

# Industrial Ethernet über Powerline

Einblicke in die Qualifizierung von PLC im industriellen Umfeld

## Übersicht

Der Einsatz von Powerline Communication in industriellen Anwendungen ermöglicht eine durchgängig IP-Kommunikation mit gleichzeitiger Energieverteilung auf einer kostengünstigen Verkabelung. Existierende Feldbuslösungen wie CAN oder Profibus sind hinsichtlich ihres Durchsatzes limitiert und damit für hybride Architekturen, beispielsweise mit integrierter Sprach- oder Bildübertragung, nur sehr begrenzt einsetzbar. Der Schritt zu IP-basierter Kommunikation erfüllt mit FW-Updates, Monitoring, Möglichkeiten zur Cloud-Anbindung etc. viele Anforderungen der Industrie 4.0.

Die ZHAW hat im Rahmen eines Kooperationsprojektes die Performance von G.hn für industrielle Anwendungen untersucht. Dabei fokussierte die Fragestellung auf zwei Bereiche:

1. Latenzen sind für industrielle Anwendungen mit Kontrollmechanismen und Regelschleifen wichtiger als eine grosse Bandbreite. Der hauptsächliche Markt für Powerline Communication sind Consumer Heimnetzwerke. Dadurch sind MAC-Mechanismen auf das Herunterladen und Streamen von Daten optimiert und gewichten deterministische Zugriffszeiten weniger stark. Auch interaktive Sprach- und Conferencing-Anwendungen wie VoIP haben mit Latenzen im mittleren zweistelligen Millisekundenbereich eine gute Performance.
2. Der Einsatz von Powerline kann für Anwendungen mit gemischtem Datenverkehr einen Vorteil haben. Ein gemischter Datenverkehr beinhaltet beispielsweise Regel- und Kontrolldaten sowie grosse Logfiles und die Verteilung von FW-Updates. Das adaptive Bit-Loading der eingesetzten OFDM Technologie kann grosse Datenpakete in kurze Frames packen. Das ist ein klarer Vorteil der Technologie im Vergleich zu Feldbussen mit einer statischen maximalen Datenrate.

## Anforderungen für die industrielle Anwendung anhand eines Aufzugs

Ein moderner Aufzug basiert auf einem Hauptrechner (Main Controller), welcher mit vielen Sensoren und Aktoren über IP kommuniziert. Das Herz des Aufzugs ist gleichzeitig der Master der Kommunikation und sitzt üblicherweise entweder im Schachtkopf oder in einem Maschinenraum oberhalb des Aufzugsschachts. Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Aufzugs mit den verteilten IP-Knoten.

Drückt eine Person den Rufknopf, sendet der IP-Knoten auf dem betreffenden Stockwerk eine Message an den Main Controller. Diese nimmt das Kommando entgegen und sendet dem Motor-Modul den Fahrbefehl. Während des Trips wird die Geschwindigkeit geregelt und die Endposition anhand eines absoluten Positionssensors millimetergenau angefahren. Während des Betriebs senden alle Module zyklisch Logfiles an ein Gateway (Edge Device), die Daten gehen von dort weiter in die Cloud. Die Kommunikation im Aufzugssystem wird in die folgenden 4 Klassen unterteilt:

- **Regelungstechnik**  
Die Kommunikation zwischen Kabine und Antrieb erfordert aufgrund Sicherheit und Genauigkeit maximal 10 ms Latenz.
- **Monitoring**  
Jeder IP-Knoten sendet alle 5 s ein Logfile über das Gateway in die Cloud.
- **Menschliche-Interaktion**  
Das Drücken eines Rufknopfs soll unter 100 ms beantwortet werden.
- **Notfalltelefon**  
Bei einer Störung können eingeschlossene Passagiere über das eingebaute Telefon mit einer Notrufzentrale sprechen. Diese VoIP Anwendung toleriert 50 ms Latenz.

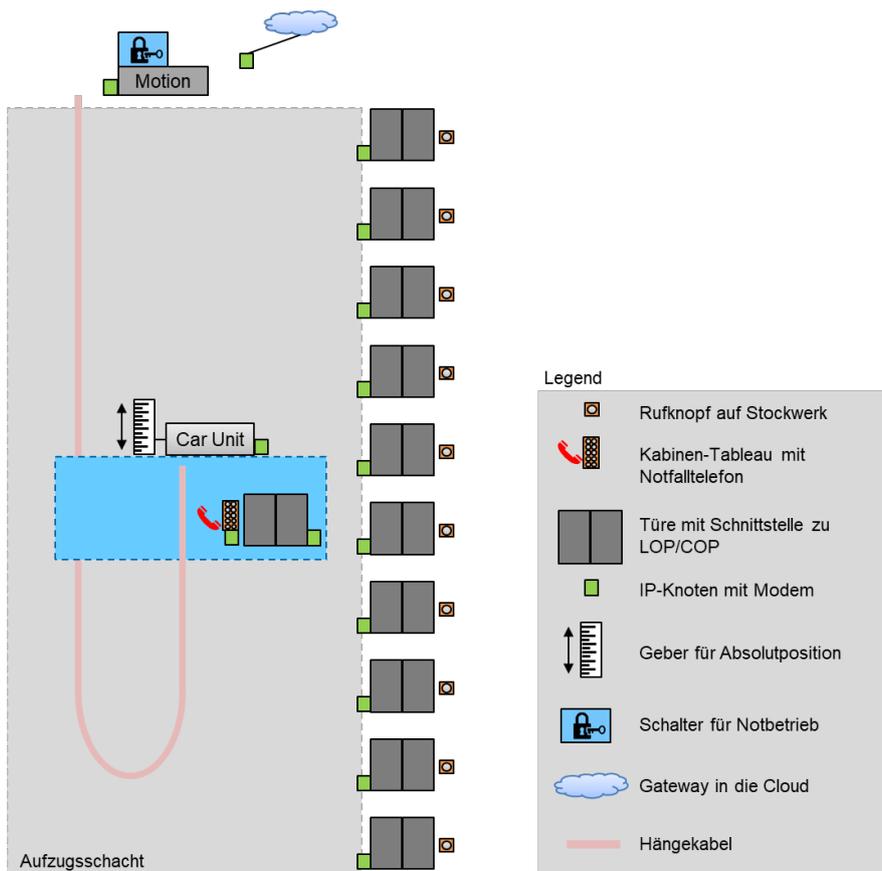


Abbildung 1 Netzwerk eines Aufzugs, grüne Quadrate repräsentieren IP-Knoten

## Der Kanal

Die Kommunikation über ein Netzwerk ohne Abschlusswiderstände führt zu Reflexionen und somit zu Einbrüchen im Spektrum. Die untersuchten Powerline Modems von MaxLinear können die Empfangsstärke im genutzten Frequenzbereich messen und darstellen. Das Sendespektrum der Modems unter Berücksichtigung der aktuellen Regulatorien [1] und Settings ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Messung an einem Referenznetzwerk mit 5 m Abstand zwischen den Stockwerken bestätigen frequenzselektive Einbrüche. Abbildung 3 bis Abbildung 5 zeigen die frequenzselektiven Einbrüche der Empfangsstärke von drei repräsentativen Verbindungen.

G.hn nutzt OFDM mit 4096 Trägern im Abstand von 24.41 kHz im Bereich von 0 - 100 MHz [2]. Das adaptive Bit-Loading mit 1-12 Bit pro Träger ermöglicht bei idealen Bedingungen eine Bruttodatenrate von bis zu 1 Gbit/s. Bei frequenzsektiv-gestörten oder verrauschten Verbindungen ist eine Kommunikation mit ca. 100 Mbit/s möglich.

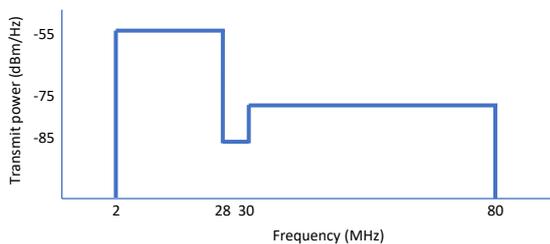


Abbildung 2 Sendespektrum von MaxLinear ohne Notches zwischen 2 MHz und 28 MHz [2]

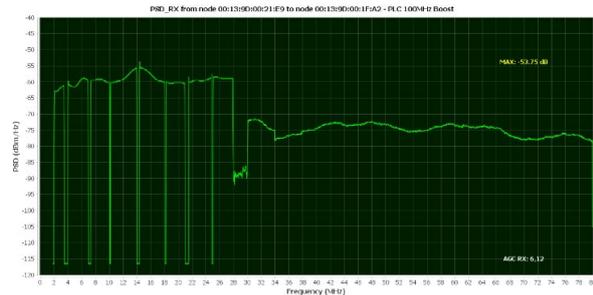


Abbildung 3 Kommunikationskanal oberster Stock zu Gateway im Schachtkopf (kurze Distanz)

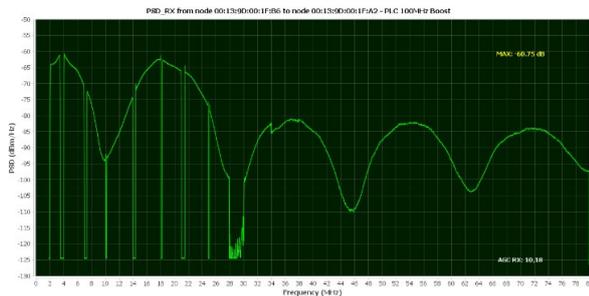


Abbildung 4 Kommunikationskanal mittlerer Stock zu Gateway im Schachtkopf (mittlere Distanz)

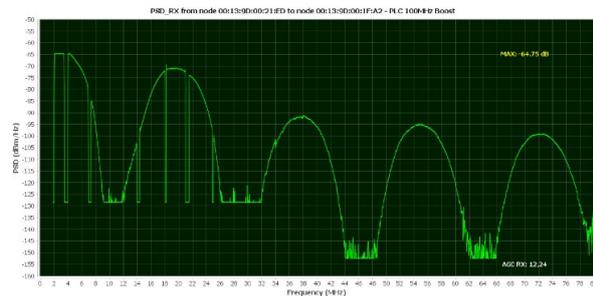


Abbildung 5 Kommunikationskanal unterster Stock zu Gateway im Schachtkopf (lange Distanz)

## Theorie

Einbrüche im Spektrum werden durch reflektierte Signale erzeugt, welche das Originalsignal mit einer Verzögerung überlagern, die einer  $\pi + n \cdot 2\pi$  verschobene Phase entspricht und somit gegenphasig sind. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf den Kabeln wird mit  $1.9 \cdot 10^8$  m/s angenommen. Die gemessenen und oben dargestellten Werte entsprechen der Theorie:

$$\pi + n \cdot 2\pi = \frac{2 \cdot l \cdot \omega_{\text{Einbruch}}}{v} = \frac{2 \cdot l \cdot 2\pi \cdot f_{\text{Einbruch}}}{v} \quad (1)$$

$$f_{\text{Einbruch}}(l, n) = \frac{(1+2n) \cdot v}{4 \cdot l} \quad (2)$$

$$f_{\text{Einbruch}}(5m, 0) = \frac{(1+2 \cdot 0) \cdot 1.9 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 5m} = 9.5 \text{ MHz} \quad (3)$$

$$f_{\text{Einbruch}}(5m, 1) = \frac{(1+2 \cdot 1) \cdot 1.9 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 5m} = 28.5 \text{ MHz} \quad (4)$$

## G.hn Paketaufbau und maximale Paketrate

Datenpakete bestehen in G.hn aus Präambel, Header sowie Payload und werden immer von einem Acknowledge ohne Payload beantwortet. Jeder der oben genannten Teile eines Pakets hat eine Übertragungsdauer von einem OFDM Symbol von 40.96  $\mu$ s zuzüglich einer Guard Time zwischen den einzelnen Symbolen von 10.24  $\mu$ s [1]. G.hn verwendet auf Layer 2 Automatic Repeat Request (ARQ), dadurch gehen keine Pakete verloren.

In einem industriellen Netzwerk kann die Paketrate der limitierende Faktor sein. Mit kurzen Paketen wird die maximale Datenrate nicht annähernd erreicht, weil die Daten zumeist nicht einmal ein Symbol füllen und somit hauptsächlich aus Overhead bestehen. Abbildung 6 zeigt die einzelnen Teile eines Datenpakets sowie des zugehörigen Acknowledgements. Die eingesetzten Modems von MaxLinear weisen leicht längere Abstände zwischen den Paketen auf. Der MAC Layer mit dem Domain-Management erreicht eine maximale Paketrate von ca. 1000 Pakete/s.

Die maximale Datenrate in G.hn von 1 Gbit/s wird durch eine längere Payload und maximales Bit-Loading in jedem OFDM-Symbol erreicht. MaxLinear erlaubt maximal 3 ms lange Pakete.

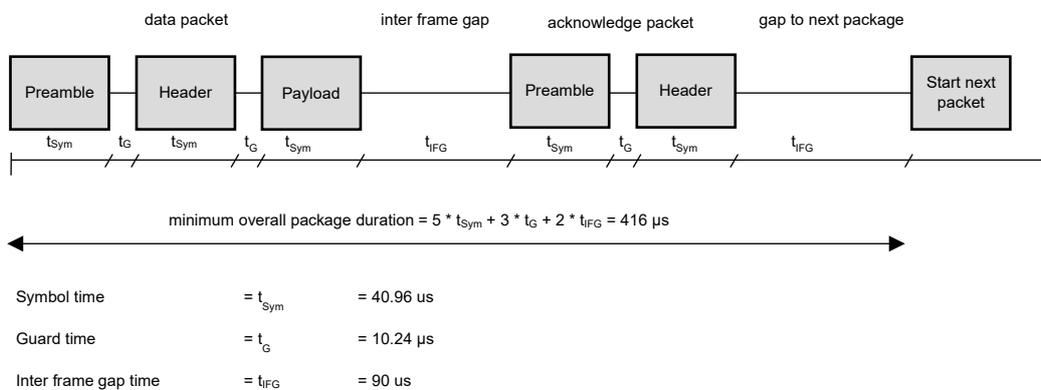


Abbildung 6 Minimale Pakettlänge aus dem G.hn Standard

## Maximale Datenrate mit kleinen Paketen

Industriellen Netzwerken genügen meist kleine Pakete. Sensorwerte und oder Sollwerte für Aktoren umfassen nur wenige Bytes. Abbildung 7 zeigt, dass in einem Ethernet Frame (Mindestlänge 64 Bytes) das kürzest mögliche UDP Paket 18 Byte User-Payload bietet.

6 Bytes	6 Bytes	2 Bytes	20 Bytes	8 Bytes	18 Byte	4 Bytes	<b>Total 64 Byte</b>
MAC destination address	MAC source address	Length / type	IPv4 header	UDP header	Payload	FCS	

Abbildung 7 Minimale IP-Paketgröße

Mit der Annahme von UDP Paketen mit der minimalen Länge und einer Paketrate von 1000 Paketen/s ergibt sich eine Nutzdatenrate von 144 kBit/s.

$$d_{G.hn} = 1000 \frac{\text{packets}}{s} * 18 \text{ Byte} * \frac{8 \text{ Bit}}{\text{Byte}} = 144 \text{ kBit/s} \quad (5)$$

## Vergleich zu 100 Mbit Ethernet

Beim Einsatz von 100 Mbit/s Ethernet muss das in Abbildung 7 gezeigte Paket um die Präambel (8 Byte) sowie den Inter Frame Gap (12 Byte) erweitert werden. Die maximale Anzahl Pakete ist durch Gleichung (6) definiert.

$$n = \frac{b}{N} = \frac{100 \text{ MBit/s}}{(8+12+64) \frac{\text{Bytes}}{\text{Paket}} * \frac{8 \text{ Bit}}{\text{Byte}}} = 148809.5 \text{ Pakete/s} \quad (6)$$

$$d_{100MBit} = 148809.5 \frac{\text{packets}}{s} * 18 \text{ Byte} * \frac{8 \text{ Bit}}{\text{Byte}} = 20.4 \text{ MBit/s} \quad (7)$$

## Testaufbau

Nachdem Anforderungen und Kanaleigenschaften bekannt sind, wurde ein Versuchsaufbau für Performance-Messungen erstellt. Der Testaufbau basiert auf dem selbst entwickelten Traffic Generator and Logger (TraGaL) System. TraGaL ist auf Embedded Linux Boards (APUs [3]) installiert und ermöglicht Latenzmessungen mit frei definierbarem Netzwerkverkehr. Die Genauigkeit der Zeitstempel beträgt  $\pm 1 \mu\text{s}$ .

Das bekannte Tool iperf3 bietet keine HW-Zeitstempelung und weniger flexibel definierbaren Netzwerkverkehr mit mehreren Knoten.

Abbildung 8 zeigt den Testaufbau. Alle Tests werden vom Central Test Controller (CTC) gesteuert. Der CTC sammelt nach jedem Test die Logfiles der einzelnen APUs und speichert diese in einer Datenbank. APU00 stellt den nachfolgenden APUs über das TSN Protocol IEEE 802.1AS die genaue Zeitbasis für die Verkehrs-Erzeugung, Zeitstempelung und die Latenzmessungen zur Verfügung. Die gewählte Daisy-Chain Verkabelung ermöglicht eine freie Topologie, ohne dass zusätzliche Ethernet Switches benötigt werden. Dadurch ist das Messsystem auch kostengünstig realisiert, da auf teure Ethernet Switches mit Zeitsynchronisationsfunktion nach IEEE 802.1AS oder IEEE 1588 verzichtet werden kann.

Die untersuchten G.hn Modems unterstützen bis zu 14 Nodes in einer Domain.

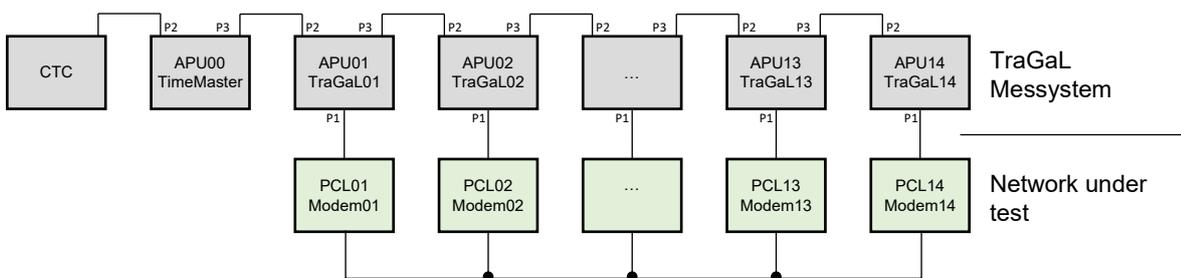


Abbildung 8 Test Setup mit TraGaL

## Kommunikations-Muster für eventgetriebene Applikationen

Latenz-Messungen für den betrachteten Aufzug sind mit Master-Slave Konfigurationen simuliert. Der Master sendet mit einer Periode von 250 ms jeweils ein Paket an jeden Slave und jeder Slave sendet alle 250 ms ein Paket an den Master. Alle Sendezeitpunkte von Paketen sind zusätzlich mit einer zeitlichen Zufallsvariable verknüpft. Das modellierte Muster entspricht einer eventgetriebenen Applikation. Solche Applikationen fordern geringe Latenzen für eine zeitnahe Reaktion auf Events. Gleichungen (8) - (11) zeigen die Anzahl Pakete in der gewählten Konfiguration.

Eine Konfiguration, bei der jeder Knoten mit jedem andere Knoten zyklisch Daten austauscht, ist eher untypisch für den betrachteten Aufzug. Ein solches Kommunikations-Pattern würde je nach Netzwerkgröße sowie Periode die 1000 Pakete/s übersteigen.

$$n_{pack}(n) = n_{Master} + n_{Slave} = 2 * (n - 1) \frac{1 \text{ packet}}{\text{periode}} \quad (8)$$

$$n_{pack}(n = 2) = 2 * (2 - 1) \frac{1 \text{ packet}}{250 \text{ ms}} = 8 \text{ packets/s} \quad (9)$$

$$n_{pack}(n = 8) = 2 * (8 - 1) \frac{1 \text{ packet}}{250 \text{ ms}} = 64 \text{ packets/s} \quad (10)$$

$$n_{pack}(n = 14) = 2 * (14 - 1) \frac{1 \text{ packet}}{250 \text{ ms}} = 104 \text{ packets/s} \quad (11)$$

## Auswertung Latenz mit unterschiedlichen MAC Algorithmen

Zur Beurteilung des Latenzverhaltens unterschiedlicher MAC Algorithmen wird die kumulative Wahrscheinlichkeit betrachtet, dass ein Telegramm bis zu einem gegebenen Zeitpunkt nach dem Senden beim Empfänger eingetroffen ist. Abbildung 9 zeigt Kurven für 2, 8 und 14 aktiv kommunizierender Knoten im Testnetzwerk sowie unterschiedlichen FW-Versionen. Die FW-Versionen unterscheiden sich in der Parametrierung des MAC Layers.

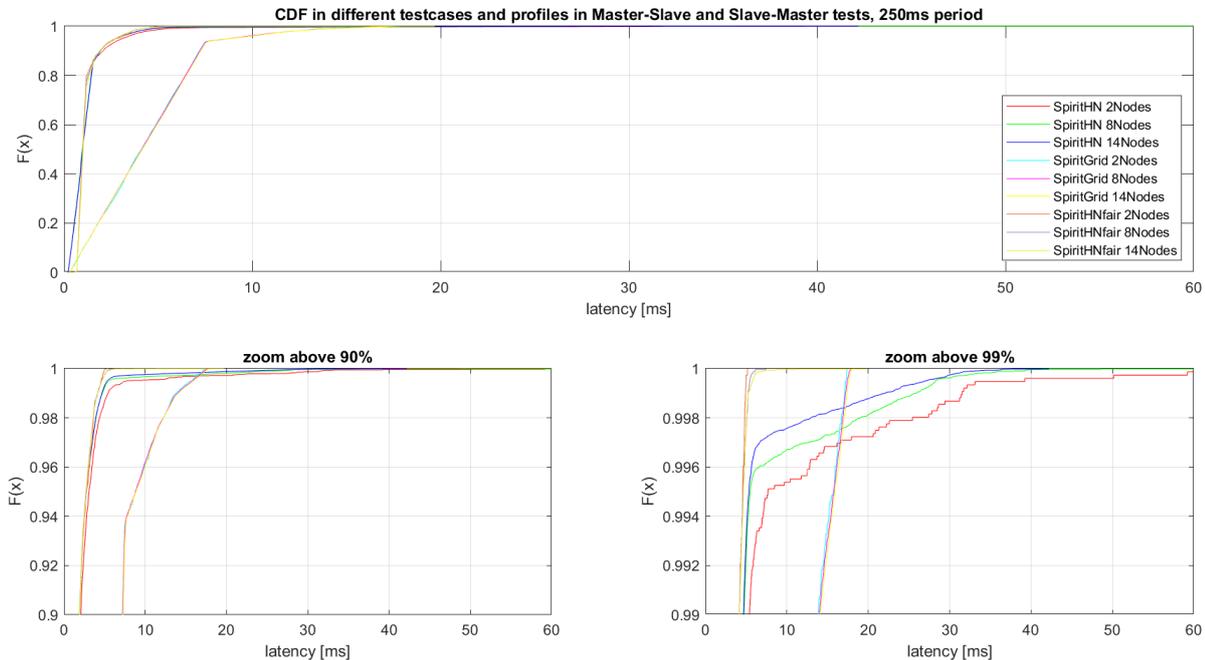


Abbildung 9 Kumulierte Latenzverteilung in linearer Darstellung für unterschiedlichen MAC Parametrierungen.

Der relevante Aspekt bei einer Beurteilung der MAC Latenzen sind Ausreisser, welche sich im obersten Teil der Y-Achse manifestieren. Ausreisser oberhalb von akzeptierten Grenzen führen zur Degradierung des Systemverhaltens bis hin zu Ausfällen oder Notstopps. Die Darstellung rechts unten in Abbildung 9 zeigt die Werte für das oberste Prozent der gemessenen Werte und somit für die interessanten Kurvenverläufe. Werden die Kurven nicht linear, sondern wie in Abbildung 10 gezeigt nichtlinear als Probability Plot dargestellt, werden die relevanten Charakteristika der Latenzverteilungen über den gesamten Bereich deutlich.

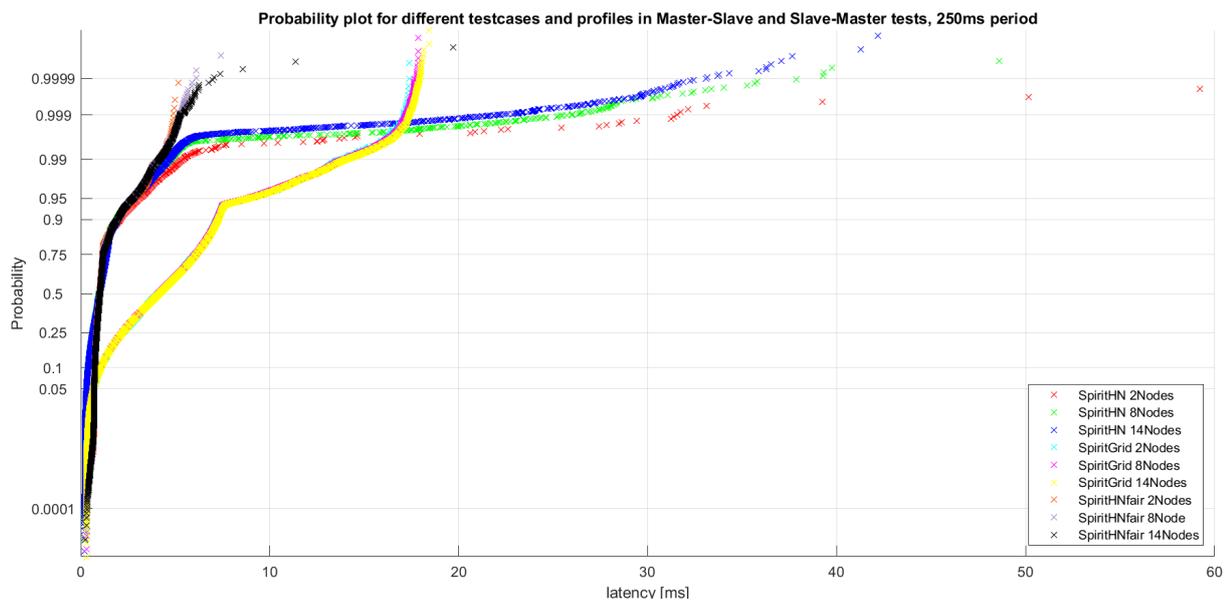


Abbildung 10 Probability Plot mit unterschiedlichen FW-Versionen von MaxLinear's PLC Modems

Die nichtlineare Y-Achse des Plots zeigt die Verteilung der Latenzen in der Kommunikation mit einem Fokus auf Ausreisser.

### Beispiel mit Zahlen:

In einem Aufzugsschacht sind auf jedem Stockwerk Positionsschalter montiert. Diese triggern bei der Vorbeifahrt des Aufzugs eine Meldung für die Positionsregelung. Der Schlupf des Antriebs muss durch die Positionsregelung kompensiert werden. Je geringer die Latenz dieses Events, desto besser kann der Aufzug den Trip optimieren und auf dem Zielstockwerk anhalten. Ein Paket mit grosser Latenz oder ein fehlendes Paket führt nicht zu einem Notstopp, aber der Aufzug ruckelt möglicherweise während der Fahrt oder muss sich dem Zielstockwerk langsamer nähern und die Position korrigieren.

Das Beispiel basiert auf dem Lift aus Abbildung 1 mit 10 Stockwerken und steht in einem Hotel. Durchschnittlich ist der Lift während 14 Stunden am Tag in Betrieb und macht 60 Trips mit einer durchschnittlichen Distanz von 5 Stockwerken. Gleichung (12) zeigt die Anzahl eventgetriebener Pakete für die Positionsregelung pro Tag. Damit nun ein fehlerhaftes Ereignis pro Tag eintritt, müssen gemäss Gleichung (13) 99.976% aller Pakete innerhalb der akzeptieren Latenz sein.

$$N_{\text{pack}} = 14 \frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} * 60 \frac{\text{Trips}}{\text{Stunde}} * \frac{5 \text{ Stockwerke}}{\text{Trip}} * \frac{1 \text{ Paket}}{\text{Stockwerk}} = 4200 \text{ Pakete} \quad (12)$$

$$p_{OK} = 1 - \frac{1 \text{ Paket}}{N_{\text{pack}}} = 1 - \frac{1 \text{ Paket}}{4200 \text{ Pakete}} = 99.976\% \quad (13)$$

Gemäss Abbildung 10 zeigen die unterschiedlichen MAC-Layer in den obersten Perzentilen deutliche Unterschiede. Für das betrachtete Beispiel mit einer Degradierung pro Tag muss der Regelalgorithmus eine maximale Latenz von 8 ms, 18 ms oder 40 ms akzeptieren.

Der Kooperationspartner wählt für seine ersten Feldtests mit PLC die SpiritHNfair Firmware. Diese Firmware wurde dank einer interaktiven Zusammenarbeit mit Kooperationspartner, Chip-Hersteller und der neutralen ZHAW ermöglicht. Die neue Firmware ermöglicht kurzen Latenzen für den Grossteil der Pakete mit einer akzeptablen Ausreisser-Performance.

## Literatur

- [1] ITU-T Rec. G.9961 (11/2018) Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – Data link layer specification
- [2] ITU-T Recommendation G.9964, " Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – Power spectral density specification Amendment 2", Sept. 2016.
- [3] PC Engines Single-Board Computers: <https://www.pcengines.ch/apu2.htm> , accessed 2020-12-02

Das Projekt wurde von Innosuisse gefördert ([www.innosuisse.ch](http://www.innosuisse.ch)).

Beteiligte Forschungseinrichtungen:

ZHAW - Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften  
School of Engineering, Institute of Embedded Systems  
[www.zhaw.ch/ines](http://www.zhaw.ch/ines)

HSLU – Hochschule Luzern für Technik & Architektur  
Institut für Elektrotechnik, Kompetenzzentrum Intelligent Sensors and Networks  
[www.hslu.ch/ccisn](http://www.hslu.ch/ccisn)