

Performancebetrachtungen von Ethernet-APL Netzwerken - Ergebnisse aus einer Lastsimulation und einer Messung

Karl-Heinz Niemann, Lukas Krapp, Frank Birgel

Suggested citation:

Niemann, Karl-Heinz, Lukas Krapp, and Frank Birgel. 2024. "Performancebetrachtungen von Ethernet-APL Netzwerken - Ergebnisse aus einer Lastsimulation und einer Messung." In *Automation 2024 - 25. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik - AI beats Automation?*, 665–79. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH. <https://doi.org/10.25968/opus-3453>.

Abstract

Eine einheitliche und durchgängige Kommunikation auf Basis von Ethernet bietet zahlreiche Vorteile für Anlagenbetreiber, besonders in der Prozessindustrie. Ethernet-APL überbrückt die letzte Meile zum Feldgerät und ermöglicht so ein konvergentes Netzwerk bis in die MES-Ebene. Die Anforderungen an ein solches Kommunikationssystem wurden schon früh von der NAMUR in der NAMUR Empfehlung NE 168 definiert. Verschiedene Echtzeitprotokolle wie PROFINET, EtherNet/IP sowie das Middleware-Protokoll OPC UA können so auch bis zum Sensor/Aktor durchgängig kommunizieren. Beim Einsatz von Ethernet-APL werden auf dem Weg vom Controller zum Sensor die Informationen mit verschiedenen Datenraten kommuniziert. Hierbei treten verschiedene Fragestellungen auf, die der folgende Beitrag beantworten soll:

- Welche Performance-Probleme entstehen beim Übergang von 100 Mbit/s oder 1 Gbit/s auf dem Industrial Ethernet zu den 10 Mbit/s bei Ethernet-APL?
- Wie verhalten sich große Ethernet-APL Netzwerke bei hoher Last?

- Welche Empfehlungen können für die Planung von Ethernet-APL-Netzwerken abgeleitet werden?

Performancebetrachtungen von Ethernet-APL Netzwerken Ergebnisse aus einer Lastsimulation und einer Messung

Prof. Dr.-Ing. **K.-H. Niemann**, Hochschule Hannover, Hannover

L. Krapp M. Eng., Hochschule Hannover, Hannover

F. Birgel, Endress + Hauser Process Solutions AG, Reinach (CH)

Kurzfassung

Eine einheitliche und durchgängige Kommunikation auf Basis von Ethernet bietet zahlreiche Vorteile für Anlagenbetreiber, besonders in der Prozessindustrie. Ethernet-APL überbrückt die letzte Meile zum Feldgerät und ermöglicht so ein konvergentes Netzwerk bis in die MES-Ebene. Die Anforderungen an ein solches Kommunikationssystem wurden schon früh von der NAMUR in der NAMUR Empfehlung NE 168 [1] definiert. Verschiedene Echtzeitprotokolle wie PROFINET, EtherNet/IP sowie das Middleware-Protokoll OPC UA können so auch bis zum Sensor/Aktor durchgängig kommunizieren. Beim Einsatz von Ethernet-APL werden auf dem Weg vom Controller zum Sensor die Informationen mit verschiedenen Datenraten kommuniziert. Hierbei treten verschiedene Fragestellungen auf, die der folgende Beitrag beantworten soll:

- Welche Performance-Probleme entstehen beim Übergang von 100 Mbit/s oder 1 Gbit/s auf dem Industrial Ethernet zu den 10 Mbit/s bei Ethernet-APL?
- Wie verhalten sich große Ethernet-APL Netzwerke bei hoher Last?
- Welche Empfehlungen können für die Planung von Ethernet-APL-Netzwerken abgeleitet werden?

1. Ethernet-APL

Mit dem Ethernet-APL Physical Layer für Ethernet steht seit dem Jahr 2021 eine Technologie für eine durchgängig digitale Kommunikation im Feld auf Basis von Ethernet zur Verfügung [2]. Bild 1 zeigt den Ethernet Advanced Physical Layer als einen von mehreren möglichen Physical Layer für den Einsatz von Ethernet in der Prozessindustrie. Es ist in Bild 1 zu erkennen, dass die Schichten 2 bis 7 für alle Physical Layer identisch sind. Damit können Sensoren und Aktuatoren über die Ethernet-Kommunikation durchgängig in ein Automatisierungssystem eingebunden werden.

Copyright © VDI Verlag GmbH; Fundstelle des Originals:

Automation 2024 - 25. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik - AI beats Automation?,
Seite 665-679. 2024. ISBN: 978-3-18-092437-3.

URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/shop/automation-2024/>

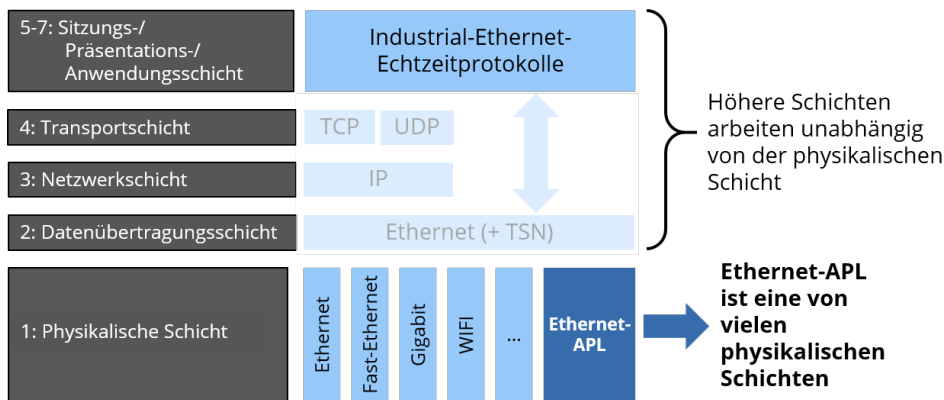


Bild 1: Ethernet-APL Physical Layer als Teil des ISO/OSI-Protokollstacks

So kann ein Controller mit PROFINET-Schnittstelle direkt mit dem Messumformer oder Aktuator über Ethernet kommunizieren. Ethernet-APL ist ein Zweidraht-Ethernet mit Energieversorgung der Teilnehmer über die Busleitung gemäß IEEE 802.3cg [3] bei einer Datenrate von 10 Mbit/s. Bild 2 zeigt eine typische Systemstruktur einer Automatisierungsanlage mit Ethernet-APL.

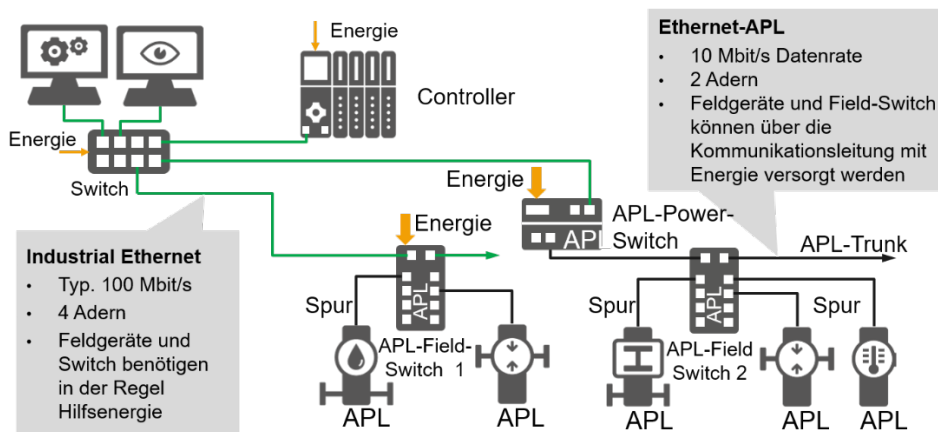


Bild 2: Systemstruktur eines Automatisierungssystems mit Ethernet-APL

Der Controller kommuniziert in diesem Beispiel über PROFINET. Die Ethernet-APL Messumformer sind über APL-Field-Switches mit dem Controller verbunden. Diese Switches arbeiten zum einen als normale Ethernet-Switches, zum anderen versorgen sie die Ethernet-APL Messumformer mit Energie. Es gibt zwei Typen von Field Switches. APL-Field Switch 1 wird über ein Standard-Ethernet (100 Mbit/s oder auch 1 Gbit/s Datenrate) angebunden und wird mit Hilfsenergie, z. B. 24 V DC, versorgt. Der Ethernet-APL Field Switch 2 auf der rechten Seite wird über einen APL Trunk mit Daten und Energie versorgt. Die Speisung des rechten Field-Switches erfolgt über einen APL Power-Switch. Dieser speist Daten und Energie in den Trunk ein und sorgt für die Umsetzung der Datenrate auf 10 Mbit/s, die auf dem Trunk verwendet wird. Weitere Informationen zur Systemtopologie und zur Planung von Ethernet-APL-Systemen finden sich in [4].

2. Gemischte Datenraten in Automatisierungsnetzwerken mit Ethernet-APL

Die Inhalte dieses Kapitels basieren auf der Masterarbeit von Herrn Lukas Krapp von Ende 2022 [5]. Die zugrundeliegenden Messungen im Rahmen der Arbeit wurden an Switch-Prototypen von zwei Herstellern durchgeführt. In der Zwischenzeit haben beide Hersteller die getesteten Geräte weiter verbessert und zur Serienreife gebracht. Unter anderem wurden noch bei einem Gerät Rate-Limiter ergänzt.

Betrachtet man Bild 2 in Bezug auf die verwendete Netzwerkstruktur, so kann man folgende Eigenschaften erkennen:

1. Es wird eine Ethernet-Kommunikation nach IEEE 802.3 eingesetzt [6]. Eine Übersicht über Funktion und Aufbau des Kommunikationsstandards findet sich in [7].
2. Ethernet-APL verbindet die Feldgeräte-Ebene (10 Mbit/s) mit der Steuerungs- & Überwachungsebene in Industrial-Ethernet Struktur (100 Mbit/s). (siehe Bild 2) Die Daten zwischen der Feldebene und der Steuerungsebene werden sowohl von der Feld- zur Steuerungsebene transportiert, was nachfolgend als „*Upstreaming*“ bezeichnet wird. Der Verkehr in Gegenrichtung wird dann „*Downstreaming*“ genannt.
3. Eine solche Kombination verschiedener Datenraten in einem Netzwerk wird auch als „mixed-link-speed network“ bezeichnet.
4. Als Kommunikationsknoten werden Switches (auch Bridges oder Multi-Port-Bridges genannt) eingesetzt [8]. Ein Switch nimmt eintreffende Datenpakete am Eingangs-Port entgegen, puffert diese und sendet die Datenpakete dann an den designierten Ziel-Port weiter. Wenn die Anzahl der eintreffenden Pakete die Grenzen des Ethernet-Switches und/oder seiner Verbindungen für die Datenübertragung überschreitet kann es zu Paketverwerfungen (engl. „*packet discarding*“) kommen.
5. Die Verarbeitung des Netzwerkverkehrs innerhalb eines Switches wird gemäß IEEE 802.1Q [8] priorisiert. Der Standard definiert acht Prioritäten. Diese Priorisierung dient dazu, Pakete mit besonderen Zeitanforderungen (bspw. Echtzeitverkehr) bevorzugt zu übertragen. Switches haben an jedem Ausgangs-Port bis zu acht Warteschlangen für jede Prioritätsklasse. Hier werden die Pakete nach Priorität eingeordnet und von der höchsten zur geringsten Priorität übertragen. Für die Durchführung der Messungen wurden die folgenden Prioritäten festgelegt:
 - a. UDP (Real-Time Verkehr) → Priorität 6 → Hohe Priorität. Soll den Echtzeitverkehr (z. B. PROFINET RT Kommunikation) darstellen. Verlust dieser Datenpakete kann zur Störung des Prozesses führen, sofern mehrere Pakete hintereinander verloren gehen.

- b. TCP (Non-Real-Time Verkehr, Unicast) → Priorität 4 → Mittlere Priorität. Soll z. B. Datenverkehr zu einem Ethernet-APL-Feldgerät darstellen, welches einen Software-Update erhält oder über OPC UA kommuniziert. Keine Echtzeitanforderungen. Das TCP-Protokoll erkennt Paketverluste und kann verlorengegangene Pakete wiederholen.
- c. ARP (Non-Real-Time Verkehr, Broadcast) → Priorität 0 → Geringste Priorität. Protokoll zur Auflösung von IP-Adressen. Wird für Netzwerkmanagement benötigt. Keine Echtzeitanforderungen. Verlorene Pakete werden wiederholt, bzw. es wird eine erneute Anfrage gestellt.

Im Rahmen der Abschlussarbeit wurden durch Messungen zwei Anwendungsfälle (Use Cases) beim Betrieb von Ethernet-APL Switches betrachtet. Ziel der Untersuchung ist es zu klären, ob die verwendeten Switches mit Überlastsituationen spezifikationsgemäß umgehen.

2.1 Anwendungsfall 1: Übergang von 100 Mbit/s auf 10 Mbit/s im Ethernet-APL Field Switch

Bild 3 zeigt den ersten untersuchten Anwendungsfall. Ethernet-APL verfügt über zwei Arten von Switches. Power Switches und Field Switches (Siehe Bild 2). Untersucht wurde in beiden Fällen ein APL Field Switch. Bei Datenverkehr in Downstream-Richtung, setzt der APL Field Switch die ankommende Datenrate von 100 Mbit/s (Industrial-Ethernet Eingangs-Port) auf eine abgehende Datenrate von 10 Mbit/s (Ethernet-APL Ausgangs-Ports) in Richtung der angeschlossenen Feldgeräte um.

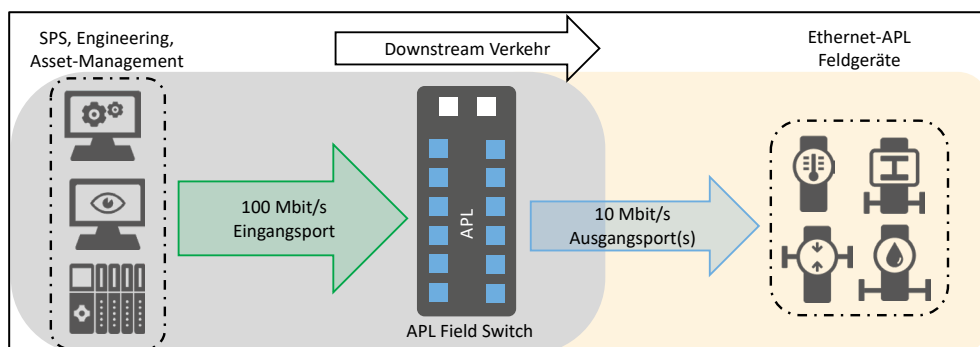


Bild 3: Übergang von 100 Mbit/s auf 10 Mbit/s im APL Field Switch, Downstream-Richtung

Bei diesem Use Case ist zu ermitteln, ob bei zunehmender Last die priorisierten Echtzeitpakete trotzdem korrekt auf den abgehenden 10 Mbit/s-Port weitergeleitet werden. Da die ankommenden Daten mit 100 Mbit/s im Switch einlaufen, die abgehenden Daten aber nur mit 10 Mbit/s abtransportiert werden, ist gerade bei hohem Dateneingang mit schwallartigen Nachrichtenbursts verschiedener Prioritäten evtl. mit einer Überlastung zu rechnen.

2.2 Anwendungsfall 2: Parallele Belastung eines APL Field Switches bei gleichzeitigem Senden aller angeschlossenen Ethernet-APL Feldgeräte

Bild 4 zeigt den zweiten untersuchten Anwendungsfall. Auf der rechten Seite sind n Ethernet-APL Feldgeräte parallel angeschlossen (typische Werte für n sind 8 bis 24).

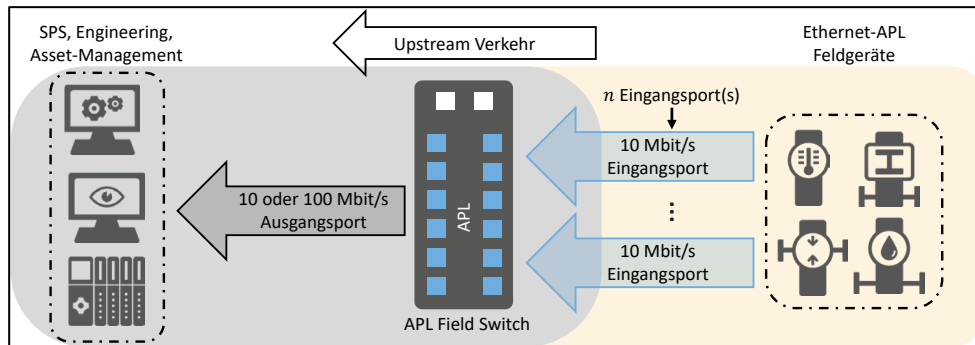


Bild 4: Übergang von n Verbindungen mit 10 Mbit/s auf eine Verbindung mit 10 oder 100 Mbit/s, Upstream-Richtung

Auf der linken Seite von Bild 4 ist zu sehen, dass die abgehenden Daten über eine 10 Mbit/s Verbindung (APL Trunk, siehe APL Field Switch 2 in Bild 2) oder über eine 100 Mbit/s Verbindung (Industrial Ethernet bis zum Field Switch, siehe APL Field Switch 1 in Bild 2) weitergeleitet werden.

Bei diesem Anwendungsfall soll geprüft werden, welches Verhalten der Switch zeigt, wenn alle n angeschlossenen Ethernet-APL Feldgeräte zeitgleich Datenpakete an die überlagerte SPS schicken. In der Realität ist ein solcher Fall nahezu auszuschließen, da die Sendezeitpunkte der Feldgeräte nicht synchronisiert sind. Dennoch ist dieses Worst-Case-Szenario zu betrachten, um die Robustheit der Ethernet-APL Field Switches zu verifizieren.

3. Ergebnisse einer Last-Simulation in Ethernet-APL-Netzwerken

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der an der Hochschule Hannover durchgeführten Messungen. Eine detaillierte Darstellung der Messergebnisse findet sich in [5].

3.1 Testaufbau

Für die beiden betrachteten Anwendungsfälle aus Kapitel 2.1 und 2.2 wurden jeweils Testaufbauten definiert. Für die Messungen kamen die nachfolgend beschriebenen Werkzeuge zum Einsatz:

- Ostinato: Werkzeug zum Erzeugen von IPv4-Verkehr mit den gewünschten Verkehrstypen und -eigenschaften. Der erzeugte Datenstrom (Paketgröße, -anzahl, -wiederholung, -priorität, etc.) kann frei konfiguriert werden [9].
- ProfiShark der Firma ProfiTAP: ProfiShark ist ein TAP-Device („Test-Access-Point“), welches in eine bestehende Ethernet-Kabelverbindung zwischen zwei Teilnehmern

eingeschleift werden kann, um den dort aufkommenden Datenverkehr (voll-duplex, quasi verzögerungsfrei) für eine detaillierte Analyse auszuleiten [10]. Die übertragenen Daten können dabei in einer Analyse-Software wie Wireshark in Echtzeit überwacht, gespeichert und ausgewertet werden.

- Wireshark: Bei Wireshark handelt es sich um ein Werkzeug zur Aufzeichnung und Analyse von Kommunikationsdaten [11].
- Workstation mit 24 über USB-Multiplexer angeschlossene Ethernet-Interfaces (emulierte Feldgeräteteilnehmer) zur Erzeugung der Datenströme auf den verschiedenen Schnittstellen des Testaufbaus.
- Ethernet-APL zu Standard-Ethernet Adapter (physische Umsetzer) um die erzeugten Datenströme in die Ethernet-APL Ports der Field Switches einzuspeisen.

Bild 5 zeigt exemplarisch einen realisierten Messaufbau für den Anwendungsfall 1. Alle genannten Bestandteile des Messaufbaus sind zusammen mit dem untersuchten Switch als DUT („Device under Test“) dargestellt.

Die Kombination aus Ethernet/USB Adapter und APL/Standard-Ethernet Medienkonverter ergeben die Anbindung der Ethernet-APL Feldgeräte. Bis zu 6 Sätze dieser Adapter-Konverter Kombination können hierbei bis zu 24 Ethernet-APL Feldgeräte emulieren. Die Emulation war erforderlich, da zum Zeitpunkt der Arbeit noch keine Ethernet-APL Feldgeräte in ausreichenden Stückzahlen zur Verfügung standen.

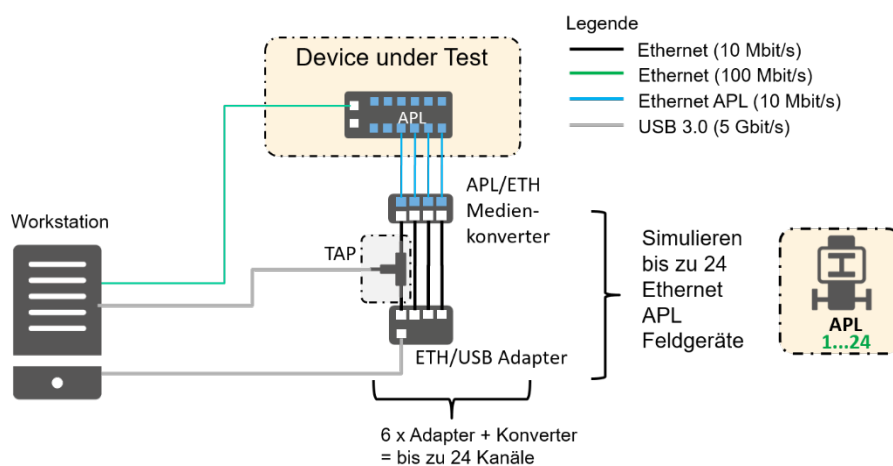


Bild 5: exemplarischer Testaufbau für Anwendungsfall 1 in Downstream-Richtung

Die Workstation sendet bei diesem Szenario Daten über die grüne markierte 100 Mbit/s Leitung an den Switch. Diese Daten werden durch den Switch dann an die bis zu 24 emulierten APL-Messumformer weitergeleitet. Die Workstation liest diese Daten über den ETH/USB-Adapter wieder ein. Zusätzlich kann für ein dediziertes Feldgerät über das TAP der Datenverkehr verlustfrei überwacht werden.

3.2 Messergebnisse Anwendungsfall 1: Übergang von 100 Mbit/s auf 10 Mbit/s im Ethernet-APL Field Switch

Für die Messung des Anwendungsfalls 1 wurden Pakete der in Kapitel 2 beschriebenen Verkehrsarten UDP, TCP und ARP in wechselnder Menge und Zusammensetzung in den 100 Mbit/s Eingangsport des Switches gesendet. Auf dem 10 Mbit/s Ausgangsport wurde dann geprüft, ob alle Daten korrekt und vollständig übertragen werden (siehe Bild 5). Tabelle 1 zeigt exemplarisch die Messergebnisse für den Anwendungsfall 1 für den Switch-Hersteller A.

Tabelle 1: Downstream Messergebnisse, Switch-Hersteller A, Anwendungsfall 1, 100 Mbit/s Eingang zu 10 Mbit/s Ausgang

#	Packet processing	UDP real-time data - single actuator	TCP IP - field device update	ARP request
1	@ ‚MinimumFrameMemory‘	¹ TPP: 88 Byte ² PUP ² (VLAN): 6 (RTC) ³ PCT: 62,5 ms PCC ⁴ : 24x1 packets / cycle FPC ⁵ : ~2 kByte/cycle PCS ⁶ : 384 packets/s FPS ⁷ : ~33 kByte/s packet loss: 0%	TPP: 1542 Byte PUP (VLAN): 4 (OPC UA) PCT: 500 ms PCC: 80 packets / cycle FPC: ~120 kByte/cycle PCS: 160 packets/s FPS: ~241 kByte/s packet loss: 0%	TPP: 88 Byte PUP (VLAN): 0 (DCP) PCT: 125 ms PCC: 100 packets / cycle FPC: ~9 kByte/cycle PCS: 800 packets/s FPS: ~69 kByte/s packet loss: 0%
2	@ decreasing ARP cycle time	see row 1 /column 1 packet loss: ~0 / ~0 / ~0%	see row 1 /column 2 packet loss: ~0 / ~0 / ~0%	PCT: 62,5/ 31,25/ 15,625 ms PCS: 1.600/ 3.200/ 6.400 packets/s FPS: ~138 / ~275 / ~550 kByte/s packet loss: ~8 / ~16 / ~18%
3	@ increasing ARP packet count	see row 1 /column 1 packet loss: ~0 / ~0 / ~0%	see row 1 /column 2 packet loss: ~0 / ~0 / ~0%	PCC: 200/ 400/ 800 packets / cycle FPC: ~17/ ~34/ ~69 kByte/cycle PCS: 1.600/ 3.200/ 6.400 packets/s FPS: ~138 / ~275 / ~550 kByte/s packet loss: ~25 / ~46 / ~82%
4	@ decreasing TCP cycle time	see row 1 /column 1 packet loss: ~0 / ~0 / ~0%	PCT: 125 ms / 62,5 ms / 31,25 ms PCS: 640/ 1.280/ 2.560 packets/s FPS: ~964 / ~1.928 / ~3.855 kByte/s packet loss: ~0 / ~38 / ~69%	see row 1 /column 3 packet loss: 0/ 100/ 100%
5	@ increasing TCP packet count	see row 1 /column 1 packet loss: ~0 / ~0 / ~6%	PCC: 320/ 640/ 1.280 packets / cycle PCS: 640/ 1.280/ 2.560 packets/s FPS: ~964 / ~1.928 / ~3.855 kByte/s packet loss: ~50 / ~70 / ~81%	see row 1 /column 3 packet loss: 15/ 15/ 31%
6	¹ TPP: total packet payload ² PUP: packet user priority ³ PCT: packet cycle time	⁴ PCC: packet count per cycle ⁵ FPC: total frame payload per cycle ⁶ PCS: packet count per second	⁷ FPS: total frame payload per second	

Die Messergebnisse sind wie folgt zu interpretieren:

- Zeile 1 zeigt ein für den Normalbetrieb antizipiertes Datenvolumen. Neben der Echtzeitkommunikation auf Priorität 6 läuft auf Priorität 4 ein simulierter OPC UA Datenverkehr mit maximal großen Datenpaketen (1542 Byte). Parallel dazu werden ARP-Requests auf Priorität 0 übertragen. Hierbei zeigt sich, dass keinerlei Informationen verloren gehen, was der „Minimum-Frame-Memory condition“ gemäß der IEC 61158-6-10 [12] entspricht.
- Zeile 2 zeigt, was passiert, wenn die Anzahl der ARP-Requests von 800 Paketen/s auf bis zu 6.400 Pakete/s, durch die schrittweise Verkürzung der Zykluszeit zwischen den versendeten Paketen, angehoben wird. Erwartungsgemäß gehen nun ARP-Pakete

teilweise verloren (gelbe Farbe bedeutet, dass weniger als 25% der Pakete verloren gehen)

- In Zeile 3 wird die Anzahl der ARP-Pakete alternativ zur Verkürzung der Zykluszeit durch die direkte Anpassung der auf einmal versendeten Pakete auf bis zu 6.400 Pakete/Sekunde angehoben. Die rote Farbe in der letzten Spalte der dritten Zeile zeigt, dass nun mehr als 25% der Pakete verloren gehen.
- In Zeile 4 wird die Anzahl der TCP-Pakete (simulierter OPC UA Verkehr) erhöht. In Analogie zu Zeile 2 geschieht dies erneut über die schrittweise Verkürzung der Zykluszeit. Es ist erkennbar, dass hierbei bis zu 69% der TCP Pakete verloren gehen. Dies ist u.a. der Tatsache geschuldet, dass diese Pakete sehr groß sind und die Verarbeitungszeit innerhalb des Switches (engl. ‚packet processing time‘) [13] entsprechend lange dauert. Gleichzeitig steigt der Paketverlust bei den ARP-Paketen auf 100%. Auch hier verhält sich der Switch erwartungsgemäß und selektiert gemäß der Paketpriorisierung.
- Zeile 5 zeigt, vergleichbar zu Zeile 3, die direkte Erhöhung der auf einmal versendeten TCP Pakete. Es ist zu erkennen, dass beim TCP-Verkehr bis zu 81% der Pakete verloren gehen. Erstmals sind nun auch bis zu 6% Paketverluste bei den Echtzeitdaten zu erkennen. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Betriebsfall absichtlich mit einem unrealistisch hohen Aufkommen von TCP-Verkehr ausgeführt wurde, um die Grenzen des Switches auszuloten. Diese liegen gegenüber der ursprünglich geforderten TCP-Paketdurchsatzrate von ~120 kByte/Zyklus bei ~1928 kByte/Zyklus was ungefähr dem 16-fachen Normwert entspricht.

Auch wenn in Tabelle 1 einige Felder rot markiert sind, verhält sich der Switch genauso, wie erwartet. Die Priorisierung der Echtzeitkommunikation sorgt dafür, dass der Echtzeitverkehr beim Übergang von 100 Mbit/s auf 10 Mbit/s nicht beeinträchtigt wird. Der Switch beherrscht die Überlastsituation dadurch, dass Pakete geringerer Priorität verworfen werden. Genauso, wie es erwartet wurde.

3.3 Messergebnisse Anwendungsfall 2: Parallele Belastung eines Fieldswitches bei gleichzeitigem Senden aller angeschlossenen Ethernet-APL Feldgeräte

Für die Messung des Anwendungsfalls 2 wurde ein Ethernet-APL Field Switch mit bis zu 24 emulierten Ethernet-APL Feldgeräten verbunden. Hierbei wurde das Verhalten des Switches beim zeitgleichen Senden von Datenpaketen aller angeschlossenen Sensoren getestet. Zunächst wurde dabei erneut eine normalisierte Last untersucht, bei der die Anzahl der Feldgeräte schrittweise erhöht wurde. Anschließend wurde wiederholt ein Anstieg der Paketlast

durch Reduzierung der Zykluszeit und Erhöhung der gleichzeitig auftretenden Paketanzahl untersucht. Dabei wurde ausschließlich Echtzeit-Datenverkehr mit der Priorität 6 betrachtet. (siehe Bild 4)

Trotz der durch die Überlast provozierten Paketverluste seitens des Testaufbaus zeigen die Ergebnisse des durchgeführten Tests, dass der Switch sich wunschgemäß verhält. Die Durchsatzrate der ankommenden Pakete liegt hierbei sogar weit über den geforderten Bedingungen und zeigt auf, dass auch große Überlastsituation vom Switch sicher beherrscht werden können.

3.4 Fazit der Lastsimulationen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Ethernet-APL Switches sich in beiden Testfällen erwartungsgemäß verhalten haben. Im Rahmen der Tests wurden für die Geräte beider Hersteller die maximalen Grenzen ausgelotet, die weit oberhalb der zu erwartenden Betriebsparameter lagen. Für die Praxis ist daher ein problemloser Normalbetrieb zu erwarten.

4. Ergebnisse einer Last-Messung in Ethernet-APL-Netzwerken

Im zweiten Teil dieses Beitrages stellt die Firma Endress+Hauser die Ergebnisse eines Skalierungstests des Ethernet-APL-Netzwerks vor. Bei diesem Test wurde ein für eine chemische Produktionsanlage repräsentatives Netzwerk aufgebaut und das PROFINET-Protokoll für die Echtzeitkommunikation verwendet. Hierbei wurden die folgenden Fragestellungen aus der Prozessindustrie betrachtet:

- Netzlast und Ausfallsicherheit der PROFINET-Kommunikation über Ethernet-APL
 - Netzlast eines voll ausgelasteten Netzwerks mit maximal 254 Teilnehmern im Normalbetrieb.
 - Stabilität der Zykluszeiten bei der Prozesssteuerung
 - Ausfallsicherheit der PROFINET-Kommunikation bei zusätzlichem nicht-Echtzeit Netzwerkverkehr
 - Ausfallsicherheit und Wiederherstellung von verschiedenen Teilnehmern bei Cyber-Angriffen
- PROFINET-Systemredundanz (S2) und Medienredundanz (MRP) [14] in einem maximal ausgebauten IPv4 Subnetz (254 Teilnehmer, ca. 240 Feldgeräte + Infrastrukturkomponenten)
 - Stoßfreiheit der S2- und MRP-Redundanzumschaltungen unter verschiedenen Lastszenarien
- PROFINET Dynamische Rekonfiguration (Anlagenänderungen und Erweiterungen)

- Betrachtung von Netzwerkkomponenten und Feldgeräten
- Geräte- und Switch-Austausch
 - PROFINET PA Profil 4 und herstellerspezifische GSDML-Dateien

4.1 Grundsätzlicher Aufbau

Bild 6 zeigt den Messaufbau der Firma Endress+Hauser. Es wird ein redundantes Controllerpaar (1) mit S2-Redundanz [14] eingesetzt.

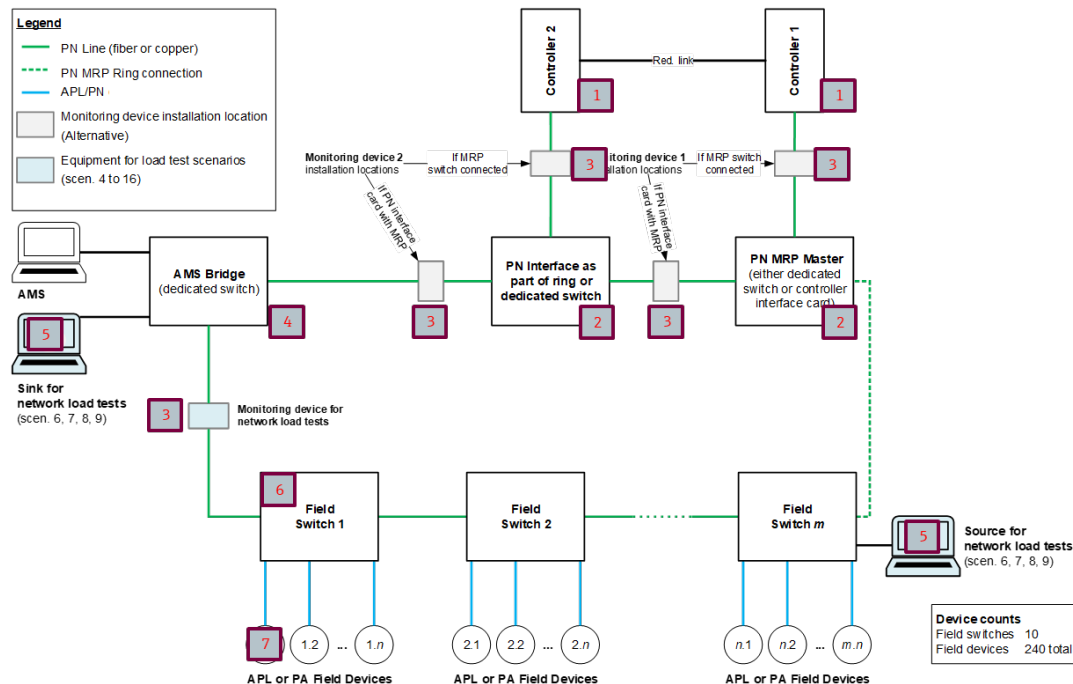


Bild 6: Messaufbau der Firma Endress+Hauser [15]

Im unterlagerten PROFINET-Ringnetzwerk kommt für die Medienredundanz das Media Redundancy Protokoll (MRP) zum Einsatz. Sofern die Controller MRP inkl. der Ringmanagerfunktion über ihre PROFINET-Schnittstelle direkt unterstützen, werden diese direkt in den Ring eingebunden. Andernfalls kommen dedizierte Industrial Ethernet-Switches zum Einsatz, an welche die Controller angebunden werden (2). Im Feld werden fremdgespeiste Field Switches (6) eingesetzt, an welche die Feldgeräte (7) an die einzelnen Spurs direkt angeschlossen werden.

Zur Überwachung der Kommunikation werden Netzwerkanalysegeräte an den gekennzeichneten Einbauorten (3) eingesetzt, welche sowohl Teilnehmerausfall als auch Netzwerkzeiten erfassen und zur späteren Auswertung bereitstellen. Die Parametrierung der Feldgeräte erfolgt über ein Asset Management System (AMS, 5) an einem separaten Industrial Ethernet Switch (AMS Bridge, 4). Für die Erzeugung zusätzlicher Last können zwei weitere

Computer (5) in das Netzwerk eingebracht werden: Einer direkt an der AMS Bridge, ein weiterer an einem beliebigen Field Switch im Netzwerk je nach Szenario.

4.2 Netzlast

Im ersten Teil wurden die Grundanforderungen des voll belegten Subnetzes geprüft. Dies beinhaltet den zyklischen Datenaustausch aller angeschlossenen PROFINET via Ethernet-APL Messumformer, aber auch deren Bedienbarkeit unter verschiedenen Bedingungen mit PROFINET-Zykluszeiten zwischen 128 ms und 256 ms. Die einzelnen Geräte bieten je n Ressourcenverfügbarkeit Antwortzeiten (min. device interval) zwischen 16 ms und 128 ms. Die Einhaltung dieser Zeitanforderungen für die Echtzeitkommunikation wurde auch während der Konfiguration von Feldgeräten, bzw. dem Upload der Gerätedaten von einem und mehreren Teilnehmern, geprüft. Auch hier zeigte sich das Netzwerk als stabil (zyklische Netzwerklast $\leq 20\%$, keine Paketverluste bei der Echtzeitkommunikation etc.). Als weiterer Testfall wurden zusätzliche nicht-Echtzeit-Lasten erzeugt und parallel zum Prozessbetrieb im Netzwerk übertragen. Wie bei den vorangehenden Tests zeigte sich die PROFINET-Echtzeitkommunikation als sehr stabil und unbeeinflusst. Bild 7 zeigt den Datenfluss beim Up-/Download-Test und beim Lasttest.

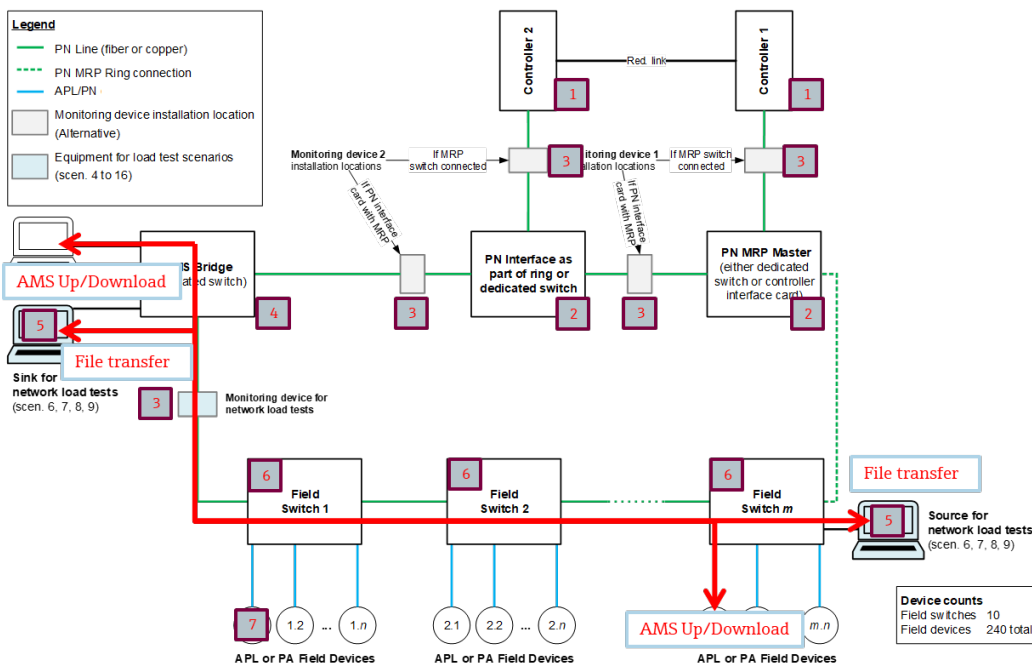


Bild 7: Datenfluss bei Netzlasttest [15]

4.3 Ausfallsicherheit bei Cyber-Angriffen

Im weiteren Verlauf wurde die Lastfestigkeit der Netzwerkkomponenten mittels eines IP Ping Storms geprüft. Dabei wurden sowohl Controller/PROFINET Modul, MRP-Switches, Field Switch, als auch die PROFINET-APL-Feldgeräte selbst getestet. Die betroffenen Geräte konnten während der Überlastsituation teilweise keine Prozesswerte mehr übertragen, gingen aber nach dieser Phase wieder automatisch im Normalbetrieb. Rückwirkungen auf weitere Geräte konnten nicht festgestellt werden – die sonstige Echtzeitkommunikation läuft hiervon ungestört. Eine aus diesem Test resultierende Empfehlung war, die Field Switches mit einem Rate Limiter zu versehen, welche den Durchsatz in Richtung der PROFINET-APL-Feldgeräte verringern und somit den Prozessdatenausfall vermeiden könnten. Dies war zu diesem Zeitpunkt nicht implementiert.

4.4 PROFINET-Redundanz und Ausfallsicherheit beim Controller / PROFINET Modul / PROFINET-APL Switches

Alle Teilnehmer im MRP-Ring wurden auf Ausfallsicherheit unter normalen und Lastbedingungen geprüft. Sowohl MRP-Master als auch MRP-Client konnten bei Redundanzumschaltung die nahtlose, stoßfreie Umschaltung der Ringkonfiguration ohne Datenverlust mehrmals hintereinander mittels Netzwerküberwachung belegen. Notwendige Alarme wurden vom System gemeldet. Im laufenden Betrieb, bedeutet das konkret, dass die Prozesssteuerung ungestört weiterläuft, aber der Anlagenverantwortliche per Meldung informiert wird, um den Ausfall zu beseitigen (verminderte Verfügbarkeit durch Fehlen der Medienredundanz). Wurde der Ausfall beseitigt (z.B. Modultausch), so wurde der Regelbetrieb ohne manuellen Eingriff wiederhergestellt (Wiederherstellungszeit abhängig von den konkret eingesetzten Komponenten).

4.5 Dynamische Rekonfiguration (Anlagenänderungen und Erweiterungen)

Eine weitere Anforderung in der Prozessindustrie ist die unterbrechungsfreie Änderung oder Erweiterung eines Netzwerkes im laufenden Betrieb (Dynamic Reconfiguration, DR). In beiden Fällen müssen der Controller sowie die betroffenen Geräte die Änderung(en) stoßfrei übernehmen, was in unserem Test alle Systeme erfolgreich absolviert haben. Mittels Netzwerkmonitor wurde festgestellt, dass die Übertragung der Echtzeitdaten während der Rekonfiguration uneingeschränkt weiterläuft und die Dynamic Reconfiguration Sequenz spezifikationsgemäß abläuft. Selbiges gilt bei Änderungen von Zykluszeiten für die PROFINET-Schnittstellen.

4.6 Geräte- und PROFINET-APL Switch Austausch

Im Gegensatz zu anderen Protokollen gibt es bei der Kombination von PROFINET mit Ethernet-APL tatsächlich den Ansatz des Plug&Play (PA Profile 4 gemäß NAMUR NE131). Ein wichtiger Punkt ist hier die Austauschbarkeit, der Ersatz von Feldgeräten. Dies ist generisch mittels sogenannten Profil-GSDMLs möglich, oder mit der herstellerspezifischen, umfangreicheren GSDMLs. Die Profile-GSDML beinhaltet für das definierte Messprinzip normierte Inhalte um auch herstellerübergreifend Geräte tauschen zu können. Zum Zeitpunkt der Tests wurde dieses Feature noch nicht vollständig unterstützt, ist aber mittlerweile verfügbar.

Der Anwendungsfall Feldgerätetausch mittels Hersteller-GSDML wurde mit einem Systemhersteller erfolgreich geprüft. Prozess- und Konfigurations-Daten wurden automatisch übernommen, die Netzwerklast war unter den geforderten 20% und benachbarte Teilnehmer waren verfügbar.

Ein weiterer Fall ist der Austausch von Systemkomponenten. Der Austausch eines PROFINET-APL Switchs zeigte ebenfalls keine Auffälligkeiten, nach wenigen Minuten, waren alle PROFINET-APL Messumformer und die zugehörigen Prozessdaten wieder verfügbar. Benachbarte Teilnehmer blieben unberührt und die Kommunikation wurde trotz Ringunterbrechung durch Nutzung der Medienredundanz unterbrechungsfrei fortgesetzt.

Ein zusätzlicher Mehrwert gegenüber bisherigen Protokollen (z.B. PROFIBUS PA), ist die Konfigurationsmöglichkeit der wichtigsten Parameter auf Prozessebene, sogenannten Startup Records (PA Profile 4). Diese können im Zuge der Prozessdatenkonfiguration definiert werden um den händischen Einsatz eines Plant Asset Management Tools im Falle eines Geräte Austauschs zu vermeiden. Diese Funktion wurde mit 3 verschiedenen Systemhersteller erfolgreich geprüft. Im Bereich dieses Tests mit Fokus auf eine chemische Verbund-Anlage war es zwar sekundär, ist aber in anderen Bereichen ein echter Pluspunkt.

5. Empfehlungen bei der Auslegung von Ethernet-APL Netzwerken

Auch wenn der Verlust von gering priorisierten Datenpaketen bei hoher Last zu erwarten ist, sollten solche Verluste in der betrieblichen Praxis vermieden werden. Daher sollte bei der Planung der Ethernet-APL-Netzwerke eine überschlägige Betrachtung der Netzlast erfolgen, um eine schon in der Planung zu erkennende Überlastung auszuschließen. Alternativ ist die Planung des Netzwerks durch Vorgaben soweit zu vereinfachen, dass diese Bedingungen unter Einhaltung der Vorgaben by-Design erfüllt werden. Weiterführende Information findet man hierzu in für Ethernet-APL in [3]. Sofern Ethernet-APL in Verbindung mit PROFINET genutzt wird, finden sich PROFINET-spezifische Empfehlungen in [16].

Bei der Entscheidung für eine Topologie mit einem gespeisten APL Trunk (Siehe APL Power Switch und APL Field Switch 2 in Bild 2) ist zu bedenken, dass mehrere Field Switches an den APL Trunk angeschlossen werden. Der gesamte Datenverkehr aller angeschlossenen Feldgeräte läuft dann über den 10 Mbit/s Trunk. Eine direkte Ankopplung an das Industrial Ethernet (Siehe APL Field Switch 1 in Bild 2) sorgt für einen früheren Übergang auf eine höhere Datenrate, erfordert aber eine Energieversorgung im Feld für den Field Switch.

6. Zusammenfassung

Die gezeigten Untersuchungen durch Lastsimulation in Kapitel 3 und durch Aufbau einer realen Anlage mit Maximalausbau in Kapitel 4 belegen, dass die verwendeten Komponenten auch unter hoher Last – wie vorgesehen – funktionieren.

Wichtige Punkte wie Netzwerkübergänge 10 Mbit/s – 100 Mbit/s – 1 Gbit/s stellten kein Problem dar, die Interoperabilität wurde belegt, sowohl für die Anwendung, Last als auch Stabilität.

Im Gegensatz zu etablierten Peer-to-Peer Qualifizierungstests mit einem einzelnen Gerät oder einem System im Verbund anhand von Äquivalenzklassen, wurde hier die Skalierbarkeit für größere Anlagen mit betrachtet und belegt. Das PA Profil kommt hier, vor allem durch den reduzierten Wartungsaufwand (Device Replacement, Plant Extension,...) vollständig zur Geltung.

7. Literatur

- [1] NE 168:2018-11. Anforderungen an ein Ethernet- Kommunikationssystem für die Feldebene
- [2] PROFIBUS and PROFINET International, Fieldcom Group, OPC-Foundation u. ODVA Inc.: Ethernet to the field. White Paper, 2020. <https://www.profibus.com/download/apl-white-paper>
- [3] IEEE 802.3cg:2019:2019-11. 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. https://standards.ieee.org/standard/802_3cg-2019.html
- [4] Niemann, K.-H.: Engineering-Richtlinie Ethernet-APL. Planung, Installation und Inbetriebnahme von Ethernet-APL-Netzwerken, 2021. <https://www.profibus.com/download/engineering-guideline-ethernet-apl>
- [5] Krapp, L.: Impact of mixed speed networks on the performance of Ethernet real time communication protocols like PROFINET, 2023. <https://doi.org/10.25968/opus-2883>
- [6] IEEE 802.3-2018:2018. IEEE Standard for Ethernet

- [7] Spurgeon, C. u. Zimmerman, J.: Ethernet. The definitive guide. Sebastopol, CA: O'Reilly 2014
- [8] IEEE 802.1Q-2022:2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks. <https://standards.ieee.org/ieee/802.1Q/10323/>
- [9] Ostinato.org: Ostinato User Guide, 2024. <https://userguide.ostinato.org/>
- [10] Profitap HQ B.V.: ProfiShark 1G - Portable Traffic Capture and Troubleshooting Tool, 2024. <https://www.profitap.com/profishark-1g/>
- [11] Wireshark Foundation: Wireshark User's Guide, 2024. https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/
- [12] IEC 61158-6-10:2023:2023. Industrial communication networks – Fieldbus specifications – Part 6-10: Application layer protocol specification – Type 10 elements
- [13] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.: Application Layer protocol for decentralized periphery Technical Specification for PROFINET IO. Version 2.4 MU4 Order- Nr. 2.722, 2023. <https://www.profibus.com/download/profinet-specification>
- [14] PROFIBUS und PROFINET International: PROFINET Planungsrichtlinie Redundanz. Order Nr. 8.131 Nr. 8.131, 2023. <https://de.profibus.com/downloads/profinet-installation-guidelines>
- [15] Testing Procedure: Test Scenarios for PROFINET Scalability Test, BASF SE, 2023. Nicht veröffentlicht.
- [16] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.: PROFINET Planungsrichtlinie Nr. 8.061, 2022. <https://www.profibus.com/download/profinet-installation-guidelines>