *Sync Message*, deren Sendezeitpunkt auf der Seite des Masters vermerkt wird (Zeitstempel t_1).
2. Slave empfängt die *Sync Message* und vermerkt den Zeitpunkt des Empfangs auf dessen Seite (t_2).
3. Danach wird vom Master eine *Follow_Up Message* gesendet, die als Payload den Zeitstempel t_1 enthält.

4. Slave empfängt die *Follow_Up Message*, welche den Zeitstempel des Aussendens von *Sync Message* enthält und kann damit bereits die Zeitdifferenz zwischen Master und Slave bestimmen.

Formel 1

$$\delta_{ms} = t_2 - t_1$$

5. Slave sendet eine *Delay_Req Message* (t_3)
6. Master erhält *Delay_Req Message* (t_4)
7. Master sendet *Delay_Resp Message*, welche den Zeitstempel t_4 enthält.
8. Slave empfängt *Delay_Resp* und kann damit die Zeitdifferenz zwischen Slave und Master bestimmen.

Formel 2

$$\delta_{sm} = t_4 - t_3$$

Anhand der vier Zeitstempel (t_1, t_2, t_3, t_4) kann der Slave den Offset bestimmen und seine Uhr an die des Masters angleichen. Für die mittlere Verzögerung δ_M gilt:

Formel 3

$$\delta_m = \frac{\delta_{ms} + \delta_{sm}}{2}$$

Der Slave kann damit seine Zeit t mit dem mittleren Offset o_{ms} wie folgt anpassen:

Formel 4

$$o_{ms} = (t_2 - t_1 + \delta_m)$$

Formel 5

$$t = t - o_{ms}$$

Diese Prozedur wiederholt sich periodisch. [2]

IEEE 1588-2002

PTP IEEE 1588-2002 ist die erste Version des Standards und definiert das grundlegende Protokoll. Im Vergleich zu seinen Nachfolgern, bietet PTPv1 eine geringere Genauigkeit und Funktionalität; dies liegt daran, dass PTPv1 von 2002 von einem symmetrischen Delay ($\frac{\text{Round Trip Time}}{2}$) bei der Berechnung von Zeitstempeln im Protokoll ausgeht. Ein weiterer Nachteil von IEEE 1588-2002 ist, dass diese Protokollversion nur zur Multicast-Kommunikation fähig ist und keine Unterstützung für die Erkennung von fehlerhaften Verbindungen bietet. Dennoch besitzt PTPv1 eine höhere Genauigkeit als NTP und kann dort eingesetzt werden, wo der Funktionsumfang von PTPv2 nicht benötigt wird.

IEEE 1588-2008 enthält eine Reihe von Verbesserungen im Vergleich zu IEEE 1588-2002, die nun auch Genauigkeiten im Nanosekundenbereich ermöglichen. Neben Verbesserungen in der allgemeinen Genauigkeit der Zeitsynchronisation, können nun robustere Systeme durch zusätzliche Optionen im Bereich Fehlertoleranz und Redundanz aufgebaut werden.

Ein weiterer Fortschritt von IEEE 1588-2008 ist ebenfalls die Einführung bzw. Unterstützung transparenter Uhren und höherer Abstraten. **Transparente Uhren** sind Netzwerkgeräte, die die Synchronisation von Uhren innerhalb einer PTP-Domäne verbessern, indem sie die Verzögerung

messen, die durch das Netzwerk verursacht wird. Diese Verzögerung wird in den Zeitstempeln der PTP-Nachrichten einbezogen und ermöglicht eine präzisere Synchronisation zwischen den Uhren in einem Netzwerk.

Eine weitere Neuerung ist die offizielle Einführung von Profilen bei diesem Standard. Ein Profil definiert spezifische Anforderungen und Konfigurationsoptionen für die Anwendung des Standards in einem bestimmten Bereich, wie z.B. Telekommunikation, industrielle Automatisierung oder Test- und Messsysteme. Dies hilft, den Standard besser an Anwendungen anzupassen.

In v2 kann ebenfalls ein Verzögerungsmechanismus passend zur gewünschten Architektur gewählt werden: P2P bzw. E2E. In Peer-to-Peer Netzwerken kann einer Asymmetrie bezüglich Netzwerkpfaden entgegengewirkt werden indem Delays von allen Links separat erfasst werden. Somit kann der Einfluss verschiedener Synchronisationspfade auf die Synchronisationsgenauigkeit deutlich reduziert werden.

Auch neu ist die Einführung des Zwei-Schritt-Verfahrens (Two-Step-Clock), welches bereits in Abbildung 4 eingeflossen ist. Dieses Verfahren erlaubt es, den Zeitpunkt des Versendens der Sync-Nachricht von dessen Payload zu entkoppeln, damit die Latenz vom Erstellen des Stempels bis zum tatsächlichen Versenden der Nachricht berücksichtigt werden kann.

Ebenfalls neu ist die Unterstützung von IPv6, sowie neue Datenfelder, welche die Qualität einer Uhr beinhalten und den BMC-Algorithmus unterstützen. Diese Felder sind *clockAccuracy* und *clockClass*.

Der **BMCA** (Best Master Clock Algorithm) ist ein Algorithmus, der in PTP-Netzwerken verwendet wird, um die Master Clock zu bestimmen, die als Referenzuhr für das Netzwerk verwendet werden soll.

In Version 2 kann mit dem neuen Parameter *Alternate Time Scale* stattdessen eine andere Zeitbasis verwendet werden, die möglicherweise besser für eine bestimmte Anwendung geeignet ist. Beispielsweise kann die Zeitbasis GPS Time verwendet werden. [3]

WRPTP

Ursprünglich ist die Idee für das Konzept von White Rabbit (WR) am Schweizer Forschungszentrum CERN im Rahmen der Erneuerung und Verbesserung des bisher dort eingesetzten Timing und Controlling Systems entstanden [4]. Mittlerweile ist WR der Name eines kollaborierenden Projektes, das eine gleichnamige und eigenständige Open-Source Technologie hervorgebracht hat, welche zur Zeitanpassung (-synchronisation) zwischen verschiedenen Knoten in einem Netzwerk dient und dabei eine Präzision im Nanosekundenbereich erzielt. Gedacht ist diese für zeitsensitive, verteilte Anwendungen.

Zusammenfassend bzw. vereinfacht lässt sich sagen, dass WRPTP eine [Kombination](#) aus IEEE1588-2008 mit den folgenden Erweiterungen darstellt:

- Taktsynchronisierung über die physikalische Schicht,
- Verbesserung der Genauigkeit der Zeitstempel durch Phasenerkennung,
- Automatische präzise Erfassung und Auswertung von Link-Asymmetrien, die bei PTP nicht berücksichtigt werden.

SyncE und PTP als Kernkomponenten von WR sind zwei unterschiedliche Verfahren zur Synchronisierung von Netzwerkgeräten, welche sich in WR für eine präzise Zeit- und Frequenzsynchronisation ergänzen. Im Gegensatz zu PTP, welches grundsätzlich ohne spezielle Hardware betrieben werden kann, setzt White Rabbit jedoch spezielle Hardware voraus, wie White Rabbit Switches [5] mit SyncE zur Synchronisation der Frequenzen.

In WR wird eine genaue Verbindungsverzögerung durch die Verwendung von Hardware-Zeitstempeln, durch die Berechnung des für die Kalibrierung erforderlichen Faserasymmetriekoeffizienten und durch die Berücksichtigung fester hardwareabhängiger Schaltkreisverzögerungen erreicht.

Dies reduziert das Problem der Bestimmung von Latenzen im Synchronisationsverfahren auf die Erkennung von Phasenverschiebungen und ermöglicht eine Genauigkeit im Sub-Nanosekundenbereich. [2]

Der Aufbau eines WR-basierten Netzwerkes ist in Abbildung 5 dargestellt. Im WR-Netzwerk existiert eine Grand Master Clock, die mit einer externen Uhr verbunden ist. Diese liefert dem Master eine genaue Zeit und Frequenz. Der Grand Master kann diese Signale dann über direkte Konnektivität an die Slaves weitergeben. Bei einem Slave-Gerät kann es sich entweder um eine WR-Boundary-Clock (BC) handeln, die selbst als Master fungiert und das Signal an weitere Slave-Geräte verteilt, oder um ein gewöhnliches Slave-Gerät, das nur auf der Empfangsseite ohne zusätzliche Master-Funktion steht.

In Abbildung 5 ist ein exemplarischer Aufbau eines einfachen White-Rabbit-Netzwerkes zu sehen:

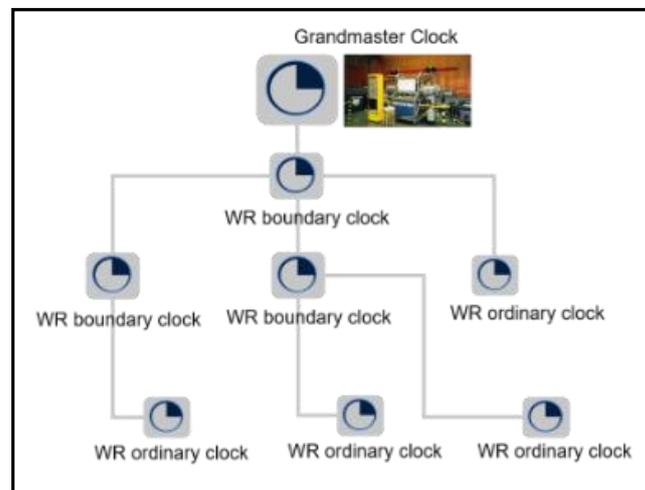


Abbildung 5: Aufbau eines White Rabbit Netzes

SyncE

Synchronous Ethernet ist eine Technologie zur Synchronisation mittels eines gemeinsamen Taktsignals, d.h. die Frequenz (125MHz) wird auf dem physikalischen Kanal mitgeliefert. Die Taktableitung aus dem Nutzsignal ist zu jederzeit möglich, selbst wenn keine Datenübertragung stattfindet.

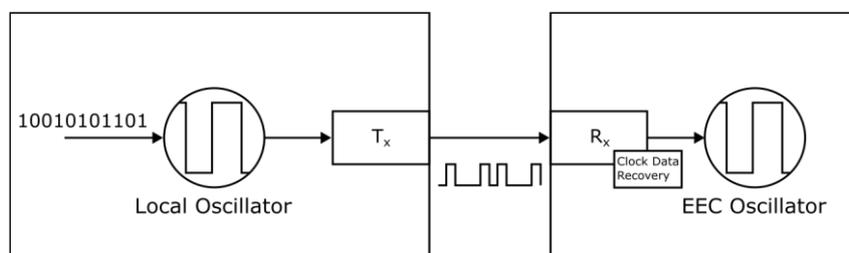


Abbildung 6: Abruf der Frequenzinformationen der übertragenen Uhr

Da White-Rabbit-PTP auf SyncE angewiesen ist, muss gewährleistet werden, dass jedes Gerät im Netzwerk SyncE fähig ist und damit eine durchgehende SyncE-Verbindung im Netz besteht.

Funktionsweise von White Rabbit

Die Funktionsweise von WR ist im Detail in der [Spezifikation](#) [6] (aktuell 2.0) beschrieben.

Der Ablauf von WR besteht im Wesentlichen aus sieben Schritten:

1. Syntonization
2. Calibration
3. Roundtrip Delay
4. Phase Measurement
5. Fine Delay
6. Determine link asymmetry
7. One Way delay computation

Erläuterung der Schritte bei einer WR-Synchronisation:

Syntonization: Mit SyncE (s. Abschnitt zu „Synchronisation vs. Syntonisierung“) wird erreicht, dass die Frequenz zwischen zwei Uhren (Master/Slave Clock) abgeglichen wird.

Calibration: In diesem Schritt werden die konstanten Delays bestimmt, die durch das Senden und Empfangen der Signale und der damit verbundenen Verarbeitungszeit in den elektrischen Komponenten hervorgerufen werden. Diese Zeiten müssen neu bestimmt werden, sobald ein anderes Gerät zum Einsatz kommt oder die Verkabelung geändert wird (anderes Interface am Gerät etc...). Durch die Kalibrierung werden die Zeiten Δ_{txm} , Δ_{rxm} , Δ_{rxs} , Δ_{txs} (s. Abbildung 7) erfasst.

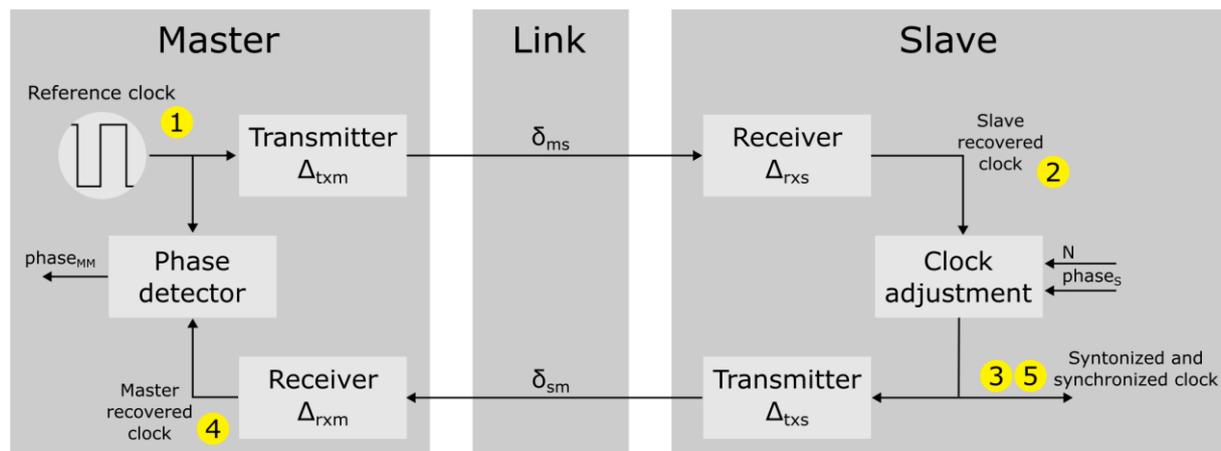


Abbildung 7: Link Modell in WR

Legende zu Abbildung 7:

Symbol	Bedeutung
δ_{sm}, δ_{ms}	Zeitverzögerung zwischen Master und Slave (δ_{sm}) bzw. Slave und Master (δ_{ms}), die sich aufgrund der Übertragung des Signals ergeben. Dieser Einflussfaktor hängt von der Länge der Übertragungstrecke (Link) und dem verwendeten Medium (Glasfaser, Kupferleitung etc...) ab.
$\Delta_{txm}, \Delta_{txs}$	Zeit die für das Aussenden des Pakets bzw. Signals im Master bzw. Slave benötigt wird
$\Delta_{rxm}, \Delta_{rxs}$	Zeit die für das Empfangen des Pakets bzw. Signals im Master bzw. Slave benötigt wird
$phase_s$	Einstellbare Phase des Phasenschiebers im Slave
$phase_{MM}$	Phasendifferenz zwischen dem ausgesendeten und eingehenden Zeitsignal (Taktfrequenz) der Master-Uhr

Roundtrip Delay: Durch Anwendung von PTP erhält der Slave vier Zeitstempel und kann daraus die Verzögerung δ_m (vgl. Formel 3) berechnen.

Phase Measurement (phase_{MM}): Die Abweichung zwischen Master und Slave Clock ergibt sich durch die Zeiten, die für das Senden (TX) und Empfangen (RX) der Daten (Δ_{txm} , Δ_{rxm} , Δ_{rxs} , Δ_{txs}) auf der Master- bzw. Slave-Seite sowie den Laufzeiten (δ_{ms} , δ_{sm}), die sich aus der Übermittlung der Daten durch das (Computer-) Netzwerk ergeben. Für die Verzögerung zwischen der Master- und Slave-Clock $delay_{MS}$ ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

Formel 6

$$delay_{MS} = \Delta_{txm} + \Delta_{rxs} + \delta_{ms}$$

Neben den Laufzeiten, die sich aus der Übertragung und Verarbeitung der Daten ergeben, wird im WR-Protokoll zusätzlich noch die Phasendifferenz ($phase_{MS}$) zwischen Master und Slave Clock abgeglichen:

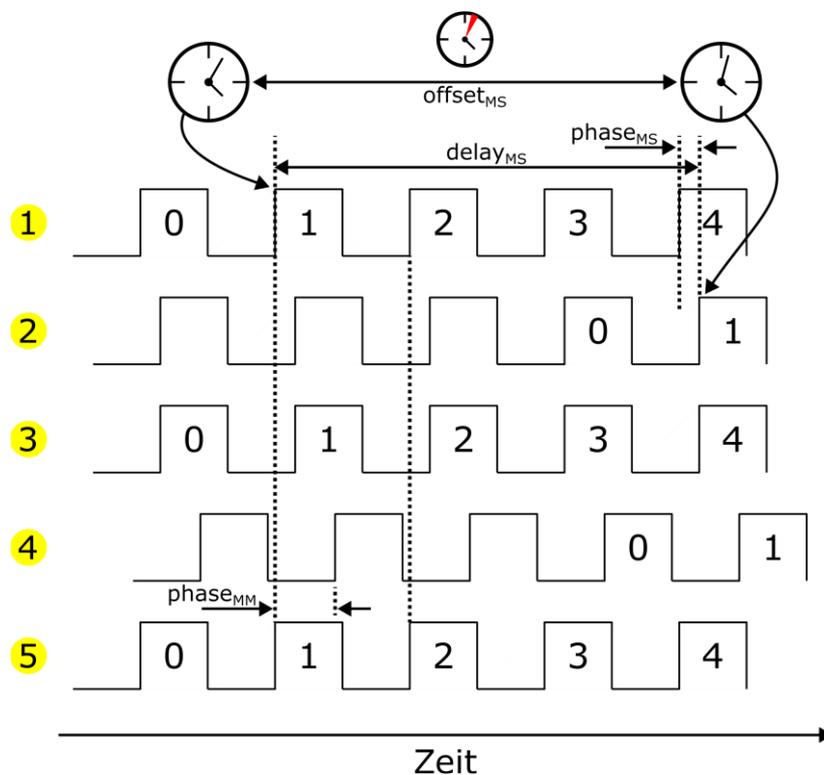


Abbildung 8: Master und Slave clock in WR

Ziel ist es, den Offset ($delay_{MS}$) zwischen den beiden Uhren exakt zu bestimmen. Folgend werden die in Abbildung 8 gezeigten Taktsignale der Master- bzw. Slave Clocks näher erläutert. Die Ziffern (1-5) beziehen sich auf die in Abbildung 7 aufgeführten Ziffern (gelb markiert) und zeigen dort an, wo das jeweilige Taktsignal auftritt. Im Folgenden wird näher auf die Bedeutung der einzelnen Taktsignale und den Ablauf der Phasen Anpassung eingegangen:

1. Das Taktsignal der Masterclock wird verwendet (1), um die Daten zu kodieren und an den Slave zu senden. Der Slave empfängt das Signal mit der Verzögerung $delay_{MS}$, siehe Formel 6.
2. Auf der Empfängerseite (Slave) erhält man eine Zeit, welche um die Verzögerung $delay_{MS}$ von der Masterclock abweicht (2). Anschließend wird das Zeitsignal einem Phasenschieber zugeführt, mit dem sich die Phase des Signals variabel ($phase_s$) verschieben lässt. Die (3) wird als phasenkompensiertes Zeitsignal bezeichnet.

3. Das phasenverschobene Signal wird vom Slave dazu verwendet, den ausgehenden Datenstrom an den Master zu kodieren.
4. Der Master dekodiert das vom Slave gesendete Signal (3) und erhält daraus ein Signal (4), das eine gewisse Phasenverschiebung zum ursprünglich vom Master ausgesendeten Signal aufweist (4). Dieser Phasenunterschied wird als Roundtrip ($phase_{MM}$) bezeichnet.

Der Phasenunterschied $phase_{MM}$ lässt sich wie folgt ausdrücken: [7]

Formel 7

$$phase_{MM} = (\Delta + \delta_{ms} + \delta_{sm} + phase_s) \bmod T_{ref}$$

wobei $\Delta = \Delta_{txm} + \Delta_{rxs} + \Delta_{txs} + \Delta_{rxm}$ und T_{ref} die Periode der Frequenz der Masterclock ist. Bei 125 MHz sind dies 8 ns.

Fine delay: Ist der $offset_{MS}$ zwischen der Master und Slave Clock sowie die Phase $phase_{MM}$ bestimmt, kann der Slave die Phase ($phase_s$) ableiten und damit eine Phasenanpassung an die Master-Clock vornehmen. Der Slave kann damit genauere Zeitstempel (t_{2P} , t_{4P}) bestimmen, da der Phasenunterschied ausgeglichen wurde. Für die Roundtrip-Phase δ_{mm} ergibt sich:

$$\delta_{mm} = (t_{2P} - t_1) - (t_{4P} - t_3)$$

Determine link asymmetry: Eine Delay-Link Asymmetrie tritt auf, wenn der Hin- bzw. Rückweg (Link) für das Senden bzw. Empfangen eines Signals unterschiedlich ist. Ursachen hierfür sind u.a. die Nutzung verschiedener Links bzw. Interfaces zum Senden bzw. Empfangen. Bei Glasfasern hat der Brechungsindex n einen Einfluss auf die Laufzeit eines Signals, da dieser von der Wellenlänge (λ) abhängt. D.h. wenn man für den Hinweg eine Wellenlänge von 1550 nm und für den Rückweg eine Wellenlänge von 1310 nm einsetzen würde, dann hätte man zwei verschiedene Brechungsindizes, die man bei White Rabbit im Gegensatz zu PTP berücksichtigen müsste und hätte damit einen Koeffizienten α als das Verhältnis der Brechungsindizes:

$$\alpha = \frac{\delta_{ms}}{\delta_{sm}} - 1 = \frac{n_{1550}}{n_{1310}} - 1$$

One Way delay computation: Mit Abhängigkeit von α lässt sich der One Way Delay δ_{ms} wie folgt ausdrücken:

$$\delta_{ms} = \frac{1 + \alpha}{2 + \alpha} (\delta_{mm} - \Delta) + \Delta_{txm} + \Delta_{rxs}$$

$$o_{ms} = t_1 - t_{2P} + \delta_{ms}$$

Der Slave kann mit dem präzisen Offset o_{ms} seine Uhr an die des Masters anpassen. Damit wird eine Präzision im Nanosekundenbereich erreicht.

Die in diesem Abschnitt dargestellte Funktionsweise von White Rabbit soll nur die Grundlage der Zeitsynchronisation in White Rabbit erläutern und die Unterschiede bei der Ermittlung des Offsets gegenüber PTP darstellen. Der detaillierte Ablauf zur Erfassung des Offsets ist in [7] ausgeführt.

High Accuracy Profile

Eine entscheidende Änderung hat sich mit [IEEE 1588-2019](#) [8] ergeben, indem das High Accuracy Default PTP Profile auf Basis von White Rabbit Teil der Spezifikation wurde. Das Profil bietet eine präzise Phasendetektion, Kalibrierung und Online-Schätzung von Asymmetrien sowie eine Syntonisation der lokalen PTP-Uhr. Die Genauigkeit der Uhr beträgt Sub-Nanosekunden, und die Präzision liegt im Bereich von Pikosekunden. Das standardisierte White Rabbit (unter dem Namen High Accuracy) ist das dritte Standard-PTP-Profil, das im Anhang I der IEEE1588-2019 definiert ist.

Folgende Punkte werden im High Accuracy Profile (WR) definiert:

- Kontrolle der L1-Syntonisierung durch PTP
- Schätzung der Verzögerungsasymmetrie und Korrektur der PTP-Berechnungen für Verzögerungsasymmetrie und Hardware-Verzögerungen
- Kalibrierung der Hardware-Verzögerungen und des relativen Verzögerungskoeffizienten (erforderlich zur Schätzung der Verzögerungsasymmetrie)
- Zuweisung fester Master-/Slave-Rollen an Ports
- Dediziertes WR-Profil, das mit dem Delay Request-Response Default PTP Profile kompatibel ist

Folgende Teile wurden verallgemeinert und in den IEEE1588-Standard integriert:

- Optionale Funktionen - enthalten in Clause 16, 17 und Annex L (einige dieser Funktionen sind HA-spezifisch, andere sehr viel allgemeiner)
- Neues Standard-PTP-Profil - Annex I.5
- Informativer Anhang - Annex N

Zusammenfassung

Folgende Tabelle enthält eine Gegenüberstellung der Verfahren NTP (Network Time Protokoll), PTP und White Rabbit in Bezug auf Genauigkeit, Synchronisierung, Syntonisation und Phasenabgleich, sowie Anwendungsgebiete.

Protokoll	NTPv4 (RFC 5905/2010)	PTP IEEE 1588-2002 (v1)	PTP IEEE 1588-2008 (v2)	PTP IEEE 1588(2019) HR Profile (WR)
Genauigkeit in [s]	Milli 10 ⁻³	Mikro 10 ⁻⁶	bis Nano 10 ⁻⁹	Sub-Nano 10 ⁻⁹
Synchronisierung	Timestamps	Timestamps, Network Delay (basierend RTT*/2)	Timestamps, Asymmetrisches Network Delay (unterschiedliche Routen)	Timestamps, Network Delay, Frequency/Phase
Syntonisation und Phasenabgleich	Nein	Nein	Syntonisation mit SyncE möglich es erfolgt jedoch kein Phasenabgleich	Syntonisation und Phasenabgleich sind erforderlich
Anwendungsgebiete	Allgemeine Zeitreferenz	Industrie & Telekommunikation	Spezialanwendungen	Forschung & Spezialanwendungen mit hohen Anforderungen

*RTT=Round-Trip-Time

Literaturverzeichnis

- [1] John R. Vig (1992): Introduction to quartz frequency standards.
- [2] Waterman, E, Helm, M, Zirngibl, J, Stubbe, H (2021): White Rabbit: High Precision PTP. Technical University of Munich.
- [3] Garner, GM (2008): IEEE 1588 Version 2.
- [4] CERN: White Rabbit Official CERN website. <https://white-rabbit.web.cern.ch/>.
- [5] Seven Solutions » Best-in-class solutions with ultra-accurate timing at the essence. (2021): WR Switch » Seven Solutions. <https://sevensols.com/wr-switch/>. Abgerufen am 26.04.2023.
- [6] White Rabbit Project: White rabbit specification (revision history). [https://ohwr.org/project/wr-std/wikis/Documents/White-Rabbit-Specification-\(Revision-History\)](https://ohwr.org/project/wr-std/wikis/Documents/White-Rabbit-Specification-(Revision-History)).
- [7] G. Cota, E, Lipinski, M, Włostowski, T, van der Bij, E, Serrano, J (10.02.2023): White rabbit specification (latest version) · Wiki · Projects / White Rabbit Standardization · Open Hardware Repository. [https://ohwr.org/project/wr-std/wikis/Documents/White-Rabbit-Specification-\(latest-version\)](https://ohwr.org/project/wr-std/wikis/Documents/White-Rabbit-Specification-(latest-version)). Abgerufen am 10.02.2023.
- [8] IEEE (2019): IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE Std 1588-2019 (Revision of IEEE Std 1588-2008).