

# Ethernet-APL Bandbreitenerweiterung für industrielle Anwendungen

Harald Müller / Benedikt Spielmann, Jörg Hähnicke

Endress+Hauser  
Temperature and System Products / Digital Solutions  
Obere Wank 1 / Christoph Merian-Ring 4  
87484 Nesselwang / 4153 Reinach (CH)  
harald.mueller@endress.com  
benedikt.spielmann@endress.com  
joerg.haehnicke@endress.com

**Abstract:** Ethernet Technologie ist in Prozessanlagen nur in den höheren Ebenen der Automatisierungspyramide im Einsatz, kaum in der Feldebene. Dabei bietet Ethernet viele Vorteile, die vor allem im Zuge der Digitalisierung und Industrie 4.0 genutzt werden könnten. Mit Ethernet-APL liegt nun eine Lösung vor, die den Einsatz von Ethernet mit 10 Mbit/s in der Prozessautomatisierung auch in einer rauen und explosionsgefährdeten Umgebung möglich macht. Auch wenn 10 Mbit/s gegenüber den bisherigen Feldbuslösungen ein Quantensprung in der verfügbaren Übertragungsbandbreite darstellen, zeigt sich in heutigen Betrachtungen der zu erwartenden Netzwerklasten schon bald auch die 10 Mbit/s als ein Engpass in der verfügbaren Bandbreite. In IEEE 802.3 existieren bereits Standards für 2-Leiter Ethernet mit 100 Mbit/s, 1Gbit/s und mehr. Die dort festgelegten maximalen Kabelstrecken sind allerdings für Anwendungsfälle im Automobilbereich ausgelegt (max. 40m) und genügen somit nicht den Anforderungen anderer Industrien. Für den Nachweis der Realisierbarkeit einer Bandbreitenerweiterung auf 100 Mbit/s bei Beibehaltung der verwendeten Kabelstruktur wurden von Endress+Hauser in Kooperation mit der Fachhochschule Nordwestschweiz diverse Machbarkeitsstudien durchgeführt. Nach einer kurzen Einführung der Notwendigkeiten für eine Bandbreiten-Erweiterung bei Ethernet-APL sollen die Ergebnisse der 100 Mbit/s Untersuchungen im Detail vorgestellt und ein Ausblick auf die weiteren Aktivitäten gezeigt werden.

## 1 Einführung Ethernet-APL

### 1.1 Warum es eine neue Technologie im Feld der Prozessautomation benötigt

Die Digitalisierung wird zunehmend auch in der Prozessindustrie vorangetrieben. Prozessanlagen sind danach bestrebt, Produkte mit immer höherer Effizienz und steigender Qualität zu produzieren, Time to Market und Kosten zu reduzieren. Die digitale Transformation kann bei diesen Bestrebungen unterstützen. Neue digitale Technologien ermöglichen die Vernetzung aller Bestandteile einer Prozessanlage, wodurch Daten anlagenweit zentral erfasst, konsolidiert und ausgewertet werden können. Daten, das Gold des digitalen Zeitalters, sind die Basis für eine fortlaufende Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung. Die Geräte im Feld der Prozessanlagen sind längst smart genug, detaillierte Informationen über sich selbst und über Prozesse zu liefern. Basierend auf diesen Daten können digitale Services wie beispielsweise Erfassung der installierten Basis, detaillierte Gerätediagnoseinformationen oder vorbeugende Wartungen der Instrumentierung bereitgestellt werden. Problematisch heute ist einzig der fehlende oder der aufwändige Zugang zu diesen Daten. Die aktuell etablierten Technologien im Feld von Prozessanlagen unterstützen zwar bereits einen Fernzugriff auf die Feldebene, für datengetriebene Use Cases ist die verfügbare Bandbreite allerdings nicht ausreichend. Erschwerend kommt hinzu, dass durch verschiedene Technologien entlang der Automatisierungspyramide zusätzliche Hardware, Konvertierung von Protokollen benötigt werden, was die Komplexität des Anlagendesigns erhöht und keine transparente Kommunikation von der Prozessebene bis zum Feldgerät zur Verfügung stellt.

Auf den oberen Ebenen der Automatisierungspyramide ist Ethernet Technologie als Standard für die Datenübertragung etabliert. In Industrien wie der Fabrik- oder Gebäudeautomation wird Ethernet-basierte Kommunikation bereits großflächig eingesetzt, bis zur Instrumentierungsebene. In der Prozessautomation konnte die Ethernet Technologie bisher kaum in der Feldebene zum Einsatz kommen. Gründe dafür liegen in den bestehenden Ethernet Spezifikationen, die den hohen Anforderungen der Prozessindustrie bisher nicht genügen.

## 1.2 Ethernet-APL

Mit der Einführung des Advanced Physical Layers für Ethernet, kurz Ethernet-APL, sind die Hindernisse für den Einsatz von Ethernet-fähigen Instrumenten, selbst in explosionsgefährdeten Bereichen einer Anlage beseitigt. Ethernet-APL ist ein eigensicherer Physical Layer, ausgelegt für 2-adrige Kabel, für den Einsatz in allen Anwendungen der Prozessautomatisierung. Zu den Charakteristiken von Ethernet-APL gehören eine hohe Kommunikationsgeschwindigkeit, die Möglichkeit der Installation in explosionsgefährdeten Bereichen, die Stromversorgung von Feldinstrumentierung und die Datenübertragung über ein 2-Leiter Kabel sowie die Möglichkeit zur Überbrückung langer Kabeldistanzen.

Die führenden Standardorganisationen FieldComm Group, ODVA, OPC Foundation und PROFIBUS & PROFINET International sowie 12 wichtige Projektpartner aus der Industrie haben in den letzten Jahren im Rahmen des „APL Projekts“ erfolgreich zusammengearbeitet, um diesen neuen Physical Layer für Ethernet Technologie zu entwickeln. Mit der Veröffentlichung der Spezifikationen, Engineering Guidelines und Konformitätstestplänen im Juni 2021, können Endanwender nun Komponenten von führenden Anbietern erwarten – erste Produkte sind bereits offiziell verfügbar.

Ethernet-APL erweitert die Single Pair Ethernet Technologie aus IEEE 802.3cg-2019 (10BASE-T1L) [1], um wichtige Eigenschaften, damit ein Einsatz in Prozessanlagen ermöglicht wird. Die elektrischen Parameter, die ein Ethernet-APL Gerät erfüllen muss, um den eigensicheren Zündschutz zu gewährleisten, sind in der technischen Spezifikation IEC TS 60079-47 definiert [2]. Dieses Konzept wird als 2-WISE bezeichnet (2-Wire Intrinsically Safe Ethernet) und basiert auf dem Fieldbus Intrinsically Safe Concept (FISCO). Durch die Definition von Port Profilen in der APL Port Profile Spezifikation [3] werden funktionale und elektrische Anforderungen mit mehreren Leistungsstufen festgelegt. Dadurch sind unterschiedliche Topologien in APL Netzwerken möglich, wie beispielsweise das weit verbreitete Trunk-and-Spur Konzept mit Kabellängen bis zu 1000m auf den Trunk und bis zu 200m auf dem Spur. Die APL Port Profile Spezifikation beinhaltet zusätzlich Installationsregeln, wie zum Beispiel zugelassene Kabel, Verbindungstechnologie, Schirmung und Erdung. Das Fieldbus Cable Type A nach IEC 61158-2 ist das bevorzugte Kabel für APL Segmente, da es alle notwendigen Kabelanforderungen gemäß 2-WISE für Eigensicherheit erfüllt und auch die genannten Kabeldistanzen unterstützt. Für die Verbindung von APL Komponenten werden in der Spezifikation Klemmverbindungen und M8 / M12 Steckverbinder definiert. Die Ethernet-APL Engineering Guideline unterstützt Endanwender bei dieser neuen Technologie von der Planung bis zur Installation, inkl. Best Practices.

Mit Ethernet-APL wurde ein einheitlicher Physical Layer definiert, der alle im ISO/OSI-Modell darüber liegenden Schichten unterstützt. Damit kann auch jedes bekannte Netzwerkprotokoll und Industrial Ethernet Protokoll, wie z.B. PROFINET auf Ethernet-APL implementiert werden. Durch die Konformitätstests bei den oben genannten Standardisierungsorganisationen wird die Interoperabilität der APL Produkte sichergestellt.

Durch Tests erster APL Geräte in der Praxis wurde der Nutzen der Technologie demonstriert. Mit Ethernet-APL ergeben sich Vorteile entlang aller Lebenszyklusphasen einer Anlage: Engineering Aufwände werden minimiert und weniger komplex. Die Installation von APL Komponenten ist über einfachen Klemmanschluss und Polaritätsunabhängigkeit einfach und fehlersicher. Die Integration von Ethernet-basierten Komponenten ins Prozessleitsystem ist halb-automatisiert und wird je nach Industrial Ethernet Protokoll durch Profile weiter vereinfacht. Die hohe Datenübertragung ermöglicht schnelle Parameter Up- und Downloads. Fehlerlokalisierung im Ethernet-Netzwerk oder in den Geräten ist durch etablierte Tools einfach und auch per Fernzugriff möglich. Dank der durchgängigen Ethernet Technologie wird der Zugriff auf die Daten im Feld vereinfacht, sodass datengetriebene Applikationen, digitale Services im Rahmen der NAMUR Open Architecture [4] ermöglicht werden.

Ethernet-APL verbindet die Vorteile der einfachen, robusten und bekannten 2-Leiter Technologie mit all den Vorteilen der Ethernet Technologie. Durch die hohe Performance und den transparenten Zugriff auf die Daten im Feld wird die digitale Transformation in Prozessanlagen begünstigt und vorangetrieben.

## 2 Bandbreitenerweiterung 100Mbit/s für Ethernet-APL

Ethernet-APL mit einer Datenübertragung von 10Mbit/s, auf Basis des IEEE Standard: 802.3cg 10BASE-T1L, wird für viele Anwendungsbereiche der Prozessindustrie ausreichen, um datengetriebene Applikationen im Rahmen der Digitalisierung umsetzen zu können. Es gibt jedoch Anwendungen, die noch höhere Datenraten benötigen. Aus diesem Grund beschäftigt sich das APL Projekt mit der Bandbreitenerweiterung

auf 100Mbit/s. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen eines neuen IEEE 802.3 Standards für eine 2-Leiter Ethernet Lösung mit 100Mbit/s für lange Kabellängen.

Die technischen Anforderungen an die Architektur leiten sich aus der 10 Mbit/s Ethernet-APL Lösung ab, wobei lediglich die die maximalen Kabellängen aufgrund der höheren Kabeldämpfung bei entsprechender Übertrags Frequenz eingeschränkt sind. Die maximal möglichen Kabellängen werden in der IEEE 802.3 Study Group für das Link-Segment entsprechend spezifiziert. Zurzeit werden hier Kabellängen im Bereich von 300...500 m diskutiert und es zeigt sich, dass mit diesen Kabellängen umfassende Anwendungen in den verschiedenen Industrien abgedeckt werden können. Damit die Kompatibilität mit den anderen IEEE Single Pair Ethernet Standards gegeben ist und insbesondere die Rückwärtskompatibilität mit dem 802.3cg Standard 10BASE-T1L gegeben ist, wird die im IEEE 802.3cg Standard etablierte Auto Negotiation gefordert. Somit können Ethernet-APL Netzwerke Geräte zukünftig mit 10Mbit/s und 100 Mbit/s kommunizieren. Die Festlegung der Übertragungsrate erfolgt in der Start-up Phase mit dem Ziel die max. mögliche Rate entsprechend automatisch auszuwählen, damit eine einfache Inbetriebnahme des gesamten Netzwerks möglich ist.

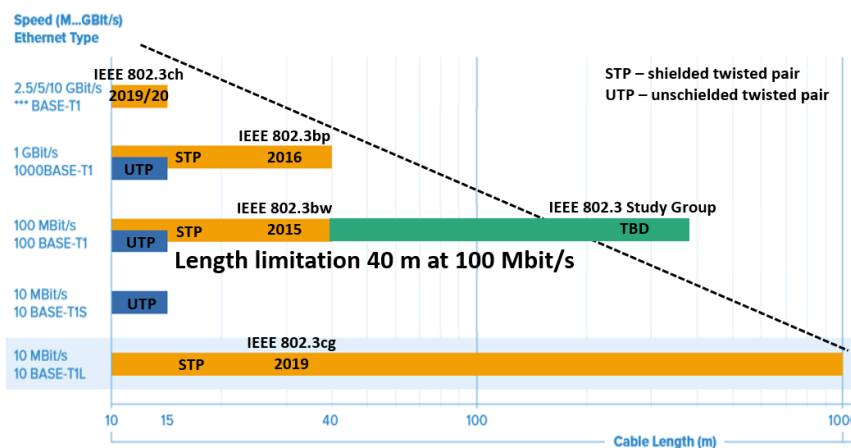


Abbildung 1: Reichweiten und Übertragungsgeschwindigkeiten der aktuellen IEEE802.3 Single Pair Ethernet Standards. Der grüne Balken zeigt die 100 Mbit/s Bandbreitenerweiterung im Rahmen der IEEE 802.3 Study Group

In IEEE 802.3 existieren bereits Standards für 2-Leiter Ethernet mit 100 Mbit/s, 1Gbit/s und mehr, siehe Abbildung 1. Die dort festgelegten maximalen Kabellängen sind allerdings für Anwendungsfälle im Automobilbereich ausgelegt (max. 40m) und genügen somit nicht den industriellen Anforderungen.

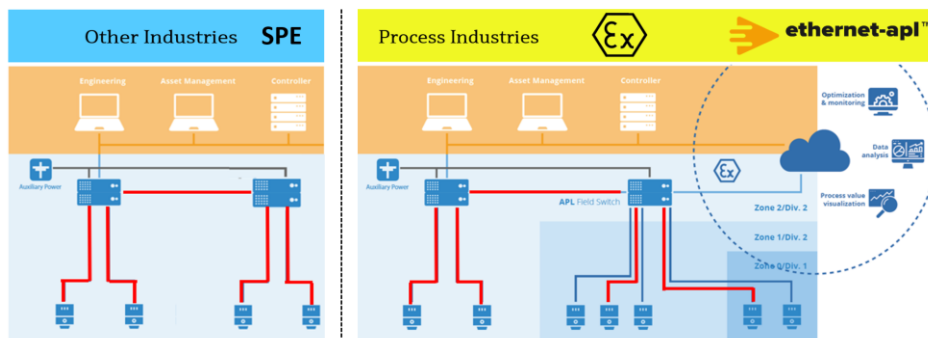


Abbildung 2: In Rot werden mögliche 100 Mbit/s Single-pair-Ethernet Punkt-zu-Punkt Verbindungen dargestellt (Switch-Switch, Switch-Feldgerät). Hierbei wird von der gleichen Architektur wie bei der 10 Mbit/s Lösung ausgegangen.

Im Rahmen des APL Projektes zur Bandbreitenerweiterung auf 100 Mbit/s wurde ein Realisierungsnachweisprojekt von Endress+Hauser in Kooperation mit der Fachhochschule Nordwestschweiz und diversen internen Machbarkeitsstudien bei Endress+Hauser durchgeführt, die gezeigt haben, dass mit einem Fieldbus Cable Type A Kabellängen im Bereich von 300...500 m erreicht werden können.

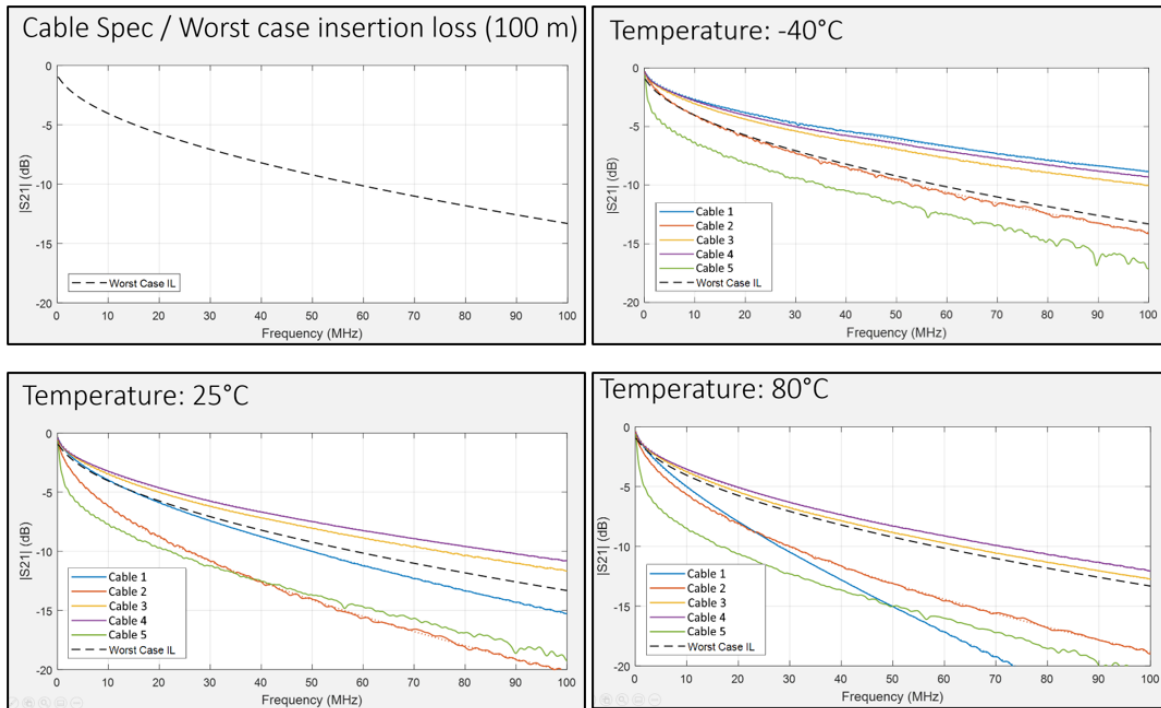


Abbildung 3: Einfügedämpfung gemessen bei unterschiedlichen Temperaturen für diverse Fieldbus Cable Type A

Abbildung 3 zeigt Messergebnisse für die Messung der Einfügedämpfung (Insertion Loss) bei verschiedenen geschirmten twisted-pair Kabeln. Die S21 Kabelübertragungsparameter werden bei verschiedenen Temperaturen im Frequenzbereich bis 100 Mhz dargestellt. Die Kurven zeigen, dass mit einem Fieldbus Cable Type A 100 Mbit/s übertragen werden kann. Die maximal mögliche Kabellänge wird hierbei durch den internen Aufbau des PHY's und des Signal-to-Noise Abstands beeinflusst.

Aufbauend auf den Kabelmessungen wurde ein Matlab/Simulink worst-case Modell von PHY-Kabel-PHY Strukturen erstellt um theoretisch die Realisierbarkeit einer 100Mbit/s Kommunikation über 200 m (Spurverbindung) bzw. 300...500 m (Trunkverbindung) mit dem Fieldbus Cable Type A nachzuweisen.

Es wurde dabei von einer Signalamplitude von 2 Volt Peak-to-Peak Trunk und 1 Volt Peak-to-Peak Spur ausgegangen. Im Rahmen der theoretischen Untersuchungen mit den simulierten Störquelle zeigten sich die Kodierungsvarianten 3B2T (3 Bit codiert auf jeweils 2 Symbole mit 3 möglichen Zuständen) und 4B3T (4 Bit codiert auf jeweils 3 Symbole mit 3 möglichen Zuständen) den höchsten Signal-zu-Rausch Abstand.

In Abbildung 4 wird der simulierte Verlauf sowie die Verteilung des Signals bei Verwendung eines Fieldbus Cable Type A mit Störsignal (weißen Rauschen) gezeigt. Hierbei wurden optimale Filtereinstellungen verwendet, welche später in der Blind Training Phase ermittelt werden. Die zeitliche Darstellung (links) sowie die Werteverteilung (rechts) wird ohne (grün) und mit (rot) simuliertem Sinus Störsignal dargestellt. Das Störsignal wurde als Sinus mit gleichbleibender Amplitude und zeitlich steigender Frequenz simuliert.

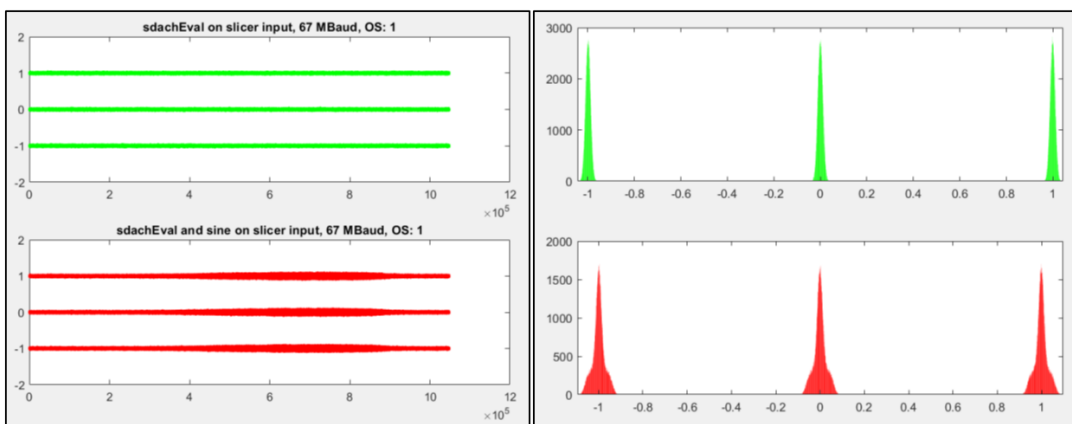


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf und Verteilung von aufbereiteten Signalen vor der Symbolzuordnung, ohne (grün) und mit (rot) simuliertem Störsignal mit 200m Worstcase Fieldbus Cable Type A

Abbildung 5 zeigt den in Simulink simulierten zeitlichen Verlauf mehrerer Parameter innerhalb eines PHYs bei einem Verbindungsaufbau zweier PHYs über ein 200m worst-case Fieldbus Cable Type A. Dargestellt wird das analog zu digital gewandelte Eingangssignal (orange), das digital aufbereiteten Signal (gelb), der Signal-zu-Rausch Abstand (grün) und der Symbolzuordnungsfehler (rot). Bei der Simulation wurde davon ausgegangen, dass während des Trainings der Signalaufbereitung mit zwei Signalzuständen gearbeitet wird. Nach festgelegter Zeit wurde schließlich auf die PAM-3 Codierung umgeschaltet. Das aufbereitete Signal zeigt eine Signalauflösung mit ausreichender Genauigkeit bereits nach wenigen Millisekunden.

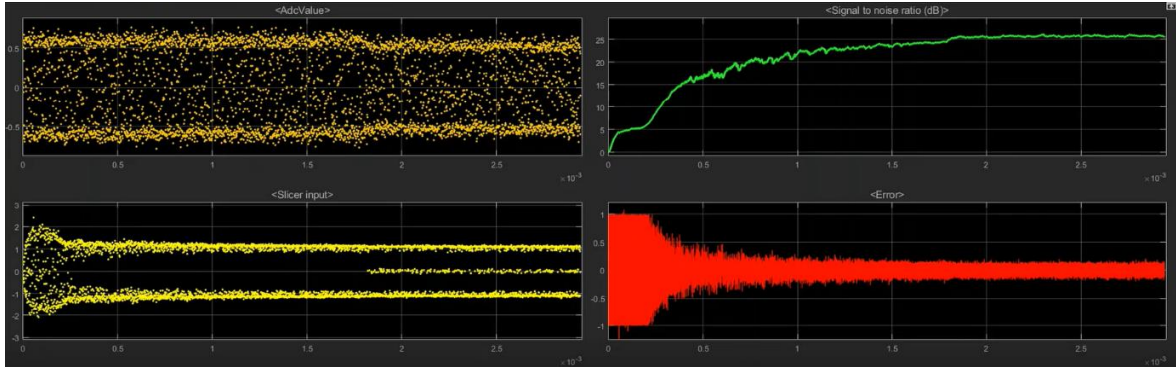


Abbildung 5: Simuliertes Blind Training der adaptiven Filter des PHY Modells mit Rohwerten (orange), aufbereiteten Werten (gelb), SNR (grün) und Symbolerkennungsfehler (rot)

Auf Grundlage des simulierten PHY-Kabel-PHY Modells konnte schließlich ein Evaluationsboard mit einem 10/100Mbit/s PHY Prototyp auf FPGA-Basis realisiert werden. Der PHY Prototyp unterstützt dabei sowohl 10Mbit/s Kommunikation über 1000m als auch 100Mbit/s Kommunikation über ein 300m Fieldbus Cable Type A bei einer Signalamplitude von 2Vpp.

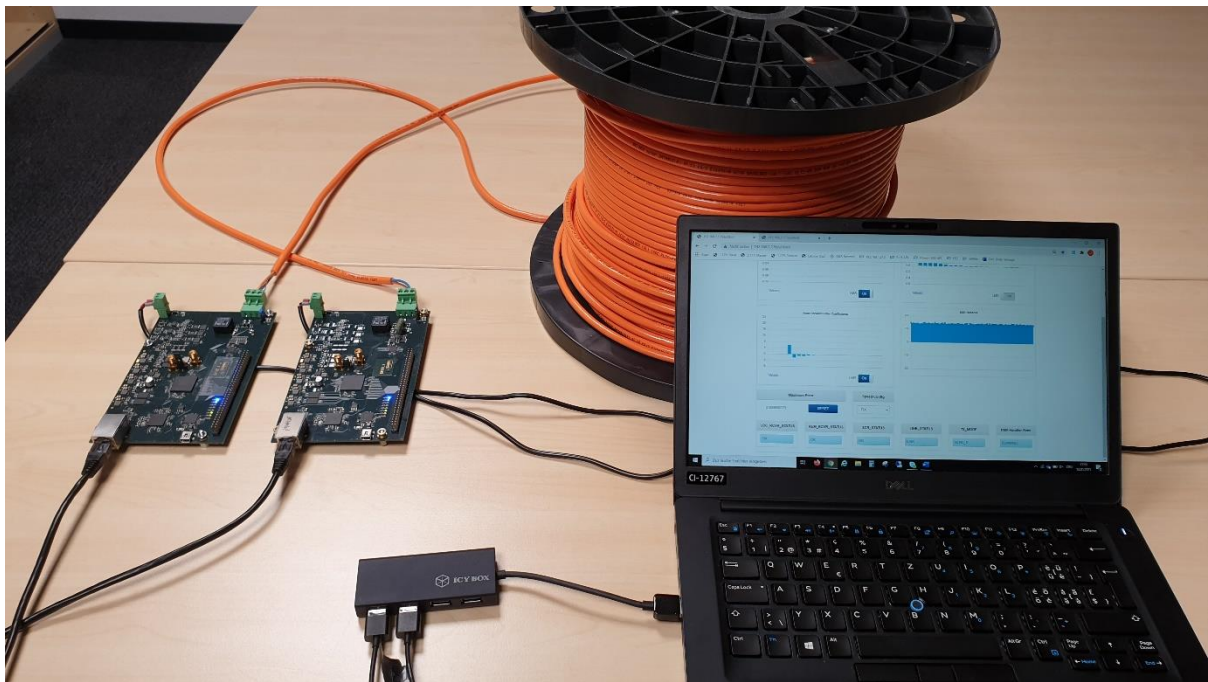


Abbildung 6: Testaufbau mit Evaluationsboards und Fieldbus Cable Type A

Der Physical Medium Attachment Layer (PMA) des Prototyps verwendet eine in Hardware realisierte Hybrid Schaltung sowie einen digitalen Echo Canceller, um das empfangene Echo auszublenden, einen Decision Feedback Equalizer zur Aufbereitung der empfangenen Symbole sowie einen Mueller-Müller Algorithmus zur Taktsynchronisation.

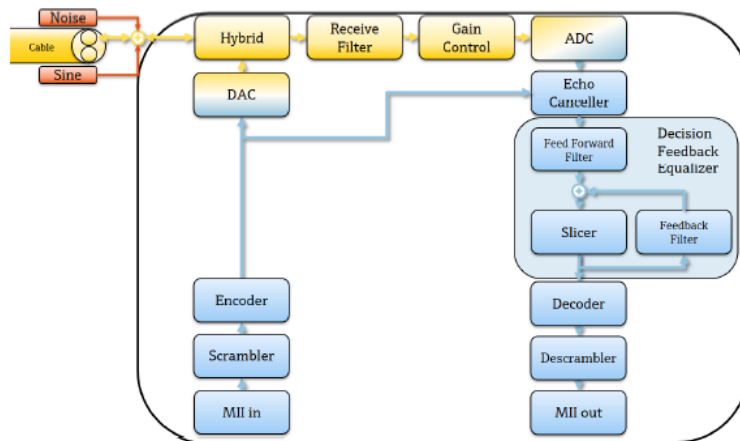


Abbildung 7: Grundstruktur des Transceivers der Simulation

Abbildung 7 zeigt auf Blockebene den Aufbau des 10/100Mbit/s PHY Prototyp auf FPGA-Basis. Die digitalen Bausteine werden als blaue Rechtecke dargestellt, während blaue Pfeile digitale Übergabeparameter anzeigen. Alle blau dargestellten Objekte sollen später auf dem FPGA realisiert werden. Gelbe Rechtecke stellen analoge Schaltungen dar, während gelbe Pfeile Spannungen anzeigen. Der Digital-Analog-Wandler (DAC) sowie der Analog-Digital-Wandler sind als gelb-blaue Rechtecke dargestellt, da diese Komponenten den Übergang zwischen dem digitalen FPGA und dem analogen Frontend bilden. Störungen, die vom Kabel ausgehen, sind dunkelorange dargestellt.

Der Verbindungsaufbau wird mittels Blind Training durchgeführt, wobei beiden PHYs außer der Kodierungsvariante nichts über die gesendeten Signale des jeweiligen Gegenübers bekannt ist. Der Physical Coding Sublayer (PCS) wurde für beide Übertragungsgeschwindigkeiten auf Grundlage des Standards IEEE 802.3cg für 10BASE-T1L aufgebaut. Für die Untersuchung des Prototyps verfügt das FPGA außerdem über ein System-on-Chip mit Webserver, über den sowohl Systemparameter ausgelesen werden als auch Konfigurationen während der Laufzeit eingestellt werden können. Zudem können in Echtzeit jeweils zwei Zwischenparameter aus dem PMA sowie dem PCS auf eine Stiftleiste ausgegeben werden, um die hochfrequenten Berechnungsprozesse analysieren zu können. Das Evaluationsboard ist als 3-Port Ethernet-Switch ausgeführt, wobei jeweils ein Port mit dem 10/100Mbit/s PHY Prototypen, mit einer 100BASE-TX Ethernet Schnittstelle und dem Webserver verbunden ist. Das Evaluationsboard verfügt über zwei Bestückungsvarianten, wobei die eine einen APL Power Source Port mit integrierten Ex-Begrenzungen und die andere einen APL Power Load Port darstellt. So kann die Kommunikation bei laufender Energieübertragung analysiert werden.

Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem Webserver des Evaluationsboards. Zu sehen sind die aktuellen Filterkoeffizienten des Echo Cancellers sowie des Feed Forward und Feedback Filters, die den Decision Feedback Equalizer bilden. Ausserdem ist die aktuelle Signal-zu-Rausch (SNR) Verhältnisreserve zu sehen, welche den Abstand zur mindestens benötigten SNR darstellt.



Abbildung 8: Screenshot aus dem Webserver des 10/100Mbit/s APL Evaluationsboards

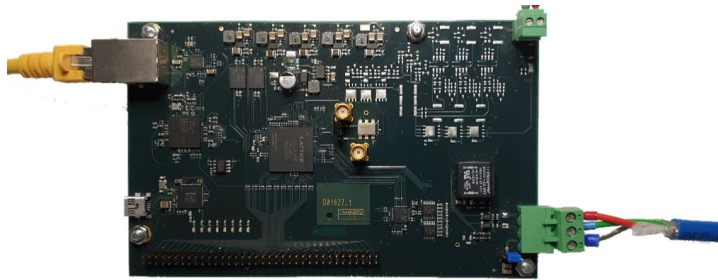


Abbildung 9: PCB des 10/100Mbit/s APL Evaluationsboards

Abbildung 9 zeigt die zwei Bestückungsvarianten der Evaluationsboards für einen APL Power Source und einen APL Power Load Port.

Das 10/100Mbit/s APL Evaluationsboard wurde im Rahmen der Phase 2 vom Ethernet APL – Projekt von Endress + Hauser aufgebaut, um die technische Machbarkeit inkl. der geforderten Rückwärtskompatibilität zur Phase 1 – 10 Mbit/s (10BASE-T1L) nachzuweisen. Für die Standardisierung auf IEEE 802.3 werden die Ergebnisse ebenfalls in der aktuellen Study Group und später in der Task Force Group als Nachweis der Machbarkeit verwendet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass über 2 Leiter auch eine Übertragung mit 100 Mbit/s über eine lange Strecke mit dem Feldbus Kabel Typ A möglich ist. 200m Spur-Länge wären kein Problem. In den Untersuchungen war eine fehlerfreie Übertragung über mehr als 300m möglich.

### 3 Literaturverzeichnis

- [1] IEEE Computer Society  
IEEE Standard for Ethernet - Amendment 5: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced Pair of Conductors, IEEE 802.3cg-2019, 2019.
- [2] IEC- International Electrotechnical Commission  
IEC TS 60079-47 Explosive atmospheres – Part 47: Equipment protection by 2-wire intrinsically safe Ethernet concept (2-WISE), 2021.
- [3] APL Project  
Ethernet-APL Port Profile Specification, Version 1.0, June 2021
- [4] NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie  
NAMUR Empfehlung NE 175: NAMUR Open Architecture, NOA Konzept