

BACHELORTHESIS
Florian Lüdke

Konzeptionierung und Prüfung einer zentralen Zeitsynchronisierung von Prozessbus-Systemen in Umspannwerken mittels Precision Time Protocol

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering
Department of Information and Electrical Engineering

Florian Lüdke

Konzeptionierung und Prüfung einer zentralen Zeitsynchronisierung von Prozessbus-Systemen in Umspannwerken mittels Precision Time Protocol

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Robert Heß
Zweitgutachter: Prof. Dr. Jürgen Vollmer

Eingereicht am: 02. Juni 2021

Florian Lüdke

Thema der Arbeit

Konzeptionierung und Prüfung einer zentralen Zeitsynchronisierung von Prozessbus-Systemen in Umspannwerken mittels Precision Time Protocol

Stichworte

Zentrale Zeitsynchronisierung, Precision Time Protocol (PTP), IEEE 1588, IEC 61850, Multiprotocol Label Switching (MPLS), PTP-Profil, ITU-T 6.8275.1

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit behandelt die zentrale Zeitsynchronisierung eines Prozessbus-Systems nach IEC 61850 mittels Precision Time Protocol (PTP) unter Verwendung eines Multiprotocol Label Switching (MPLS) Telekommunikationsnetzes zur Zeitverteilung. In der Arbeit werden drei Konzeptvorschläge einer redundanten Zeitsynchronisierung präsentiert. Der Ansatz einer dezentralen Zeitsynchronisierung mit der zentralen Zeitsynchronisierung als Backup wird als das geeignetste Konzept evaluiert und für dieses ein Konzeptaufbau realisiert. Unter der Anforderung einer hohen Genauigkeit der Synchronisierung muss im MPLS-Netzwerk das ITU-T G.8275.1 PTP-Profil verwendet werden, woraus die Anforderung einer physikalischen Frequenzsynchronisierung der Geräte resultiert. Das Gerät (Telecom Boundary Clock) im Konzeptaufbau, welches die Schnittstelle zwischen den Netzsegmenten des MPLS-Netzes und des Prozessbuses bildet, unterstützt diese allerdings nicht. Trotzdem verläuft der durchgeführte Test der Zeitsynchronisierung im Prozessbus-System erfolgreich und die Genauigkeit bleibt im Rahmen der Anforderungen. Daher werden, um eine vollständige Kompatibilität zu gewährleisten, Alternativen für das Gerät der Telecom Boundary Clock aufgezeigt. Insgesamt bestätigte eine Messung und eine theoretische Betrachtung des Zeitfehlers, dass das vorgestellte Konzept alle Genauigkeitsanforderungen erfüllt. Damit wird in der Arbeit ein anforderungskonformes, redundantes Konzept einer zentralen Zeitsynchronisierung für ein Prozessbus-System erarbeitet und die Möglichkeit einer Umsetzung präsentiert.

Florian Lüdke

Title of Thesis

Design and testing of a centralized time synchronization for processbus systems in primary substations using the Precision Time Protocol

Keywords

centralized time synchronization, Precision Time Protocol (PTP), IEEE 1588, digital substation, IEC 61850, Multiprotocol Label Switching (MPLS), telecom profile, ITU-T 6.8275.1

Abstract

This thesis describes the concept and the testing of a centralized time synchronization for a processbus according to IEC 61850 standard using the Precision Time Protocol (PTP) and a Multiprotocol Label Switching (MPLS) telecommunication network for time distribution. Three different concepts of deploying a redundant time synchronization get presented. The concept containing a decentralized time master together with a centralized backup synchronization is found to be the preferred solution. Therefore, a test and concept setup is subsequently realized. The design phase has shown that for meeting required time accuracy, the PTP profile ITU-G.8275.1 has to be used in the MPLS network. The usage of the G.8275.1 PTP profile requires a physical frequency synchronization for the device (Telecom Boundary Clock) switching between MPLS network and processbus. The Telecom Boundary Clock used in the test setup has not supported a physical frequency synchronization, but even without this feature, the processbus has synchronized successfully and accurately. The testing and a theoretical calculation has shown that the main challenge of accuracy is met by the concept. To be compliant with the standard, alternative devices for the intended use as Telecom Boundary Clock are being named. Therefore, this thesis demonstrates a redundant and accurate concept that can be used for the centralized time synchronization of a processbus system.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	viii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Umspannwerke in elektrischen Verteilnetzen	3
2.2 Einführung eines Weitbereichsnetzes mittels des Multiprotocol Label Switching (MPLS)	5
2.2.1 Relevante Schichten des ISO-OSI Referenzmodells	6
2.2.2 Multiprotocol Label Switching (MPLS)	8
2.2.3 Multiprotocol Label Switching (MPLS) Prüflabor	9
2.3 Konzept für Sekundärtechnik in Umspannwerken nach IEC 61850	10
2.3.1 Überblick über den Kommunikationsstandard IEC 61850	12
2.3.2 Prozessbus-Systeme nach IEC 61850	13
2.3.3 Sekundärtechnik IEC 61850 Prüflabor	17
2.4 Zeitsynchronisierung mit dem Precision Time Protocol (PTP) nach IEEE 1588	20
2.4.1 Zeitsynchronisierung mit einer Zeitreferenz	20
2.4.2 PTP-Instanzen	22
2.4.3 Synchronisierungskonzept	23
2.4.4 Übertragungsprotokoll der PTP-Zeitsynchronisierung	25
2.4.5 Genauigkeit der PTP-Zeitsynchronisierung	26
2.4.6 Announce-Nachrichten und dynamische Wahl des besten Masters	26
2.4.7 Standardisierung der PTP-Voreinstellungen für verschiedene Branchen durch PTP-Profile	28
3 Anforderungen	30
4 Konzeptionierung der zentralen PTP-Zeitsynchronisierung	32
4.1 Dezentrale und zentrale Zeitsynchronisierung	32
4.2 Konzepte einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung	34
4.2.1 Vermaschte PTP-Zeitsynchronisierung	34
4.2.2 Redundante zentrale PTP-Zeitsynchronisierung	35
4.2.3 Zentrale PTP-Zeitsynchronisierung als Backup zur dezentralen Zeitsynchronisierung	36
4.2.4 Konzeptbewertung	36

4.3	PTP-Marktanalyse	37
4.4	Geräteauswahl	39
4.4.1	Zentrale Master Clocks	39
4.4.2	MPLS-Weitbereichsnetz	39
4.4.3	Dezentrale Master Clock und Boundary Clock im Umspannwerk	39
4.4.4	Weitere Netzwerktechnik	40
4.4.5	Anpassung der Geräteauswahl bei Verwendung des Parallel Redundancy Protocol (PRP)	41
4.5	PTP-Konzept	41
4.5.1	PTP-Profil im Prozessbus-System	41
4.5.2	Auswahl des PTP-Profiles im MPLS-Weitbereichsnetz	41
4.5.3	ITU-T G.8275.1 PTP-Profil	43
4.6	Synchronisierungshierarchie	45
4.7	Anforderung einer physikalischen Frequenzsynchronisierung	47
4.8	Zeitfehlerbudget	48
5	Realisierung des zentralen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts	51
5.1	Hardwareaufbau	51
5.2	Parametrierung	53
5.3	Inbetriebnahme	55
6	Prüfung des zentralen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts	56
6.1	Prüfverfahren	56
6.1.1	Wireshark	56
6.1.2	Omicron Daneo 400	57
6.1.3	1PPS-Vergleich	58
6.2	Erfüllung der Umsetzungsvorgaben	58
6.3	Prüfung der Zeitsynchronisierung und des Verhaltens des Prozessbus-Systems im Konzeptaufbau	59
6.4	Prüfung der Synchronisierungsgenauigkeit	65
6.4.1	Prüfung des Synchronisierungsfehlers der zentralen Zeitsynchronisierungskette	65
6.4.2	Prüfung des Zeitunterschiedes der Synchronisierungsvarianten	70
6.5	Bewertung der Prüfungsergebnisse anhand des Anforderungsprotokolls	73
7	Zusammenfassung und Ausblick	76
	Literaturverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	83
	Tabellenverzeichnis	85
A	Anhang	86
A.1	Weitere Ergebnisse zur Prüfung 6.4.1	86

A.2 Weitere Ergebnisse zur Prüfung 6.4.2	89
Selbstständigkeitserklärung	91

Abkürzungen

1PPS	1-Pulse-Per-Second
ABCMA	Alternate Best Master Clock Algorithm
BC	Boundary Clock
BCU	Bay Control Unit
BMCA	Best Master Clock Algorithm
BPCU	Bay Protection Control Unit
E2E	End-to-End Delay-Mechanism
GM	Grandmaster Clock
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Event
GPST	GPS Time
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electrical Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO/OSI	International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LWL	Lichtwellenleiter
MC	Master Clock

MPLS	Multiprotocol Label Switching
NTP	Network Time Protocol
OC	Ordinary Clock
P2P	Peer-to-Peer Delay-Mechanism
PCU	Protection Control Unit
PIU	Process Interface Unit
PRP	Parallel Redundancy Protocol
PTP	Precision Time Protocol
Red-Box	Redundancy Box
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol
SC	Slave-only Clock
SDH	Synchrone Digitale Hierarchie
SNTP	Simple Network Time Protocol
SV	Sampled Values
SyncE	Synchronous Ethernet
T-BC	Telecom Boundary Clock
T-GM	Telecom Grandmaster Clock
T-TC	Telecom Transparent Clock
T-TSC	Telecom Time Slave Clock
TAI	Temps Atomique International
TC	Transparent Clock
UTC	Universal Time Coordinated
WAN	Weitbereichs-Telekommunikationsnetz (Wide Area Network)

1 Einleitung

Für die elektrische Energieversorgung wird in Stromnetzen die elektrische Spannung zwischen verschiedenen Spannungsebenen transformiert, um große Leistungen verlustarm zwischen Erzeugern und Verbrauchern zu übertragen. Die Transformation zwischen Hochspannung und Mittelspannung findet in Umspannwerken statt, in denen sich das für Langstrecken verwendete Hochspannungsnetz in ein feinmaschigeres Mittelspannungsnetz verzweigt. Neben den eigentlich für die Transformation der elektrischen Energie benötigten Transformatoren besteht das Umspannwerk aus einer Vielzahl unterstützender Systeme, die die Steuerung und den Schutz des Stromnetzes ermöglichen. Für die Steuer- und Überwachungsaufgaben sind die Umspannwerke über ein Telekommunikationsnetz untereinander und mit zentralen Leitstellen verbunden. Komponenten der Energieversorgung wie Kabel, Transformatoren sowie Steuer- und Schutzsysteme haben Einsatzzeiten im Stromnetz von mehreren Jahrzehnten. Aus einer sich im stetigen Wandel befindenden Energieversorgung resultiert eine stetige Weiterentwicklung des Stromnetzes unter Paralleleinsatz mehrerer Technologiegenerationen. Im Zuge fortschreitender Digitalisierung wird kontinuierlich der Einsatz neuer Technologien zur Bewältigung zukünftiger Anforderungen des Stromnetzes evaluiert.

Ein aktuelles Beispiel hierfür ist die Verwendung des Kommunikationsstandards IEC 61850 und damit einhergehend der Einsatz eines Prozessbus-Systems im Rahmen eines neuen Umspannwerkkonzepts. Ein Prozessbus-System dient dazu, Signale (beispielsweise Messwerte von Strom- und Spannungswandlern) direkt am Prozess zu erfassen, zu digitalisieren und über ein Netzwerk zu übertragen. Die Kommunikation geschieht über auf Ethernet basierende Standardprotokolle der Netzwerktechnik. Damit erübrigt sich die individuelle Anbindung aller Messsysteme und die Anzahl der Leitungswege wird reduziert. Weitergehend ergibt sich daraus die Anforderung einer hochgenauen Zeitsynchronisierung der Prozessbus-Komponenten, um eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu garantieren. Eine Möglichkeit dieser Zeitsynchronisierung ist das Precision Time Protocol (PTP). Parallel zur Entwicklung von neuen Umspannwerkkonzepten werden von Netzbetreibern neue Technologien für die standortverbindenden Kommunikationsnetze für Steuer- und Überwachungsaufgaben evaluiert.

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptionierung und Prüfung einer zentralen Zeitsynchronisierung von Prozessbus-Systemen in Umspannwerken mittels Precision Time Protocol. Für eine zentrale Zeitsynchronisierung soll das standortverbindende Kommunikationsnetz verwendet werden. Die Konzeptionierung geschieht unter der Anforderung einer hohen Genauigkeit der Synchronisierung. Für das Precision Time Protocol werden Zeitgeber benötigt, die als Master die Synchronisierung des Prozessbus-Systems ermöglichen.

Die Arbeit führt in die benötigten Grundlagen der elektrischen Energieversorgung und Prozessbus-Komponenten ein. Weiter werden die aktuellen Laboraufbauten zum standortverbindenden Kommunikationsnetz und zum IEC 61850 Prozessbus-System vorgestellt. Insbesondere wird die notwendige Theorie zum Precision Time Protocol erläutert. Weiter erfolgt mit einer konkreten Formulierung der Anforderungen eine Grobkonzeption denkbarer zentraler Synchronisierungsansätze. Auf Basis der Anforderungen wird ein geeigneter Ansatz ausgewählt und mit einer Marktanalyse werden die Möglichkeiten der in den Laboraufbauten zur Verfügung stehenden Komponenten betrachtet. Mit einer Komponentenauswahl wird ein Konzeptaufbau unter Berücksichtigung der für das PTP zu spezifizierenden Parameter erstellt. Für die Beurteilung der möglichen Synchronisierungsgenauigkeit erfolgt eine theoretische Betrachtung des Zeitfehlers der zentralen Synchronisierungskette. Anschließend wird mit dem erarbeiteten Konzept der Konzeptaufbau realisiert. Auf Basis des Aufbaus erfolgt die Prüfung der zentralen Zeitsynchronisierung in Form des Verhaltens in verschiedenen Betriebsmodi und der Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen. Final werden Empfehlungen bezüglich der Möglichkeiten einer zentralen Zeitsynchronisierung getroffen und Restriktionen aufgezeigt.

2 Grundlagen

Für die Konzeptionierung einer zentralen Zeitsynchronisierung eines Prozessbus-Systems werden die Grundlagen, die für die Bearbeitung dieses Themas notwendig sind, erläutert. Es wird der Anwendungsbereich eines Prozessbus-Systems in Umspannwerken eingeordnet, das Multiprotocol Label Switching-Weitbereichsnetz, über das die Synchronisierung erfolgt, erklärt, der IEC 61850 Standard betrachtet und das für die Synchronisierung verwendete Precision Time Protocol erläutert.

2.1 Umspannwerke in elektrischen Verteilnetzen

Die Bachelorarbeit wird beim Hamburger Verteilnetzbetreiber Stromnetz Hamburg GmbH durchgeführt. Das Stromnetz ist in Deutschland zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern aufgeteilt. Im Übertragungsnetz wird die elektrische Energie mit Höchst- und Hochspannung von bis zu 400 kV mit hohen elektrischen Leistungen und über größere Entfernungen übertragen. Die Verteilnetzbetreiber verteilen die elektrische Energie regional im Verteilnetz mit Spannungen zwischen 100 kV und 400 V an die Endkunden. Das Verteilnetz bezieht seine Energie aus dem überregionalen Übertragungsnetz. Im Hamburger Verteilnetz geschieht diese Übergabe an drei Knotenpunkten am nördlichen, südlichen und östlichen Stadtrand in sogenannten Hauptumspannwerken von 380 kV auf 110 kV. Im Stadtgebiet betreibt die Stromnetz Hamburg GmbH weiterhin insgesamt 54 Umspannwerke und ca. 5000 Ortsnetzstationen. In den Umspannwerken wird die Spannung von 110 kV Hochspannung auf 10 kV Mittelspannung transformiert. Von der 10 kV Mittelspannungsebene transformieren Ortsnetzstationen die Spannung auf 400 V Niederspannung, an die dann die meisten privaten Endkunden angeschlossen sind. Abbildung 2.1 zeigt die Umspannwerkstandorte im Hamburger Verteilnetz. [1]

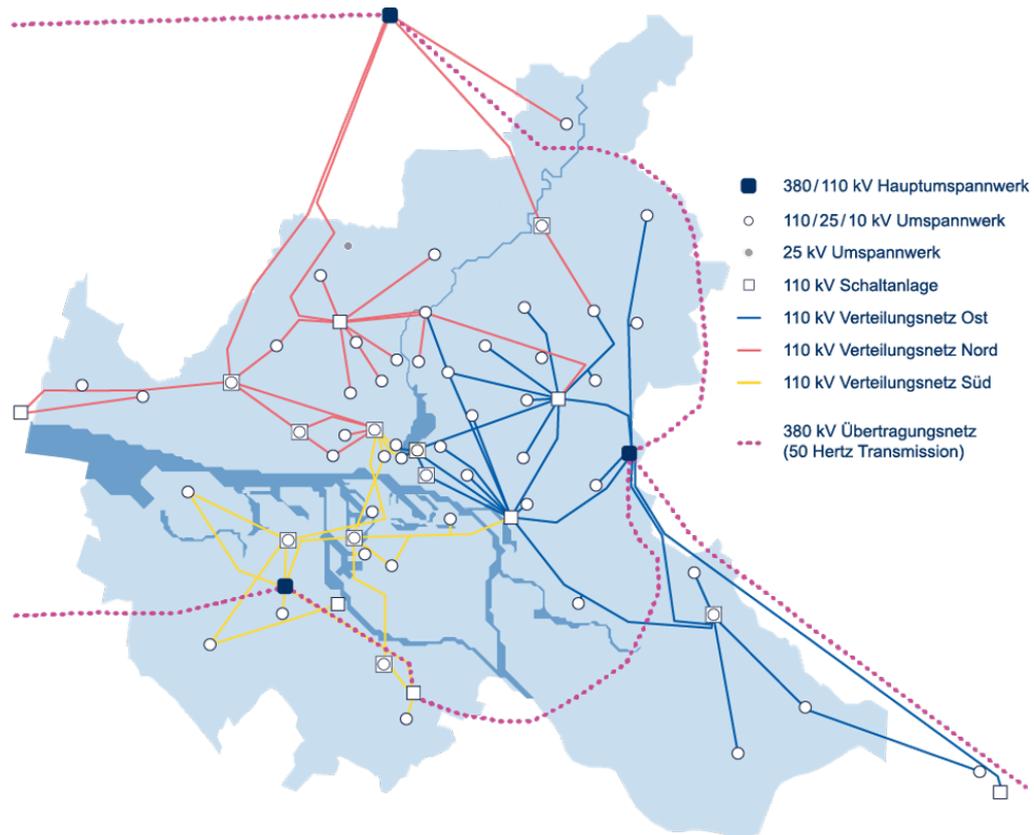


Abbildung 2.1: Verteilnetz mit Umspannwerkstandorten der Stromnetz Hamburg GmbH [2]

Neben der Aufgabe der Energieübertragung sind Netzbetreiber auch für die Steuerung- und Überwachung des Stromnetzes verantwortlich. Von Leitstellen werden diese Aufgaben über ein Telekommunikationsnetz und Netzleittechnik ausgeführt. Bei der Beschreibung der Systeme der elektrischen Energieversorgung wird zwischen der Primärtechnik, welche die Betriebsmittel beschreibt, die direkt in den Energietransport eingebunden sind und der Sekundärtechnik, welcher alle unterstützenden Systeme wie die Netzleittechnik und die Schutztechnik zugeordnet sind, unterschieden. Im Hamburger Verteilnetz wird die Sekundärtechnik durch die drei Abteilungen Schutztechnik, Leittechnik und Übertragungstechnik abgebildet. Die Bearbeitung der zentralen Zeitsynchronisierung findet in diesen Abteilungen statt. Die Aufgabe der Schutztechnik ist der Betrieb der Schutzeinrichtungen für alle Komponenten im Stromnetz. Die Leittechnik stellt über spezielle Leittechnik-Systeme die Möglichkeiten zur Steuerung und Überwachung des Stromnetzes von zentraler Stelle aus dem Netzleitsystem zur Verfügung. Die Übertragungstechnik betreibt das firmeneigene Telekommunikationsnetz zwischen den verteilten Standorten des Verteilnetzes. Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit sind die Abteilungen eng miteinander verzahnt. [3]

Für den stabilen Betrieb eines elektrischen Energienetzes ist die Steuerung und Überwachung des Netzes auf allen Spannungsebenen notwendig. Auf den verschiedenen Ebenen herrscht ein unterschiedlich hoher Automatisierungsgrad. Automatisierte Schaltanlagen können aus der Ferne gesteuert werden. Dadurch kann beispielsweise bei Störungen

sofort regiert werden und ein redundantes System den Betrieb übernehmen. Ein Netzleitsystem hat eine Pyramidenstruktur und ist in die Ebenen Netzleitebene, Stationsleitebene, Feldleitebene und Prozessebene unterteilt. [1]

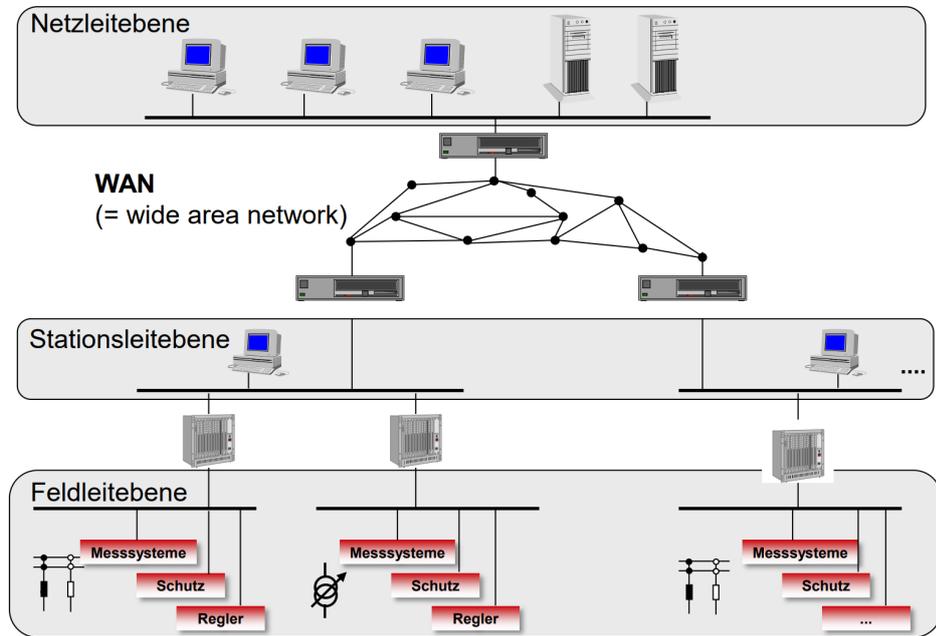


Abbildung 2.2: Hierarchischer Aufbau von Netzleitsystemen [4]

Abbildung 2.2 zeigt den hierarchischen Aufbau eines Netzleitsystems. Zusätzlich ist auch ein Weitbereichs-Telekommunikationsnetz (WAN) gezeigt, welches verteilte Standorte verbindet. Die Netzleitebene dient der Fernsteuerung und Überwachung des Netzes von einer zentralen Leitstelle aus, wogegen die Stationsleitebene der Überwachung und Steuerung von ganzen Stationen, wie beispielsweise Umspannwerken, dient. Unterhalb der Stationsleitebene befindet sich die Feldleitebene, in welcher Schutz- und Steuerungsfunktionalitäten für ein Feld zusammengefasst sind. Direkt an den Betriebsmitteln der Primär- und Sekundärtechnik befindet sich die Prozessebene. Die Prozessebene ist die Darstellung der Zustände der primären Betriebsmittel des Netzes. Von der Feldleitebene werden diese Zustände ausgewertet und der Prozess gesteuert. [1].

2.2 Einführung eines Weitbereichsnetzes mittels des Multiprotocol Label Switching (MPLS)

Mit Telekommunikationsnetzen werden Daten zwischen verschiedenen Endsystemen übertragen. Aktuelle Telekommunikationsnetze müssen Anforderungen, wie hohe Datenraten und geringe Laufzeitverzögerungen, erfüllen. Übertragungen können dabei mit Hilfe von Leitungsvermittlung oder Paketvermittlung erfolgen. Bei der Leitungsvermittlung wird wie im Telefonnetz ein Übertragungskanal zwischen den Endsystemen auf-

gebaut. Dieser Verbindungsaufbau und danach -abbau ist zeitintensiv und der Kanal wird, abhängig von der für die Anwendung benötigten Datenrate, meistens nur ineffizient genutzt. Moderne Telekommunikationsnetze arbeiten von daher mit dem Ansatz der Paketvermittlung. Dabei werden die Nachrichten in kleinere Segmente, die Pakete, unterteilt und nacheinander übertragen. Da die Pakete bei der Übertragung durch ein komplexes Netz unterschiedliche Wege nehmen können, entstehen neue Herausforderungen durch Laufzeitschwankungen und eine abweichende Empfangsreihenfolge beim Empfänger. Abbildung 2.3 zeigt die schematische Darstellung eines Telekommunikationsnetzes. [5]

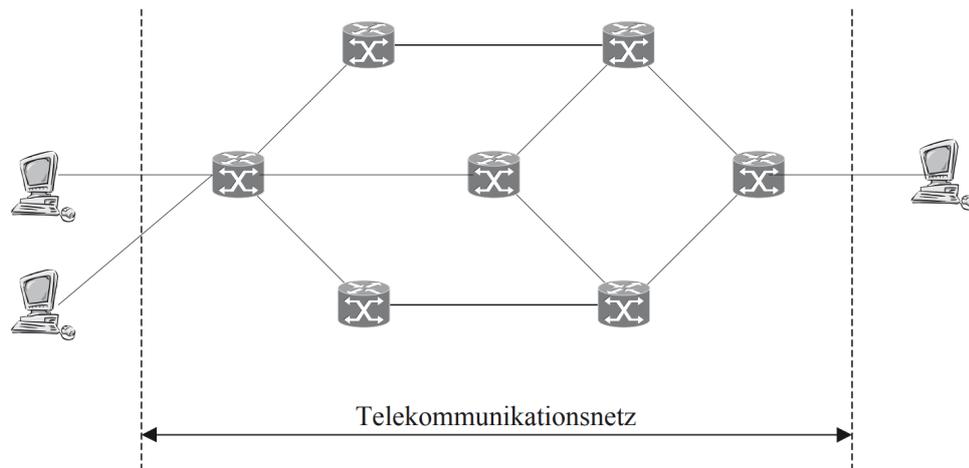


Abbildung 2.3: Telekommunikationsnetz mit Netzknotten und Computern als Endsystemen [5]

Angewendet auf das Thema der zentralen Zeitsynchronisierung wären die Endsysteme Prozessbus-Systeme in Umspannwerken. Im Rahmen eines Projektes soll bei der Stromnetz Hamburg GmbH ein neues, firmeneigenes Telekommunikationsnetz mit Multiprotocol Label Switching (MPLS) eingeführt werden. Für die Erklärung des MPLS-Protokolls werden die verschiedenen Schichten einer Kommunikation betrachtet.

2.2.1 Relevante Schichten des ISO-OSI Referenzmodells

Für die Beschreibung eines komplexen Telekommunikationsnetzes wird dies in mehrere Teilfunktionalitäten unterteilt, die mit dem ISO-OSI Referenzmodell beschrieben werden können. Das ISO/OSI Referenzmodell besteht aus verschiedenen Schichten (Layers). Jeder dieser Layer beschreibt einen Teilaspekt der Kommunikation. Von höheren Layers kann über eine Schnittstelle auf die Dienstleistung des nächst niedrigeren Layers zugegriffen werden. Dafür muss nur die Schnittstelle bekannt sein und nicht die konkrete Implementierung des darunter liegenden Layer. Die Regeln der Kommunikation zwischen zwei Endpunkten werden für jede Schicht durch Protokolle beschrieben. Für die Konzeptionierung einer zentralen Zeitsynchronisierung ist das Verständnis der Layer 1

bis 3 relevant. Abbildung 2.4 zeigt das ISO-OSI Referenzmodell am Beispiel der Komponenten eines einfachen Kommunikationsnetzes. [5]

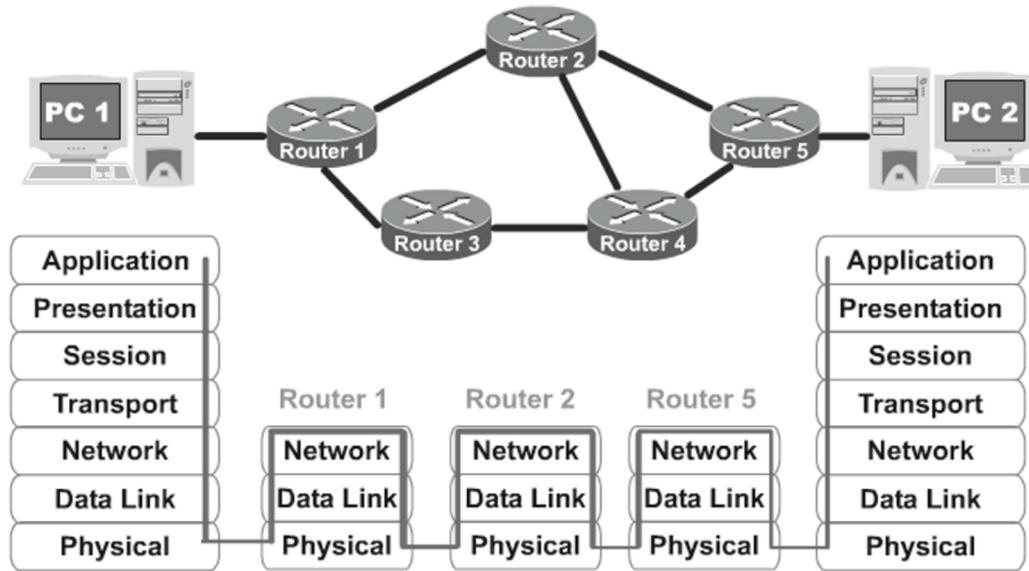


Abbildung 2.4: ISO-OSI Referenzmodell am Beispiel der Komponenten eines einfachen Kommunikationsnetzes [5]

Der Layer 1 ist die Bitübertragungsschicht (Physical Layer), die die elektrischen und die Hardware-Eigenschaften für die Kommunikation behandelt. Dazu gehören beispielsweise die Steckertypen oder das Übertragungsmedium, wie Lichtwellenleiter (LWL) oder Twisted-Pair-Kupferkabel. Der Layer 2 ist die Sicherungsschicht (Data Link Layer), die einzelne Bits in Rahmen (Frames) abgrenzt und durch Sicherungsmechanismen Übertragungsfehler ausgleicht. Außerdem wird im Layer 2 der Zugriff auf den Übertragungskanal geregelt. Der Layer 3 ist die Vermittlungsschicht (Network Layer), in welcher Nachrichten in Pakete aufgeteilt werden und der Weg der Pakete durch das Kommunikationsnetz bestimmt wird. Diese Aufgabe des sogenannten Routings wird von Routern (vgl. Abbildung 2.4) beispielsweise auf Basis der IP-Adresse durchgeführt. Mit dieser Aufteilung ist der Layer 3 der höchste notwendige Layer zur Übertragung im Kommunikationsnetz. [5]

Für die Aufgaben der Layer 1 und 2 können verschiedene Protokolle verwendet werden. In der Internet-Protokollfamilie wird für den Network Layer (Layer 3) das IP-Protokoll verwendet. Die Layer 1 und 2 werden z.B. von Ethernet nach den Teilen des Standards IEEE 802.3 abgedeckt. Im Layer 2 ist als eine Unterschicht von Ethernet der Media Access Control (MAC) integriert. Dieser dient der Adressierung und der Unterscheidung der Ethernet-Schnittstellen verschiedener Technologien mit einer weltweit eindeutigen Adresse. Auf Basis der MAC-Adresse kann die Kommunikation im Layer 2 ohne Verwendung des Layer 3 betrieben werden. Geräte, die auf Layer 2 vermitteln, werden Switches genannt. [5, 6, 7, 8]

2.2.2 Multiprotocol Label Switching (MPLS)

Das Multiprotocol Label Switching ist eine Technologie für Weitbereichs-Telekommunikationsnetze. Bei einer paketbasierten Übertragung mittels des IP-Protokolls wird in jedem beteiligten Router die Ziel-IP-Adresse überprüft, um den weiteren Weg des Pakets zu bestimmen (vgl. Abbildung 2.4). Innerhalb eines MPLS-Netzwerkes hingegen werden Datenpakete weitergeleitet, ohne dass jeder Router diese Überprüfung durchführen muss. MPLS ist als ein abgeschlossenes Netz zu betrachten, welches aus miteinander verknüpften Routern besteht. Für ein Datenpaket bietet dieses Netz einen Tunnel von einem Netzpunkt zu einem anderen Netzpunkt, ohne dass jeder Router auf Layer 3 des ISO-OSI Referenzmodells den Routing-Weg erneut prüfen muss. Abbildung 2.5 zeigt eine beispielhafte MPLS-Architektur. [6, 9]

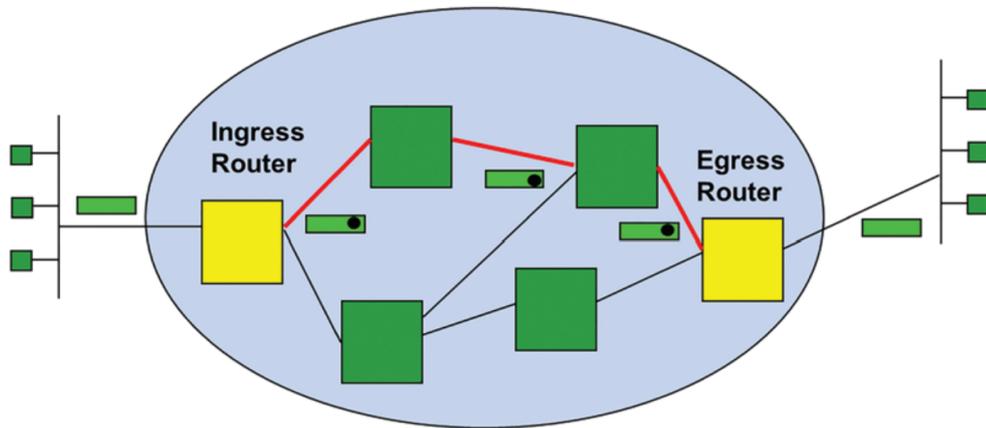


Abbildung 2.5: MPLS-Architektur [6]

Ein von einem Endpunkt gesendetes Datenpaket gelangt über den sogenannten Ingress Router in das MPLS-Netz. Dieser ermittelt den Pfad für das Paket durch das Gesamtnetz und markiert das Paket mit so genannten Labels, die den bestimmten Pfad vorgeben. Bei der weiteren Durchleitung durch das Netz wird auf diese Labels zugegriffen und das Paket anhand des vorgegebenen Pfades übertragen. Am letzten Router des MPLS-Netzes, dem Egress Router, werden die Labels wieder entfernt und das Paket an das Endsystem übergeben. Damit kombiniert MPLS die Vorteile von Paket- und Leitungsvermittlung, indem es sich zwar um ein verbindungsloses Netz handelt (keine Leitungsvermittlung), die Pakete aber anhand fester Pfade übertragen werden. Diese Arbeitsweise macht MPLS effizienter als die wiederholte Wegbestimmung auf Layer 3. MPLS wird daher auch als auf Layer 2,5 arbeitend beschrieben. Die MPLS-Technologie ist weiterhin nicht an bestimmte Protokolle der darunter liegenden Layer gebunden, sondern mit verschiedenen Protokollen möglich (Multiprotocol). [6, 9]

2.2.3 Multiprotocol Label Switching (MPLS) Prüflabor

Für zukünftige Anforderungen des Betriebs des Hamburger Verteilnetzes soll die MPLS-Technologie eingesetzt werden. Aufgrund der Kompatibilität der Technologie mit verschiedenen Protokollen wären dadurch mehrere Lösungen möglich. Aktuell wird die Synchronische Digitale Hierarchie (SDH) als Layer 1 Protokoll verwendet. Dabei handelt es sich um ein etabliertes, aber nicht mehr dem Stand der Technik entsprechendes Protokoll. Im aktuellen Projekt soll in den nächsten Jahren das momentan verwendete Netzwerk modernisiert werden. Mit der Einführung des MPLS-Netzes werden die Layer 1, 2 und 3 von kombinierten Routern auf Basis von Ethernet, MPLS und dem IP-Protokoll ersetzt. Als Übertragungsmedium sollen nur noch Lichtwellenleiter verwendet werden. Insgesamt wird damit das standortverbindende Telekommunikations-Weitbereichsnetz (vgl. Abschnitt 2.1) in Großteilen ausgetauscht.

Eine Voraussetzung für die Funktionalität des MPLS-Netzes ist eine Taktsynchronisierung der Router. Für die Synchronisierung könnten verschiedene Verfahren verwendet werden. Eine sehr genaue Taktsynchronisierungsvariante ist das Synchronous Ethernet (SyncE), das in Paketnetzwerken auf Basis von Ethernet eingesetzt werden kann. SyncE ist ein Verfahren zur physikalischen Frequenzsynchronisierung. Dabei wird das Signal aus der Bitübertragungsschicht verwendet und teilweise werden Stopfbits hinzugefügt. Aus dem modifizierten Signal können die Router den Takt dann jeweils ableiten. Wie das in Abschnitt 2.4 eingeführte Precision Time Protocol, wird die Synchronisierung bei SyncE von einem Master ausgehend, beispielsweise in einer Sterntopologie, im Netzwerk verteilt. [10]

Im aktuellen Projekt zur Einführung eines Weitbereichsnetzes mittels der MPLS-Technologie werden die von verschiedenen Herstellern angebotenen Geräte durch die Abteilung Übertragungstechnik der Stromnetz Hamburg GmbH in MPLS-Testnetzen als Laboraufbauten geprüft. Einer dieser Aufbauten bildet die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit zu konzeptionierende zentrale Zeitsynchronisierung. Abbildung 2.6 zeigt die Topologie des MPLS-Testnetzes im Laboraufbau.

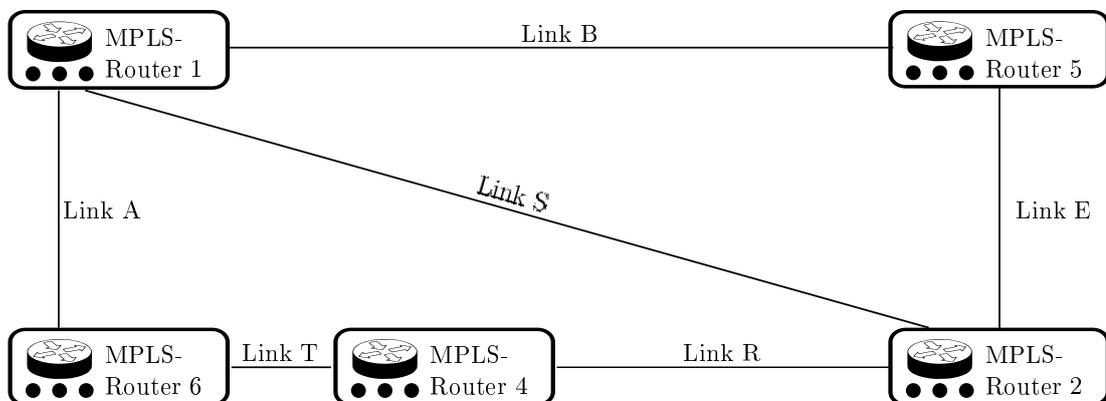


Abbildung 2.6: Topologie des MPLS-LaboraAufbaus

Für die Vergleichbarkeit der verschiedenen Angebote werden alle Laboraufbauten nach der gleichen Netztopologie aufgebaut. Im Testnetz sind unterschiedlich komplexe Router-Knoten aufgebaut, um die im späteren Betrieb verschieden großen MPLS-Knoten abzubilden. Die Ausbaustufen der Router spielen für die Zeitsynchronisierung keine Rolle und werden daher in Abbildung 2.6 vernachlässigt. Die Verbindungen zwischen den Routern (Links) werden mit Buchstaben beschrieben. Als Namenskonvention wird in dieser Arbeit MPLS-Netz als Alias für den beschriebenen Laboraufbau eines Weitbereichstestnetzes mit MPLS-Technologie verwendet.

2.3 Konzept für Sekundärtechnik in Umspannwerken nach IEC 61850

Innerhalb des Umspannwerks besteht die Sekundärtechnik aus Schutz- und Leittechnik (vgl. Abschnitt 2.1). Die Einführung eines Konzepts für Umspannwerke nach dem Kommunikationsstandard IEC 61850 umfasst beide Bereiche. Im Umspannwerk wird die Schutztechnik durch Messwandler, welche Strom- und Spannungswerte aufnehmen und Schutzgeräte, die diese Messwerte auswerten, repräsentiert. Geschützt werden beispielsweise die Transformatoren und jedes abgehende Mittelspannungskabel. Die Leittechnik wird im Umspannwerk durch Feldleitgeräte für jeden Kabelabgang und Leittechnikzentralgeräte repräsentiert. Die Feldleitgeräte dienen der Steuerung und Überwachung von beispielsweise Leistungs- und Trennschaltern. Mit diesen können Kabelverbindungen aus der Ferne ein- oder abgeschaltet werden. Das Leittechnikzentralgerät dient als zentraler Knotenpunkt für Steuerungs- und Überwachungsfunktionen und es bildet die Anbindung an die zentrale Leitstelle. Wie in der Automatisierung wird auch in der Netzleittechnik zwischen der Feld- und der Prozessebene unterschieden. Auf der Prozessebene befinden sich die Sensoren, Wandler und Schalter. Auf der Feldebene befinden sich die auswertenden Geräte der Schutz- und Leittechnik. Abbildung 2.7 zeigt dies am Beispiel eines Schutzgeräts in der Feldebene mit Verbindungen zu Strom- und Spannungswandlern in der Prozessebene. [7, 11]

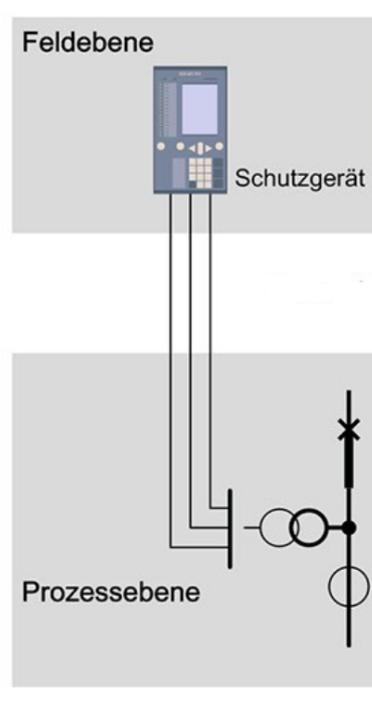


Abbildung 2.7: Schutzgerät und Wandler in der Feld- und Prozessebene [12]

Insgesamt ergibt sich bei diesem Ansatz eine Vielzahl an Verbindungen zwischen Prozessgeräten und Feldgeräten. Konventionell sind die Geräte von Schutz- und Leittechnik unabhängige Geräte, um vor allem die notwendige hohe Verfügbarkeit der Schutztechnik zu gewährleisten. Abbildung 2.8 zeigt den aktuellen Technologieansatz einer konventionellen Verdrahtung der Sekundärtechnik mit diversen Verbindungen zwischen Prozess- und Feldebene. [11].

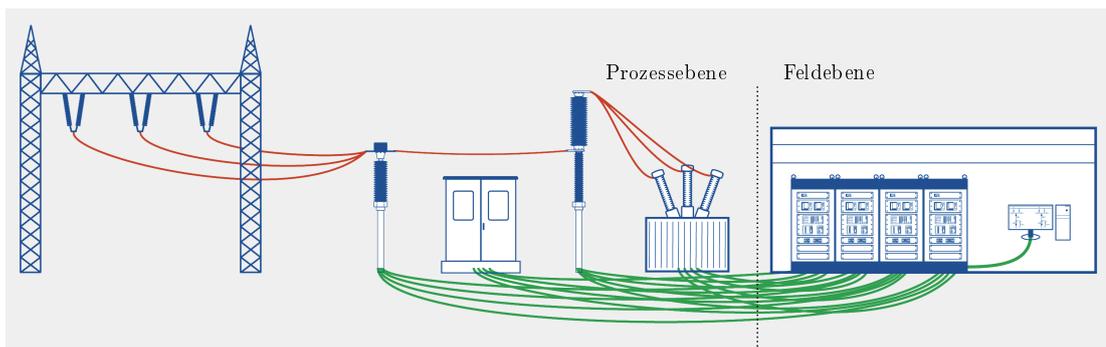


Abbildung 2.8: Konventionelle Verdrahtung eines Umspannwerks [13]

Mit dem Projekt zur Einführung eines Sekundärtechnikkonzepts in Umspannwerken nach der IEC 61850 soll diese konventionelle Verdrahtung durch ein Prozessbus-System ersetzt werden. Im Speziellen soll für die Zeitsynchronisierung der Bereich der Schutztechnik betrachtet werden.

2.3.1 Überblick über den Kommunikationsstandard IEC 61850

Die International Electrotechnical Commission (IEC) ist eine internationale Organisation für die Standardisierung in Bereichen der Elektrotechnik und Elektronik. Der Standard IEC 61850 beschreibt Kommunikationsnetzwerke und -systeme für die Energieversorgungsautomation und deckt die Bereiche der Prozessebene, der Stationsleitebene und der Netzleitebene ab (vgl. Abbildung 2.2). Der Standard besteht aus 10 Teilen (Parts) und weiteren Unter-Teilen. Das Hauptziel des Standards IEC 61850 ist es, eine größere Interoperabilität zwischen Sekundärgeräten zu erreichen. Dafür werden ein einheitliches Datenmodell und spezielle Kommunikationsprotokolle eingeführt. Weiterhin werden auch Vorgaben für den Betrieb und Planungsvorgaben spezifiziert. Den Standard erfüllende Geräte werden als Intelligent Electrical Device (IED) bezeichnet. Sämtliche Funktionalitäten eines IEDs werden über eine objektorientierte Modellierungssprache in einem Datenmodell beschrieben. Mit dieser Beschreibungslogik lassen sich beliebige Geräte verschiedener Hersteller und mit verschiedenen Aufgaben nach einem genormten Standard beschreiben. Im Datenmodell existieren die verschiedenen Hierarchieebenen Physical Device, Logical Device, Logical Node, Data Object und Data Attribute (vgl. Abbildung 2.9). [3, 14, 15]

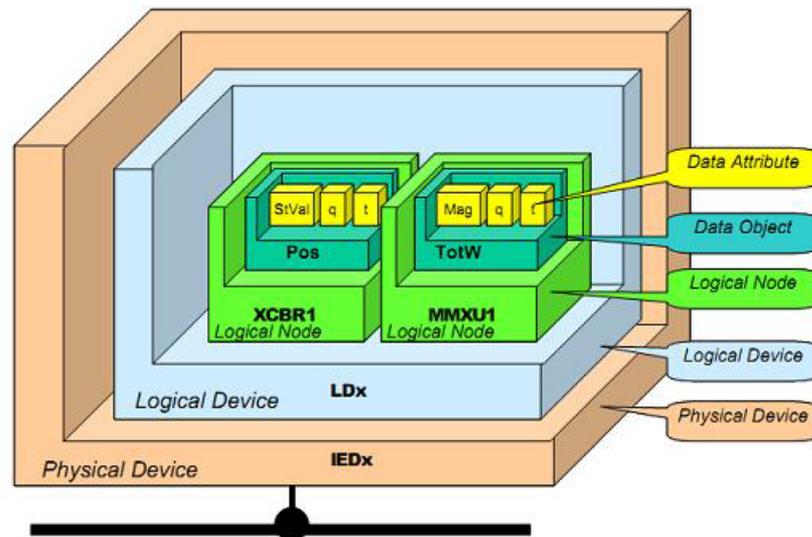


Abbildung 2.9: Objektorientiertes Modell des IEC 61850 Standards [16]

Mit diesen Standardisierungen kann eine von einem IED gesendete Information von allen anderen IEDs verstanden und genutzt werden. Vorher notwendige Protokollumwandlungen, beispielsweise auf das vielfach verwendete IEC 60870-5-104 Protokoll zur Informationsübertragung an die Netzleitstelle, können bei durchgängiger Nutzung der IEC 61850 auf allen Ebenen der Netzleittechnik entfallen. Hauptbestandteil zur Umsetzung des Standards ist die Einführung eines Prozessbus-Systems. [3, 14]

2.3.2 Prozessbus-Systeme nach IEC 61850

Mit der Einführung des IEC 61850 Standards auf Prozessebene werden analoge Verbindungen durch ein netzwerkbasierendes Bussystem zwischen IEDs ersetzt. Daraus resultiert vor allem eine Reduzierung von Kupferverbindungen. Der IEC 61850 Standard ist so aufgebaut, dass zukünftige Technologieänderungen berücksichtigt werden können. Durch ein im Standard spezifiziertes Mapping kann das Datenmodell mit verschiedenen Protokollstapeln implementiert werden. In der aktuellen Version des Standards baut der Prozessbus in den Layers 1 und 2 auf die Ethernet Standards nach IEEE 802.3 auf. Mit Ethernet werden die IEDs im Prozessbus in einem Local Area Network (LAN) verbunden. Dafür kommen Twisted-Pair Kupferkabel und LWL-Verbindungen zum Einsatz. Der Vorteil bei Lichtwellenleitern liegt in der elektrischen Trennung zwischen über den Prozessbus verbundenen Bereichen des Umspannwerks. Neben den Vorteilen durch ein einheitliches Kommunikationsprotokoll sowie Datenmodell durch IEC 61850 ermöglicht ein Prozessbus eine erhebliche Reduzierung von Leitungsverbindungen. Abbildung 2.10 zeigt als Ergänzung zu Abbildung 2.8 beispielhaft die durch die Nutzung eines Prozessbus reduzierten Verbindungen. [17]

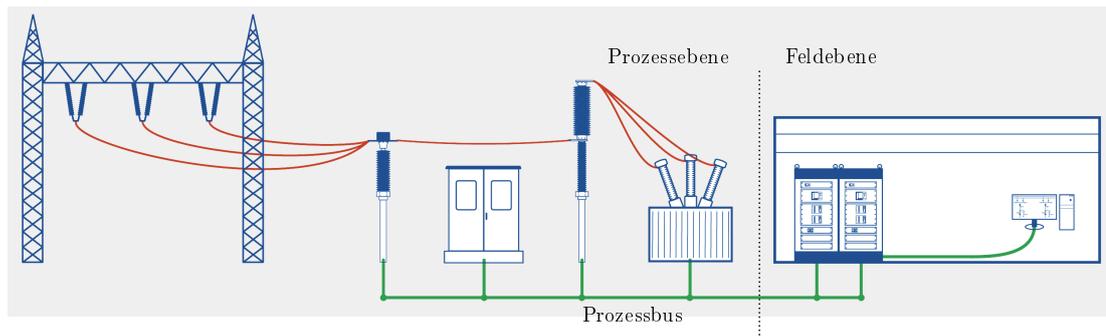


Abbildung 2.10: Umspannwerk mit Prozessbus-System [13]

In Abbildung 2.11 ist die Entwicklung der Stationsautomatisierung bis zum Einsatz eines Prozessbus-Systems abgebildet. Dabei ist der Prozess der Digitalisierung über alle Ebenen dargestellt. Ausgehend von der Verwendung von analogen Übertragungen mit Punkt-zu-Punkt Verbindungen wird mit der Einführung des Prozessbus-Systems die letzte verbleibende Ebene digitalisiert. Weiterhin zeigt die Abbildung auch die Evolution der Kommunikation zur Leitstelle von serieller Kommunikation bis zum Einsatz der MPLS-Technologie. Neben der Reduzierung von Leitungen kann auch die Anzahl von Geräten reduziert werden, indem Funktionen in weniger Geräten zusammengefasst werden.

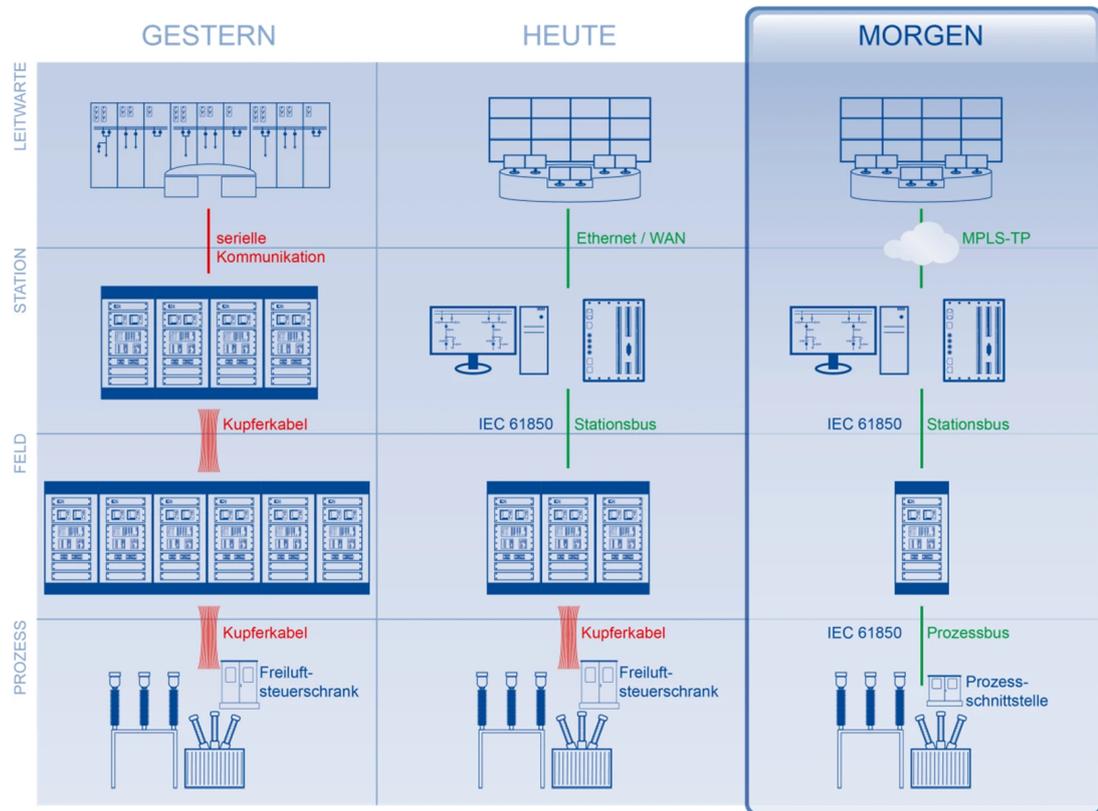


Abbildung 2.11: Entwicklung der Stationsautomatisierung [18]

Die Ethernet-Variante im Prozessbus-System erfordert Punkt-zu-Punkt Verbindungen. Somit ist die Darstellung des Prozessbusses nicht als einzelne Leitung zu interpretieren. Durch den Einsatz von Switches können Verbindungen im Prozessbus allerdings zusammengefasst werden.

Das Prozessbus-LAN müsste ohne weitere Anpassungen als Sterntopologie aufgebaut werden. Daraus würde eine Abhängigkeit des Gesamtsystems von einzelnen Verbindungen resultieren. Um eine Redundanz zu gewährleisten, werden im Prozessbus die Redundanzprotokolle Parallel Redundancy Protocol (PRP) und Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) verwendet. Beim PRP werden alle IEDs in zwei redundante LANs eingebunden. Damit ist der gesamte Prozessbus in Prozessbus A und Prozessbus B aufgeteilt und gedoppelt ausgeführt. RSTP bildet zusätzlich in beiden Prozessbus-LANs Ringe, die die Switches miteinander verbinden und im Fehlerfall ein Umleiten der Pakete über die andere Seite des Ringes ermöglichen. Für die Verwendung von PRP und RSTP müssen die jeweils beteiligten Geräte die Protokolle unterstützen, um die duplizierten Nachrichten verarbeiten zu können oder um mit den beim RSTP entstehenden Ringen im LAN umgehen zu können. [5, 19]

Abbildung 2.12 zeigt den Grundgedanken hinter dem neuen Sekundärkonzept der Stromnetz Hamburg GmbH.

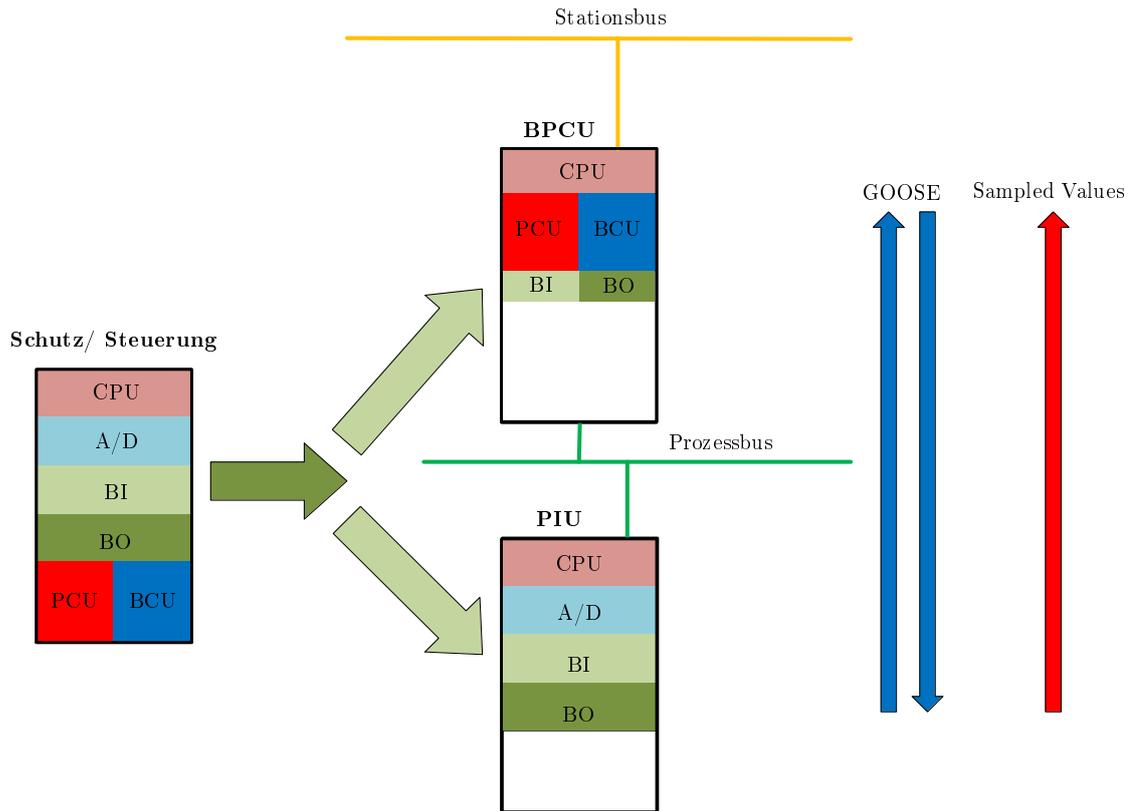


Abbildung 2.12: Grundgedanke des neuen Sekundärkonzepts [20]

Links in der Abbildung ist der aktuelle Stand mit kombinierten Schutz- und Steuerungsgeräten gezeigt. Diese beinhalten die in Abbildung 2.12 dargestellten Funktionalitäten für Schutz (Protection Control Unit (PCU), Steuerung (Bay Control Unit (BCU) und Binäre Ein- / Ausgänge (BI, BO)) und Analog-Digital-Wandlung (A/D) der Messwerte im Prozess. Mit der Einführung eines Prozessbus-Systems sollen diese Funktionalitäten auf zwei Geräte aufgeteilt werden. Es wird eine Process Interface Unit (PIU) eingeführt, die die Analog-Digital-Wandlung (A/D) der gemessenen Werte im Prozess durchführt. Diese bietet außerdem mit Binären Ein- und Ausgängen (BI, BO) die Schnittstellen zu den Leistungsschaltern und weiteren Betriebsmitteln. Ebenfalls im Prozessbus und mit einer Anbindung an den Stationsbus befindet sich in der Feldebene eine Bay Protection Control Unit (BPCU). Diese übernimmt die Schutzfunktionen mit dem Bestandteil einer Protection Control Unit (PCU) und durch die Bay Control Unit (BCU) die Leittechnikfunktionen der Steuerung der Prozesskomponenten. Über den verbindenden Prozessbus kommunizieren beiden Gerätetypen PIU und BPCU miteinander. Die BPCU hat weitergehend über den Stationsbus eine Anbindung an die Netzleitstelle. Die in Abbildung 2.11, durch den Einsatz von IEC 61850, gezeigte mögliche Reduzierung von Geräten in der Feldebene wird dadurch erreicht, dass eine BPCU Schutz- und Steuerung für mehrere PIUs und somit mehrere Felder übernehmen soll. [20]

Sampled Values (SV)

Für die Übertragung analoger Werte nach der IEC 61850 werden im Standard Sampled Values (SV) eingeführt. Dafür werden von einem Prozessbusgerät, wie beispielsweise

einer PIU, die dort erfassten analogen Messwerte abgetastet und auf dem Prozessbus gesendet. Der Standard beschreibt die Rahmenbedingungen der Abtastung und die eigentliche Übertragung. Die aktuelle Version des Standards sieht vor, die SVs im Multicast auf dem Prozessbus zu senden und damit mehreren IEDs parallel zur Verfügung zu stellen. Bei dieser sogenannten Publisher / Subscriber-Methode wird der Prozessbusverkehr von jedem IED mitgelesen. Das sendende Gerät ist der Publisher und die Geräte, die die Werte benötigen, sind die Subscriber. In den gesendeten SV-Nachrichten ist für die Subscriber jeweils erkenntlich, von welchem Publisher diese stammen. Jede SV-Nachricht enthält neben dem Messwert einen Zeitstempel der Messung. Erst mit dieser Zeitinformation können die Subscriber, wie beispielsweise die BPCU, die erhaltenen SV-Werte vergleichen und entsprechend ihrer Funktionalität auswerten. Die Anforderung für die Genauigkeit dieses Zeitstempels ist ein maximaler absoluter Zeitfehler von 1 μ s für Schutzanwendungen. Im Falle der Schutzanwendungen werden für Strom- und Spannungswandler jeweils mindestens 4096 Messwerte in der Sekunde für jeden sogenannten SV-Stream übertragen. Aufgrund des damit anfallenden Datenverkehrs muss die Datenrate des Prozessbus-Systems an die Anzahl an SV-Streams angepasst werden. [17, 21, 22]

Generic Object Oriented Event (GOOSE)

Neben der Übertragung von Messwerten müssen auch Schaltbefehle, beispielsweise für Leistungsschalter, sowie Rückmeldungen über Schaltzustände, über den Prozessbus übertragen werden. Gegenüber der Übertragung über einen analogen, elektrischen Schaltpegel, muss auch der Prozessbus nach IEC 61850 für diese besonders zeitkritischen Nachrichten eine Übertragungsmöglichkeit bieten. Das Protokoll für die Erfüllung von Echtzeitanforderungen und mit hoher Verfügbarkeit nennt sich Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE). Eine GOOSE-Nachricht enthält verschiedene Datenpunkte, die zu einem Datenset gruppiert sind. Im Normalzustand wird die GOOSE-Nachricht in einem verhältnismäßig großen Zeitintervall im Millisekundenbereich regelmäßig übertragen. Ändert sich ein Datenpunkt, reduziert sich dieses Intervall auf einen Minimalwert, was einer nahezu direkten Übertragung entspricht. Anschließend erhöht sich das Intervall mit jedem wiederholten Senden der GOOSE-Nachrichten bis zum Erreichen des Ausgangssendeintervalls. GOOSE-Nachrichten werden, wie auch SVs, direkt in einem Ethernet Data Frame im Multicast gesendet und erreichen damit parallel alle Subscriber. Die gesamte Implementierung von GOOSE-Nachrichten ist auf eine schnelle, zuverlässige Übertragung ausgelegt. Dafür werden die Nachrichten im Ethernet zusätzlich priorisiert. Im IEC 61850 Standard müssen GOOSE-Nachrichten innerhalb von 4 ms alle Subscriber erreichen [17]. Durch das intervallbasierte Senden wird eine hohe Zuverlässigkeit der Übertragung ermöglicht. Mit effektivem Ausnutzen der Protokolle und kurzen Wiederholungsintervallen bei Zustandsänderungen wird mit GOOSE eine echtzeitfähige und zuverlässige Übertragung von Schaltbefehlen erreicht. Durch das Ausbleiben von Nachrichten können Subscriber zudem erkennen, dass eine Störung vorliegt

und darauf entsprechend reagieren. Dies entspricht dem analogen Ruhestromprinzip der Überwachung. Wie die SVs haben GOOSE-Nachrichten einen Zeitstempel. [23, 24]

Mit dem Einsatz des Prozessbus-Systems ergibt sich für die Zeitstempelung der Nachrichten die Anforderung einer Zeitsynchronisierung der Prozessgeräte, auf der der Fokus dieser Arbeit liegt.

2.3.3 Sekundärtechnik IEC 61850 Prüflabor

Im Projekt zur Einführung eines Prozessbus-Systems nach IEC 61850 wird wie beim MPLS-Netz ein Laboraufbau mit den verschiedenen für die Erprobung der neuen Schutz- und Leittechnik notwendigen Geräten aufgebaut. Außerdem wird die Realisierung der Zeitsynchronisierung mit dem Precision Time Protocol getestet. Abbildung 2.13 zeigt das Konzept für die Einführung des Prozessbus-Systems am Beispiel der Abgänge von Mittelspannungskabeln. Die wesentlichen Bestandteile Stationsbus, Prozessbus, BPCU und PIU sind abgebildet. Weiterhin sind die Mittelspannungsabgänge jeweils mit Leistungsschaltern, Strom und Spannungswandlern gezeigt.

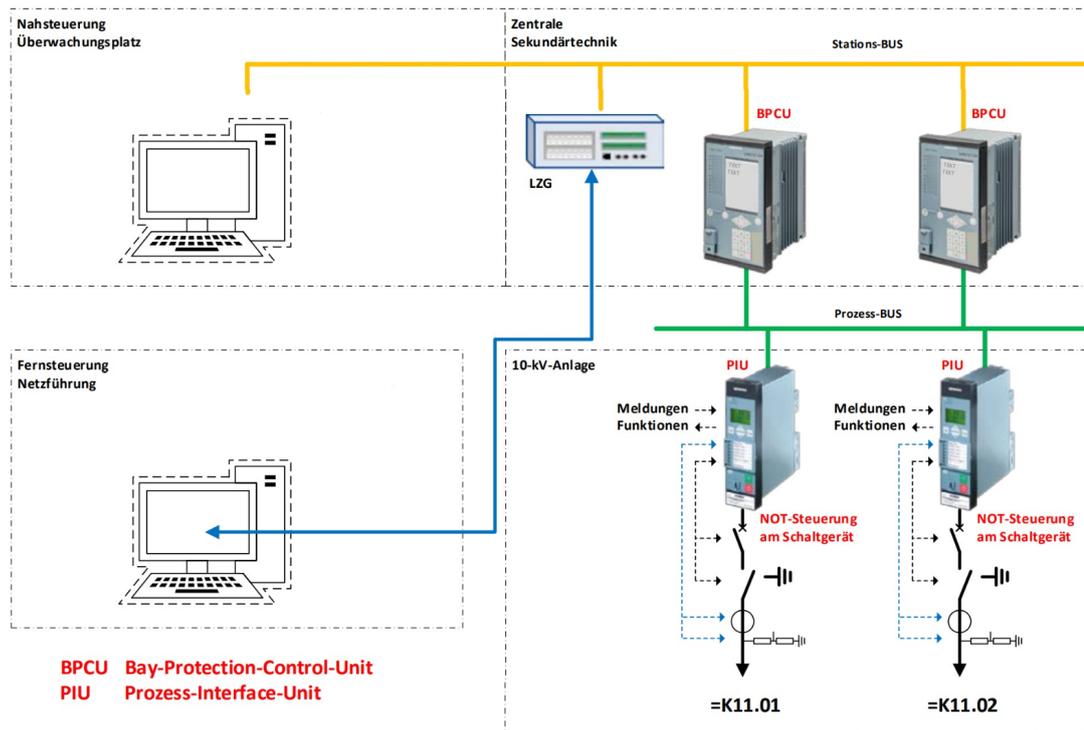


Abbildung 2.13: Konzept des IEC 61850 Prozessbusses am Beispiel einer Mittelspannungssammelschiene [20]

Der Laboraufbau bildet dieses Konzept vereinfacht ab, dafür ist dieser auf einzelne oder wenige für die Prüfungen notwendige Geräte beschränkt. Abbildung 2.14 zeigt das Netzwerkkonzept des Laboraufbaus mit allen beteiligten Komponenten. Wesentlicher Bestandteil des Netzwerkkonzepts sind die für den Prozessbus notwendigen Switches.

Die PIUs und BPCUs sind als Gruppen von Geräten abgebildet. Übergeordnet befindet sich der überwiegend aus Switches bestehende Stationsbus. Über diesen ist oben in der Abbildung die Anbindung an die Netzführung skizziert. Die Verwendung des Redundanzprotokolls PRP ist durch die doppelte Ausführung des Prozessbusses durch Aufteilung in Prozessbus A (hellgrün) und Prozessbus B (dunkelgrün) gezeigt. Das Redundanzprotokoll RSTP ist an den ringförmigen Verbindungen zwischen den Switches zu erkennen. Für die Zeitsynchronisierung sind rechts und links von den Stationsbusswitches zwei Geräte abgebildet, die als Grandmaster Clocks bezeichnet werden. Außerdem sind verschiedene weitere Geräte für spezielle Anwendungen, wie beispielsweise die Überwachung vor Ort, eingezeichnet. Für die Zeitsynchronisierung werden diese nicht weiter betrachtet. Mit diesem Laboraufbau und den Geräten aus dem MPLS-Laboraufbau wird die Zeitsynchronisierung konzeptioniert und geprüft.

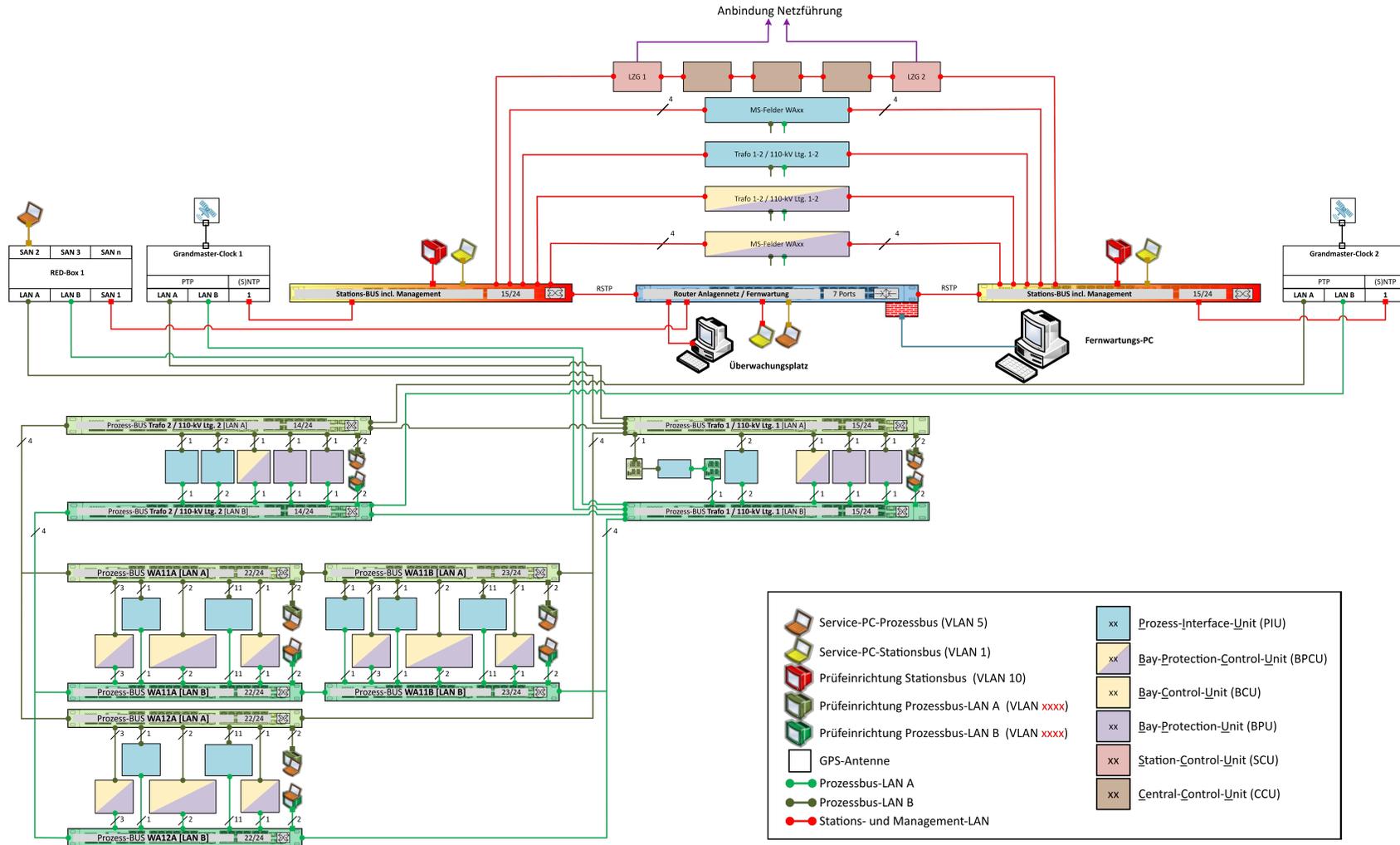


Abbildung 2.14: Topologie des IEC 61850-Laboraaufbaus [25]

2.4 Zeitsynchronisierung mit dem Precision Time Protocol (PTP) nach IEEE 1588

Für das Prozessbus-System ergeben sich verschiedene Notwendigkeiten einer Zeitsynchronisierung. Im Netzwerk können Laufzeiten abhängig vom Übertragungsweg und der Auslastung variieren. Für eine Vergleichbarkeit von Nachrichten ist somit eine genaue Zeitstempelung von Netzwerk-Paketen wichtig. Da Zeitstempelfehler direkt abhängig von Synchronisierungsfehlern sind, ist es notwendig, eine Synchronisierungsgenauigkeit mit einem maximalen absoluten Zeitfehler von $1\ \mu\text{s}$ zu erreichen. In der Energieversorgung mit Wechselstrom mit 50 Hz Netzfrequenz ist der erlaubte Zeitfehler so klein gewählt, um eine Messabweichung durch den Phasenunterschied zwischen zwei Messwerten möglichst gering zu halten. Aus einem Zeitfehler von $1\ \mu\text{s}$ resultiert ein Phasenfehler von $0,02^\circ$. Für die Zeitsynchronisierung über Ethernet und TCP/IP wird in den meisten Netzwerken das Network Time Protocol (NTP) oder das Simple Network Time Protocol (SNTP) verwendet. Windows Maschinen synchronisieren sich beispielsweise mit einem Windows NTP-Zeitserver, wobei Genauigkeiten bis zu 10 ms erreicht werden können. Für die höheren Anforderungen nach IEC 61850 kann das PTP verwendet werden. [22, 17]

Insgesamt umfasst der IEEE 1588 Standard drei Versionen und verschiedene Implementierungsmöglichkeiten. Die hier vorgestellten Aspekte beschränken sich auf die für die Synchronisierung des Prozessbus-Systems benötigten Implementierungen. Es wird PTP in der Version 2 auf Basis des IEEE 1588-2008 Standards verwendet. Neue Standards sind mit diesem rückwärtskompatibel. Der Term „PTP“, ohne weitere Spezifizierung, wird in den folgenden Abschnitten als Namenskonvention für das PTP in der Version 2 verwendet.

2.4.1 Zeitsynchronisierung mit einer Zeitreferenz

Zeitsynchronisierung bedeutet, die internen Uhren der an der Synchronisierung beteiligten Geräte mit einer Zeitreferenz abzugleichen. Bei einer idealen Synchronisierung würden die Oszillatoren der Geräte fortlaufend mit exakt der gleichen Frequenz schwingen und die gleiche Phasenlage haben. In der Realität müssen Geräte wiederholt synchronisiert werden. Die Güte der Synchronisierung lässt sich über einen verbleibenden Zeitfehler beschreiben. In der Abbildung 2.15 ist eine ideale Synchronisierung gezeigt. Die Phasenlage und die Frequenz beider Geräte sind gleich, daher ist an den gezeigten Zeitpunkten die gleiche Zeit ablesbar.

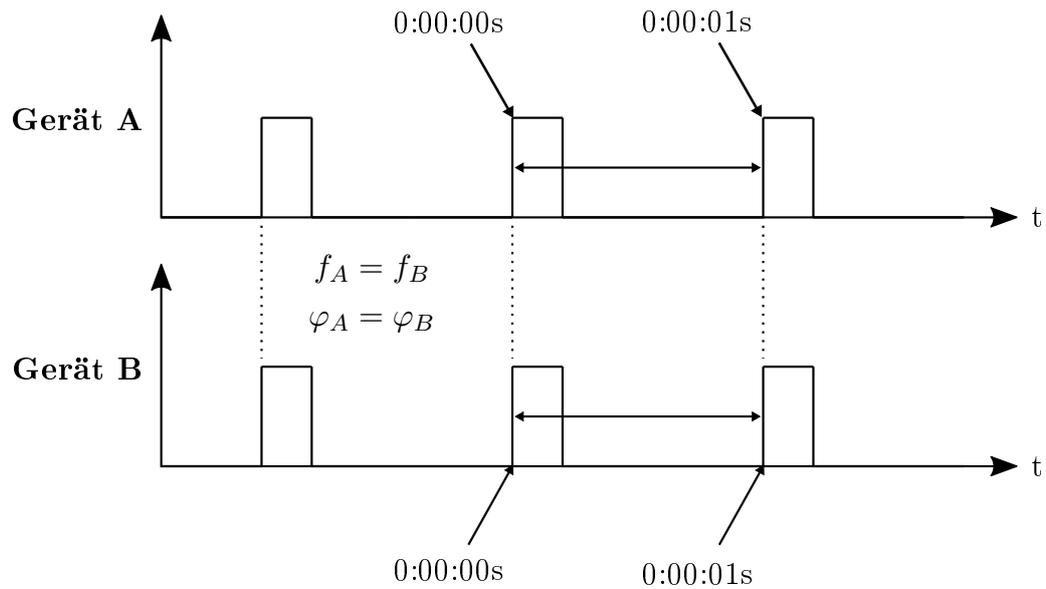


Abbildung 2.15: Ideale Zeit-, Frequenz- und Phasensynchronisierung (Angelehnt an [26])

Die Elemente einer Zeitsynchronisierung werden in Abbildung 2.16 in einer Zeitsynchronisierungskette für ein IED im Prozessbus-System gezeigt.

Zeitsynchronisierungskette

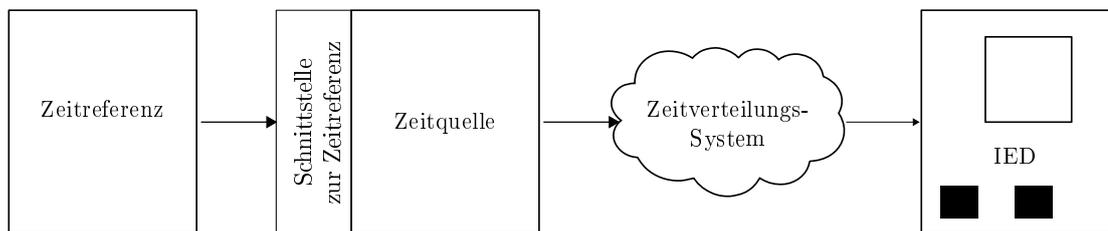


Abbildung 2.16: Zeitsynchronisierungskette

Am Anfang der Zeitsynchronisierungskette steht die verwendete Zeitreferenz. Aufgrund historischer Entwicklungen und Technologien koexistieren verschiedene Zeitreferenzen. Im PTP wird die Temps Atomique International (TAI) verwendet. Diese wird aus einem Zusammenschluss von Atomuhren bestimmt und bildet die Grundlage für die koordinierte Weltzeit UTC, nach der das tägliche Leben abläuft. Aufgrund von Abweichungen der Erdgeschwindigkeit besteht zwischen den Zeitreferenzen eine Differenz. Die koordinierte Weltzeit wird über Schaltsekunden durchschnittlich alle 1-6 Jahre angepasst. Aktuell beträgt die Zeitdifferenz 37 s. [27]

Um die Zeitinformation verfügbar zu machen, wird eine Schnittstelle zu der Zeitreferenz benötigt. Eine Möglichkeit ist die Verwendung globaler Navigationssatellitensysteme (Global Navigation Satellite System (GNSS)). Dazu gehört beispielsweise das Global Positioning System (GPS), dessen Funktionalität auf dem Aussenden von Zeitinformationen verschiedener Satelliten basiert. Die Positionsbestimmung erfolgt von GPS-Empfängern über Triangulation der Laufzeitunterschiede unter Berücksichtigung der

Satellitenpositionen. Dieses Verfahren kann umgekehrt genutzt werden, indem aus der GPS-Zeit die TAI abgeleitet wird. Zwischen der GPS-Zeitreferenz (GPS Time (GPST)) und TAI besteht eine konstante Zeitdifferenz, die bei der Bestimmung berücksichtigt wird. Neben GPS werden auch andere GNS-Systeme, wie das europäische Galileo, das russische Glonass oder das chinesische BeiDou, verwendet. Für die Integration in die PTP-Synchronisierungskette wird eine Zeitquelle für das PTP-System benötigt. PTP basiert auf dem Master Slave Prinzip. Master und Slave Instanzen werden im PTP nach Funktionalität unterschieden. [28]

2.4.2 PTP-Instanzen

Abbildung 2.17 zeigt eine Synchronisierungskette mit möglichen PTP-Instanzen.

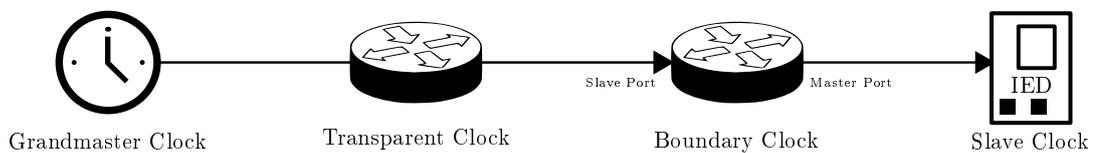


Abbildung 2.17: PTP-Synchronisierungskette mit möglichen PTP-Instanzen

Diese möglichen PTP-Instanzen werden im Einzelnen betrachtet.

Grandmaster Clock (GM) und Master Clock (MC)

Im PTP gibt es die Zeitverteilungsinstanz, die den Master für das System bildet. Diese wird als Grandmaster Clock (GM) bezeichnet und muss eine Schnittstelle zu einer internationalen Zeitreferenz haben. Für das Prozessbus-System wird dafür die Variante mit einem GNSS-Empfänger verwendet. Mit dem GNS-System ist eine Synchronisierungsgenauigkeit der Grandmaster Clock im Bereich von ± 100 ns möglich.

Häufig befinden sich aus Redundanzgründen mehrere Master in einem System. Nur der Master, der aktiv die Synchronisierung übernimmt, wird als Grandmaster Clock bezeichnet. Weitere Master, die diese Möglichkeit übernehmen könnten, werden als grandmaster-fähige Uhren bezeichnet. Die Auswahl des aktiven Masters erfolgt unter verschiedenen Bedingungen und ist in Abschnitt 2.4.6 beschrieben. Mehrere Synchronisierungssysteme in einem Netzwerk können durch die sogenannte PTP-Domain abgegrenzt werden. Die Domain ist ein Parameter, der in allen Geräten parametrisiert werden muss. Die Funktion des Grandmasters wird in jedem System durch einen Master exklusiv übernommen. [29]

Slave-only Clock (SC)

Ein einfaches, mit PTP synchronisiertes Gerät wird als Slave-only Clock (SC) bezeichnet. Diese bildet einen Endpunkt der Synchronisierungskette. [22, 29]

Ordinary Clock (OC)

Eine Ordinary Clock (OC, deutsch: einfache Uhr) ist ein Überbegriff für PTP-Instanzen, die einen Endpunkt der Synchronisierungskette bilden und die entweder Master oder

Slave sein können. In der Implementierung ist mit Ordinary Clock meistens eine Slave Clock gemeint. [22, 29]

Transparent Clock (TC)

Zwischengeräte in der Synchronisierungskette sind PTP-Instanzen des Typs Transparent Clock oder Boundary Clock. Transparent Clocks nehmen in der Synchronisierungskette nicht aktiv an der Synchronisierung teil. Diese kompensieren allerdings in Synchronisierungsnachrichten die durch die Verarbeitung hinzugefügte Zeitverzögerung in sogenannten Correction Fields. Diese kann dann von den Slaves berücksichtigt werden. [22, 29]

Boundary Clock (BC)

Eine Mischform zwischen Master und Slave bildet die sogenannte Boundary Clock (BC, deutsch: Grenz-Uhr). Eine Boundary Clock ist für eine Seite der Synchronisierungskette ein Slave und stellt die Synchronisierung auf der anderen Seite als Master zur Verfügung. Dieser Typ wird beispielsweise an Verzweigungen oder zwischen separaten Netzwerken eingesetzt. Für die Konzeptionierung der zentralen Zeitsynchronisierung mit verschiedenen Systemen ist vor allem dieser Typ relevant. Da Boundary Clocks eine Masterfunktionalität besitzen, könnten diese den Grandmaster für das System bilden. Dies ist meistens allerdings nicht sinnvoll, da keine direkte Synchronisierung mit einer Zeitreferenz besteht. Die Boundary Clock bezieht die Zeitinformationen dann von ihrer internen Uhr. [22, 29]

2.4.3 Synchronisierungskonzept

Die Synchronisierung geht immer von der Grandmaster Clock aus und erfolgt über PTP-Nachrichten. Für die hochgenaue Synchronisierung werden auf der einen Seite die aktuellen Zeitinformationen vom Master gesendet und auf der anderen Seite wird die Laufzeitverzögerung vom Slave bestimmt. Abbildung 2.18 zeigt den Synchronisierungsablauf zwischen einem Master und einem Slave.

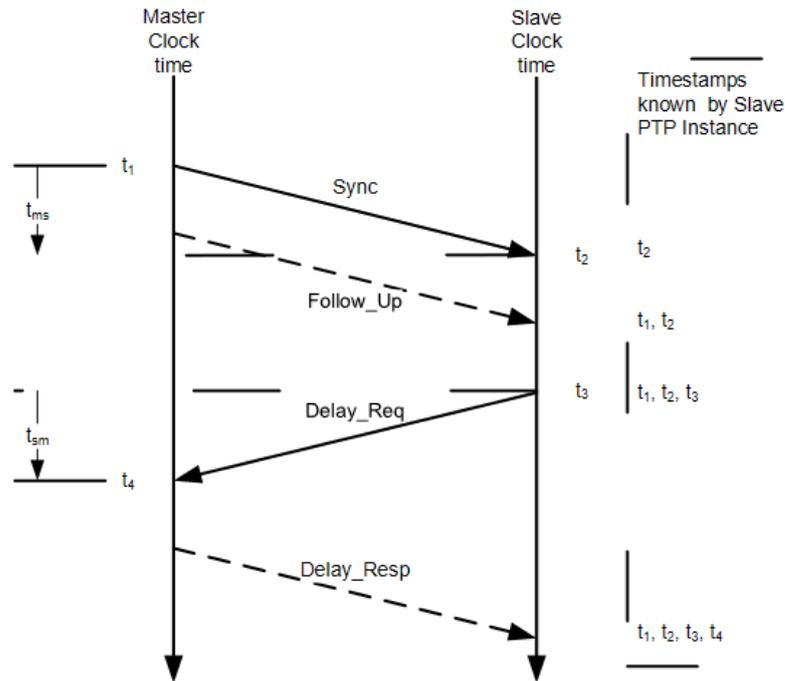


Abbildung 2.18: PTP-Synchronisierungskonzept [29]

In regelmäßigen Abständen sendet der Master eine Synchronisierungs-Nachricht (Sync-Nachricht) an den Slave. Der Slave erhält mit dieser den aktuellen Zeitstempel und speichert den Zeitpunkt des Eintreffens der Nachricht (vgl. Abbildung 2.18 t_2). Der Master sendet weiterhin eine Follow-Up-Nachricht. Diese enthält den Zeitpunkt des Sendens der Sync-Nachricht (t_1). Aus den beiden Zeitpunkten kann der Slave die Laufzeit der Nachricht vom Master zum Slave bestimmen. Darauffolgend sendet der Slave eine Delay-Request-Nachricht. Hierbei speichert der Slave den Zeitpunkt des Absendens der Nachricht (t_3). Der Master antwortet mit der Delay-Response-Nachricht, die den Zeitpunkt des Empfangs der Delay-Request-Nachricht enthält (t_4).

$$T_{\text{mittlere Laufzeit}} = \frac{t_2 - t_1 + (t_4 - t_3)}{2} \quad (2.1)$$

Mit den vier Zeitpunkten t_1 , t_2 , t_3 und t_4 kann der Slave jetzt die Laufzeitverzögerung in beide Richtungen bestimmen. Der Mittelwert der Laufzeiten wird, wie in Gleichung 2.1 berechnet, vom Zeitstempel der Sync-Nachricht abgezogen und der Slave ist synchronisiert.

Die Follow-Up-Nachricht wird nicht in jeder PTP-Implementierung benötigt. Diese wurde aufgrund der Schwierigkeit der gleichzeitigen Zeitstempelung und Nachrichtenverwendung verwendet. In aktuellen Implementierungen ist eine genauere Zeitstempelung möglich, sodass auf die Follow-Up-Nachricht verzichtet werden kann. Diese Implementierung, die auch im Prozessbus-System verwendet wird, nennt sich One-Step-Clock-Implementierung. Slaves unterstützen weiterhin auch die beschriebene Implementierung mit den Follow-Up-Nachrichten. Die vorgestellte Variante der Laufzeitmessung aus den

Zeitpunkten der Sync-Nachricht und der Delay-Request-Nachricht wird als der End-to-End Delay-Mechanism (E2E) bezeichnet. Neben diesem gibt es den Peer-to-Peer Delay-Mechanism (P2P). Abbildung 2.19 zeigt beide Verfahren mit den jeweils dafür verwendeten Nachrichten. [29]

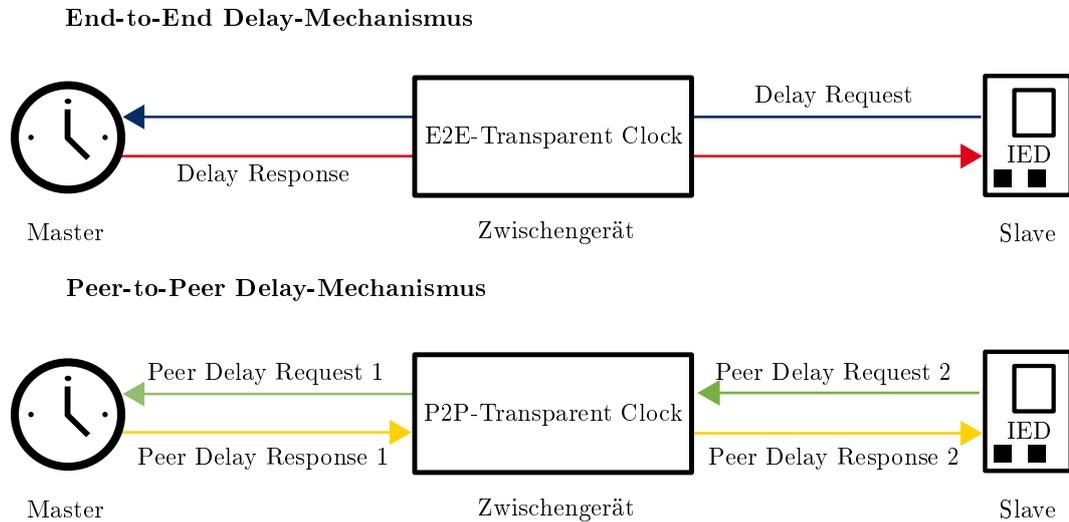


Abbildung 2.19: PTP-Laufzeitbestimmung über E2E- und P2P-Mechanismen¹

Der Unterschied zwischen den Mechanismen wird, abgesehen von den Nachrichten, erst bemerkbar, wenn die Synchronisierungskette aus mindestens drei Geräten besteht. Beim End-to-End Delay-Mechanismus wird die Delay-Request-Nachricht vom Slave über das Zwischengerät bis zum Master gesendet und dieser antwortet mit der Delay-Response-Nachricht. Es wird die Laufzeit von einem Endpunkt zum anderen Endpunkt gemessen. Beim Peer-to-Peer Delay-Mechanismus wird jeweils die Laufzeit vom Zwischengerät zum Master und dann wiederum vom Slave zum Zwischengerät bestimmt. Es werden jeweils die Laufzeiten zwischen zwei Geräten ermittelt. Für dieses Verfahren werden andere Nachrichten, die sogenannten Peer-Delay-Request-Nachrichten und die Peer-Delay-Response-Nachrichten eingesetzt. Abhängig von der Implementierung des PTP wird das eine oder das andere Laufzeitbestimmungsverfahren angewendet. Beim Peer-to-Peer Delay-Mechanismus muss jedes Gerät die Messungen durchführen und damit das PTP unterstützen. Beim End-to-End Delay-Mechanismus können auch Netzwerkgeräte eingesetzt werden, die PTP nicht nativ unterstützen. In der zentralen Zeitsynchronisierung werden aufgrund der unterschiedlichen Systeme beide Verfahren eingesetzt. [30]

2.4.4 Übertragungsprotokoll der PTP-Zeitsynchronisierung

PTP kann aufbauend auf dem TCP/IP-Protokollstapel oder auf Basis der Ethernetstandards IEEE 802.3 im Layer 2 implementiert werden. Als IP-Paket gesendet kann

¹Anmerkung: Der P2P-Mechanismus ist vereinfacht dargestellt. Es sind nur die Nachrichten gezeigt, die für die dargestellte Synchronisierungsrichtung benötigt werden.

es beliebig durch bestehende LANs gesendet werden. Die Implementierung auf Layer 2 ist schneller und unabhängig von der Auslastung des IP-Netzwerkverkehrs. [29]

2.4.5 Genauigkeit der PTP-Zeitsynchronisierung

Die Genauigkeit der PTP-Zeitsynchronisierung ist davon abhängig, wie die Zeitstempelung der Nachrichten erfolgt. Ein in Hardware zeitgestempelttes Paket weist eine deutlich höhere Genauigkeit auf als eine softwarebasierte Zeitstempelung. Bei Geräten, die PTP in der Layer-2-Variante nutzen, erfolgt eine Hardware-Zeitstempelung. Durch diese können Ungenauigkeiten innerhalb jedes Gerätes minimiert und damit die Synchronisierungsgenauigkeit erhöht werden. Zusätzlich werden Laufzeitverzögerungen durch Zwischengeräte, die als Transparent Clocks oder Boundary Clocks funktionieren, kompensiert. Abhängig von der Implementierung können mit PTP-Zeitgenauigkeiten im Nano- bis Millisekundenbereich erreicht werden. Für den Anwendungsfall der Prozessbus-Synchronisierung wird nur die Hardware-Zeitstempelung verwendet. Diese hat zwar eine höhere, aber trotzdem begrenzte Genauigkeit. Die maximale Ungenauigkeit ist für jeden Gerätetyp in den PTP-Standards spezifiziert. Die Spezifikation beschreibt die maximal erlaubte Abweichung des Zeitstempels von der absoluten Zeit zwischen Ein- und Ausgang eines Gerätes. Damit ist weiterhin die Synchronisierungskette auf eine gewisse Geräteanzahl begrenzt, um am Endpunkt die Synchronisierungsgenauigkeit von 1 μ s einzuhalten. [31, 32]

2.4.6 Announce-Nachrichten und dynamische Wahl des besten Masters

Für den Aufbau der PTP Master-Slave-Synchronisierung machen sich im ersten Schritt alle grandmaster-fähigen Uhren mit sogenannten Announce-Nachrichten bekannt. Diese enthalten Informationen zur jeweiligen Uhr und dienen für die Wahl des besten Masters als Grandmaster. Für die Konzeptionierung der Zeitsynchronisierung sind diese Parameter auch deshalb interessant, weil sie einen Aufschluss über den aktuellen Zustand des Systems geben. Für die Wahl des besten Masters als Grandmaster wird der sogenannte Best Master Clock Algorithm (BMCA) durchgeführt. Für den BMCA werden folgende Parameter betrachtet [29]:

Priority 1

Die Priority 1 ist ein anpassbarer Parameter zur Priorisierung grandmaster-fähiger Uhren.

Clock Class

Die Clock Class gibt Aufschluss über den Synchronisierungsstatus zur Zeitreferenz. Clock Classes sind implementierungsabhängig und geben synchronisierten Geräten eine Information, welche Art der Synchronisierung vorliegt. Für Prozessbus-Systeme typische Clock Classes sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Tabelle 2.1: Clock Classes im Prozessbus-System

Clock Class	Beschreibung
6	Synchronisiert mit internationaler Zeitreferenz.
7	Synchronisierungsverlust zur Zeitreferenz. Die Synchronisierung wird dabei vom internen Oszillator gehalten.
52	Synchronisierungsverlust zur Zeitreferenz und außerhalb einer Genauigkeit von 250 ns.
187	Synchronisierungsverlust zur Zeitreferenz und außerhalb einer Genauigkeit von 1 μ s.
248	Clock Class von Geräten, die zuvor nie mit einer Zeitreferenz synchronisiert waren.

Die Clock Class ist einer der wichtigsten Synchronisierungsparameter. Schutzgeräte im Prozessbus blockieren außerhalb der Synchronisierung in Clock Class 6 bestimmte Schutzfunktionen. Die Zeit, die ein Gerät die Synchronisierungsgenauigkeit in Clock Class 7 mit dem internen Oszillator halten kann, wird Holdover-Zeit genannt. [29]

Accuracy

Der Parameter beschreibt die Genauigkeit der Synchronisierung zur Zeitreferenz. Ein typischer und guter Wert im Prozessbus-System beträgt 100 ns. [29]

Variance

Der Parameter beschreibt die Varianz der Frequenzabweichung und damit die Qualität des Oszillators der Uhr. [29]

Priority 2

Der Parameter dient als weiterer Parameter zur Priorisierung grandmaster-fähiger Uhren. Dieser wird erst nach Betrachtung der synchronisierungsspezifischen Parameter relevant und ist damit gut geeignet, bestimmte Uhren zu priorisieren. [29]

Identifier

Der Parameter dient zur Identifikation der Uhr, auf Basis der MAC-Adresse. Da diese exklusiv ist, wird der Identifier als finales Entscheidungskriterium verwendet, wenn die Uhren sonst gleich qualifiziert sind. [29]

Im BMCA werden die Parameter in allen PTP-Endgeräten in der oben beschriebenen Reihenfolge sequentiell ausgewertet. Bei Gleichheit wird jeweils der nächste Parameter hinzugezogen. Durch den deterministischen Algorithmus ergibt sich im gesamten Netzwerk der gleiche Grandmaster. Grandmaster-fähige Uhren, die nach erfolgreichem BMCA nicht Grandmaster sind, schalten sich passiv. Weitergehend werden Announce-Nachrichten nur noch vom aktiven Grandmaster gesendet. Während des Betriebs wird der BMCA-Algorithmus von den beteiligten Geräten laufend weiter ausgeführt. Dabei wertet jeder Master die empfangenen Announce-Nachrichten gegenüber den eigenen Parametern aus. Kommt ein anderer Master zu dem Ergebnis ein besserer Grandmaster zu sein, sendet dieser parallel zum aktiven Grandmaster Announce-Nachrichten. Die anderen Geräte erkennen dann ebenfalls die Eignung des anderen Grandmasters und

der Grandmaster für das Netzwerk wechselt. Eine erneute systemweite Ausführung des BMCA erfolgt, wenn die Announce-Nachrichten des Grandmasters für eine gewisse Zeit, das sogenannte Announce-Timeout-Intervall, ausbleiben. Dann senden wieder alle Master Announce-Nachrichten und der Master mit den besten Parametern qualifiziert sich als neuer Grandmaster. Dieser Vorgang wird BMCA-Wechsel genannt. Insgesamt erfolgt mit dem BMCA immer eine dynamische Wahl des besten Masters als Grandmasters. Der Standard bietet weiterhin die Möglichkeit, von diesem Algorithmus abzuweichen. Spezifische Auslegungen des PTP-Standards werden in sogenannten PTP-Profilen spezifiziert. [29]

2.4.7 Standardisierung der PTP-Voreinstellungen für verschiedene Branchen durch PTP-Profile

Durch PTP-Profile ergibt sich die Möglichkeit, den komplexen Standard für die Anforderungen bestimmter Branchen zu vereinfachen. Dafür können von Organisationen Profile definiert werden, die gewisse PTP-Voreinstellungen beinhalten. Ein PTP-Profil definiert bei diesen Voreinstellungen die Anpassbarkeit der PTP-Parametrierung in vordefinierte Werte, nicht anpassbare Werte und individuell konfigurierbare Werte. PTP-Profile können beispielsweise von der IEC, dem IEEE¹ oder der ITU² erstellt werden. Die Definitionen der PTP-Umsetzung, die ein Profil vorgibt, umfassen verschiedene Punkte des PTP-Standards. Darunter ist die Definition, wie der Best Master Clock Algorithmus gewählt wird, welcher Delay-Mechanismus verwendet wird, welche PTP-Instanztypen es gibt und die anpassbaren sowie nicht anpassbaren Parameter. Die Profile schaffen eine Interoperabilität von Geräten in gleichen Anwendungsfeldern. Eine Kompatibilität der Profile untereinander muss aufgrund unterschiedlicher Implementierung des PTP nicht gewährleistet sein. Für die zentrale Zeitsynchronisierung sind die Profile interessant, die für das MPLS-Weitbereichsnetz und für das Prozessbus-System verwendet werden können. [29, 33]

¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) : Weltweite Organisation für Elektro- und Informationstechnikaspekte

² International Telecommunication Union (ITU) (dt. Internationale Fernmeldeunion): Internationale Organisation für Telekommunikationsaspekte

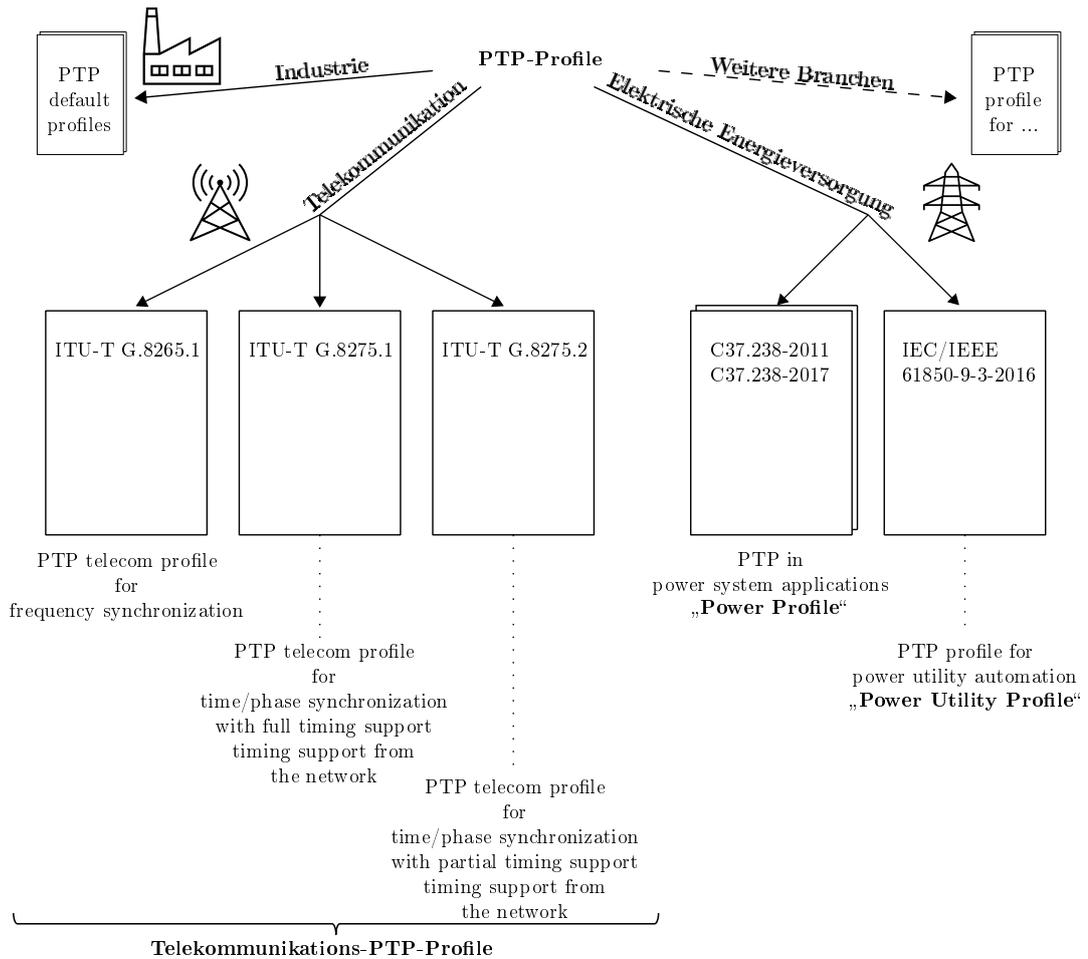


Abbildung 2.20: Übersicht der relevanten PTP-Profilen [29, 34, 35, 36, 37, 38, 39]

Die Abbildung 2.20 zeigt eine Aufteilung der PTP-Profilen verschiedener Branchen. Für die Synchronisierung im Prozessbus-System sind die Profile für elektrische Energieversorgung relevant. Dies ist das „Power Profile“ in den Versionen von 2011 und 2017 und das „Power Utility Profile“. Für das Prozessbus-System bei der Stromnetz Hamburg GmbH soll das einfacher aufgebaute Power Utility Profil verwendet werden [40]. Das Power Profil bietet zusätzliche Erweiterungen, die für die Anwendung nicht benötigt werden. [38, 39, 37]

Für die zentrale Zeitsynchronisierung durch das MPLS-Netzwerk können die Telekommunikations-PTP-Profilen verwendet werden. Dies ist das ITU-T G.8265.1, das G.8275.1 und das G.8275.2 PTP-Profil. Die Auswahl des geeigneten Profils für das MPLS-Weitbereichsnetz wird in der Konzeptionsphase durchgeführt. [34, 35, 36]

3 Anforderungen

Bei der Konzeptionierung der zentralen Zeitsynchronisierung mittels PTP müssen zwei hauptsächliche Anforderungen erfüllt werden. Die erste Hauptanforderung ist die Konzeptionierung mit den vorgestellten Technologien. Die Laboraufbauten bilden die Technologien ab, die in Zukunft eingesetzt werden sollen. Dabei ist eine Variation der einzelnen Geräte und Hersteller im Laufe der Projekte zwar möglich, aber der Einsatz dieser Technologien sehr wahrscheinlich. Die zweite Hauptanforderung ist die Erfüllung der Anforderungen an die Genauigkeit für die geplante Anwendung als IEC 61850 Prozessbus-System. Darauf aufbauend werden folgende Anforderungen definiert:

- Verwendung des Precision Time Protocol in der Version 2 (vgl. Abschnitt 2.4)
- Redundante zentrale Zeitsynchronisierung für die Anwendung eines IEC 61850 Prozessbus-Systems
 - Eindeutiges Synchronisierungsverhalten bei Normalbetrieb und im Redundanzfall
 - Synchronisierungshierarchie von zentraler Stelle zum Prozessbus-System
- Kompatibilität zum aktuellen MPLS- und Sekundärtechnik-Konzept
 - Verwendung des IEC/IEEE 61850-9-3-2016 - Power Utility Profil im Prozessbus-System
 - Kompatibilität zur Taktsynchronisierung im MPLS-Netz mittels Synchronous Ethernet
 - Kompatibilität des Konzepts zum Parallel Redundancy Protocol (PRP) im Prozessbus-System
- Umsetzungsvorgaben für den Konzeptaufbau
 - Konzeptaufbau mit den in den Laborumgebungen vorhandenen Komponenten
 - Prüfung des Konzeptaufbaus mit den in den Laboren vorhandenen Messgeräten
 - Konzeptaufbau und Prüfung parallel zu weiteren Arbeiten im Prüflabor

- Differenzierte Betrachtung der Genauigkeit mit den Anforderungen für den Schutzgerättyp SIPROTEC 5¹ und der generellen Empfehlung der Firma Omicron für die Stromnetz Hamburg GmbH
 - Anforderung SIPROTEC Schutzgerät: Master Clocks mit Zeitunterschieden kleiner 6 μ s bei Grandmaster-Wechsel. [41]
 - Empfehlung Omicron: Erfüllung der Time Performance Class T5². [40, 42]

¹Schutzgerättyp des Kooperationspartners Siemens, der im Laboraufbau u.a getestet wird.

²Entspricht einer Genauigkeit von 1 μ s und damit den Anforderungen für SVs und GOOSE aus Abschnitt 2.3.2.

4 Konzeptionierung der zentralen PTP-Zeitsynchronisierung

Mit den im Grundlagenteil beschriebenen Aspekten und den anschließend definierten Anforderungen wird in den folgenden Abschnitten ein Konzept zur zentralen Zeitsynchronisierung vorgestellt.

4.1 Dezentrale und zentrale Zeitsynchronisierung

Für die Zeitsynchronisierung der Prozessbus-Systeme in den Umspannwerken werden zwei Ansätze betrachtet: Die dezentrale und die zentrale Zeitsynchronisierung. Die Übersicht des Verteilnetzes in Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung der Umspannwerke im Hamburger Stadtgebiet. Die Ansätze zur Zeitsynchronisierung unterscheiden sich darin, wie diese Umspannwerke mit einer Zeitreferenz verbunden werden und wie eine Redundanz hergestellt wird.

Bei der dezentralen Zeitsynchronisierung synchronisiert sich eine Grandmaster Clock in jedem Umspannwerk mit einem GNSS-Empfänger mit einer internationalen Zeitreferenz. Die Redundanz dieses Systems ist durch unabhängige Master Clocks, die sich mit unterschiedlichen GNS-Systemen synchronisieren können, gewährleistet. Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Darstellung der dezentralen Zeitsynchronisierung ohne Berücksichtigung der redundanten Ausführung der dezentralen Master Clocks. Das Prinzip der dezentralen Zeitsynchronisierung wird bei der Stromnetz Hamburg GmbH aktuell verfolgt, da über GNS-Systeme eine hohe Genauigkeit der Synchronisierung erreicht werden kann und die Synchronisierung von keinen weiteren Systemen abhängig ist. Nachteilig ist eine Abhängigkeit von den GNS-Systemen und hohe Investitionskosten durch die Geräte sowie die Installation der GNSS-Antennen.

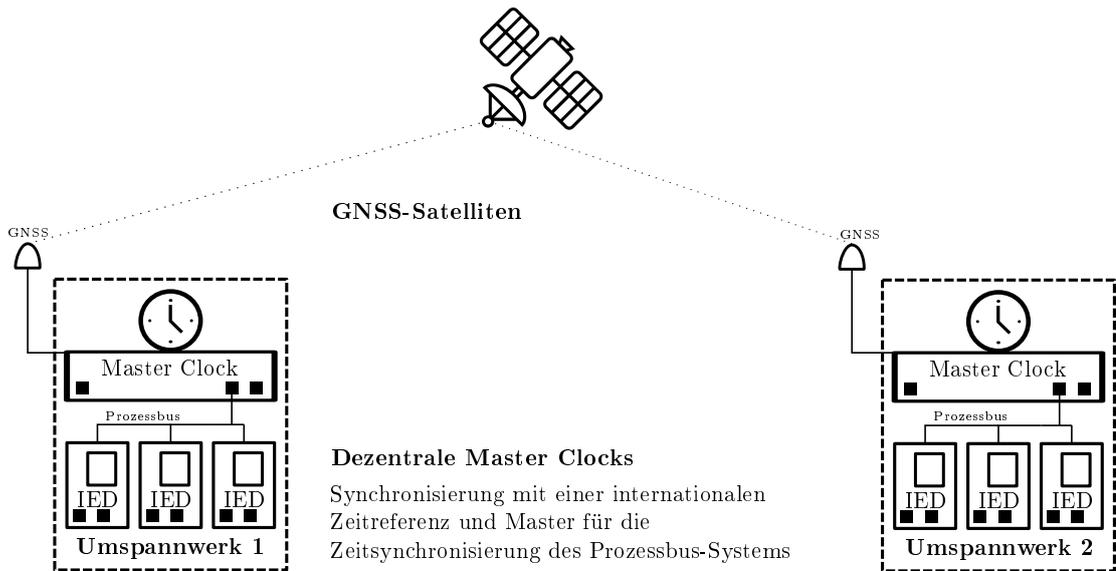


Abbildung 4.1: Konzept einer dezentralen Zeitsynchronisierung mit PTP

Der alternative Ansatz ist eine zentrale Zeitsynchronisierung über das standortverbindende, firmeneigene Weitbereichs-Telekommunikationsnetz. Dabei werden, anstatt dezentrale Grandmaster Clocks in jedem Umspannwerk einzusetzen, diese an zentralen Stellen des Verteilnetzes aufgestellt. Diese zentralen Master synchronisieren sich ebenfalls über ein GNS-System mit einer internationalen Zeitreferenz. Die Zeitinformation wird dann mittels PTP über das MPLS-Weitbereichsnetz in die Umspannwerksstandorte übertragen. Beim zentralen Ansatz der Zeitsynchronisierung ergeben sich Herausforderungen durch den Transport des PTP-Zeitsignals über viele Zwischengeräte und über weitere Distanzen. Außerdem muss das PTP-Zeitsignal Übergänge zwischen verschiedenen Netzwerken passieren. Vorteilhaft ist bei der zentralen Zeitsynchronisierung die hohe Ausfallsicherheit gegenüber Störungen der GNS-Systeme. Weiterhin kann bei diesem Ansatz das gesamte Netzwerk von einer zentralen firmeneigenen Stelle synchronisiert werden. Die Abbildung 4.2 zeigt den schematischen Ansatz einer zentralen Zeitsynchronisierung.

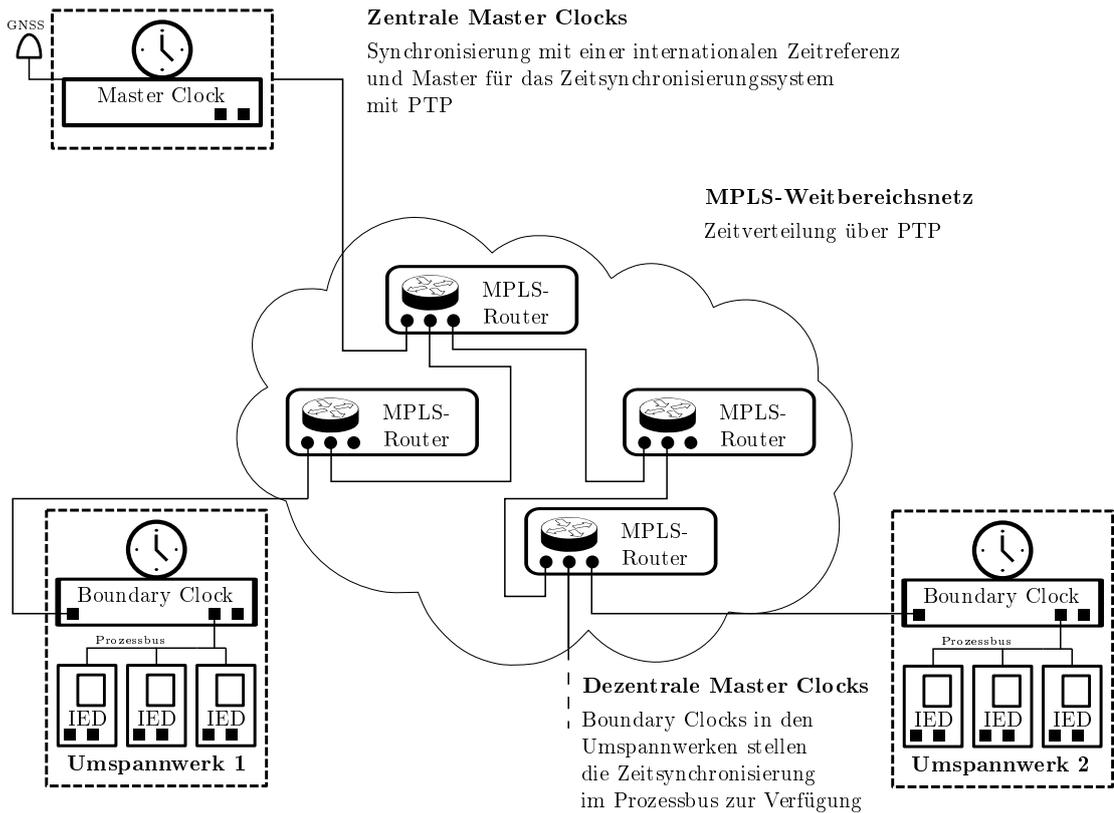


Abbildung 4.2: Zentrale Zeitsynchronisierung mit PTP

Im Energieversorgungsbereich ist die zentrale Synchronisierung von Prozessbus-System über verteilte Standorte mittels PTP kein etabliertes Verfahren. Die grundsätzlichen Voraussetzungen für die zentrale Zeitsynchronisierung sind theoretisch allerdings durch PTP in der Version 2 gegeben. Die parallele Durchführung des Projekts der Modernisierung des Weitbereichsnetzes und der Einführung von digitalen Prozessbus-Systemen ermöglicht die praktische Erprobung der zentralen Synchronisierung.

4.2 Konzepte einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung

Für die Konzeptionierung einer redundanten, zentralen Zeitsynchronisierung mittels PTP gibt es verschiedene Möglichkeiten der Realisierung. Das verbindende Medium zwischen den Umspannwerken ist bei der dezentrale Zeitsynchronisierung ein GNSS, welches global verfügbar ist. Bei der zentralen Zeitsynchronisierung ist das MPLS-Weitbereichsnetz das verbindende Medium zwischen den Umspannwerken über das das Zeitsignal transportiert wird.

4.2.1 Vermaschte PTP-Zeitsynchronisierung

Der in Abbildung 4.3 erläuterte Ansatz verwendet das MPLS-Weitbereichsnetz nur als ein verbindendes Medium zwischen den Umspannwerkstandorten. Dabei werden die ein-

zelen Umspannwerke nicht zwingend von zentralen Mastern synchronisiert. Mit dem Netz als Verbindung zwischen den Umspannwerken werden die dezentralen Master in den Umspannwerken untereinander synchronisiert. Dieser Ansatz benötigt keine weiteren zentralen Uhren, da die Synchronisierung immer von einem der dezentralen Master übernommen wird. Das Konzept baut allein auf einer vermaschten Vernetzung der dezentralen Standorte auf.

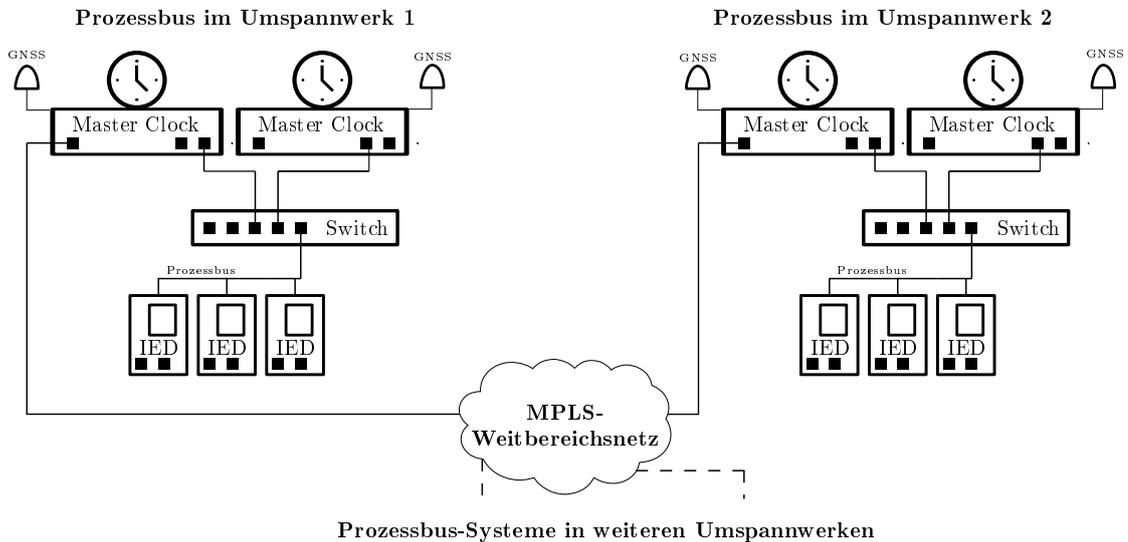


Abbildung 4.3: Topologie einer vermaschten PTP-Zeitsynchronisierung

4.2.2 Redundante zentrale PTP-Zeitsynchronisierung

Der in Abbildung 4.4 erläuterte Ansatz einer redundanten, zentralen PTP-Zeitsynchronisierung baut ausschließlich auf zentralen Master Clocks auf. Von den zentralen Master Clocks gelangt die Zeitsynchronisierung über das MPLS-Weitbereichsnetz direkt zu den Boundary Clocks in den Umspannwerken. Da das MPLS-Weitbereichsnetz grundsätzlich redundant ausgelegt ist, wird die Redundanz der Zeitsynchronisierung bei dieser Variante komplett von den zentralen Master Clocks gewährleistet. Im Umspannwerk werden über redundante Erweiterungskarten im MPLS-Router zwei Boundary Clocks verbunden, die sich wiederum im Prozessbus-System befinden, sodass die Synchronisierung ebenfalls redundant ist.

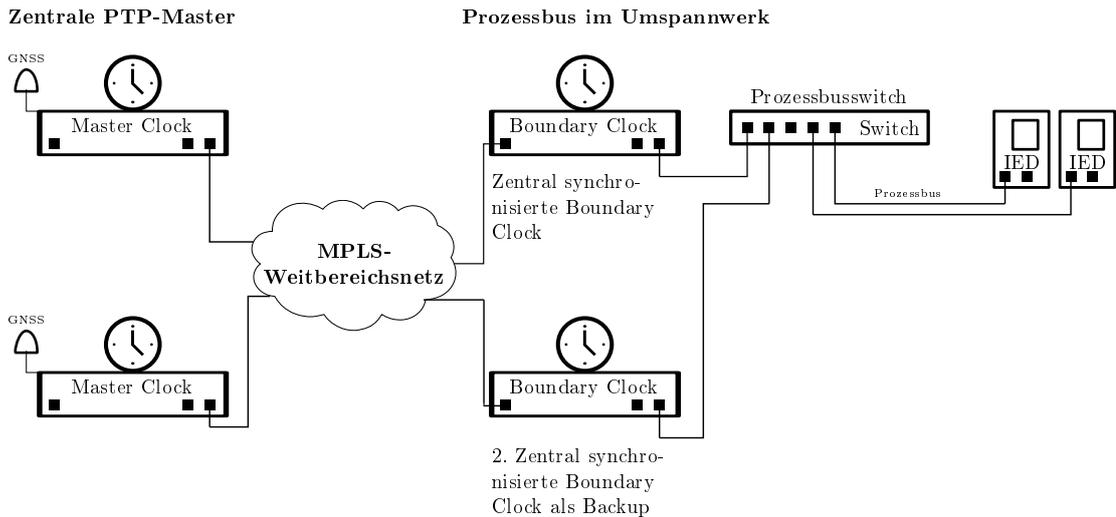


Abbildung 4.4: Topologie einer redundanten zentralen PTP-Zeitsynchronisierung

4.2.3 Zentrale PTP-Zeitsynchronisierung als Backup zur dezentralen Zeitsynchronisierung

Bei dem in Abbildung 4.5 erläuterten Ansatz einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung werden sowohl Elemente der zentralen als auch der dezentralen Zeitsynchronisierung verwendet. Im Normalbetrieb wird bei diesem Konzept der Prozessbus von einer dezentralen Master Clock synchronisiert, die einen GNSS-Empfänger besitzt. Die Redundanz wird durch eine zentral synchronisierte Boundary Clock gewährleistet.

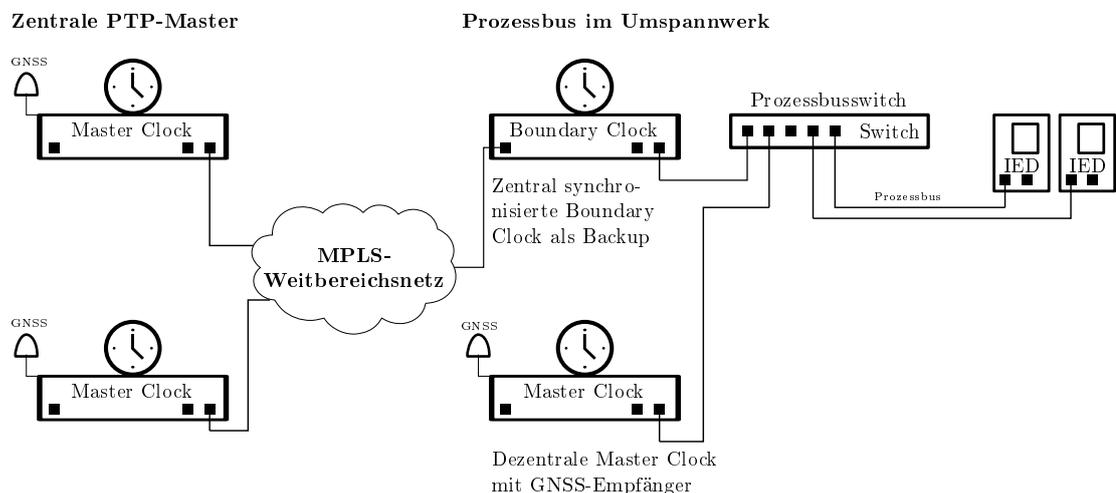


Abbildung 4.5: Topologie einer PTP-Zeitsynchronisierung als Backup

4.2.4 Konzeptbewertung

Alle drei Ansätze sind Variationen einer zentrale Zeitsynchronisierung mittels eines MPLS-Weitbereichsnetzes. Die einzelnen Konzepte haben unterschiedliche strukturelle Vor- und Nachteile. Beim Ansatz der vermaschten PTP-Zeitsynchronisierung ist eine

hohe Redundanz geboten. Nachteilig bei diesem Ansatz ist eine aufwändige Planung zur Parametrierung des Weitbereichsnetzes. Aufgrund der möglichen langen Übertragungswege wäre zudem der Zeitfehler aller Synchronisierungsketten schwer zu bestimmen. Beim Ansatz mit einer redundanten zentralen PTP-Zeitsynchronisierung kann in jedem Fall nicht die gleiche Genauigkeit erreicht werden, wie beim Einsatz von dezentralen Mastern. Dafür ist das System sehr robust gegenüber Störungen der GNS-Systeme. Ein weiterer Vorteil ist bei dieser Variante, dass keine Installation dezentraler GNSS-Antennen notwendig ist. Der dritte Ansatz kombiniert die beiden Varianten. Im Normalbetrieb kann eine sehr genaue Zeitsynchronisierung zu einer internationalen Zeitreferenz erreicht werden und bei Störungen wird die Synchronisierung von einem zentralen Master übernommen. Damit sind für die Synchronisierung Vorteile beider Varianten kombiniert. Zusätzlich muss jeweils nur eine dezentrale GNSS-Antenne installiert werden. Die zentralen Master werden sowieso für die Taktsynchronisierung des MPLS-Weitbereichsnetzes eingesetzt und können so für beide Anwendungsfälle genutzt werden. Dafür sind keine zusätzlichen Investitionen notwendig.

Für die Evaluierung eines optimalen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts sollten Metriken festgelegt werden, anhand derer verschiedene Konzepte bewertet werden und Vor- und Nachteile gewichtet werden können. Folgende Punkte könnten als übergeordnete Metriken zur Bewertung herangezogen werden:

- Genauigkeit
- Redundanz
- Investitionskosten
- Operative Kosten / Wartbarkeit
- Sicherheit

Die Evaluierung einer Zeitsynchronisierungsvariante wird auch bei anderen Netzbetreibern durchgeführt. Abhängig von den Gegebenheiten und der individuellen Gewichtung der vorgestellten Metriken eignen sich unterschiedliche Varianten (vgl. [43]). Für die weitere Konzeptionierung wird der Ansatz verfolgt, bei dem ein dezentraler Master zusammen mit einer zentral synchronisierten Boundary Clock als Backup arbeitet. Dieses System kombiniert die Vorteile aus beiden Möglichkeiten und lässt sich mit den in den Laboren vorhandenen Geräten realisieren (vgl. Abschnitt 4.4). Außerdem bietet es durch die Elemente beider Synchronisierungsvarianten die höchste Robustheit gegenüber Störungen. Die Bewertung der Konzepte anhand der vorgestellten Metriken zusammen mit nach Anforderungen definierten Gewichtung kann mit der konzipierten zentralen Zeitsynchronisierung aus dieser Arbeit resultierend evaluiert werden.

4.3 PTP-Marktanalyse

Für die Umsetzung des Konzepts werden die PTP-Eigenschaften der in den Laborumgebungen verwendeten Geräte in einer Marktanalyse untersucht. Die Geräte, die in den

Laborumgebungen verwendet werden, wurden entweder von den Herstellern, nach den ausgeschriebenen Anforderungen, zur Verfügung gestellt oder mit Fokus auf Herstellerunabhängigkeit für den IEC 61850 Laboraufbau ausgewählt. Alle Geräte unterstützen aufgrund dieser Anforderung den PTP-Standard. Für die konkreten Unterschiede werden folgende Eigenschaften betrachtet:

- Gerät / Typ / Hersteller
- Clock Typ (Welche PTP-Instanzen kann das Gerät abbilden?)
- Relevante PTP-Profil (vgl. Abschnitt 4.5.2)
- Unterstützung des Parallel Redundancy Protocol (PRP)

Tabelle 4.6 zeigt die Ergebnisse der Marktanalyse. Rot hinterlegte Spalten zeigen die für die zentrale PTP-Zeitsynchronisierung relevanten Eigenschaften. Weitere für das Gesamtkonzept zu betrachtende Eigenschaften sind blau hinterlegt. Nicht eingefärbte Zeilen zeigen Geräte, die schon in den Laborumgebungen eingesetzt sind. Gelb hinterlegte Zeilen zeigen Geräte, die eventuell in Zukunft eingesetzt werden sollen. Die Symbole sind als Haken: „erfüllt“, Kreuz: „nicht erfüllt“ und Fragezeichen: „keine Information“ zu interpretieren.

Gerät	Typ	Hersteller	Clock Type	PTP Power Profile		PTP-Power Utility Profile IEC/IEEE 61850-9-3	PTP ITU-Profil		PRP
				C37.238.2011 (v1)	C37.238.2017 (v2)		PTP-Profil ITU-T G. 8265.1	PTP-Profil ITU-T G. 8275.1	
-	-	-	GM / MC / BC / OC / TC / SC	C37.238.2011 (v1)	C37.238.2017 (v2)	IEC/IEEE 61850-9-3	PTP-Profil ITU-T G. 8265.1	PTP-Profil ITU-T G. 8275.1	-
Zeitserver	8030HEPTA-01 /GPS	Hopf	✓ GM	✓	✗ ?	✗ ?	✗	✗	✓ IEC62439-3: 2011
Zeitserver	8030HEPTA-02 /GPS (Kein neues Modell, sondern überarbeitet Version mit technischen Verbesserungen)	Hopf	✓ GM	✓	✓	✓	? Nicht vorgesehen, aber in Absprache können diese in Anforderung aufgenommen werden	? Nicht vorgesehen, aber in Absprache können diese in Anforderung aufgenommen werden	✓
Zeitserver	NTS-4000	Elproma (Ansprechpartner Lange Electronics)	✓ GM	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Zeitserver	microSyncRX 100/AD10DC20	Meinberg	✓ GM	✓	✓	✓	✓	✓	✓ IEC 62439-3
Zeitserver	LANTIME M1000	Meinberg	✓ GM	✓	✓	✓	✓	✓	✓ Konfigurationsabhängig
Switch	RST2228	RUGGEDCOM	TC (Peer-to-Peer, End-to-End)	✓	✓	✓	-	-	-
Switch	Greyhound 1040 GRS1042-6T6ZTHH11V9HHS E2A9908.1	Hirschmann	✓ TC / BC / OC	(✓) Keine voreingestellten Profile. Diese müssen vom Kunden selbst konfiguriert werden.					-
MPLS Router	7705 SAR	Nokia	MC/BC/SC	✗	✗	✗	✓	✓	✗
MPLS Router	ASR903 / ASR907	Cisco	?	?	?	?	✓	?	?

Abbildung 4.6: Marktanalyse zu PTP-Eigenschaften der im Laboraufbau verwendeten Geräte

4.4 Geräteauswahl

Um Geräte für den Konzeptaufbau auszuwählen, werden die Ergebnisse der Marktanalyse aus Abschnitt 4.3 ausgewertet. Eine Anforderung ist, die Zeitsynchronisierung mit den verfügbaren Geräten zu konzeptionieren. Aus Abschnitt 4.2 geht das Konzept, mit einem dezentralen Master und einer zentral synchronisierten Boundary Clock als Backup, hervor. Abbildung 4.7 zeigt das geplante Hardwarekonzept mit den in den folgenden Abschnitten ausgewählten Geräten.

4.4.1 Zentrale Master Clocks

Als zentrale Master Clocks werden die Geräte Meinberg Lantime M1000 verwendet. Diese werden bereits für die Taktsynchronisierung des MPLS-Weitbereichsnetzes eingesetzt. Die parallele Verwendung für beide Zwecke ist mit einem aktuellen Softwareupdate möglich.

4.4.2 MPLS-Weitbereichsnetz

Für das MPLS-Weitbereichsnetz stehen zwei Laboraufbauten zur Verfügung. Die Laboraufbauten bilden die von zwei Anbietern im Rahmen einer Ausschreibung angebotene MPLS-Technik ab. Die Anforderung der Taktsynchronisierung kann auf verschiedene Weise realisiert werden. Beide MPLS-Anbieter setzen dafür Synchronous Ethernet ein. Daraus resultiert, dass zum Zeitpunkt der Bachelorarbeit aus Lizenzgründen nur der Nokia-Labora Aufbau mit den Nokia 7705 SAR Routern das PTP unterstützt. Aus der Marktanalyse geht hervor, dass die Nokia-Router die benötigten Anforderungen erfüllen, daher wird dieser Aufbau verwendet. Mit Anpassung der Lizenzen wäre das Konzept genauso mit den Cisco ASR903 / ASR907 Routern realisierbar. Der Nokia-Labora Aufbau des MPLS-Weitbereichsnetzes ist topologisch wie das MPLS-Netz in Abbildung 2.6 im Unterabschnitt 2.2.3 zum MPLS-Prüflabor aufgebaut.

4.4.3 Dezentrale Master Clock und Boundary Clock im Umspannwerk

Im Umspannwerk wird eine dezentrale Master Clock benötigt, die im Normalbetrieb die Zeitsynchronisierung des Prozessbus-Systems gewährleistet. Diese soll mit einem GNSS-Empfänger den Prozessbus mit einer internationalen Zeitreferenz synchronisieren. Für den Einsatz als dezentraler Master kommt mit den Ergebnissen der Marktanalyse nur die Meinberg MicroSync in Frage. Die MicroSync unterstützt im Gegensatz zum im Prüflabor vorhandenen Hepta Zeitserver die notwendigen PTP-Profile (siehe Marktanalyse 4.6).

Als Boundary Clock kommen bei Betrachtung der Marktanalyse verschiedene Geräte

in Frage. Die Meinberg MicroSync ist auch für diesen Betriebsmodus geeignet. Aus der Marktanalyse geht zudem hervor, dass der Hirschmann Switch als Boundary Clock betrieben werden kann. Bei diesem lassen sich laut Aussage des Herstellers die Profile individuell parametrieren. Um das Konzept in der Gesamtheit zu testen, wird der Hirschmann Switch als Boundary Clock verwendet, da nur eine Meinberg MicoSync verfügbar ist und somit zusätzlich erstmal das einfacher ausgelegte Gerät getestet wird.

4.4.4 Weitere Netzwerktechnik

Für die Vergleichbarkeit der Synchronisierungsquellen wird ein Prozessbuswitch benötigt. An diesem Switch laufen die Signale der dezentralen Master Clock sowie der zentral synchronisierten Boundary Clock zusammen (vgl. Abbildung 4.7). Für die spätere Prüfung des Konzepts kann somit die Zeitsynchronisierung an diesem Switch betrachtet werden. Als Gerät hierfür würde sowohl der Hirschmann Switch als auch der Ruggedcom Switch (siehe Marktanalyse in Abbildung 4.6) in Frage kommen. Bei beiden Switches handelt es sich um Transparent Clock PTP-Instanzen, bei denen Zeitverzögerungen durch die Verarbeitung kompensiert werden (vgl. Unterabschnitt 2.4.2). Für den Konzeptaufbau wird der Ruggedcom Switch verwendet, der schon im Labor für den Prozessbus parametrierbar ist.

Die Netzwerkverbindungen zwischen den Geräten werden über SFP-Ports mit Twisted-Pair-Kupferkabeln realisiert. Zwischen den Routern des MPLS-Netzes werden LWL-Verbindungen eingesetzt.

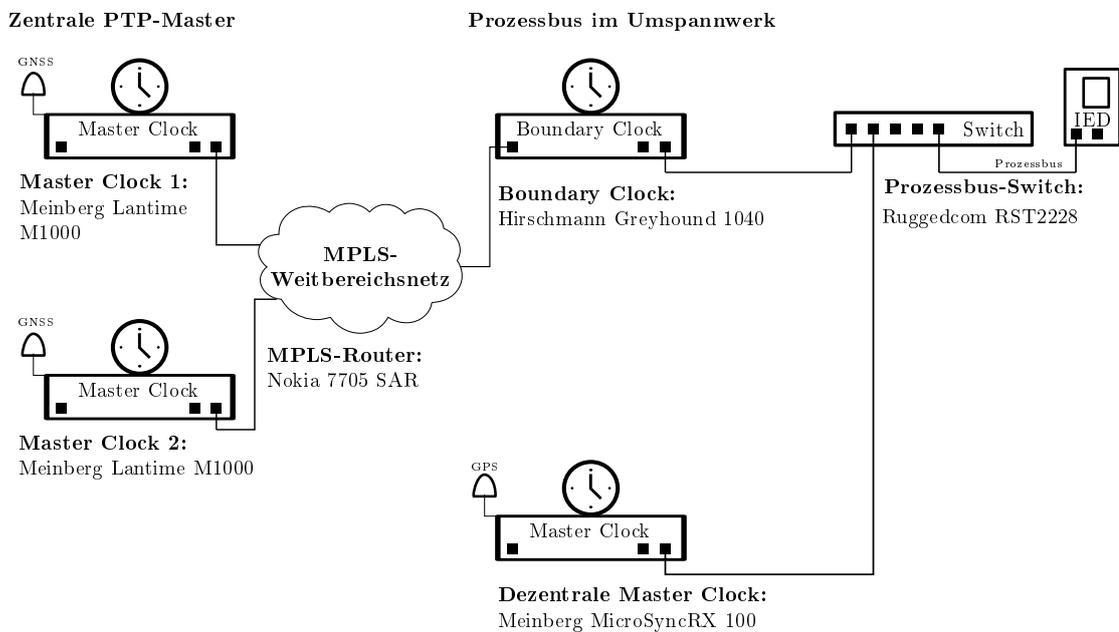


Abbildung 4.7: Verwendete Geräte im Konzeptaufbau

4.4.5 Anpassung der Geräteauswahl bei Verwendung des Parallel Redundancy Protocol (PRP)

Für die redundante Auslegung des Prozessbus-Systems wird das Parallel Redundancy Protocol (PRP) verwendet (vgl. Abbildung 2.14 und Unterabschnitt 2.3.2). In der Abbildung 4.7 ist nur der einfache Prozessbus angedeutet. Für die PTP-Synchronisierung ist es erforderlich, dass die Synchronisierungsnachrichten jeweils auf den redundanten LANs des Prozessbusses verfügbar sind. Hierfür müssen die Master Clocks das PRP unterstützen oder es kann eine sogenannte Redundancy Box (Red-Box) eingesetzt werden. Die Meinberg Lantime und MicroSync unterstützen PRP. Bei der Boundary Clock muss darauf geachtet werden, dass dann mindestens drei PTP-fähige Schnittstellen benötigt werden. Dies ergibt sich aus einer Schnittstelle zum MPLS-Weitbereichsnetz und zwei Schnittstellen für die PRP-Anforderung des Prozessbus-Systems. Dies wäre bei der aktuellen Auswahl der Geräte nur in einer erweiterten Konfiguration der Meinberg Lantime als Boundary Clock möglich. Für den Hirschmann Switch könnte eine Red-Box eingesetzt werden. Die PRP-Anbindung des zentralen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts ist damit theoretisch realisierbar und soll für den Konzeptaufbau erstmal nicht weiter betrachtet werden. Eine Konzeption einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung mit dem Parallel Redundancy Protocol wäre wie beschrieben zu realisieren.

4.5 PTP-Konzept

Mit der Hardwareauswahl wird im nächsten Schritt die konkrete Implementierung des PTP sowohl im Prozessbus als auch im MPLS-Weitbereichsnetz beschrieben.

4.5.1 PTP-Profil im Prozessbus-System

Für den Prozessbus im Umspannwerk soll das Power Utility Profil verwendet werden. Dieses wird ab der Schnittstelle der Boundary Clock zwischen zentraler PTP-Zeitsynchronisierung und dem Prozessbus-System eingesetzt (vgl. Abbildung 4.7). Das Profil wird wie im Standard IEC 61850-9-3-2016 beschrieben parametrisiert (vgl. [37]). Für die Kompatibilität muss die PTP-Domain des gesamten Synchronisierungssystems einheitlich gewählt werden. Hier soll die gleiche PTP-Domain wie im MPLS-Weitbereichsnetz verwendet werden.

4.5.2 Auswahl des PTP-Profiles im MPLS-Weitbereichsnetz

Für ein Prozessbus-System nach IEC 61850 und die zentrale Zeitsynchronisierung über ein MPLS-Weitbereichsnetz kommen die in Abschnitt 2.4.7 beschriebenen PTP-Profile in Frage. Die Marktanalyse zeigt weiterhin, welche Profile von den Komponenten unterstützt werden. Für Telekommunikationsanwendungen stehen die PTP-Profile ITU-T

G.8265.1, ITU-T G.8275.1 und ITU-T G.8275.2 zur Verfügung. Tabelle 4.1 zeigt die relevanten Unterscheidungsmerkmale dieser Profile mit den IEEE 1588 Default Profilen und dem Power Utility Profil.

Tabelle 4.1: Übersicht ausgewählter PTP-Profile (Angelehnt an [26])

	IEEE 1588 Default Profiles	IEC 61850-9-3	ITU-T G.8265.1	ITU-T G.8275.1	ITU-T G.8275.2
Branche	Industrie	Energie- versorgung	Telekommuni- kation	Telekommuni- kation	Telekommuni- kation
Übertragungs- protokoll	IP, Layer 2, ...	Ethernet (L2)	IPv4	Ethernet (L2)	IPv4
Übertragungs- methode	Multi-/Unicast	Multicast	Unicast	Multicast	Unicast
Delay- Mechanismus	Beide	P2P	E2E	E2E	E2E
Clock Modus	One-Step / Two-Step	Beide	Beide	Beide	Beide
BMCA	Standard	Standard	Alternativ	Alternativ	Alternativ
PTP-Instanzen	OC, BC, TC	OC, BC, TC	Nur OC	T-GM, T-BC, T-TSC, T-TC	T-BC-P, T-TSC-P/A, T-TC-P
PTP- Unterstützung durch Netzwerk	beliebig	vollständig	keine	vollständig + SyncE	teilweise

Die IEEE 1588 Default Profile bieten die größte Variation der Parameter. Das Power Utility Profil (IEC 61850-9-3-2016) und die Telekommunikations-PTP-Profile haben eindeutigeren Vorgaben, da diese jeweils für eine bestimmte Anwendung konzipiert sind. Das älteste 2010 eingeführte ITU-T G.8265.1 Profil ermöglicht die Frequenzsynchronisierung mittels PTP. Für die geplante Anwendung ist das Profil ungeeignet, da die Implementierung der Zeitsynchronisierung fehlt. [34]

Die Profile G.8275.1 und G.8275.2 ermöglichen die geforderte Zeitsynchronisierung. Die Unterschiede der beiden Profile zeigen sich in Tabelle 4.1 bei dem verwendeten Übertragungsprotokoll, den Clock Typen und der geforderten PTP-Unterstützung durch das Netzwerk. Beim G.8275.1 Profil wird als Übertragungsprotokoll die PTP-Implementierung im Layer 2 (Ethernet) verwendet. Das Profil erfordert vollständige PTP-Unterstützung von jedem Zwischengerät im Netzwerk. Die damit einhergehende Hardware-Zeitstempelung ermöglicht eine hohe Genauigkeit und eine Abschätzbarkeit des maximal möglichen Zeitfehlers.

Beim G.8275.2 Profil wird als Übertragungsprotokoll das IP-Protokoll verwendet. Das Profil erfordert nur eine teilweise PTP-Unterstützung von den Zwischengeräten und ist damit für Bestandsnetzwerke geeignet, bei denen PTP nicht von allen Zwischengeräten unterstützt wird. Je mehr Zwischengeräte der Synchronisierungskette PTP-fähig sind, desto genauer ist bei diesem Profil die Synchronisierung. Durch die IP-Implementierung

ist die Genauigkeit der Synchronisierung zusätzlich vom Netzwerkverkehr abhängig. Für die Konzeptionierung einer zentralen Zeitsynchronisierung, mit der Anforderung einer möglichst hohen Genauigkeit in einem neu aufzubauenden MPLS-Weitbereichsnetz, wird damit das G.8275.1 Profil verwendet. Die Tabelle 4.1 zeigt weitere Besonderheiten des G.8275.1 Profils, die für die Implementierung im Folgenden betrachtet werden. [26, 35, 36, 44]

4.5.3 ITU-T G.8275.1 PTP-Profil

Das ITU-T G.8275.1 Profil ist das „Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network“. Für die Konzeptionierung mit diesem Profil werden die wichtigsten Eigenschaften betrachtet und die Parameter dokumentiert. Das Profil soll in der aktuellen Version 3.0 von März 2020 verwendet werden. Die Standardisierung der PTP-Profile ist eine Arbeit der letzten Jahre, sodass auch weiter regelmäßige Anpassungen zu erwarten sind. [35]

PTP-Instanzen

Das Profil definiert abweichende PTP-Instanztypen. Die Bedeutung der Begrifflichkeiten im Rahmen des PTP bleibt dabei unverändert.

Tabelle 4.2: PTP-Instanztypen im ITU-T G.8275.1 PTP-Profil [29, 35]

PTP-Instanz	Bedeutung im PTP
Telecom Grandmaster Clock (T-GM)	Verhält sich immer als Master und nicht als Slave
Telecom Time Slave Clock (T-TSC)	Wie eine Slave-only Clock (SC)
Telecom Transparent Clock (T-TC)	Wie eine Transparent Clock (TC), die den End-to-End Delay-Mechanismus verwendet
Telecom Boundary Clock (T-BC)	Wie eine Boundary Clock (BC)

Die Unterschiede zu den in Unterabschnitt 2.4.2 vorgestellten PTP-Instanztypen sind ein teilweise anderes Verhalten und andere Performanceansprüche, die in den ITU Standards beschrieben werden. Außerdem ist die T-GM ein in der ITU-Umgebung komplett neu definierter PTP-Instanztyp. Die T-GM führt ebenfalls die Synchronisierung durch. Für die Erfüllung der Performanceanforderungen wird für Telekommunikations-PTP-Instanztypen gefordert, dass zusätzlich zum PTP eine physikalische Frequenzsynchronisierung durchgeführt wird. [35, 45, 46]

End-to-End Delay-Mechanismus

Im G.8275.1 Profil wird der End-to-End Delay-Mechanismus verwendet (vgl. Unterabschnitt 2.4.3).

Alternate Best Master Clock Algorithm (ABCMA)

Im G.8275.1 Profil wird ein alternativer Best Master Clock Algorithmus genutzt. Dabei sind die wesentlichen Änderungen zum BMCA zwei zusätzliche Parameter und die Möglichkeit, dass im Synchronisierungssystem mehrere Telecom Grandmaster Clocks (T-GM) parallel existieren können. Die Synchronisierung eines Systems wird, wie in Unterabschnitt 2.4.2 beschrieben, nur von einer T-GM übernommen. Die Auswahl der besten Synchronisierung erfolgt von jedem Gerät nach dem gleichen Verfahren, wie beim vorgestellten BMCA in Unterabschnitt 2.4.3, wobei andere Parameter ausgewertet werden. Folgende Parameter werden beim ABMCA im G.8275.1 Profil zusätzlich verwendet:

- masterOnly
- localPriority

Beide Parameter müssen für jede Schnittstelle einer Telekommunikations-PTP-Instanz parametrisiert werden. Der Parameter masterOnly ist ein boolescher Wert, der beschreibt, dass eine Schnittstelle nur als Master funktioniert und sich nie als Slave synchronisiert. Damit könnten beispielweise Synchronisierungshierarchien aufgebaut werden. Der Parameter localPriority ist neben dem im Unterabschnitt 2.4.3 vorgestellten Parameter Priority2 im ABMCA eine weitere Möglichkeit, einzelne Schnittstellen einer Telekommunikations-PTP-Instanz zu priorisieren.

Für den ABMCA wird jede Schnittstelle einer Telekommunikations-PTP-Instanz einzeln ausgewertet. Schnittstellen mit dem aktivierten Parameter masterOnly führen den ABMCA nicht weiter durch, da sie nur Master sein können. Alle anderen Schnittstellen einer Instanz werden, wie im BMCA, die Announce-Nachrichten aus. Die Parameterreihenfolge im ABMCA ist: Clock Class, Clock Accuracy, Variance und Priority2. Dann wird für jede Schnittstelle der Parameter localPriority ausgewertet und im letzten Schritt dient die Identity wieder als finales Entscheidungskriterium.

Mit dem ABMCA wird gewährleistet, dass bei verschiedenen möglichen Wegen im MPLS-Weitbereichsnetz die PTP-Synchronisierung über die beste Schnittstelle durchgeführt wird. Weitergehend werden noch Parameter ausgewertet, um doppelt empfangene Nachrichten zu erkennen und bei gleich guten Synchronisierungen die Schnittstelle mit der kürzeren Synchronisierungskette zu verwenden.

Für die Konzeptionierung der zentralen Zeitsynchronisierung ist die Funktionalität des ABMCA nur insofern relevant, dass durch die zusätzlichen Parameter die Möglichkeit besteht, eine Synchronisierungshierarchie aufzubauen. Die Wahl der besten Synchronisierung erfolgt, wie aus Unterabschnitt 2.4.3 bekannt, auch im G.8275.1 Profil dynamisch.

Zusätzliche Nachrichtfelder und Nachrichtenintervalle

Im G.8275.1 Profil werden zusätzliche Flags in den Announce-Nachrichten gesendet. Diese erhalten Informationen über den Zustand der T-GM. Die Flags werden allerdings beim ABMCA nicht berücksichtigt und sind damit nur informativ und nicht weiter relevant. Ein hilfreiches Feld in den Announce-Nachrichten ist der Parameter stepsRemoved. Dieser wird bei jeder PTP-Komponente erhöht und ermöglicht damit eine Bestimmung

der Anzahl der Zwischengeräte der Synchronisierungskette. Im ABMCA erfolgt damit, bei sonst gleicher Qualifizierung, die Wahl der kürzeren Synchronisierungskette. Für die spätere Prüfung des Konzepts kann daraus abgeleitet werden, über wie viele Router die PTP-Nachrichten gesendet werden. Die Nachrichtenintervalle für Announce-, Sync- und Delay-Request-Nachrichten sind im Profil vorgegeben.

Synchronisierungsfehlerbudget

Mit den Performanceanforderungen der Telekommunikations-PTP-Instanztypen werden auch Möglichkeiten zur Betrachtung des Synchronisierungsfehlerbudgets spezifiziert. Die Performance der Instanztypen ist in verschiedene Klassen unterteilt. Eine Betrachtung des Synchronisierungsfehlerbudgets des zentralen Zeitsynchronisierungskonzepts findet in Abschnitt 4.8 statt. [46]

Tabelle 4.3 zeigt ausgewählte Parameter des G.8275.1 PTP-Profiles, die parametrisiert werden müssen. Weiter wird dabei zwischen geräte- und schnittstellenspezifischen Parametern unterschieden.

Tabelle 4.3: Ausgewählte Parameter des ITU-T G.8275.1 PTP-Profiles

Gültigkeit	Parameter	Wert	
Gerät	Profile	ITU-T G.8275.1	
	Version	3.0	
	Domain	24	
	Priority 2	128	
	Announce Receipt Timeout	3	
	Announce Message Rate	8/s	
	Timescale	TAI	
	Clock Type	T-GM, T-BC, T-TC, T-TSC	
	Schnittstelle	Sync Message Rate	16/s
		Delay Request Rate	16/s
Local Priority		128	
Master Only		no	
Delay Mechanism		E2E	
Network Protocol		IEEE 802.3 (Ethernet, (L2))	

4.6 Synchronisierungshierarchie

Die Topologie eines beispielhaften MPLS-Weitbereichsnetzes in Abbildung 2.6 zeigt, dass es mehrere Wege (Links) gibt, mit denen die Router verbunden sind. Die PTP-Nachrichten können durch den ABMCA alle Wege nehmen, wenn das PTP auf den

jeweiligen Schnittstellen parametriert ist. Über den Parameter `localPriority` wäre es weiter möglich, die PTP-Synchronisierung im Netzwerk über bestimmte Wege zu priorisieren. Ohne aktive Veränderung der Prioritäten werden die Wege dynamisch gewählt. Dies ist die Standardeinstellung und soll so ebenfalls im Konzeptaufbau umgesetzt werden. Abbildung 4.8 zeigt die Synchronisierungshierarchie von zentraler Stelle zum Prozessbus-System. Die Gerätebezeichnungen sind dabei an die Namenskonventionen der PTP-Instanztypen im ITU-T G.8275.1 Profil angepasst.

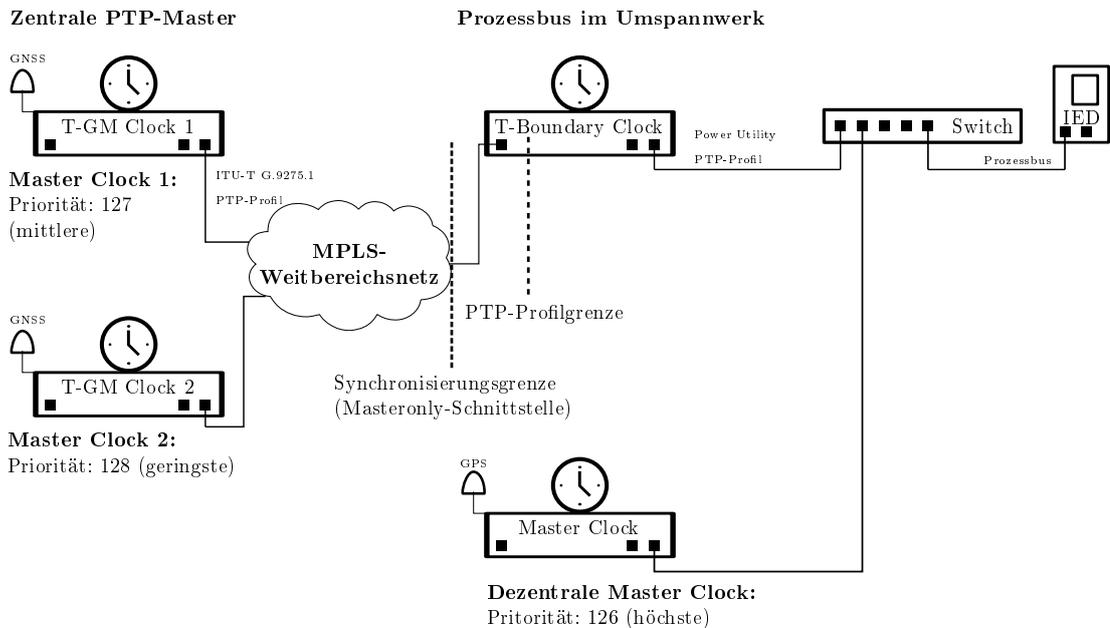


Abbildung 4.8: Synchronisierungshierarchie im Konzeptaufbau

In dem in Unterabschnitt 4.2.4 ermittelten Konzept soll die Synchronisierung des Prozessbus-Systems nur im Redundanzfall als Backup über das MPLS-Weitbereichsnetz erfolgen. Dies würde bedeuten, dass in der PTP-Domain im Normalbetrieb der dezentrale Master die Synchronisierung übernimmt. Um diese Synchronisierungshierarchie zu gewährleisten, soll der Parameter `masterOnly` an der Schnittstelle des Routers, an dem das Prozessbus-System mit dem MPLS-Weitbereichsnetz verbunden ist, verwendet werden. Damit ist immer gewährleistet, dass nur eine Synchronisierung von zentraler Stelle an die verteilten Umspannwerkstandorte erfolgt und die Synchronisierung im MPLS-Weitbereichsnetz unabhängig von dem Master im Prozessbus-System bleibt (vgl. Abbildung 4.8). Für die Anforderung des definierten Verhaltens beim Normalbetrieb wird mit dem Parameter `Priority2` eine Priorisierung der drei möglichen Grandmaster Clocks durchgeführt. Der dezentrale Master erhält die höchste Priorität (entspricht niedrigstem Wert). Die beiden zentralen Uhren erhalten die beiden darauf folgenden, niedrigeren Prioritäten. Damit ist der dezentrale Master als vorzugsweise genutzte Grandmaster Clock definiert.

synchronisierung mit einem MPLS-Weitbereichsnetz sollten PTP und SyncE parallel geplant werden und das Gerätekonzept angepasst werden.

4.8 Zeitfehlerbudget

Für eine theoretische Betrachtung der Qualität der Zeitsynchronisierung wird das Zeitfehlerbudget bestimmt. Zeitfehler können an verschiedenen Stellen in der Synchronisierungskette entstehen. Für das G.8275.1 PTP-Profil werden mögliche Zeitfehler im Standard ITU-T G.8271.1 für „Network limits for time synchronization in packet networks with full timing support from the network“ beschrieben [48]. Das Zeitfehlerbudget setzt sich aus dem Fehler der Telecom Grandmaster Clock, einem dynamischen Fehler der Telecom Boundary Clocks, einem konstanten Fehler der Telecom Boundary Clocks, Asymmetriefehlern der Links und Rauschen in der Endanwendung zusammen. Die Performance der PTP-Instanztypen ist nach Klassen unterteilt, für die unterschiedliche Zeitfehler gelten. Die genauere Betrachtung des Zeitfehlerbudgets im Standard erfolgt anhand vorher definierter Referenzmodelle, bei denen Synchronisierungsketten bestimmter Länge angenommen werden. Bei der Betrachtung wird für das G.8275.1 Profil ein maximaler absoluter Zeitfehler von $1,5 \mu\text{s}$ errechnet. Dabei handelt es sich um die genaueste Anforderung einer Telekommunikationsanwendung (LTE-TDD), für die das PTP-Profil aktuell eingesetzt wird [48]. Dieser Zeitfehler wird bei einer Synchronisierungskette mit 10 T-BCs der Klasse A erreicht. Die Einteilung in Klassen A, B und zukünftig C ermöglicht eine Berücksichtigung der Entwicklung zu immer genaueren Geräten. Im G.8275.1 PTP-Profil wird weiterhin ein Fehlerbudget für den Holdover-Fall angenommen. Dieser tritt auf, wenn die Synchronisierung der jeweiligen Grandmaster Clock zur Zeitreferenz verloren wird. Im Konzept der zentralen Zeitsynchronisierung wird im ersten Schritt allerdings der Normalbetrieb betrachtet. [35]

Im Power Utility Profil wird ebenfalls ein Zeitfehler in Form der Netzwerkzeitungenauigkeit theoretisch beschrieben. Eine Netzwerkzeitungenauigkeit von $1 \mu\text{s}$ wird bei Verwendung von 15 TCs oder 3 BCs erreicht [37]. Die Tabellen 4.4 und 4.5 zeigen die zu berücksichtigenden absoluten Zeitfehler für die in den PTP-Profilen verwendeten Komponenten.

Tabelle 4.4: Theoretische Werte des absoluten Zeitfehlers im ITU-T G.8275.1 PTP-Profil [48]

Komponente	absoluter Zeitfehler	Geltungsbereich
T-GM	100 ns	pro Gerät
T-BC	50 ns	pro Gerät
T-TSC	50 ns	pro Gerät
Dynamischer Fehler	200 ns	für Kette von max. 20 T-BC
Link-Asymmetrie	-	Link abhängig
Endanwendung	150 ns	pro T-TSC

Tabelle 4.5: Theoretische Werte des absoluten Zeitfehlers im Power Utility Profil IEC 61850-9-3-2016 [37]

Komponente	absoluter Zeitfehler	Geltungsbereich
GM	250 ns	pro Gerät
BC	200 ns	pro Gerät
TC	50 ns	pro Gerät
Link-Asymmetrie	25 ns	wird bei Berechnung vernachlässigt [37]

Es ist zu erkennen, dass die Standards der IEC/IEEE und der ITU unterschiedliche Ansätze und Betrachtungstiefen haben. Beim Power Utility Profil werden Asymmetrien der Links im Standard erwähnt, aber in der Berechnung nicht betrachtet. Außerdem werden keine dynamischen Fehler berücksichtigt. Asymmetriefehler können in Weitbereichsnetzen durch verschiedene Wellenlängen, Muffen in Erdkabeln oder verschieden lange Fasern auftreten. In beiden Profilen ist es möglich, durch Parameter bekannte Asymmetriefehler zu kompensieren. In der Betrachtung des Zeitfehlerbudgets des G.8275.1 Profils wird für verbleibende, unkompensierte Asymmetriefehler ein Asymmetriefehlerbudget eingerechnet. In kleineren Netzen innerhalb eines Umspannwerks und bei Verwendung von gleich langen Patch-Kabeln sollten diese Fehler klein ausfallen. Von daher werden diese, wie bei der Berechnung im Power Utility Profil, vernachlässigt. Weiter ist es schwierig, die Boundary Clock, die zwischen den Profilen wechselt, einzuordnen, da zudem auch die physikalische Frequenzsynchronisierung vernachlässigt wird. Fehler durch die vernachlässigte physikalische Frequenzsynchronisierung sind jedoch vermutlich mit dem dynamischen Zeitfehlerbudget von 200 μ s bereits ausreichend berücksichtigt. In der Berechnung wird die Boundary Clock als Telecom Slave Clock (T-TSC) und als Telekommunikations-Endanwendung mit einem absoluten Zeitfehler von 200 μ s berücksichtigt. Tabelle 4.6 zeigt die Berechnung des maximalen absoluten Zeitfehlers mit den beschriebenen Vereinfachungen.

Tabelle 4.6: Gegenüberstellung des maximalen absoluten Zeitfehlers beider Synchronisierungsvarianten

Dezentrale Synchronisierung		Zentrale Synchronisierung	
Komponente	Fehler	Komponente	Fehler
GM	250 ns	T-GM	100 ns
		2 x T-BC	100 ns
		Dynamischer Fehler	200 ns
		Link-Asymmetrie	-
		T-Endanwendung	150 ns
		T-Slave Clock	50 ns
TC (Prozessbusswitch)	50 ns	TC (Prozessbusswitch)	50 ns
Gesamtfehler	± 300 ns	Gesamtfehler	± 650 ns

Eine realistische Berechnung des Zeitfehlers ist aufgrund der vielen zu betrachtenden Parameter kaum möglich. Die theoretische Berechnung soll als Anhaltspunkt für den Vergleich der Konzepte dienen. Mit einem Gesamtfehler von ± 650 ns kann das geplante Konzept die Anforderungen an die Genauigkeit erfüllen. Mit einem Zeitfehler von maximal ± 650 ns für die zentrale Synchronisierungskette bleibt weiterhin ein Zeitfehlerbudget von ± 350 ns für weitere Komponenten des Prozessbus-Systems oder weitere MPLS-Router bis zum Erreichen des in den Anforderungen definierten maximalen Zeitfehlerbudgets von $1 \mu\text{s}$.

Bestimmte Fehlerquellen, wie die Link-Asymmetrie und der Einfluss der Vereinfachungen, lassen sich nicht vorhersagen. Eine höhere Sicherheit über den absoluten Zeitfehler kann mit einer Messung erreicht werden. Für die Funktionalität der Geräte wird dieser Fehler keinen Einfluss haben. Im Normalbetrieb verteilen die Grandmaster Clocks die Synchronisierungsnachrichten mit einer Genauigkeit von 100 ns. Das betrachtete Zeitfehlerbudget beschreibt zusätzlich die Abweichung der Synchronisierung durch die Synchronisierungskette und lässt Rückschlüsse über die daraus resultierenden möglichen Messfehler der Sampled Value-Streams zu.

5 Realisierung des zentralen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts

Nachdem im vorherigen Kapitel die Entwicklung des Konzepts zur zentralen PTP-Zeitsynchronisierung in Umspannwerken beschrieben wurde, befasst sich dieses Kapitel mit dessen Realisierung. Dafür beschreiben die folgenden Abschnitte den Hardwareaufbau, die Parametrierung der Geräte und die Inbetriebnahme des Konzeptaufbaus.

5.1 Hardwareaufbau

Im ersten Schritt des Konzeptaufbaus wurden die Geräte in die Laboraufbauten integriert und eine Spannungsversorgung hergestellt. Im nächsten Schritt erfolgte die Herstellung der Netzwerkverbindungen zwischen den Geräten. Dafür wurden Twisted-Pair-Kabel sowie LWL-Singlemode Kabel zwischen den MPLS-Routern eingesetzt. Aufgrund eines Kompatibilitätsproblems wurde der Aufbau an dieser Stelle angepasst. Im Hardwarepool der Labore befand sich kein Medienwandler zwischen LWL-Singlemode und Twisted-Pair Kupferkabeln. Diese Wandlung wird zwischen den MPLS-Routern und der T-BC benötigt. Von daher wurde ein zusätzliches Gerät als Telecom Transparent Clock (T-TC) (vgl. Unterabschnitt 4.5.3) verwendet, das beide Medien unterstützt. Der Einsatz einer Transparent Clock im ITU-T G.8275.1 Profil birgt das Risiko von Paketschleifen, da die T-TC nicht am alternativen Besten Master Clock Algorithmus (ABMCA) teilnimmt. An der geplanten Position der T-TC im Konzeptaufbau befinden sich keine doppelten Wege, wodurch der Einsatz möglich war. Abbildung 5.1 zeigt den Konzeptaufbau mit der zusätzlichen Telecom Transparent Clock (vgl. Abschnitt 4.4).

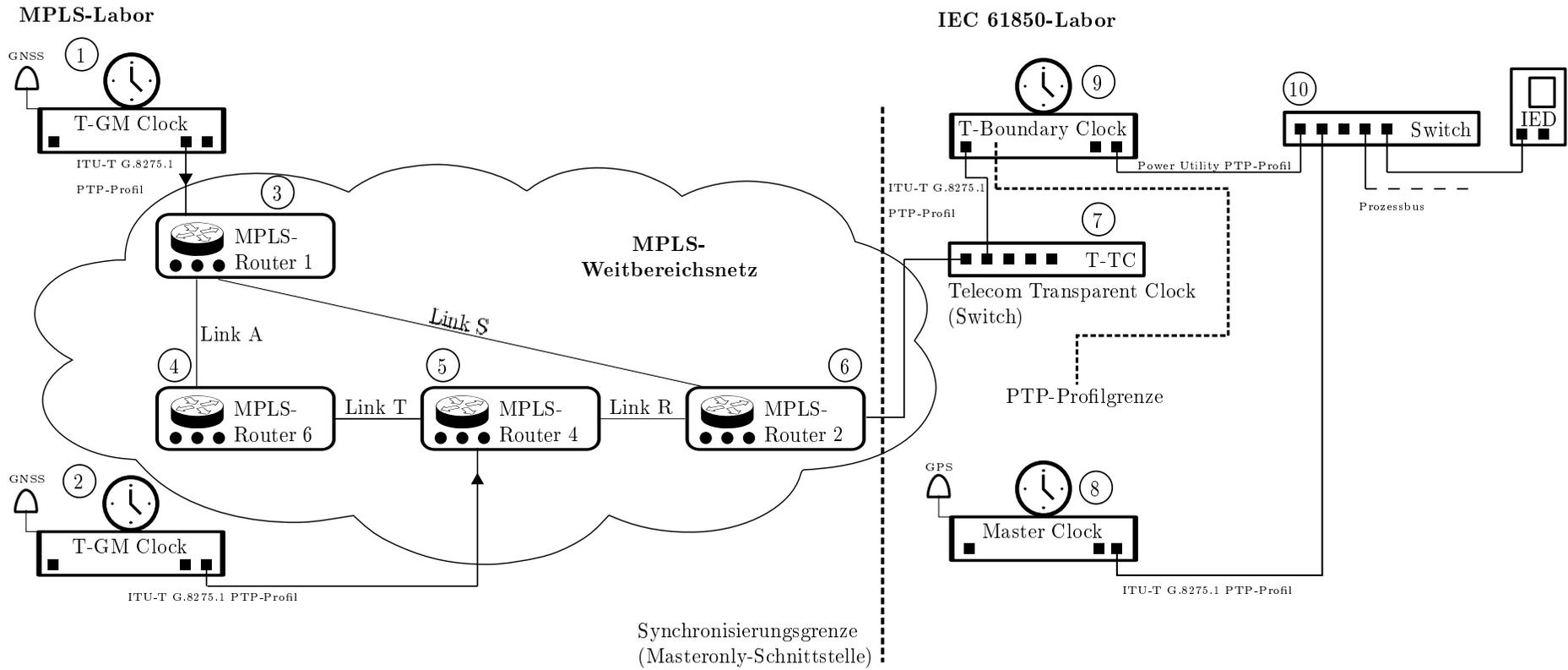


Abbildung 5.1: Angepasster Konzeptaufbau der zentralen PTP-Zeitsynchronisierung

5.2 Parametrierung

Im Sekundärtechnik IEC 61850 Prüflabor befindet sich der Prozessbus in einem anderem IP-Bereich als der Stationsbus, über den auf die Geräte zugegriffen werden kann (vgl. Unterabschnitt 2.3.3). Die aus dem Bestandsaufbau verwendeten Geräte waren bereits in die Netzwerke integriert. Der Zugriff auf die neuen Geräte erfolgte über ein zusätzlich erstelltes Subnetz. Die Parametrierung der zentralen Master Clocks sowie des MPLS-Netzes wurde in Zusammenarbeit mit den Abteilungen durchgeführt.

Bei der Parametrierung des PTP-Profiles bleiben herstellerabhängig unterschiedlich viele Parameter einstellbar. Für die PTP-Parametrierung wurden außer bestimmter Parameter die Default-Einstellungen übernommen. Bei der Parametrierung des Hirschmann Switch als Telecom Boundary Clock (vgl. ⑨) trat ein weiteres Problem auf. Der Hirschmann Switch unterstützt als einziges Gerät im Aufbau keine definierten PTP-Profile (vgl. Marktanalyse 4.3). Dies wird im Konzept als Vorteil für den Einsatz als Telecom Boundary Clock gesehen, da damit keine Restriktionen bezüglich der Parametrierung bestehen dürften. Die Schnittstellen sollten laut Marktanalyse und Herstelleraussage individuell konfigurierbar sein. Es ließen sich allerdings nicht die im ITU-T G.8275.1 Profil geforderten Nachrichtenintervalle wählen. Da die Nachrichtenintervalle in der Synchronisierungskette von dem MPLS-Router vorgegeben werden, kann angenommen werden, dass dadurch keine Einschränkungen der Synchronisierung zu erwarten sind. Mit dem Problem der nicht möglichen physikalischen Frequenzsynchronisierung ist der Hirschmann Switch als Telecom Boundary Clock zwischen den PTP-Profilen entgegen der ursprünglichen Annahme trotzdem ungeeignet. Für ein generalisiertes Konzept sollte ein Alternativgerät evaluiert werden. Die Aufzählung ergänzt die Abbildung 5.1 um die Gerätetypen mit den für den Konzeptaufbau wichtigen Eigenschaften und zeigt jeweils die PTP-spezifische Parametrierung (vgl. Tabelle 4.3 für ITU-T G.8275.1 PTP-Profil und [37] für Power Utility Profil).

① Zentraler Master 1 Meinberg Lantime M1000

Relevante Eigenschaften:

- GNS-System: Global Positioning System (GPS)
- SyncE Master für MPLS-Router

PTP-Parametrierung:

- Betriebsmodus: PTP v2
- PTP-Profil: Telecom ITU-T G.8275.1
- Einstellungen gemäß profilspezifischer Vorauswahl mit Ausnahme von:
 - Priority2: 127

② Zentraler Master 2 Meinberg Lantime M1000

Relevante Eigenschaften:

- GNS-System: Galileo

PTP-Parametrierung:

- wie ① mit Ausnahme von:

- Priority2: 128

③ ④ ⑤ **MPLS Router 1,4,6 Nokia 7705 SAR**

Relevante Eigenschaften:

- Taktsynchronisierung: SyncE

PTP-Parametrierung:

- PTP v2: verwendete Schnittstellen gemäß Link S,R,T,A (vgl. Abbildung 5.1)
- Betriebsmodus: Boundary (entspricht Telecom Boundary Clock vgl. Unterabschnitt 4.5.3)
- PTP Profil: Telecom ITU-T G.8275.1
- Einstellungen gemäß profilspezifischer Vorauswahl (vgl. Tabelle 4.3 und ITU-T G.8275.1 Profil [35])

⑥ **MPLS Router 2 Nokia 7705 SAR**

Relevante Eigenschaften:

- wie ③ ④ ⑤

PTP-Parametrierung:

- wie ③ ④ ⑤ mit Ausnahme der Schnittstelle 1/1/6 mit:
 - Master Only: on

⑦ **Telecom Transparent Clock Ruggedcom RST 2228 Switch**

PTP-Parametrierung:

- Betriebsmodus: E2E TClock (entspricht Telecom Transparent Clock)
- PTP-Profil: Custom Profile (Weitere Einstellungen gemäß G.8275.1 Profil)
- Transport Protokoll: Layer 2 Multicast
- Domain: 24
- Delay-Mechanismus: End-to-End

⑧ **Dezentrale Master Clock Meinberg MicroSyncRX 101**

Relevante Eigenschaften:

- GNS-System: Global Positioning System (GPS)

PTP-Parametrierung:

- Betriebsmodus: PTP v2
- PTP-Profil: IEC 61850-9-3 Power Utility Profil (vgl. [37])
- Einstellungen gemäß profilspezifischer Vorauswahl mit Ausnahme von:
 - Domain: 24
 - Priority2: 126

⑨ **Boundary Clock Hirschmann GRS1040 Switch**

PTP-Parametrierung (allgemein):

- Betriebsmodus: PTP v2, Boundary Clock
- Domain: 24

PTP-Parametrierung Schnittstelle zu MPLS-Router 2 (Nicht alle Einstellungen gemäß G.8275.1 Profil möglich):

- Sync-Intervall: 0.125 s
- Delay-Mechanismus: E2E
- Übertragungsprotokoll: IEEE 802.3 (L2)
- Announce-Intervall: 1 s
- Announce-Timeout-Intervall: 3

PTP-Parametrierung Schnittstelle zu Prozessbusswitch:

- Einstellungen gemäß Power Utility Profil (vgl. [37])

⑩ Prozessbusswitch Ruggedcom RST 2228 Switch

PTP-Parametrierung:

- Betriebsmodus: P2P TClock (entspricht Transparent Clock)
- PTP-Profil: IEC 61850-9-3
- Weitere Einstellungen gemäß profilspezifischer Vorauswahl mit Ausnahme von:
 - Domain: 24

5.3 Inbetriebnahme

Mit erfolgter Parametrierung der Laborgeräte wurde der Konzeptaufbau in Betrieb genommen. Für die Parametrierung mussten die Geräte eingeschaltet sein. Änderungen der Parametrierungen setzen die Geräte sofort um. Nach einem Neustart standen nach einigen Minuten alle Geräte zur Verfügung. Gleichzeitig erfolgte durch den Neustart auch die Prüfung, dass die jeweilige Parametrierung gespeichert wurde. Zur Kontrolle der erfolgreichen Inbetriebnahme wurden die Statusinformationen der einzelnen Geräte überprüft. Der Konzeptaufbau wurde damit mit einigen Anpassungen erfolgreich umgesetzt.

6 Prüfung des zentralen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts

Aus dem Kapitel der Konzeptionierung resultiert ein Konzept einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung und aus der Realisierung resultiert ein Laboraufbau dieses Konzepts mit den notwendigen Anpassungen. Im Rahmen dieses Kapitels wird nun geprüft, ob die definierten Anforderungen aus Kapitel 3 eingehalten werden. Dafür werden zuerst die angewendeten Prüfverfahren vorgestellt. Weiter wird die Erfüllung der Umsetzungsanforderungen für den Konzeptaufbau betrachtet. Im nächsten Schritt soll zunächst die Funktionalität der Synchronisierung geprüft werden. Anschließend erfolgt die Prüfung des Verhaltens im Normalbetrieb und im Redundanzfall. Im letzten Schritt wird die Performance des Konzeptaufbaus geprüft und mit den Zeitanforderungen verglichen. Mit der Prüfung des Konzeptaufbaus wird die Erfüllung der allgemeinen Anforderungen durch das Konzept beurteilt. Die Ergebnisse aller geprüften Anforderungen werden abschließend in Tabelle 6.7 zusammengefasst.

6.1 Prüfverfahren

Für die Prüfung der Synchronisierung und für die Messungen von Synchronisierungsfehlern werden Software-Werkzeuge und Messgeräte benötigt, die in den folgenden Unterabschnitten beschrieben werden.

6.1.1 Wireshark

Wireshark ist ein Netzwerk-Protokoll-Analysator, mit dem sich verschiedenste Protokolle analysieren lassen. Dafür können Netzwerkpakete, die über eine vorher ausgewählte Schnittstelle gesendet werden, mitgeschnitten werden. Wireshark erkennt die Protokolle und stellt die Pakete als zeitlich sortierte Liste dar. Die Inhalte der Pakete werden bei bekannten Protokollen protokollspezifisch aufgeschlüsselt. Die empfangenen Pakete können außerdem mit Filtern vorgefiltert werden. Diese sogenannten Display-Filter reduzieren die Anzahl der angezeigten Pakete auf die für den Anwendungsfall relevanten Pakete. Wireshark wird als Prüf-Software eingesetzt, um die PTP-Announce-Nachrichten zu analysieren. Diese bieten Aufschluss über den Status der Synchronisierung (vgl. Unterabschnitt 2.4.3). Die Abbildung 6.1 zeigen die Aufschlüsselung einer Announce-Nachricht mit Wireshark. [49, 50]

```

> Ethernet II, Src: Hirschma_9c:80:00 (64:60:38:9c:80:00), Dst: IEEEI&MS_00:00:00 (01:1b:19:00:00:00)
▼ Precision Time Protocol (IEEE1588)
  > 0000 .... = transportSpecific: 0x0
    ... 1011 = messageId: Announce Message (0xb)
  0000 .... = Reserved: 0
    ... 0010 = versionPTP: 2
  messageLength: 64
  subdomainNumber: 24
  Reserved: 0
  ▼ flags: 0x003c
    0... .. = PTP_SECURITY: False
    .0.. .. = PTP profile Specific 2: False
    ..0. .. = PTP profile Specific 1: False
    .... .0.. .. = PTP_UNICAST: False
    .....0. .... = PTP_TWO_STEP: False
    .....0 .... = PTP_ALTERNATE_MASTER: False
    .....1. .... = FREQUENCY_TRACEABLE: True
    .....1 .... = TIME_TRACEABLE: True
    .....1... = PTP_TIMESCALE: True
    .....1.. = PTP.UTC_REASONABLE: True
    .....0. = PTP.LI_59: False
    .....0 = PTP.LI_61: False
  > correction: 0,000000 nanoseconds
  Reserved: 0
  > ClockIdentity: 0x646038fffe9c8000
  SourcePortID: 8
  sequenceId: 80
  control: Other Message (5)
  logMessagePeriod: 0
  originTimestamp (seconds): 1616071283
  originTimestamp (nanoseconds): 517664551
  originCurrentUTCOffset: 37
  priority1: 128
  grandmasterClockClass: 6
  grandmasterClockAccuracy: The time is accurate to within 100 ns (0x21)
  grandmasterClockVariance: 20061
  priority2: 127
  grandmasterClockIdentity: 0xec4670fffe0a9b21
  localStepsRemoved: 3
  TimeSource: GPS (0x20)

```

Abbildung 6.1: Mit Wireshark aufgeschlüsselte Announce-Nachricht

Relevant sind die markierten Parameter grandmasterClock, Clock Class und Accuracy, die den Ursprung der Synchronisierung zeigen und eine Beurteilung der Qualität dieser Synchronisierung ermöglichen (vgl. Unterabschnitt 2.4.6). Im Ethernet-Frame-Header ist außerdem abzulesen, welches Gerät das Paket gesendet hat.

6.1.2 Omicron Daneo 400

Der Omicron Daneo 400 ist ein von der Omicron Electronics GmbH als Multimeter und Störschreiber entwickeltes Gerät, um u.a. IEC 61850 Sampled Values und GOOSE-Nachrichten aufzuzeichnen. Der Daneo hat drei Ethernet Schnittstellen, um im Normalbetrieb einen IEC 61850-Prozessbus zu überwachen. Der Daneo kann wie ein IED über PTP synchronisiert werden. Weiter unterstützt der Daneo einen PTP-Sniffer-Modus. Dabei werden die Signale an den Schnittstellen auf PTP-Nachrichten untersucht und Informationen über die Synchronisierung angezeigt. Diese Übersicht wird in den Prüfungen verwendet, um die Synchronisierung im Prozessbus-System zu betrachten und nachzuvollziehen. [51]

6.1.3 1PPS-Vergleich

Bei dem 1-Pulse-Per-Second (1PPS)-Vergleich wird die Synchronisierung verschiedener Geräte anhand von 1PPS-Signalen verglichen. Für ein 1PPS-Signal wird zu Beginn einer neuen Sekunde (Top of a Second) ein Impuls ausgegeben. Die steigenden Flanken der Impulse werden auf einem Oszilloskop betrachtet und aus der Zeitdifferenz kann der Synchronisierungsfehler bestimmt werden. Im Konzeptaufbau bieten die Meinberg Geräte (Lantime und MicroSync) die Möglichkeit einen 1PPS-Ausgang zu parametrieren. Um die PTP-Synchronisierung an einer Stelle im Synchronisierungsnetz zu prüfen, kann der Omicron Ticro verwendet werden. Der Omicron Ticro ist ein Zeitkonverter, der sich mit PTP synchronisiert und daraus verschiedene analoge Zeitcodes generiert. Der Ticro bietet damit eine Möglichkeit, an einer beliebigen Stelle im Synchronisierungsnetzwerk ein 1PPS-Signal zu generieren, das mit anderen 1PPS-Signalen in Hinblick auf den Synchronisierungszeitfehler verglichen werden kann. Abbildung 6.2 zeigt das Prinzip eines 1PPS-Vergleichs. [52]

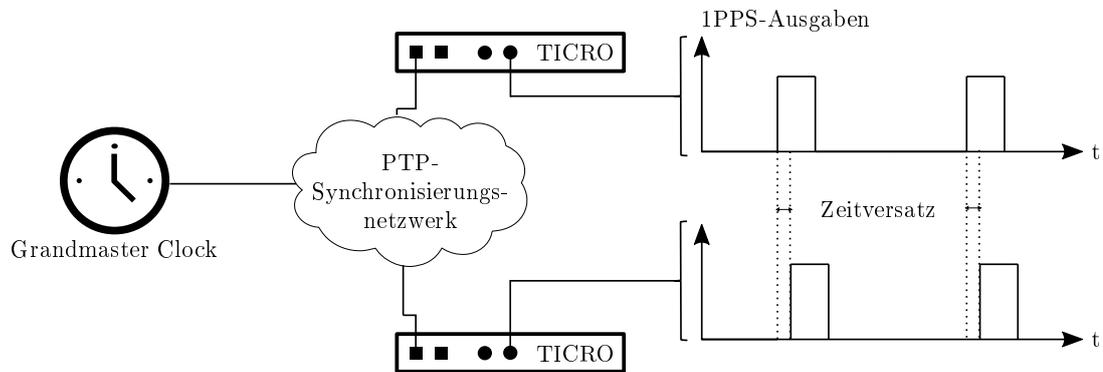


Abbildung 6.2: Prinzip eines 1PPS-Vergleich mit mehreren Omicron Ticro Messgeräten

Für den Vergleich der 1PPS-Signale wird in den Prüfungen ein Oszilloskop der Serie PicoScope¹ 2000 verwendet. Die 1PPS-Schnittstellen des Ticro und der Meinberg Geräte sind in Form von BNC-Buchsen ausgeführt. Diese BNC-Buchsen werden in den Prüfungen über angepasste BNC-Leitungen mit dem Oszilloskop verbunden. Alle Komponenten haben einen definierten Wellenwiderstand von $50\ \Omega$. Die BNC-Leitungen haben, um Messfehler durch Laufzeiten zu verhindern, immer die gleiche Länge.

6.2 Erfüllung der Umsetzungsvorgaben

Aus dem Abschnitt der Konzeptionierung und der Realisierung gehen die Punkte hervor, bei denen durch die Umsetzungsvorgaben Probleme für den Konzeptaufbau auftraten. Zuerst wird das PRP-Redundanzprotokoll im Konzeptaufbau für das Prozessbus-System nicht verwendet. Mit der Auswahl der Geräte lässt sich dies nicht realisieren. Mit einer

¹PicoScope ist ein Hersteller für USB-Oszilloskope als Alternative zu üblichen Tischozilloskopen [53]

Anpassung der Geräte wäre es allerdings möglich (vgl. Unterabschnitt 4.4.5). Damit wird die Anforderung als teilweise erfüllt angesehen.

Eine weitere Einschränkung gab es bei der Telecom Boundary Clock. Die Verwendung des Hirschmann Switch erfüllt die Anforderung der physikalischen Frequenzsynchronisierung im ITU-T G.8275.1 PTP-Profil nicht. Zusätzlich ist die profilspezifische Parametrierung der Nachrichtenintervalle sowie lokaler Prioritäten nicht möglich. Dies schränkt die verwendete Synchronisierungsrichtung von zentraler Stelle nicht ein, allerdings ist damit nicht gewiss, dass das Gerät gemäß dem ITU-T G.8275.1 PTP-Profil vollumfänglich funktioniert. Da vom Standard abgewichen wird, müsste für alle möglichen Eventualitäten geprüft werden, ob der Hirschmann Switch wie erwartet arbeitet. Bei vollständiger Unterstützung des Profils wäre umgekehrt zu erwarten, dass der Hersteller die Kompatibilität mit dem PTP-Profil in allen Aspekten geprüft hat. Eine derart detaillierte Prüfung der PTP-Implementierung wurde nicht durchgeführt. Insgesamt ist damit die Anforderung eines Konzeptaufbaus mit den in den Laborumgebungen vorhandenen Geräten nicht entsprechend aller in den Standards geforderter Anforderungen erfüllt. Die Marktanalyse in Abschnitt 4.3 zeigt, dass dies mit anderen Geräten als Telecom Boundary Clock möglich wäre (z.B. MicroSync, Lantime). Der Konzeptaufbau konnte trotzdem unter der Akzeptanz einer etwas schlechteren Zeitperformance an der T-BC realisiert werden.

6.3 Prüfung der Zeitsynchronisierung und des Verhaltens des Prozessbus-Systems im Konzeptaufbau

Für die Überprüfung des zentralen PTP-Zeitsynchronisierungskonzepts wird die Zeitsynchronisierung des Prozessbus-Systems im Konzeptaufbau geprüft. Dabei wird zwischen den zwei Szenarien Normalbetrieb und Redundanzfall unterschieden. Der Redundanzfall ist im Konzept der eigentliche Fall der zentralen Zeitsynchronisierung. Der Wechsel zwischen beiden Szenarien soll ebenfalls betrachtet werden. Im Normalbetrieb bildet der dezentrale Master den Grandmaster für das Prozessbus-System. Wenn die Verbindung zum dezentralen Master getrennt wird, tritt der Redundanzfall ein und die zentral synchronisierte T-BC übernimmt die Synchronisierung des Prozessbus-Systems. Der Grandmaster ist dann eine der zentralen T-GMs. Der Prüfaufbau entspricht größtenteils dem Konzeptaufbau. Zum Zeitpunkt der Prüfung war allerdings nur eine der zentralen T-GMs im MPLS-System vorhanden, da die andere T-GM für anderweitige Arbeiten eingesetzt wurde. Abbildung 6.3 zeigt den Prüfaufbau und ergänzt die Abbildung des Konzeptaufbaus 5.1 um die letzten 4 Hexadezimal-Zahlen der Kennungen (IDs) der Uhren. Damit kann in der Prüfung erkannt werden, von welchen Geräten die Synchronisierung ausgeht.

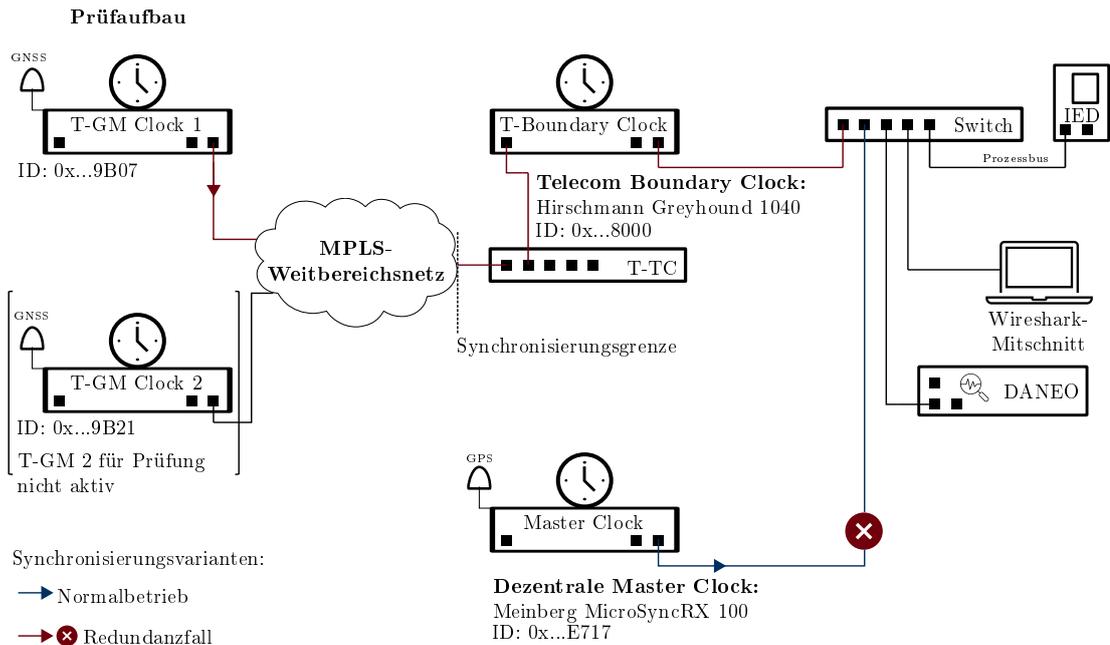


Abbildung 6.3: Prüfaufbau zur Prüfung der Synchronisierung bei Normalbetrieb und im Redundanzfall

In der Prüfung wird wie folgt vorgegangen: Das System wird im Normalbetrieb gestartet und die Zeitsynchronisierung wird betrachtet. Für die Simulation des Redundanzfalls wird die Verbindung des dezentralen Masters zum Prozessbus getrennt. Damit wird die Übernahme der zentralen Synchronisierung über die T-BC erzwungen. Bei dieser Synchronisierungsvariante wird wieder die Zeitsynchronisierung betrachtet. Dann folgt der Wechsel vom Redundanzbetrieb zurück zum Normalbetrieb, indem die Verbindung des dezentralen Masters wieder hergestellt wird. Während der Wechsel werden mit Wireshark die PTP-Nachrichten am Prozessbus switch aufgenommen. Außerdem wird die Synchronisierung mit dem PTP-Sniffer-Modus des Daneo betrachtet. Die Abbildung 6.4 zeigen den Status des PTP-Sniffers im Normalbetrieb.

PTP Sniffer - UW2030 (GH258H)

Status	Port	Protokoll	Domäne
✓	A	IEEE 802.3	0
✓	A	IEEE 802.3	24

PTP-Quellen

PTP-Master

- ▶ 4@64-60-38-FF-FE-9C-80-00 (Inaktiv)
- ▲ 1@EC-46-70-FF-FE-0C-E7-17 (Best Master)
 - Power Profile GM ID --
 - Power Profile-Version --
 - MAC-Adresse EC-46-70-0C-E7-17
 - VLAN ID nicht vorhanden
 - VLAN Priorität nicht vorhanden
 - GM identity EC-46-70-FF-FE-0C-E7-17
 - GM priority 1 128
 - GM priority 2 128
 - GM clock accuracy WITHIN_100_NS (0x21)
 - GM clock class PRIMARY_REF_PTP (6)
 - GM clock variance 13563
 - Qualified True
 - Alternate False
 - TLV count 0
 - UTC offset 37
 - UTC offset valid True
 - Leap 59 False
 - Leap 61 False
 - Time traceable True
 - Frequency traceable True
 - PTP time scale True
 - Zeitquelle GPS (0x20)

Details der PTP-Quelle Verwendbar

Delay Mechanismus	Peer-To-Peer
Announce Intervall	1 s
Sync Intervall	1 s
Other Peers	1
Best Master verfügbar	True
Paketfehler	0

Abbildung 6.4: Daneo PTP-Sniffers: Synchronisierung durch dezentralen Master (Normalbetrieb)¹

Links auf dieser Abbildung werden die durch den Sniffer gefundenen PTP-Quellen dargestellt. Die Quelle an Port A mit der Domäne 24 (engl. Domain) ist das zu betrachtende PTP-Synchronisierungssystem. Rechts in der Abbildung werden Informationen über den PTP-Master angezeigt. Mit der ID $0x...E717$ ist der dezentrale Master als Grandmaster erkennbar. Die T-BC mit der ID $0x...8000$ ist inaktiv. Weiter werden die Parameter Clock Class und Clock Accuracy angezeigt, die die Qualität der Synchronisierung messen. Die Clock Class 6 bedeutet, dass der Grandmaster mit einer internationalen Zeitreferenz synchronisiert ist (vgl. Tabelle 2.4.3) Eine Clock Accuracy von („within 100 ns“, dt. „Innerhalb 100 ns“) bedeutet die genaueste, im Synchronisierungssystem, anzeigbare Synchronisierungsgenauigkeit. Unten links in der Abbildung werden weitere Details der PTP-Quelle angezeigt. Die Voranalyse „Verwendbar“ lässt auf eine erfolgreiche Synchronisierung schließen. Weiter sind die für das Power Utility Profil spezifischen Parameter wie der Peer-to-Peer Delay-Mechanismus und die Nachrichtenintervalle von 1 s erkennbar. (vgl. [37]). Mit diesen Erkenntnissen zeigt die Prüfung, dass die Synchronisierung des Prozessbus-Systems im Normalbetrieb durch den dezentralen Master Meinberg MicroSync erfolgreich ist.

Tabelle 6.1 zeigt eine Auswahl der mit Wireshark aufgenommenen PTP-Announce-Nachrichten. Dabei sind neben dem Zeitstempel die Nachrichtenquelle, die Grandmaster ID, die Clock Class und die (Clock) Accuracy gezeigt.

¹Anmerkung: Bei der Auswertung der Prüfung fällt in der Abbildung auf, dass die BMCA-Parameter Priority2 zum Zeitpunkt der Bandaufnahme noch nicht richtig eingestellt waren. Dies wurde später angepasst und aufgrund der unterschiedlichen Varianz ist der dezentrale Master gegenüber der T-GM im BMCA auch ohne die Priority2 bevorzugt. Das Verhalten der Uhren ist damit trotzdem wie im Konzept vorgesehen.

Tabelle 6.1: Ausgewählte Announce-Nachrichten am Prozessbusswitch beim Normalbetrieb und beim Wechsel der Synchronisierung vom dezentralen Master zur zentralen T-GM ¹

Time	Source	Info	GM ID	Clock Class	Clock Accuracy
0.000000	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
0.999949	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
5.201788	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
6.201930	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
7.202141	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns

Die Tabelle 6.1 zeigt, dass die ersten beiden Announce-Nachrichten, wie auch vom PTP-Sniffer gezeigt, im Sekundentakt gesendet werden. Diese zeigen den in Abbildung 6.4 betrachteten Normalbetrieb. Die charakterisierenden Parameter Clock Class und Accuracy sind wie erwartet gesetzt. Der dezentrale Master Meinberg MicroSync ist gleichzeitig der Ursprung der Nachricht und die Grandmaster Clock (ID: 0x...E717). Weiter ist zu erkennen, was passiert, wenn die Verbindung zum dezentralen Master getrennt wird. Es werden für etwa 3 s keine Announce-Nachrichten gesendet. Dann wird im Hirschmann Switch als T-BC (ID: 0x...8000) das Announce-Timeout-Intervall (vgl. Unterabschnitt 2.4.6) überschritten und die T-BC beginnt, Announce-Nachrichten zu senden. Die Quelle der Announce-Nachrichten ist die T-BC (ID: 0x...8000). Die Grandmaster ID in den Announce-Nachrichten ist allerdings die ID der zentralen T-GM (ID: 0x...9B07). Außerdem ist zu erkennen, dass die Announce-Nachrichten wieder im Sekundentakt gesendet werden. Die Parameter Clock Class und Accuracy haben die gleichen Werte wie bei der Synchronisierung durch den dezentralen Master. Diese Werte lassen auf eine ebenfalls erfolgreiche Synchronisierung schließen. Das Verhalten der Übernahme der Synchronisierung durch die T-BC im Redundanzfall kann bestätigt werden. Zusätzlich wird der Daneo PTP-Sniffer in Abbildung 6.5 betrachtet.

¹Die vollständigen Wireshark-Aufzeichnungen befinden sich im Anhang zur Arbeit auf der CD und können beim Erstgutachter eingesehen werden.

PTP Sniffer - UW2030 (GH258H)

PTP Quellen

Status	Port	Protokoll	Domäne
✓	A	IEEE 802.3	0
✓	A	IEEE 802.3	24

Details der PTP-Quelle Verwendbar

Delay Mechanismus	Peer-To-Peer
Announce Intervall	1 s
Sync Intervall	1 s
Other Peers	1
Best Master verfügbar	True
Paketfehler	0

PTP-Master

◀ **4@64-60-38-FF-FE-9C-80-00 (Best Master)**

Power Profile GM ID	--
Power Profile-Version	--
MAC-Adresse	64-60-38-9C-80-00
VLAN ID	nicht vorhanden
VLAN Priorität	nicht vorhanden
GM identity	EC-46-70-FF-FE-0A-9B-07
GM priority 1	128
GM priority 2	128
GM clock accuracy	WITHIN_100_NS (0x21)
GM clock class	PRIMARY_REF_PTP (6)
GM clock variance	20061
Qualified	True
Alternate	False
TLV count	0
UTC offset	37
UTC offset valid	True
Leap 59	False
Leap 61	False
Time traceable	True
Frequency traceable	True
PTP time scale	True
Zeitquelle	GPS (0x20)

▶ 1@EC-46-70-FF-FE-0C-E7-17 (Inaktiv)

Abbildung 6.5: Daneo PTP-Sniffer: Synchronisierung über T-BC und zentralen Grandmaster (Redundanzfall)

Die Abbildung 6.5 zeigt die gleichen Parameter, wie für Tabelle 6.1 nach dem Wechsel zur zentralen Synchronisierung beschrieben. Auf der rechten Seite der Abbildung 6.5 ist nun zu erkennen, dass die T-BC (ID: 0x...8000) aktiv ist. Der Grandmaster des Systems ist im Feld GM Identity abzulesen und ist die T-GM (ID: 0x...9B07). Der dezentrale Master (ID: 0x...E717) ist inaktiv. Damit ist das Prozessbus-System in Redundanzfall über die T-BC durch eine zentrale T-GM synchronisiert. Der Daneo PTP-Sniffer trifft auch hier die Voranalyse „Verwendbar“. Dies lässt auf eine ebenfalls erfolgreiche Synchronisierung schließen. Die weiteren in der Abbildung gezeigten Parameter sind, bis auf die ID des Grandmasters, die gleichen Parameter wie im Normalbetrieb und spezifisch für das Power Utility Profil. Damit ist der Wechsel zwischen den Profilen ITU-T G.8275.1 und Power Utility Profil im Hirschmann Switch als T-BC erfolgreich. Im letzten Schritt der Prüfung wird die Verbindung zum dezentralen Master wieder hergestellt. Der Wechsel zurück von der Synchronisierung über die T-BC zum dezentralen Master wird in Tabelle 6.2 betrachtet.

Tabelle 6.2: Ausgewählte Announce-Nachrichten am Prozessbusswitch beim Wechsel der Synchronisierung über die T-BC zum dezentralen Master

Time	Source	Info	GM ID	Clock Class	Clock Accuracy
0.000000	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
0.999846	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
1.795314	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
2.000114	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
2.795470	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
3.000279	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
3.795448	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
4.000091	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
4.795456	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
5.000305	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
5.795392	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
6.000682	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9B07	6	The time is accurate to within 100 ns
6.795411	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
7.795375	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns
8.795558	Meinberg0c:e7:17	Announce Message	0x...E717	6	The time is accurate to within 100 ns

Bei den ersten beiden gezeigten Announce-Nachrichten befindet sich das System noch in der Synchronisierung über die T-BC (Source ID: 0x...8000). Durch das Verbinden des dezentralen Masters sind dann zwei grandmaster-fähige Clocks im Synchronisierungssystem. Es tritt der in Unterabschnitt 2.4.6 beschriebene Fall ein, dass der dezentrale Master Meinberg MicroSync (ID: 0x...E717) die bessere Qualifizierung als Grandmaster erkennt und parallel zur T-BC beginnt Announce-Nachrichten zu senden. Der Best Master Clock Algorithmus wird nun neu ausgeführt. Ab dem Zeitpunkt der Announce-Nachricht bei etwa 6,7s sendet nur noch der dezentrale Master Announce-Nachrichten. Weiterhin verhält sich die T-BC wieder passiv und der Normalzustand ist hergestellt. Die die Synchronisierung charakterisierenden Parameter Clock Class und Clock Accuracy bleiben während des gesamten Prozesses unverändert. Damit ist auch der Wechsel vom Redundanzfall zurück zum Normalbetrieb erfolgreich.

Die Prüfung hat damit die Erfüllung mehrerer Anforderungen gezeigt. Die Synchro-

nisierung des Prozessbussystems ist in beiden Fällen erfolgreich. Dies zeigt, dass die Synchronisierung wie angenommen trotz des als T-BC ungenügend geeigneten Hirschmann Switches funktioniert. Damit ist die grundsätzliche Funktionalität der zentralen Zeitsynchronisierung durch den Konzeptaufbau bestätigt. Das Verhalten der Synchronisierung bei Normalbetrieb und im Redundanzfall funktioniert somit konzeptgemäß. Die Übergänge zwischen Normalbetrieb und Redundanzfall verlaufen dynamisch. Weiter wird die Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen geprüft.

6.4 Prüfung der Synchronisierungsgenauigkeit

Die zweite Hauptanforderung an den Konzeptaufbau ist die Genauigkeit der Synchronisierung. Diese wird mit maximal möglichen Zeitfehlern beschrieben. Aus der letzten Prüfung geht hervor, dass die Grandmaster Clocks in den Announce-Nachrichten eine Genauigkeit von 100 ns ankündigen. Dabei wird der in der weiteren Synchronisierungskette hinzugekommene Fehler nicht berücksichtigt. Die Betrachtung des maximalen absoluten Synchronisierungsfehlers aus Abschnitt 4.8 zeigt, dass das Konzept in der Theorie die Genauigkeitsanforderungen einhält. Dies soll nun durch eine Messung am Konzeptaufbau bestätigt werden. Als erstes wird der Synchronisierungsfehler der zentralen Zeitsynchronisierungskette geprüft. Im zweiten Schritt erfolgt die Prüfung der Zeitdifferenz zwischen dem dezentralen Master und der zentral synchronisierten T-BC.

6.4.1 Prüfung des Synchronisierungsfehlers der zentralen Zeitsynchronisierungskette

Die Prüfung des Zeitfehlers der zentrale Zeitsynchronisierungskette gibt Aufschluss über die Genauigkeit der Synchronisierung im Redundanzfall. Der größte Anteil der Zeitverzögerung der Zeitsynchronisierungskette zwischen T-GM und dem Prozessbus wird durch die Delay-Messung und die Correction-Fields kompensiert (vgl. Unterabschnitte 2.4.2 und 2.4.3). Der verbleibende Zeitfehler entsteht durch nicht korrekt kompensierte Verarbeitungszeiten, Laufzeitasymmetrie, dynamische Fehler und die Vernachlässigung der physikalischen Frequenzsynchronisierung der T-BC. Ziel dieser Prüfung ist es, die Fehlerbetrachtung des Konzepts aus Abschnitt 4.8 durch Messung des realen Zeitfehlers zu bestätigen. Damit wird die Erfüllung der Anforderung an die Genauigkeit der Zeitsynchronisierung von 1 μ s geprüft. Die zentrale Zeitsynchronisierung über die T-BC wird im Konzept im Redundanzfall verwendet. Für die Prüfung wird der Konzeptaufbau daher angepasst und örtlich umgebaut. Abbildung 6.6 zeigt den Prüfaufbau.

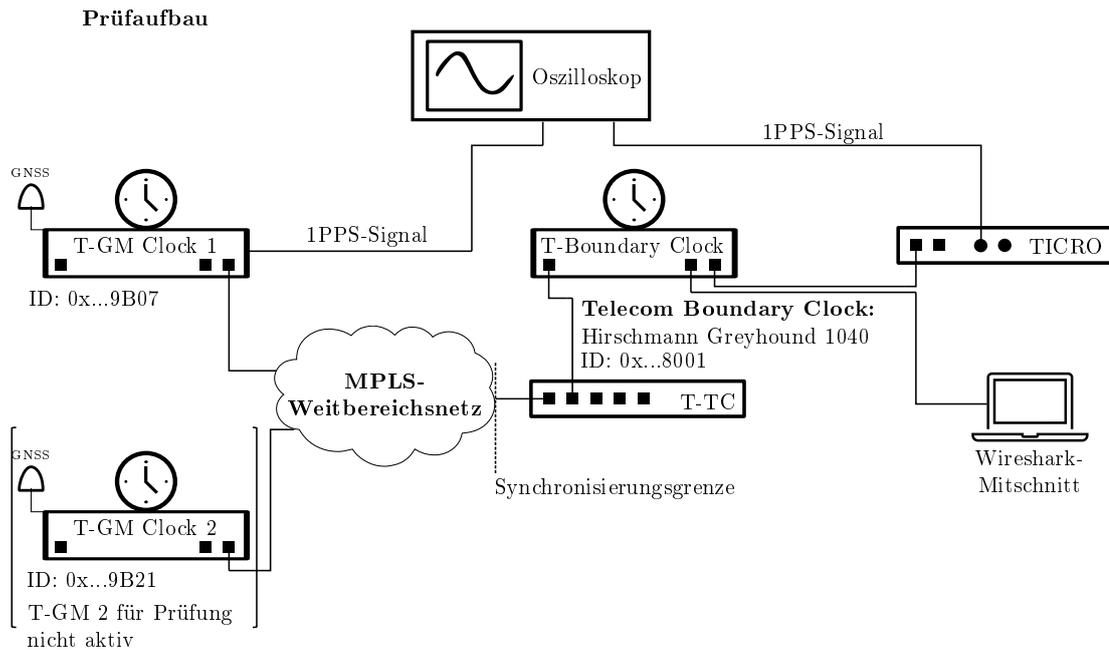


Abbildung 6.6: Prüfaufbau des Synchronisierungsfehlers der zentralen Zeitsynchronisierungskette

In der Prüfung wird wie folgt vorgegangen: Der dezentrale Master wird nicht benötigt und ist aus dem Aufbau entfernt. Das Zeitsignal der zentralen T-GM Clock wird direkt mit dem Zeitsignal an der T-BC verglichen. Für die Bestimmung des Zeitfehlers der dazwischen liegenden Synchronisierungskette wird ein 1PPS-Vergleich durchgeführt (vgl. Unterabschnitt 6.1.3). Die zentrale T-GM benötigt für den GNSS-Empfang eine Antenne. Die Antenne und die Uhr können für die Prüfung nicht verändert werden, daher wird der 1PPS-Vergleich bei der zentralen T-GM durchgeführt. Dafür werden die Telecom Transparent Clock und die T-BC dort wie im Konzeptaufbau aufgebaut. Bei dem 1PPS Vergleich wird das Ticro Messgerät als PTP-Client mit der T-BC verbunden. Über LWL-Verbindungen wird das Zeitsignal von der zentralen T-GM zum MPLS-Weitbereichsnetz zu Router 1 und 2 und zurück geführt. Für den 1PPS Vergleich wird an der zentralen T-GM der 1PPS-Ausgang parametrisiert und das Oszilloskop mit den 1PPS-Quellen verbunden.

Für den örtlich veränderten Prüfaufbau wird mit Wireshark und über den Status des Ticro die Synchronisierung geprüft. Die Tabelle A.1 im Anhang mit ausgewählten PTP-Nachrichten an der T-BC bestätigt, dass der Aufbau von der zentralen T-GM synchronisiert ist, von der auch das 1PPS-Signal verglichen wird. Ähnlich wie der Daneo zeigt der Ticro den Status der PTP-Synchronisierung. Die Abbildung A.1 im Anhang bestätigt, dass der Ticro synchronisiert ist und die Messungen aufgenommen werden können. Mit dem Oszilloskop werden für verschiedene Zeitaufösungen die Messkurven aufgenommen. Im Persistenzmodus des Oszilloskops können mehrere Kurven übereinander abgebildet werden. Die Einfärbung wird dabei dunkler, wenn sich mehrere Kurven überlagern. Bei der Messung fällt auf, dass es immer wieder zu Interferenzen auf den Messleitungen kommt. Die Abbildungen zeigen die Aufnahme mehrerer Messkurven, ohne dass

eine Interferenz aufgetreten ist. Die Ergebnisse der Prüfung sind in den Abbildungen 6.7 bis 6.9 abgebildet.

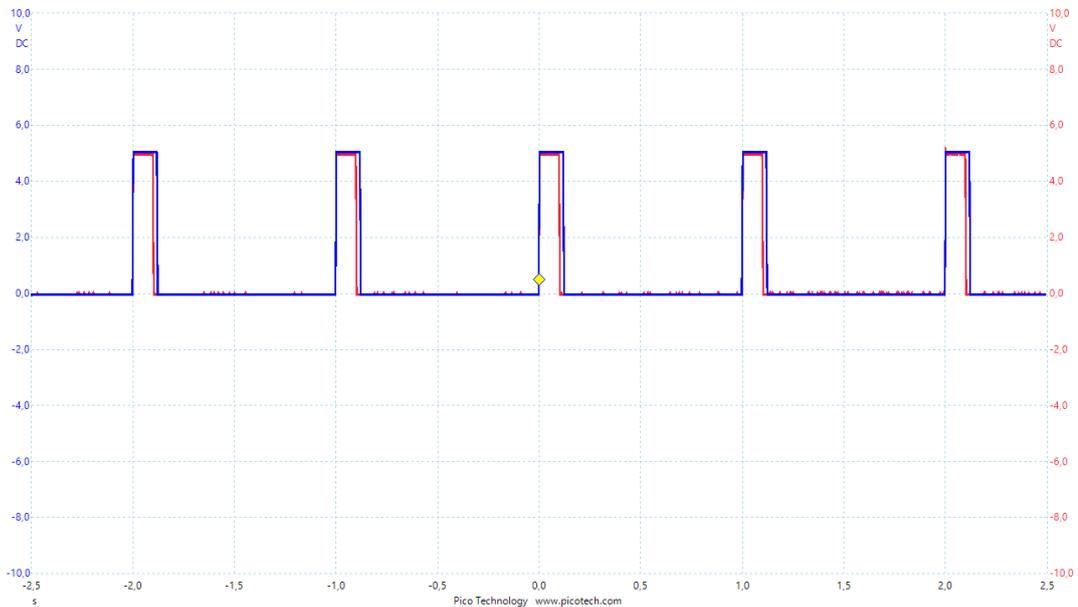


Abbildung 6.7: Synchronisierungsfehler durch die zentrale Synchronisierungskette bei 500 ms Zeitaufösung (blau: T-GM, rot: Ticro)

Bei einer Zeitaufösung von 500 ms sind die 1PPS-Signalverläufe gut zu erkennen. Eine Zeitdifferenz der steigenden Flanken ist in dieser Auflösung noch nicht sichtbar. In den Abbildungen 6.8 und 6.9 werden die 1PPS-Signale mit einer Zeitaufösung von 5 ns aufgenommen.

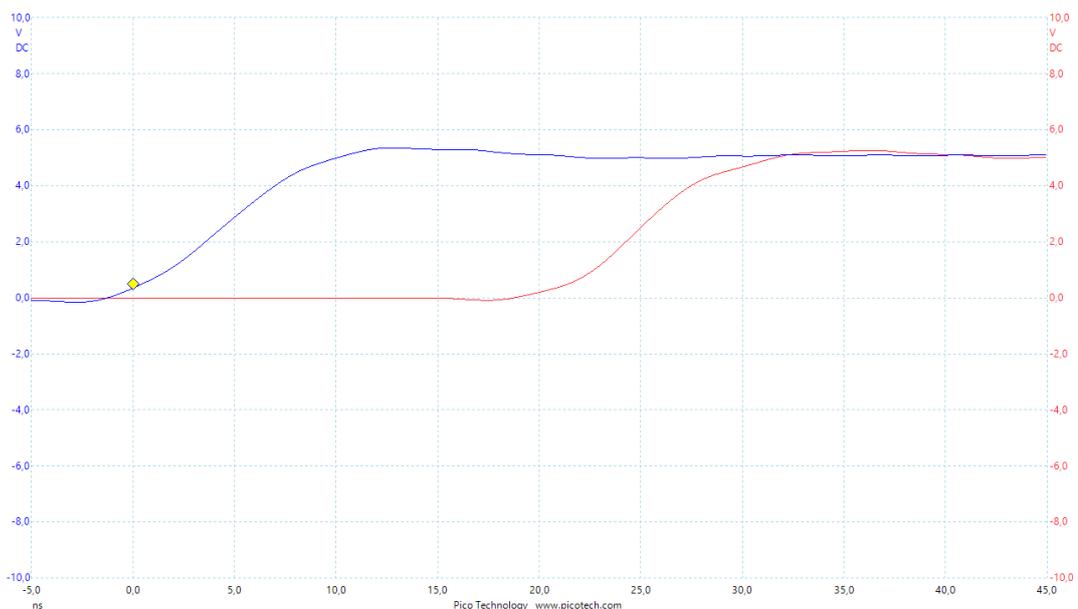


Abbildung 6.8: Synchronisierungsfehler durch die zentrale Synchronisierungskette bei 5 ns Zeitaufösung (blau: T-GM, rot: Ticro)

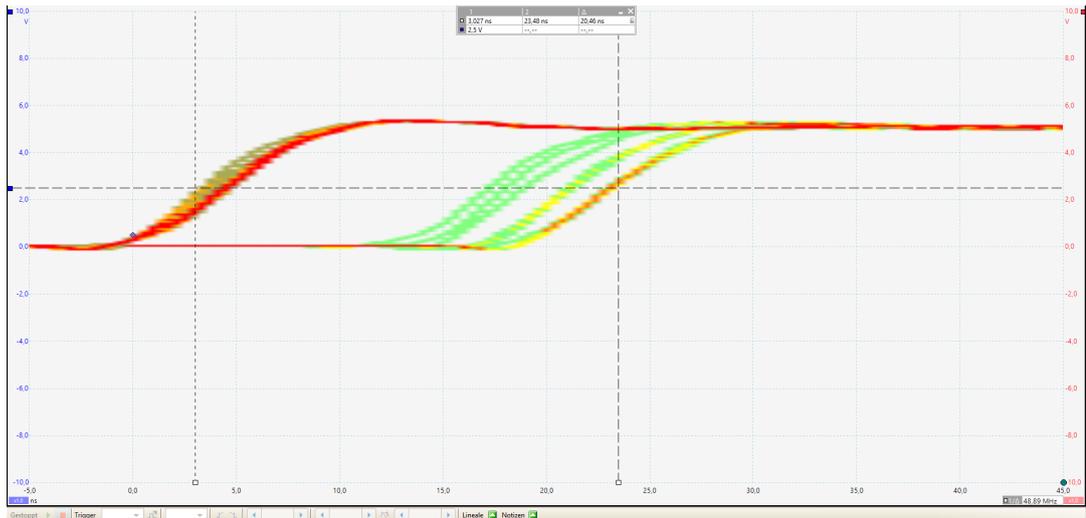


Abbildung 6.9: Überlagerung der 1 PPS Signale des Synchronisierungsfehlers über einen Aufnahmezeitraum von 10 s bei 5 ns Zeitauflösung

Tabelle 6.3 zeigt den mit Cursors bestimmten Zeitfehler und den Jitter des Zeitfehlers.

Tabelle 6.3: Messwerte des Zeitfehlers

Messung	
Jitter T-GM	1,93 ns
Jitter Ticro	6,69 ns
Maximaler Zeitfehler	20,46 ns

Bei Betrachtung der Messergebnisse fällt auf, dass diese gegenüber dem in Abschnitt 4.8 betrachteten Fehler sehr klein sind. In der Tabelle 4.6 wird der mögliche Zeitfehler des Konzepts für die Fälle der Synchronisierung über den dezentralen Master und für den Fall der zentralen Zeitsynchronisierung über die T-BC betrachtet. Angepasst auf den Prüfaufbau wird in Tabelle 6.4 der maximale absolute Zeitfehler beschränkt auf die Komponenten der zentralen Zeitsynchronisierungskette berechnet. Durch den Wechsel zwischen zwei PTP-Profilen und der unterschiedlichen Betrachtung des Zeitfehlers, wird für die T-BC wie in Abschnitt 4.8 der Zeitfehler als Kombination aus Telecom Slave Clock und Telecom Endanwendung angenommen.

Tabelle 6.4: Berechneter maximaler absoluter Zeitfehler der zentralen Zeitsynchronisierungskette

Komponente	Fehler
2 x T-BC	100 ns
Dynamischer Fehler	200 ns
Link-Asymmetrie	-
T-TC	50 ns
T-Slave Clock	50 ns
T-Endanwendung	150 ns
Ticro	50 ns
Gesamtfehler	± 600 ns

Das Messergebnis aus Tabelle 6.3 mit einem maximalen Zeitfehler von 20,46 ns gegenüber dem möglichen Fehler von ± 600 ns ist deutlich geringer als erwartet. Die Messung des Zeitfehlers wurde über 10 s aufgenommen. Dabei wurde ein Jitter von 6,687 ns der zentralen Synchronisierung gemessen. Während der Prüfung über einen Zeitraum von einer Stunde wurden keine größeren Abweichungen beobachtet. Das Ergebnis erklärt sich mit einer stochastischen Verteilung der Zeitfehler in positive und negative Zeitfehler. Zudem ist der Prüfaufbau mit der Anzahl der Geräte nur sehr klein. Ein weiterer Grund für die gute Synchronisierung ist die parallele Verwendung von SyncE mit wenigen kurzen LWL-Leitungen, die wenig Asymmetrie haben. Ein Test im hybriden Modus (SyncE und PTP) erreicht bei einem Testnetz der Firma Transmode bei einem 11 stündigen Test mit einer Abweichung von maximal -43 ns nur geringfügig schlechtere Ergebnisse [54]. Es handelt sich bei dem Messergebnis um eine Momentaufnahme für genau die verwendeten Komponenten. Eine Verallgemeinerung des Ergebnisses ist damit nicht möglich. Wahrscheinlich ist aber, dass der Zeitfehler der Geräte deutlich unterhalb der theoretischen angenommen Fehler der Standards liegt (vgl. [46]). Für eine Betrachtung des Einflusses der Einzelkomponenten müsste der Fehler jeder Komponente untersucht werden. Auch dann könnten veränderte Umwelteinflüsse sich noch auf den Fehler auswirken.

Bezüglich der Anforderungen der Genauigkeit ist festzustellen, dass die Vernachlässigung der physikalischen Frequenzsynchronisierung der T-BC keine erhebliche Verschlechterung der Performance verursacht. Für die Komponenten des Konzeptaufbaus ergibt sich ein deutlich unterhalb der Erwartungen liegender Zeitfehler. Die Anforderung der Genauigkeit ist für diesen Fall bestätigt. Sowohl die theoretische Berechnung des maximalen absoluten Zeitfehlers für das Konzept in Tabelle 4.6 als auch die am Konzeptaufbau in der Prüfung durchgeführte Messung übersteigt das Zeitfehlerbudget von 1 μ s nicht.

6.4.2 Prüfung des Zeitunterschiedes der Synchronisierungsvarianten

Die Prüfung gibt Aufschluss über den Zeitunterschied zwischen den beiden Synchronisierungsvarianten. Dieser wird zur Erfüllung der Anforderung eines maximalen Zeitunterschiedes zwischen dem dezentralen Master und der T-BC von $6\ \mu\text{s}$ geprüft. Resultierend aus dem Zeitfehler der zentralen Zeitsynchronisierungskette in der letzten Prüfung und der theoretischen Betrachtung der Zeitfehler in Abschnitt 4.8 ist abzusehen, dass der Zeitunterschied deutlich kleiner sein wird. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 6.10 abgebildet.

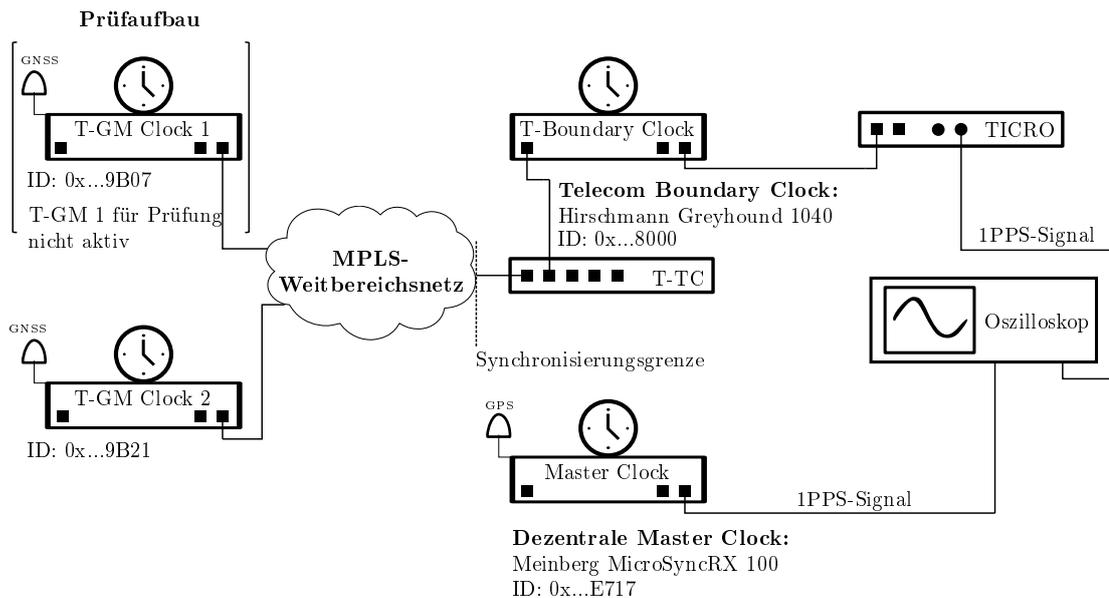


Abbildung 6.10: Prüfaufbau des Zeitunterschiedes der Synchronisierungsvarianten

In der Prüfung wird wie folgt vorgegangen: Der Prüfaufbau entspricht dem Konzeptaufbau ohne den Prozessbusswitch, um den Vergleich möglichst nahe an den Uhren durchzuführen. Für die Prüfung wird, wie in der Prüfung zuvor ein 1PPS-Vergleich durchgeführt. Dafür wird bei dem dezentralen Master ein 1PPS-Ausgang parametrisiert. Für die zentrale Synchronisierung wird wie zuvor der Ticro als PTP-Client mit der T-BC verbunden. Zu Beginn der Prüfung wird geprüft, ob der Ticro synchronisiert ist. Abbildung A.1 im Anhang zeigt die erfolgreiche Synchronisierung. Mit dem Oszilloskop werden für verschiedene Zeitaufösungen die Messkurven aufgenommen. Die Ergebnisse der Prüfung sind in den Abbildungen A.4 und A.5 im Anhang dokumentiert und in Abbildung 6.11 gezeigt.

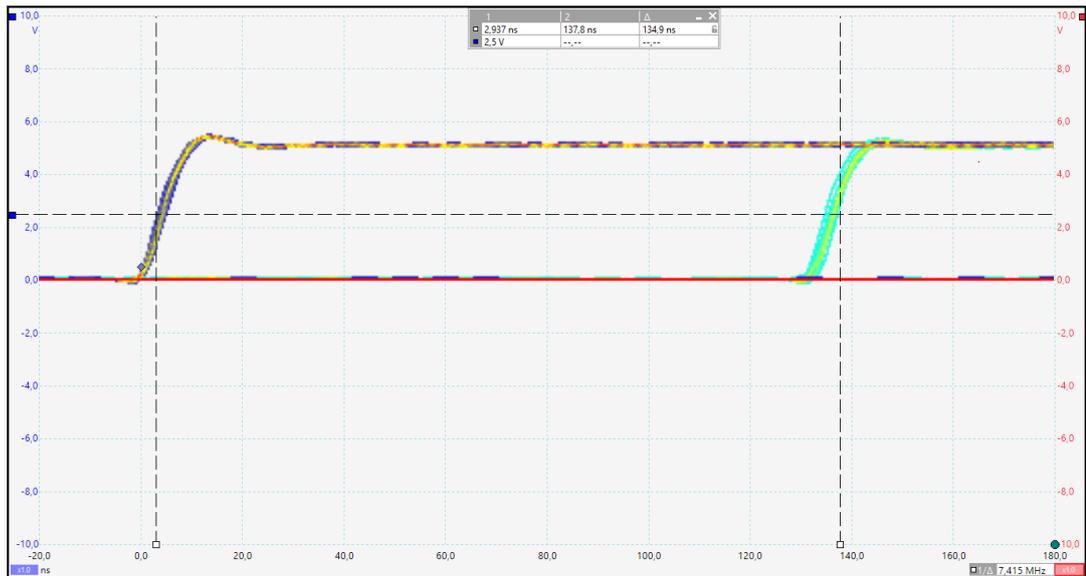


Abbildung 6.11: Überlagerung der 1PPS-Signale der Synchronisierungsvarianten über einen Aufnahmezeitraum von 10 s bei 20 ns Zeitauflösung

Aus der Abbildung 6.11 wird der Zeitunterschied mit Cursorsn bestimmt. Tabelle 6.5 zeigt die bestimmte Zeitabweichung und den Jitter.

Tabelle 6.5: Messwerte des Zeitunterschieds der Synchronisierungsvarianten

Messung	
Jitter Ticro	3,86 ns
Maximale Abweichung	134,9 ns

In Abbildung 6.11 zeigt die erste steigende Flanke das 1PPS-Signal der dezentralen Master Clock. Die zweite steigende Flanke ist, wie in Tabelle 6.5 aufgeführt, 134,9 ns verzögert und gehört zum 1PPS-Signal der zentralen Zeitsynchronisierungskette. Für die Interpretation der Prüfergebnisse wird wie zuvor ein theoretischer Wert für die Zeitdifferenz berechnet. Dieser wird als Summe der maximalen absoluten Zeitfehler der Einzelkomponenten, wie in Abschnitt 4.8 und Prüfung 6.4.1, in Tabelle 6.6 berechnet. Für den Zeitfehler zur internationalen Zeitreferenz des dezentralen Masters und der zentralen T-GM werden jeweils ± 100 ns angenommen. Dies entspricht der angegebenen Accuracy in den Announce-Nachrichten.

Tabelle 6.6: Berechnete maximale absolute Zeitabweichung der Synchronisierungsvarianten im Konzeptaufbau

Zeitfehler dezentraler Master		Zeitfehler zentrale Synchronisierungskette	
Komponente	Fehler	Komponente	Fehler
GM	100 ns	T-GM	100 ns
		2 x T-BC	100 ns
		Dynamischer Fehler	200 ns
		Link-Asymmetrie	-
		T-TC	50 ns
		T-Slave Clock	50 ns
		T-Endanwendung	150 ns
		Ticro	50 ns
Gesamtfehler	± 100 ns	Gesamtfehler	± 700 ns
Maximale Zeitabweichung ± 800 ns			

Mit der Berechnung aus Tabelle 6.6 ergibt sich eine mögliche Abweichung der Uhren von ± 800 ns. Die gemessene Abweichung ist mit 134,9 ns kleiner, aber deutlich größer als der gemessene Zeitfehler in Prüfung 6.4.1. Für die Prüfung wurden teilweise andere Komponenten verwendet. Außerdem wird die Synchronisierung zur internationalen Zeitreferenz über das GNS-System mit berücksichtigt, wodurch zusätzliches Zeitfehlerpotential entsteht. Der Grund für den geringeren gemessenen Werte ist wie zuvor eine stochastische Verteilung der Zeitfehler. Das Ergebnis zeigt dabei, dass die zentral synchronisierte T-BC bei dieser Messung 134,9 ns verzögert gegenüber dem dezentralen Master ist. Der Jitter ist mit 3,86 ns sogar kleiner als in der letzten Prüfung. Auch bei dieser Messung wurden keine größeren Sprünge beobachtet. Das Messergebnis gilt nur für die verwendeten Komponenten und eine Verallgemeinerung des Messergebnisses ist damit nicht möglich. Die Messung gibt Aufschluss über das Erfüllen der Anforderung einer Zeitdifferenz von maximal 6 μ s zwischen den Synchronisierungsvarianten. Das Messergebnis und die theoretische Berechnung zeigen, dass der Wert eingehalten wird. Insgesamt ist diese Anforderung bei Erfüllung der strengeren Genauigkeitsanforderung von 1 μ s immer erfüllt. Zusammengefasst bestätigen die Prüfung 6.4.1 und diese Prüfung, dass der Konzeptaufbau der zentralen PTP-Zeitsynchronisierung die Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

6.5 Bewertung der Prüfungsergebnisse anhand des Anforderungsprotokolls

In Tabelle 6.7 werden alle Anforderungen aus Kapitel 3 (Anforderungen) gesammelt betrachtet. Dabei wird zusätzlich auf die durch das Konzept erfüllten Anforderungen eingegangen, die nicht gesondert geprüft wurden.

Tabelle 6.7: Bewertung anhand des Anforderungsprotokolls

Anforderung	Erfüllt	Details
Verwendung des Precision Time Protocol in der Version 2	ok	Siehe Parametrierung 5.2
Redundante Zeitsynchronisierung	ok	Siehe Konzept 4.2.3 und Prüfung 6.3
Eindeutiges Synchronisierungsverhalten bei Normalbetrieb und im Redundanzfall	ok	Siehe Synchronisierungshierarchie 4.6 und Prüfung 6.3
Synchronisierungshierarchie von zentraler Stelle zum Prozessbus-System	ok	Siehe Synchronisierungshierarchie 4.6 und Prüfung 6.3
Verwendung des IEC/IEEE 61850-9-3-2016 - Power Utility Profil im Prozessbus-System	ok	Siehe PTP-Konzept 4.5.1
Kompatibilität zur Taktsynchronisierung im MPLS-Netz mittels Synchronous Ethernet	ok	Siehe Anforderung einer physikalischen Frequenzsynchronisierung 4.7
Kompatibilität zum Parallel Redundancy Protocol (PRP)	nicht ok (theoretisch möglich)	Mit Konzeptaufbau Geräten nicht möglich (Alternativen vgl. Unterabschnitt 4.4.5)
Konzeptaufbau mit den in den Laborumgebungen vorhandenen Komponenten	ok (mit Einschränkungen)	Kompromiss durch Vereinfachungen im PTP-Konzept (vgl. 5.2) und Verzicht auf physikalische Frequenzsynchronisierung der T-BC (vgl. 4.7)
Prüfung des Konzeptaufbaus mit den in den Laboren vorhandenen Messgeräten	ok	Einzige Einschränkung durch Interferenzen bei Messwertaufnahme (vgl. 6.4.1 und 6.4.2)
Konzeptaufbau und Prüfung parallel zu weiteren Arbeiten im Prüflabor	ok	Teilweise nur eine T-GM verwendet, dadurch aber keine Einschränkungen
Master Clocks mit Zeitunterschieden kleiner $6 \mu\text{s}$ bei Grandmaster-Wechsel	ok	Siehe Prüfung 6.4.2
Erfüllung der Time Performance Class T5 (Entspricht einer Genauigkeit von $1 \mu\text{s}$)	ok	Siehe Prüfung 6.4.1 und theoretische Betrachtung des zentralen Zeitfehlerbudgets von $\pm 650 \text{ ns}$ ($\pm 700 \text{ ns}$ mit T-Transparent Clock) in 4.8

Die Tabelle 6.7 zeigt, dass die Anforderungen vom Konzept und vom Konzeptaufbau mit Anpassungen erfüllt werden. Einschränkungen ergeben sich im Bereich der Unterstützung des PRP und der Eignung der T-BC. Die Genauigkeitsanforderungen werden in beiden Fällen erfüllt. Das Konzept einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung als Backup der Zeitsynchronisierung stellt damit einen funktionierenden Ansatz der Synchronisierung von Prozessbus-Systemen in verteilten Umspannwerkstandorten dar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein Konzept und ein Laboraufbau einer zentralen PTP-Zeitsynchronisierung über ein MPLS-Weitbereichsnetzwerk als eine mögliche Alternative zur dezentralen Zeitsynchronisierung von Prozessbus-Systemen mit GNSS-Empfängern. Die am Konzeptaufbau durchgeführten Prüfungen zeigen, dass der Ansatz trotz der Herausforderung durch eine längere Synchronisierungskette die Hauptanforderung an die Genauigkeit der Synchronisierung erfüllen kann. In der Arbeit wurden drei Konzeptvorschläge präsentiert und der Ansatz einer dezentralen Zeitsynchronisierung, mit der zentralen Zeitsynchronisierung als Backup, als der geeignetste Ansatz evaluiert. Für die Umsetzung des Konzepts hat eine Marktanalyse die grundsätzliche Eignung der bisher bei der Stromnetz Hamburg GmbH für den IEC 61850 Prozessbus eingesetzten Geräte beleuchtet. Weitergehend ist aus der konkreten Betrachtung der PTP-Implementierung hervorgegangen, dass für die Anforderungen an die Genauigkeit im MPLS-Weitbereichsnetz das ITU-T G.8275.1 PTP-Profil eingesetzt werden sollte. Die damit einhergehenden Anforderungen an die Telecom Boundary Clock (T-BC), welche die Schlüsselfunktion in der zentralen Zeitsynchronisierung bildet, werden von keinem der bisher eingesetzten Geräte vollständig erfüllt. Für die T-BC wird ein Gerät benötigt, das die in den unterschiedlichen Netzsegmenten verwendeten PTP-Profile inklusive einer physikalischen Frequenzsynchronisierung mittels SyncE unterstützt. Weiterhin wäre eine direkte Unterstützung des Parallel Redundancy Protocol durch die T-BC vorteilhaft. Der im Konzeptaufbau als T-BC eingesetzte Hirschmann Switch GRS1040 ermöglichte auch mit vernachlässigter physikalischer Frequenzsynchronisierung eine Synchronisierung mit einer hohen Genauigkeit. Die Anforderungen werden damit trotzdem erfüllt. Das Konzept ist mit einer Anpassung des Gerätes für die Aufgabe der T-BC ohne Einschränkungen umsetzbar. Die Arbeit hat damit insbesondere gezeigt, dass eine zentrale Zeitsynchronisierung für die Anforderungen einer Synchronisierung eines Prozessbus-Systems nach IEC 61850 eingesetzt werden kann. Des Weiteren wurde eine Möglichkeit der Umsetzung gezeigt. Im vorgestellten Konzept werden dabei Elemente der zentralen und der dezentralen Zeitsynchronisierung eingesetzt. Für eine weitere Optimierung der Synchronisierungslösung wurden Metriken vorgeschlagen, um ein Konzept für den Einsatz im Verteilnetz zu evaluieren.

Dabei sollten einige Aspekte weitergehend betrachtet werden: Es sollten die Systeme SyncE und PTP im MPLS-Weitbereichsnetz parallel geplant und auf den gleichen Links im Netz verteilt werden. Hier wären im Gegensatz zur dynamischen Wahl der Wege die Links im Normalbetrieb und die im Redundanzfall verwendeten Links vorher bekannt.

Dies erleichtert die Suche möglicher Fehler, außerdem ist zu jeder Zeit die Länge der Synchronisierungskette für die Zeitfehlerbestimmung bekannt. Weiterhin ist im Konzept das Fehlerbudget mit 650 ns durch den verhältnismäßig kleinen Konzeptaufbau schon fast ausgereizt. Detailliertere Planungen unter Betrachtung eines MPLS-Weitbereichsnetzes einer im Verteilnetz typischen Größe sollten folgen, da die gemessenen Synchronisierungsfehler durch das kleine MPLS-Testnetz unter Laborbedingungen nicht grundsätzlich generalisierbar sind. Falls die Anforderung der Genauigkeit für eine lange Synchronisierungskette bei einer theoretischen Betrachtung nicht eingehalten wird, kann für solche Fälle der reale Synchronisierungsfehler gemessen werden. Mit diesem kann im Individualfall entschieden werden, ob der Einsatz einer zentralen Zeitsynchronisierung möglich ist. Um eine Messung des Synchronisierungsfehlers mit verteilten Standorten durchzuführen, ist es möglich eine abgewandelte Form der Prüfung 6.4.1 durchzuführen. Ähnlich der Prüfung 6.4.2 könnten sich dabei Messgeräte am Anfang und am Ende der Synchronisierungskette mit einem GNS-System synchronisieren und dann den Zeitfehler der Synchronisierungskette bestimmen [26]. Weiterhin sollten auch die Vorteile geprüft werden, die zentrale Synchronisierung im Normalbetrieb einzusetzen, um komplett auf die Investition in dezentrale GNSS-Empfänger zu verzichten. Außerdem ist zu prüfen, wie häufig im vorgestellten Konzept der Redundanzfall eintritt und zu entscheiden, welche Zeitsynchronisierungsvariante besser geeignet ist. Final sollte auch die Wirtschaftlichkeit der konkreten Implementierungen geprüft werden, um dann unter Berücksichtigung aller genannten Aspekte das geeignetste Zeitsynchronisierungskonzept zu bestimmen.

Literaturverzeichnis

- [1] SCHWAB, Adolf J.: *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Springer-Verlag, 2006. – ISBN 978-3-540-29664-5
- [2] STROMNETZ HAMBURG GMBH: *Stromnetz Hamburg GmbH - Ihr Verteilnetzbetreiber*. Stand: 2020. – Unternehmenspräsentation
- [3] HEUCK, Klaus ; DETTMANN, Klaus-Dieter ; SCHULZ, Detlef: *Elektrische Energieversorgung, 9. Auflage*. Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-8348-1699-3
- [4] BECKER, Christian: *Elektrische Energiesysteme II (EES II) - Kapitel 4: Netzleittechnik und Netzleitsysteme*. 2018. – Vorlesungsfolien
- [5] OBERMANN, Kristof ; HORNEFFER, Martin: *Datennetztechnologien für Next Generation Networks, 2. Auflage*. Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-8348-1384-8
- [6] LUNTOVSKYY, Andriy ; GÜTTER, Dietbert: *Moderne Rechnernetze: Protokolle, Standards und Apps in kombinierten drahtgebundenen, mobilen und drahtlosen Netzwerken*. Springer-Verlag, 2020. – ISBN 978-3-658-25616-6
- [7] SCHNELL, Gerhard ; WIEDEMANN, Bernhard: *Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik: Grundlagen, Systeme und Anwendungen der industriellen Kommunikation, 9. Auflage*. Springer-Verlag, 2019. – ISBN 978-3-658-23687-8
- [8] IEEE Standard for Ethernet. In: *IEEE Std 802.3-2018 (Revision of IEEE Std 802.3-2015)* (2018), S. 1-5600. – DOI 10.1109/IEEESTD.2018.8457469
- [9] REDAKTION COMPUTERWEEKLY: *MPLS (Multiprotocol Label Switching)*. <https://www.computerweekly.com/de/definition/MPLS-Multiprotocol-Label-Switching>. Version: Oktober 2020. – Eingesehen am 21.04.2021
- [10] ITU Recommendation - Timing and synchronization aspects in packet networks. In: *ITU-T G.8261 Edition 4.0 2019-08* (Switzerland (2019)), S. 1-108
- [11] CRASTAN, Valentin: *Elektrische Energieversorgung 1, 4. Auflage*. Springer-Verlag Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-662-45984-3

- [12] SIEMENS: *Prozessbus in Digital Substations*. <https://new.siemens.com/de/de/produkte/energie/energieautomatisierung-und-smart-grid/schutztechnik/general-protection/prozessbus.html>. – Eingesehen am 12.04.2021
- [13] HUTTERER, Stephan: *Digital Substation: Prozessbus im Einsatz*. <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/digital-substation-prozessbus-im-einsatz.html>. Version: November 2017. – Eingesehen am 10.04.2021
- [14] USLAR, Mathias ; SPECHT, Michael u. a.: *Standardization in smart grids: Introduction to IT-related methodologies, architectures and standards*. Springer-Verlag Science & Business Media, 2012. – ISBN 9783642349164
- [15] IEC International Standard - Communication networks and systems for power utility automation – Part 1: Introduction and overview. In: *IEC 61850-1 Edition 2.0 2013-01* (2013), S. 1–31
- [16] TYPHOON HIL: *IEC 61850 MMS Protocol*. https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/References/iec_61850_mms_protocol.html. – Eingesehen am 18.04.2021
- [17] PAPPU, Vijay ; CARVALHO, Marco ; PARDALOS, Panos M. u. a.: *Optimization and security challenges in smart power grids*. Springer-Verlag, 2013. – ISBN 9783642381331
- [18] MEINDL, Johann ; HUTTERER, Stephan ; LOKEN, Rannveig: Erfahrungen eines Transportnetzbetreibers in Norwegen mit der Digitalisierung. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* (2019), S. 75–78
- [19] IEC International Standard - Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). In: *IEC 62439-3 Edition 3.0 2016-03* (2016), S. 1–120
- [20] PFANNENSTIEL, Marco ; SCHMIDT, Dennis ; RITT, Bendic: *Projekt UW2030 - Systemarchitektur Sekundärtechnik*. 2020. – Stromnetz Hamburg interne Präsentation
- [21] IEC International Standard - Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. In: *IEC 61850-9-2 Edition 2.1 2020-02* (2020), S. 1–32
- [22] MICROSEMI: *White Paper - Profile for Use of Precision Time Protocol in Power Systems*, 2017. https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/133171-precise-synchronization-for-electrical-utilities-the-ptp-power-profile. – Eingesehen am 19.04.2020

- [23] IEC International Standard - Communication networks and systems for power utility automation – Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. In: *IEC 61850-8-1 Edition 2.0 2011* (2011), S. 1–186
- [24] MACKIEWICZ, R. E.: Overview of IEC 61850 and Benefits. In: *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2006, S. 623–630. – DOI 10.1109/PSCE.2006.296392
- [25] STROMNETZ HAMBURG GMBH: *Projekt UW2030 - IEC 61850 Netzwerktopologie*. 2020. – Interne Planungsdokumente
- [26] HAGARTY, Dennis: *5G Synchronization Design, Testing Deploying Timing - Deploying Timing Across the Transport*. <https://www.ciscolive.com/c/dam/r/ciscolive/emea/docs/2020/pdf/BRKSPG-2557.pdf>. Version: 2020. – Eingesehen am 26.04.2021
- [27] KONSTANTIN BIKOS, Anne B.: *Die Internationale Atomzeit (TAI)*. <https://www.timeanddate.de/zeitzone/internationale-atomzeit>. – Eingesehen am 17.04.2021
- [28] EUROPEAN SPACE AGENCY: *Categorie GPS*. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Category:GPS>. – Eingesehen am 17.04.2021
- [29] IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. In: *IEEE Std 1588-2019 (Revision of IEEE Std 1588-2008)* (2020), S. 1–499. – DOI 10.1109/IEEESTD.2020.9120376
- [30] ARNOLD, Douglas: *End-to-End Versus Peer-to-Peer*. <https://blog.meinbergglobal.com/2013/09/19/end-end-versus-peer-peer/>. Version: September 2013. – Eingesehen am 17.04.2021
- [31] ARNOLD, Douglas: *Why is IEEE 1588 so accurate?* <https://blog.meinbergglobal.com/2013/09/14/ieee-1588-accurate/>. Version: September 2013. – Eingesehen am 17.04.2021
- [32] HIRSCHMANN: *White Paper - Precision Clock Synchronization The Standard IEEE 1588*, https://www.industrialnetworking.com/pdf/Hirschmann_IEEE_1588.pdf. – Eingesehen am 17.04.2021
- [33] MICROSEMI: *White Paper - Synchronization for Next Generation Networks — The PTP Telecom Profile*, November 2017. https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/133176-synchronization-for-next-generation-networks-the-ptp-telecom-profile. – Eingesehen am 26.04.2021
- [34] ITU Recommendation - Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization. In: *ITU-T G.8265.1 Edition 2.0 2014-07* (Switzerland (2014)), S. 1–23

- [35] ITU Recommendation - Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network. In: *ITU-T G.8275.1 Edition 3.0 2020-03* (Switzerland (2020)), S. 1–54
- [36] ITU Recommendation - Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with partial timing support from the network. In: *ITU-T G.8275.2 Edition 2.0 2020-03* (Switzerland (2020)), S. 1–61
- [37] IEC/IEEE International Standard - Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation. In: *IEC/IEEE 61850-9-3 Edition 1.0 2016-05* (2016), S. 1–18. – DOI 10.1109/IEEESTD.2016.7479438
- [38] IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications. In: *IEEE Std C37.238-2011* (2011), S. 1–66. – DOI 10.1109/IEEESTD.2011.5963699
- [39] IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications. In: *IEEE Std C37.238-2017 (Revision of IEEE Std C37.238-2011)* (2017), S. 1–42. – DOI 10.1109/IEEESTD.2017.7953616
- [40] MOHAPATRA, Priyanka: *Omicron - Time Synchronization Specification and Test Procedure*. 2020. – Stromnetz Hamburg GmbH internes Dokument mit Umsetzungsempfehlungen
- [41] STROMNETZ HAMBURG GMBH, Siemens: *Zeitsynchronisierung im UW2030*. 2020. – Stromnetz Hamburg GmbH internes Besprechungsprotokoll
- [42] IEC International Standard - Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models. In: *IEC 61850-5 Edition 2.0 2013-01* (2013), S. 1–140
- [43] PORANEN, Mikko u. a.: *Precise and Reliable Time Distribution in the Power Transmission System*. (2018)
- [44] FROST, Tim: *The PTP Telecom Profiles for Frequency, Phase and Time Synchronization*, Mai 2013. https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/133481-ptp-telecom-profiles-for-frequency-phase-and-time-synchronization
- [45] ITU Recommendation - Architecture and requirements for packet-based time and phase distribution. In: *ITU-T G.8275 Edition 3.0 2020-10* (Switzerland (2020)), S. 1–49
- [46] ITU Recommendation - Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks for use with full timing support from the network. In: *ITU-T G.8273.2 Edition 4.0 2020-10* (Switzerland (2020)), S. 1–52
- [47] TELENT GMBH: *Taktplanung*. 2020. – Interne Planungsdokumente

- [48] ITU Recommendation - Network limits for time synchronization in packet networks with full timing support from the network. In: *ITU-T G.8271.1 Edition 3.0 2020-03* (Switzerland (2020)), S. 1–56
- [49] *Wireshark*. <https://www.wireshark.org/>. – Eingesehen am 22.03.2021
- [50] *Wireshark Protocols PTP*. <https://wiki.wireshark.org/Protocols/ptp>. – Eingesehen am 22.03.2021
- [51] *Daneo 400 - Hybrider Signalanalysator für Schutz- und Automatisierungssysteme*. <https://www.omicronenergy.com/de/produkte/daneo-400/>. – Eingesehen am 22.03.2021
- [52] *TICRO 100 - IEEE 1588/PTP Zeitkonverter*. <https://www.omicronenergy.com/de/produkte/ticro-100/>. – Eingesehen am 22.03.2021
- [53] *Pico Technology*. <https://www.picotech.com/products/oscilloscope>. – Eingesehen am 22.03.2021
- [54] HANS SJÖSTRAND, Chris F.: *Using a hybrid environment with SyncE and 1588v2 to provide a better platform for mobile backhaul*. http://www.telecom-sync.com/files/pdfs/itsf/2014/Day2/SyncE%7C1588_PTP_providing_better_platform_for_mobile_backhaul.pdf. Version: November 2014. – Eingesehen am 26.03.2021

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verteilnetz mit Umspannwerkstandorten der Stromnetz Hamburg GmbH [2]	4
2.2	Hierachischer Aufbau von Netzleitsystemen [4]	5
2.3	Telekommunikationsnetz mit Netzknoten und Computern als Endsyste- men [5]	6
2.4	ISO-OSI Referenzmodell am Beispiel der Komponenten eines einfachen Kommunikationsnetzes [5]	7
2.5	MPLS-Architektur [6]	8
2.6	Topologie des MPLS-Laboraufbaus (Eigene Darstellung)	9
2.7	Schutzgerät und Wandler in der Feld- und Prozessebene [12]	11
2.8	Konventionelle Verdrahtung eines Umspannwerks [13]	11
2.9	Objektorientiertes Modell des IEC 61850 Standards [16]	12
2.10	Umspannwerk mit Prozessbus-System [13]	13
2.11	Entwicklung der Stationsautomatisierung [18]	14
2.12	Grundgedanke des neuen Sekundärkonzepts [20]	15
2.13	Konzept des IEC 61850 Prozessbusses am Beispiel einer Mittelspannungs- sammelschiene [20]	17
2.14	Topologie des IEC 61850-Laboraufbaus [25]	19
2.15	Ideale Zeit-, Frequenz- und Phasensynchronisierung (Angelehnt an [26], eigene Darstellung)	21
2.16	Zeitsynchronisierungskette (Eigene Darstellung)	21
2.17	PTP-Synchronisierungskette mit möglichen PTP-Instanzen (Eigene Dar- stellung)	22
2.18	PTP-Synchronisierungskonzept [29]	24
2.19	PTP-Laufzeitbestimmung über E2E- und P2P-Mechanismen (Eigene Dar- stellung)	25
2.20	Übersicht der relevanten PTP-Profile (Eigene Darstellung)	29
4.1	Konzept einer dezentralen Zeitsynchronisierung mit PTP (Eigene Dar- stellung)	33
4.2	Zentrale Zeitsynchronisierung mit PTP (Eigene Darstellung)	34
4.3	Topologie einer vermaschten PTP-Zeitsynchronisierung (Eigene Darstel- lung)	35
4.4	Topologie einer redundanten zentralen PTP-Zeitsynchronisierung (Eige- ne Darstellung)	36

4.5	Topologie einer PTP-Zeitsynchronisierung als Backup (Eigene Darstellung)	36
4.6	Marktanalyse zu PTP-Eigenschaften der im Laboraufbau verwendeten Geräte	38
4.7	Verwendete Geräte im Konzeptaufbau (Eigene Darstellung)	40
4.8	Synchronisierungshierarchie im Konzeptaufbau (Eigene Darstellung) . .	46
4.9	SyncE-Taktsynchronisierung im MPLS-Laboraufbau (Angelehnt an [47], eigene Darstellung)	47
5.1	Angepasster Konzeptaufbau der zentralen PTP-Zeitsynchronisierung (Eigene Darstellung)	52
6.1	Mit Wireshark aufgeschlüsselte Announce-Nachricht	57
6.2	Prinzip eines 1PPS-Vergleich mit mehreren Omicron Ticro Messgeräten (Eigene Darstellung)	58
6.3	Prüfaufbau zur Prüfung der Synchronisierung bei Normalbetrieb und im Redundanzfall (Eigene Darstellung)	60
6.4	Daneo PTP-Sniffers: Synchronisierung durch dezentralen Master (Normalbetrieb)	61
6.5	Daneo PTP-Sniffer: Synchronisierung über T-BC und zentralen Grandmaster (Redundanzfall)	63
6.6	Prüfaufbau des Synchronisierungsfehlers der zentralen Zeitsynchronisierungskette (Eigene Darstellung)	66
6.7	Synchronisierungsfehler durch die zentrale Synchronisierungskette bei 500 ms Zeitauflösung (blau: T-GM, rot: Ticro)	67
6.8	Synchronisierungsfehler durch die zentrale Synchronisierungskette bei 5 ns Zeitauflösung (blau: T-GM, rot: Ticro)	67
6.9	Überlagerung der 1 PPS Signale des Synchronisierungsfehlers über einen Aufnahmezeitraum von 10 s bei 5 ns Zeitauflösung	68
6.10	Prüfaufbau des Zeitunterschiedes der Synchronisierungsvarianten (Eigene Darstellung)	70
6.11	Überlagerung der 1PPS-Signale der Synchronisierungsvarianten über einen Aufnahmezeitraum von 10 s bei 20 ns Zeitauflösung	71
A.1	PTP-Status des Ticro zur Prüfung der Synchronisierung	87
A.2	Synchronisierungsfehler durch die zentrale Synchronisierungskette bei 1 μ s Zeitauflösung (blau:T-GM, rot: Ticro)	88
A.3	PTP-Status des Ticro zur Prüfung der Synchronisierung	89
A.4	Zeitunterschied der Synchronisierungsvarianten bei 1 μ s Zeitauflösung (blau: MicroSync, rot: Ticro)	90
A.5	Zeitunterschied der Synchronisierungsvarianten bei 20 ns Zeitauflösung (blau: MicroSync, rot: Ticro)	90

Tabellenverzeichnis

2.1	Clock Classes im Prozessbus-System	27
4.1	Übersicht ausgewählter PTP-Profilen (Angelehnt an [26])	42
4.2	PTP-Instanztypen im ITU-T G.8275.1 PTP-Profil [29, 35]	43
4.3	Ausgewählte Parameter des ITU-T G.8275.1 PTP-Profiles	45
4.4	Theoretische Werte des absoluten Zeitfehlers im ITU-T G.8275.1 PTP-Profil [48]	48
4.5	Theoretische Werte des absoluten Zeitfehlers im Power Utility Profil IEC 61850-9-3-2016 [37]	49
4.6	Gegenüberstellung des maximalen absoluten Zeitfehlers beider Synchronisierungsvarianten	49
6.1	Ausgewählte Announce-Nachrichten am Prozessbusswitch beim Normalbetrieb und beim Wechsel der Synchronisierung vom dezentralen Master zur zentralen T-GM	62
6.2	Ausgewählte Announce-Nachrichten am Prozessbusswitch beim Wechsel der Synchronisierung über die T-BC zum dezentralen Master	64
6.3	Messwerte des Zeitfehlers	68
6.4	Berechneter maximaler absoluter Zeitfehler der zentralen Zeitsynchronisierungskette	69
6.5	Messwerte des Zeitunterschieds der Synchronisierungsvarianten	71
6.6	Berechnete maximale absolute Zeitabweichung der Synchronisierungsvarianten im Konzeptaufbau	72
6.7	Bewertung anhand des Anforderungsprotokolls	74
A.1	Ausgewählte PTP-Nachrichten zur Prüfung der Synchronisierung am Ausgang der T-BC	86

A Anhang

A.1 Weitere Ergebnisse zur Prüfung 6.4.1

Tabelle A.1: Ausgewählte PTP-Nachrichten zur Prüfung der Synchronisierung am Ausgang der T-BC

Time	Source	Info	GM ID	Clock Class	Clock Accuracy
0.000000	Hirschma9c:80:00	Announce Message	0x...9b07	6	The time is accurate to within 100 ns
0.999958	Hirschma9c:80:00	Sync Message			
0.999982	Hirschma9c:80:00	FollowUp Message			



TICRO 100
PTP Time Terminal



[Help - Support - Manual](#)



Overview



Status



Configuration



Tools



Output



PTP



Network



Log Viewer

Port edit

Port state:	Slave
Delay mechanism:	P2P
Sync interval:	1 s
Announce interval:	1 s
Announce receipt timeout:	3
Minimum pdelay request interval:	1 s
Peer mean path delay:	19 ns
Delay asymmetry:	0 ns
Profile ID:	00:0c:cd:00:01:00
Network protocol:	IEEE_802_3

Current

Steps removed:	4
Offset from master:	-4 ns

Default edit

Clock identity:	20:b7:c0:ff:fe:00:ca:97
Clock class:	SLAVE_ONLY (255)
Domain number:	24

Parent

Port identity:	4@64:60:38:ff:fe:9c:80:00
Grandmaster identity:	ec:46:70:ff:fe:0a:9b:07
Grandmaster clock class:	PRIMARY_REF_PTP (6)
Grandmaster clock accuracy:	WITHIN_100_NS (0x21)
Grandmaster clock variance:	20061
Grandmaster priority 1:	128
Grandmaster priority 2:	128

Time

UTC offset:	37
UTC offset valid:	true
Leap 59:	false
Leap 61:	false
Time traceable:	true
Frequency traceable:	true
PTP time scale:	true
Time source:	GPS (0x20)

© 2021 OMICRON Lab - License Information

Abbildung A.1: PTP-Status des Ticro zur Prüfung der Synchronisierung

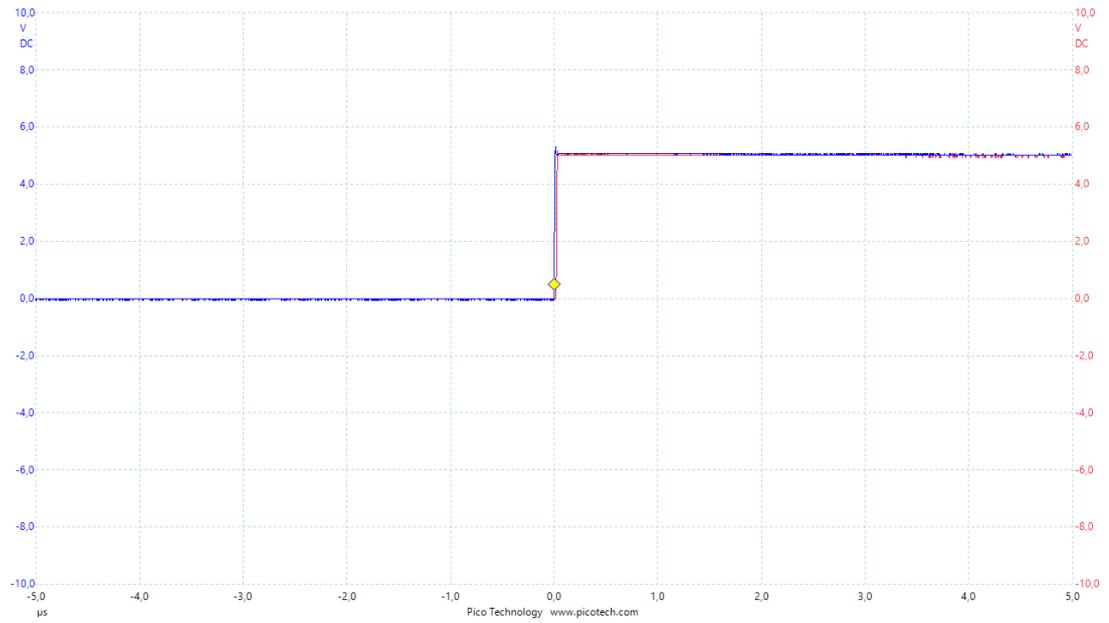


Abbildung A.2: Synchronisierungsfehler durch die zentrale Synchronisierungskette bei 1 µs Zeitauflösung (blau:T-GM, rot: Ticro)

A.2 Weitere Ergebnisse zur Prüfung 6.4.2



TICRO 100
PTP Time Terminal



Help - Support - Manual


Overview


Status


Configuration


Tools


Output


PTP


Network


Log Viewer

Port [edit](#)

Port state:	Slave
Delay mechanism:	P2P
Sync interval:	1 s
Announce interval:	1 s
Announce receipt timeout:	3
Minimum pdelay request interval:	1 s
Peer mean path delay:	19 ns
Delay asymmetry:	0 ns
Profile ID:	00:0c:cd:00:01:00
Network protocol:	IEEE_802_3

Current

Steps removed:	4
Offset from master:	-10 ns

Default [edit](#)

Clock identity:	20:b7:c0:ff:fe:00:ca:97
Clock class:	SLAVE_ONLY (255)
Domain number:	24

Parent

Port identity:	4@64:60:38:ff:fe:9c:80:00
Grandmaster identity:	ec:46:70:ff:fe:0a:9b:21
Grandmaster clock class:	PRIMARY_REF_PTP (6)
Grandmaster clock accuracy:	WITHIN_100_NS (0x21)
Grandmaster clock variance:	20061
Grandmaster priority 1:	128
Grandmaster priority 2:	127

Time

UTC offset:	37
UTC offset valid:	true
Leap 59:	false
Leap 61:	false
Time traceable:	true
Frequency traceable:	true
PTP time scale:	true
Time source:	GPS (0x20)

© 2021 OMICRON Lab - License Information

Abbildung A.3: PTP-Status des Ticro zur Prüfung der Synchronisierung

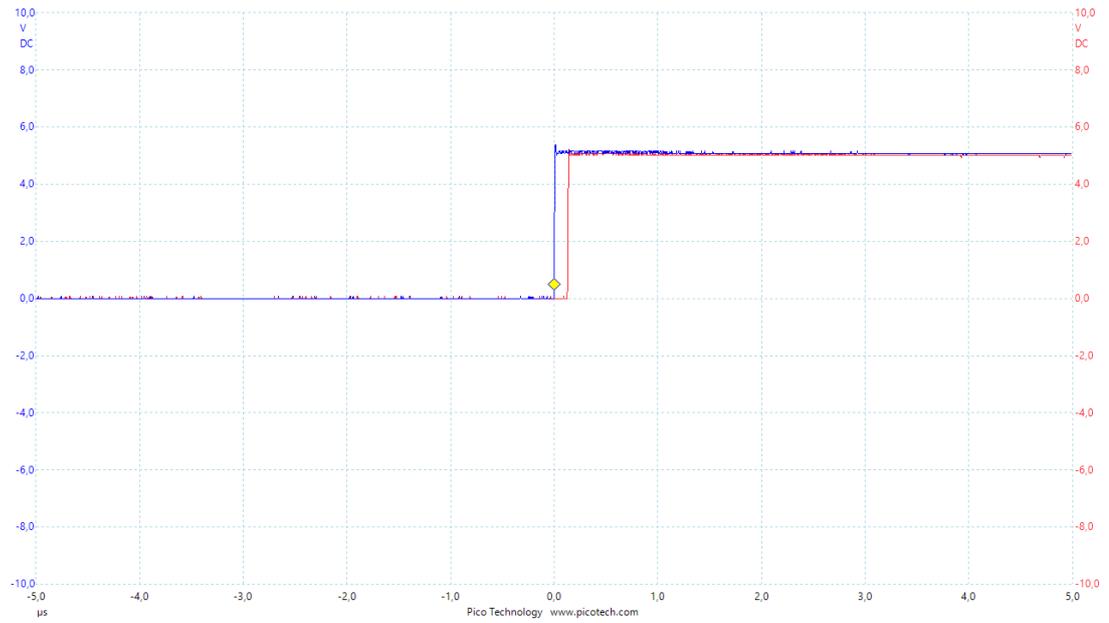


Abbildung A.4: Zeitunterschied der Synchronisierungsvarianten bei 1 μ s Zeitauflösung (blau: MicroSync, rot: Ticro)

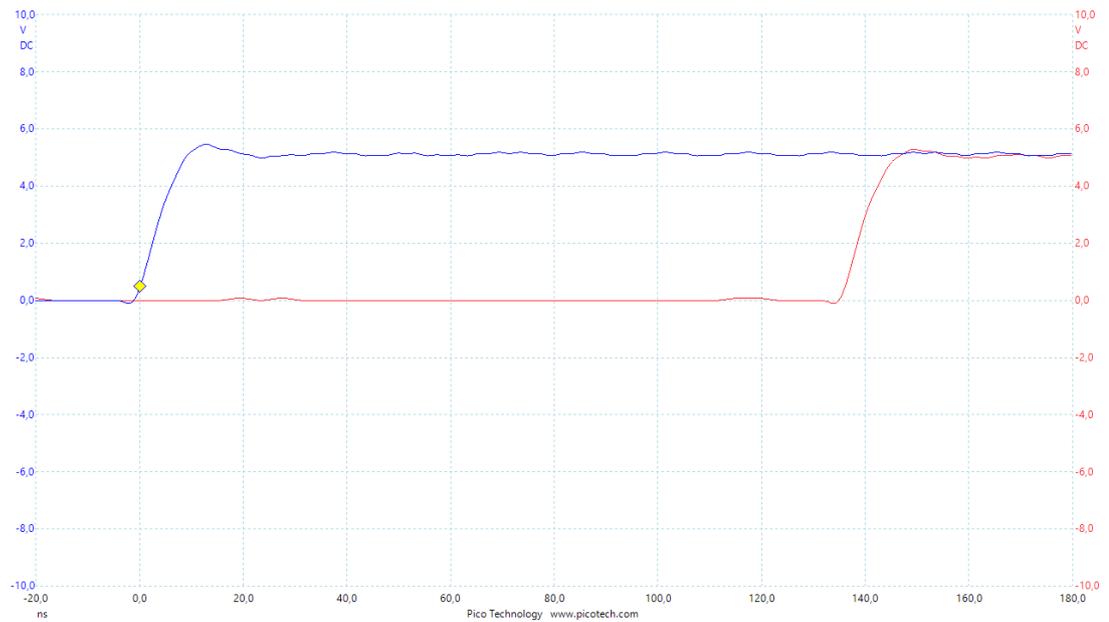


Abbildung A.5: Zeitunterschied der Synchronisierungsvarianten bei 20 ns Zeitauflösung (blau: MicroSync, rot: Ticro)

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original