

Ko²SiBus

IGF-Nr. 19574BG

Kontinuierliche und kostengünstige Signalüberwachung für industrielle Bussysteme

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Das Monitoring von Industrieanlagen stellt in der Wirtschaft sicher, dass hoch-automatisierte Prozesse reibungslos ablaufen können. Meistens steht hier das Monitoring der Anlagen selbst im Mittelpunkt, die Kommunikationsleitungen für den Datenaustausch auf Ethernet-Basis (z.B. Profinet) sind gegenwärtig noch nicht Teil einer kontinuierlichen Überwachung. Zwar werden auch hier die physischen Verbindungen überprüft, jedoch geschieht häufig dies nur zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme, wenn die Anlage noch nicht in das Gesamtsystem integriert ist oder während eines Wartungszyklus, wenn die Maschine für die Dauer der Wartung aus dem Betriebsablauf genommen wird. Dies führt dazu, dass insbesondere heute, wo vor allem Ethernet zunehmend als Basis für die industrielle Kommunikation herangezogen wird, Maschinenausfälle aufgrund fehlender Kabelüberwachung immer wahrscheinlicher werden. Um dem entgegenwirken zu können, wurde im Projekt Ko²SiBus ein neues Messverfahren konzipiert, implementiert und validiert, das kostengünstig in neue oder bestehende Systeme integriert werden kann. Um die Tauglichkeit zu zeigen, wurden die Projektergebnisse in Prototypen und Demonstratoren implementiert, die sowohl als Stand-Alone aber auch als Integrationslösungen dienen können.

Das Ziel des Forschungsvorhaben ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	83 S., 53 Abb., 9 Tab., 18 Lit.
Laufzeit:	01.06.2017 - 30.04.2020
Zuschussgeber:	BMWi/IGF-Nr. 19574BG
Forschungsstellen:	Hochschule Offenburg (HSO) Prof. Dr. Axel Sikora IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH) Dr. Tino Hutschenreuther Technische Universität Chemnitz (TUC) Prof. Dr. Olfa Kanoun

Bearbeiter und Verfasser:

Prof. Dr. Axel Sikora (HSO)
Manuel Schappacher (HSO)
Amrut Dant (HSO)

Dr. Tino Hutschenreuther (IMMS)
Sebastian Uziel (IMMS)
Jonathan Gamez (IMMS)
Tamas Harczos (IMMS)

Prof. Dr. Olfa Kanoun (TUC)
Dr. Thomas Keutel (TUC)
Ahmed Kallel (TUC)
Dawoud Kalifa (TUC)

Vorsitzender projekt-
begleitender Ausschuss:

Friedrich Becker (TURCK Electronics)

Vorsitzender Beirat:

Judith Binzer (DFAM)

Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von der Deutschen Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik (DFAM) e.V. gestellt und gemeinsam am IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), am Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik (ivESK) der Hochschule Offenburg und an der TU Chemnitz (TUC) unter der Leitung von Herrn Dr. Tino Hutschenreuther (IMMS) bearbeitet wurde.

Die DFAM dankt Herrn Hutschenreuther und den wissenschaftlichen Bearbeitern Sebastian Uziel (IMMS), Tino Hutschenreuther (IMMS), Jonathan Gamez (IMMS), Tamas Harczos (IMMS), Dr. Thomas Keutel (TUC), Dawoud Khalifa (TUC), Ahmed Kallel (TUC), Dr. Axel Sikora (HSO), Manuel Schappacher (HSO) und Amrut Dant (HSO) für die Durchführung des Vorhabens sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e.V. für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der DFAM unter der Leitung von Friedrich Becker (TURCK Electronics) begleitet. Diesem Projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 19574BG) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e.V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Danksagung	III
1. Executive Summary	2
2. Einleitung	3
2.1. Problem und Aufgabenstellung	4
2.2. Lösungsansatz	4
2.3. Projektablauf	6
2.4. Zusammenarbeit mit Dritten	8
2.5. Verwendung und Veröffentlichung der Ergebnisse	8
3. Stand der Technik	9
3.1. Verfügbare Überwachungsmechanismen	9
3.1.1. Link Down Functionality	9
3.1.2. Time Domain Reflectometry (TDR)	9
3.1.3. Bit Error Rate (BER) Monitor	9
3.1.4. FEQ Monitor	10
3.1.5. Active Link Cable Diagnostic (ALCD)	10
3.1.6. Matched Cable Diagnostic	10
3.2. Weitere Hilfsmittel für die Signalanalyse	10
3.2.1. Arbitrary Signal Generation	10
3.2.2. Energy Detector	11
3.2.3. Linked Cable Status	11
3.2.4. Link Quality Monitor	11
3.2.5. Ultrasound Inspection	11
3.2.6. DC Method and Sound Injection	12
3.2.7. Capacitive and Inductive Sensors	12
3.3. I4.0 Protokolle für das Geräte-Monitoring	13
3.3.1. Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA)	13
3.3.2. Simple Network Management Protocol (SNMP)	14
4. Anforderungserhebung	16
4.1. Befragung der Unternehmen	16
4.2. Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen	17
4.2.1. Allgemeine technische Anforderungen	17
4.2.2. Wirtschaftliche Anforderungen	17
4.2.3. Anforderungen an die Überwachungsarchitekturen	18
5. Technische Grundlagen der Leitungsüberwachung	21
5.1. 100BASE-TX Ethernet-Schnittstelle	21
5.2. Kabelmodell und Kabelimpedanz	21

5.3.	Einfluss der Impedanz auf das MLT-3 Signal	23
5.3.1.	Resistiver Fehler	23
5.3.2.	Kapazitiver und Induktiver Fehler	24
5.4.	Methode zur Überwachung	25
5.4.1.	Aktive Methoden	25
5.4.2.	Passive Methoden	27
5.5.	Lösungsansatz – Vorgeschlagene Methode	28
5.5.1.	Undersampling (Unterabtastung)	29
5.5.2.	Wiederherstellung der Sprungantwort durch Sortieren der Absoluten Werte der Amplituden des Signales	30
5.5.3.	Wiederherstellung der Impulsantwort durch Resampling (Neuabtastung)	31
5.5.4.	Histogramm	32
5.6.	Simulationsergebnisse	33
5.6.1.	Resistiver Fehler	33
5.6.2.	Kapazitive-Induktiver Fehler	35
5.6.3.	Reflexion	35
5.6.4.	Diskussion	35
6.	Umsetzung der Leitungsüberwachung	38
6.1.	Konzept und Systemdesign	38
6.2.	Methoden zur Leitungsüberwachung	38
6.2.1.	Spitzenwertdetektor	38
6.2.2.	Auswertung der Signalstatistik	39
6.2.3.	Fazit	41
6.3.	Messeinheit	41
6.3.1.	Schaltungsvarianten	41
6.3.2.	Schaltungsentwurf	42
6.3.3.	Layout und Fertigung der Messeinheit	43
6.4.	Analyseeinheit	47
6.4.1.	Signalerfassung	47
6.4.2.	Verteilung der Werte	47
6.4.3.	Symbol Identifikation	47
6.4.4.	Berechnung der Qualitätsparameter	47
6.5.	Test und Messungen	48
6.5.1.	Test der Messeinheit	48
6.5.2.	Test der Mess- und Analyse Einheit	50
7.	Integration in ein Gesamtsystemkonzept	54
7.1.	Gesamtsystemkonzept	54
7.2.	Messeinheit	55
7.3.	Analyseeinheit	55
7.4.	Schnittstelleneinheit	55
7.4.1.	Hardwareplattform	55

7.4.2. Softwarearchitektur	56
7.5. Schnittstellenbeschreibungen	57
7.5.1. Schnittstelle zwischen Messeinheit und Analyseeinheit	59
7.5.2. Schnittstelle zwischen Analyseeinheit und Schnittstelleneinheit	59
7.6. Registerbeschreibungen	60
7.6.1. Übersicht	60
7.6.2. CHX_ACTIVITY (0x00/0x05)	60
7.6.3. CHX_CLARITY (0x01/0x06)	61
7.6.4. CHX_ASYMMETRY (0x02/0x07)	61
7.6.5. CHX_AMPLITUDE (0x03/0x08)	62
7.6.6. CHX_SYMBOL_DISTRIBUTION (0x04/0x09)	62
7.6.7. INTERRUPT_STATUS (0x0A)	63
7.6.8. INTERRUPT_ENABLE (0x0B)	63
7.6.9. INTERNAL_TEMPERATURE (0x0C)	64
7.6.10. SINE_WAVE (0x0D)	64
7.7. Schnittstelle zu den übergeordneten Systemen	64
7.7.1. OPC UA	64
7.7.2. SNMP	64
8. Demonstrator	65
8.1. Integrationsdemonstrator	65
8.2. Messedemonstrator	66
8.2.1. Gesamtaufbau	66
8.2.2. Aufbau des Analysegeräts	67
8.2.3. Zugriff über Standard-Clients	68
8.2.4. Zugriff und Visualisierung über IoT-Plattform	68
9. Zusammenfassung	73
9.1. Erfahrungen aus dem Projekt	73
9.2. Fazit	73
9.3. Mögliche zukünftige Arbeiten	73
A. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	75
B. Durchgeführte Transfermaßnahmen	76
B.1. Wissenschaftliche Veröffentlichungen	76
B.2. Nichtwissenschaftliche Veröffentlichungen	76
B.3. Wissenstransfer innerhalb des projektbegleitenden Ausschusses	76
B.4. Wissenstransfer innerhalb der DFAM	77
B.5. Wissenstransfer auf Messen	77
C. Weitere Transfermaßnahmen	77
D. Abkürzungsverzeichnis	79

E. Abbildungsverzeichnis	80
F. Tabellenverzeichnis	82

1. Executive Summary

The monitoring of industrial plants ensures that highly automated processes can run smoothly in the economy. In most cases, the monitoring of the plants themselves is at the centre of attention here; the communication lines for data exchange on an Ethernet basis (e.g. Profinet) are currently not yet part of a continuous monitoring system. Although the physical connections are also checked here, this is often only done at the time of commissioning, when the plant is not yet integrated into the overall system, or during a maintenance cycle, when the machine is taken out of operation for the duration of maintenance. As a result, especially today, when Ethernet in particular is increasingly being used as the basis for industrial communication, machine failures due to a lack of cable monitoring are becoming increasingly probable. In order to counteract this, a new measuring method based on undersampling was designed and implemented in the project Ko²SiBus, which can be integrated cost-effectively into new or existing systems. In order to demonstrate its suitability, the project results were implemented in prototypes and demonstrators, which can be used as stand-alone or integration solutions.

2. Einleitung

Das Monitoring von Industrieanlagen stellt in der Wirtschaft sicher, dass hoch automatisierte Prozesse reibungslos ablaufen können. Meistens steht hier das Monitoring der Anlagen selbst im Mittelpunkt, die Kommunikationsleitungen für den Datenaustausch auf Ethernet-Basis (z.B. Profinet) sind gegenwärtig noch nicht Teil einer kontinuierlichen Überwachung. Zwar werden auch hier die physischen Verbindungen überprüft, jedoch geschieht dies häufig nur zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme, wenn die Anlage noch nicht in das Gesamtsystem integriert ist oder während eines Wartungszyklus, wenn die Maschine für die Dauer der Wartung aus dem Betriebsablauf genommen wird.

In den genannten Fällen ist es bislang erforderlich, dass das System, dessen Kommunikationsleitungen überprüft werden sollen, für die Dauer der Überprüfung aus dem Betriebsablauf entfernt wird. Eine kontinuierliche Überprüfung der Signalqualität im regulären Betriebsablauf der drahtgebundenen Ethernet-basierten Installationen ist mit den gegenwärtig verfügbaren Standardprodukten nicht effizient möglich. Eine Messung selbst wird mit meist sehr kosten- und installationsaufwändigen analogen Messgeräten durchgeführt, die deswegen nur für beschränkte Zeiten von qualifizierten Ingenieuren eingesetzt werden. Entsprechend erfolgt diese Überprüfung selten und ist mit hohen Kosten verbunden. Darüber hinaus besteht das Risiko, dass z.B. kurzzeitig eingetretene Änderungen in der Qualität der Kommunikationsleitungen durch zyklische Wartungsintervalle nicht bzw. u.U. nicht rechtzeitig festgestellt werden können. Gerade dieser Fall kann allerdings in industriellen Umgebungen schnell eintreten, da die Wartungsintervalle generell groß sind und Probleme nur erkannt werden, wenn diese während der Messung auch auftreten. Auf der anderen Seite ist es mit hohen Kosten verbunden, wenn ein Ausfall der Kommunikation zwischen den Anlagen zu einem nicht vorhergesehenen Ausfall der Produktion führt. Kabel unterliegen in Produktionsbereichen hohen Wechselbiegebeanspruchungen, da sie im Gegensatz zu Office-Umgebungen bewegt werden. Dies kann schleichend zur Verschlechterung der Impedanz bis hin zum Bruch führen. Damit werden die Kabel zunehmend zur Schwachstelle im System, die unbedingt überwacht werden muss. Aufgrund der noch relativ jungen Technologie Profinet wurden diese Probleme bisher nicht wahrgenommen. So werden in den nächsten Jahren Probleme durch den Verschleiß von Kabeln erwartet. Diese werden aber durch fehlende oder sehr aufwendige Methoden der Überwachung nicht früh genug erkannt und so zu ungeplanten Ausfällen führen.

Aus diesen Gründen befasste sich das Projekt „Kontinuierliche und kostengünstige Signalüberwachung für industrielle Bussysteme“ (Ko²SiBus) mit den Möglichkeiten einer kontinuierlichen und kostengünstigen Signalüberwachung solcher Ethernet-basierter industrieller Bussysteme. Es wurde ein Konzept entwickelt, das es ermöglicht, industrielle Ethernet-Kommunikationsleitungen kontinuierlich ohne kostenaufwändiges Messequipment zu überwachen und bei Bedarf Wartungen zu planen. Es erlaubt die Monitoring-Daten über eine einheitliche und offene Schnittstelle weiterzugeben, so dass eine Integration in kundenspezifische Monitoring-Lösungen einfach möglich ist. Zudem kann es in bestehende Anlagen/Systeme als nachrüstbares Add-On integriert werden kann (z.B. als Switch), oder als Feature direkt in Netzwerkknoten von Industrie

4.0-Anlagen integriert werden.

2.1. Problem und Aufgabenstellung

2.2. Lösungsansatz

Um dieses Ziel der kontinuierlichen und kostengünstigen Signalüberwachung zu erreichen, werden zunächst der aktuelle Stand der Technik sowie die verfügbaren Monitoring-Funktionen untersucht. Anschließend werden die gegebenen Kommunikationssignale auf ihre Eignung für die Leitungsanalyse hin untersucht und Parameter und Algorithmen definiert und getestet, die eine Erweiterung oder Verbesserung der gegebenen Überwachungsmöglichkeiten hin zu einer kontinuierlichen Überwachung erlauben. Im letzten Schritt wird ein Konzept entwickelt und in einem Demonstrator prototypisch umgesetzt, um die in den vorangegangenen Schritten definierten Parameter zu überwachen. Um im Anschluss die Monitoring-Daten auszuwerten und definiert weitergeben zu können, bedarf es einer einheitlichen Schnittstelle. Hierzu sollen die existierenden einschlägigen Standards auf ihre Eignung geprüft und bei Bedarf erweitert werden. Um die praktische Realisierbarkeit der in diesem Projekt erarbeiteten Konzepte nachzuweisen, soll eine Integration in einen Demonstrator erfolgen. Dieser soll dazu dienen, die Ergebnisse beispielhaft zu präsentieren und die Konzepte in einem realen System zu testen. Abb. 1 skizziert den finalen Anwendungsfall.

Das Projekt nutzt die in der von der DFAM Studie[1] gewonnenen Erkenntnisse, um eine kontinuierliche Leitungsüberwachung in Datenleitungen zu realisieren. Dabei werden folgende Arbeitshypothesen verwendet:

- Der Nutzdatenstrom ist im Sinne eines Stimulus für die Kabeldiagnose nutz- und manipulierbar
- Physikalische Merkmale der auf den Kabeln stimulierten Signale bilden den Kabelzustand mit ähnlicher Qualität ab wie das bei dedizierten Messgeräten der Fall ist;
- Durch geeignete Kombination von Stimulus sowie Hard- und Software für die Datenanalyse lassen sich zukünftige Fehler detektieren – und damit vorausschauend Maßnahmen ergreifen, bevor die eigentliche Verbindung abbricht
- Die Diagnose bildet die Basis für ein prädiktives Netzwerkmanagement, indem Netzwerkinfrastruktur mit der kontinuierlichen Leitungsüberwachung ausgestattet wird. Diese Hypothesen bilden die Grundlage für die Arbeitspakete des Projektes, die sich über theoretischen Fragestellungen, messtechnische Aspekte, die Modellierung und Datenanalyse sowie die Einbindung in das Netzwerkmanagement und Standardisierungsfragestellungen erstrecken.

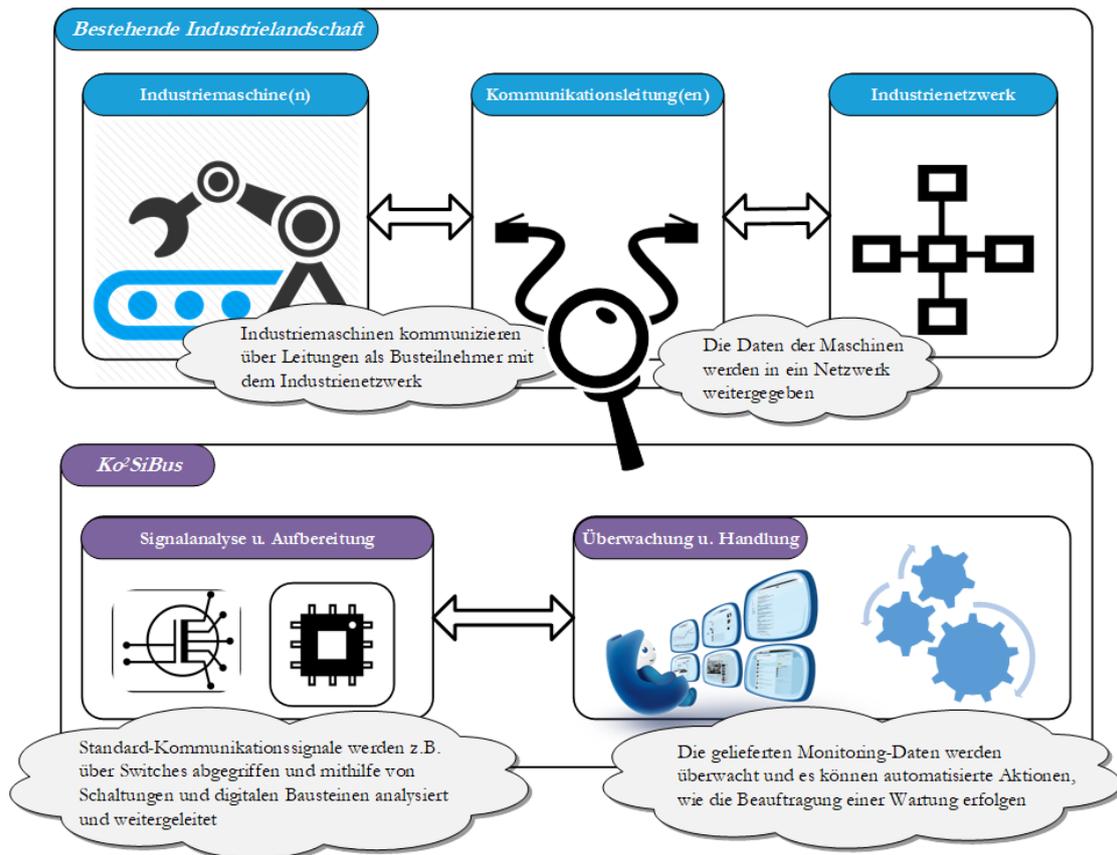


Abbildung 1: Genereller Anwendungsfall der kontinuierlichen Signalüberwachung

2.3. Projektablauf

Bereits vor Beginn der Arbeiten zu Ko²SiBus haben die Forschungsstellen in einer Vorstudie [1] die kommerziell verfügbaren Technologien zur Überwachung von Ethernet-basierten Kommunikationsleitungen untersucht. Darauf aufbauend sollte das Projekt die fehlenden Funktionalitäten ergänzen und mittels eines Prototyps deren Tauglichkeit verifizieren.

Zu Beginn des Projekts wurden die technischen Parameter und Anforderungen erarbeitet. Dies wurde u.a. durch eine Recherche zum Stand der Technik, als auch durch eine intensive Befragung und Diskussionen mit dem Projekt begleitenden Ausschuss (PA) erreicht. Darauf aufbauend wurden Methoden für die Leitungsanalyse untersucht und spezifiziert, die wiederum als Grundlage für die Umsetzung dienten. Letztendlich wurden die Arbeiten zu einem Gesamtsystem integriert und in einem Demonstrator vereint, so dass die Ergebnisse in entsprechende Weise präsentiert werden können.

Die Arbeiten wurden zudem an einige Mitglieder des PA verteilt, um diesen die Möglichkeit zu geben, die Entwicklungen zu untersuchen und ggf. sogar in deren Entwicklungen und Produkte zu integrieren.

Abb. 2 zeigt die Übersicht der Arbeitspakete innerhalb des Projekts mit den jeweiligen Beteiligten und AP-Leitern. Leider kam es innerhalb des Projekts zu Verzögerungen, so dass der ursprüngliche Endtermin zum 31.08.2019 nicht eingehalten werden konnte und das Projekt verlängert wurde. Diese Verzögerung war größtenteils auf mangelndes Fachpersonal zurück zu führen. Dennoch wurden die Arbeiten so fortgeführt, dass ein gutes Ergebnis erzielt werden konnte.



Abbildung 2: Übersicht der Arbeitspakete innerhalb des Projekts

2.4. Zusammenarbeit mit Dritten

Die Arbeiten zu Ko²SiBus waren durch enge Kooperationen mit Unternehmen, Herstellern und anderen Projekten geprägt.

- Vorstellung des Demonstrators und Durchführung von Messungen an Kabeln bei Firmen Indu-Sol GmbH.
- Bereitstellung des Integrationsdemonstrators für Firma Hilscher Gesellschaft für Systemautomation mbH zur Evaluierung der Integrationsmöglichkeiten der Projektergebnisse.
- Weitere Kontakte fanden im Rahmen der regelmäßigen Projekttreffen des PA statt

2.5. Verwendung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Der Projektfortschritt sowie die Ergebnisse wurden regelmäßig auf Treffen mit dem PA sowie den Frühjahrs- und Herbsttagungen der DFAM vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse wurden bereits Mitgliedern des PA zur Verfügung gestellt und werden dort aktuell untersucht und erprobt. Im Rahmen der Arbeiten zu Ko²SiBus ist zudem eine Reihe von wissenschaftlichen wie nichtwissenschaftlichen Veröffentlichungen entstanden. Eine Aufstellung der einzelnen Maßnahmen und Veröffentlichungen findet sich in Anhang B.

3. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik in Bezug auf das zu entwickelnde Überwachungssystem analysiert. Hierzu zählt zum einen die Recherche über die am Markt bereits verfügbaren Lösungen als auch die Untersuchung der technischen Aspekte und Grundlagen, die für die Entwicklung notwendig sind. Diese fließen dann später in die Anforderungserhebung mit ein.

3.1. Verfügbare Überwachungsmechanismen

Diverse Chiphersteller bieten in ihren Ethernet-Transceivern zusätzliche Funktionalitäten an, die es ermöglichen, bestimmte Monitoring Funktionen durchführen zu können oder zumindest diese zu unterstützen. Diese Funktionen wurden im Rahmen des Projekts gesammelt und auf deren Funktion und Tauglichkeit bzgl. der Projektanforderungen untersucht. Die folgenden Kapitel geben einen Überblick der verfügbaren Monitoring Erweiterungen.

3.1.1. Link Down Functionality

bezeichnet eine Funktion innerhalb von Ethernet-Transceivern des Herstellers Texas Instruments (TI), die eine schnelle Reaktionszeit auf Verbindungsausfälle ermöglicht. Der Mechanismus ist so konfigurierbar, dass er sogenannte Link-Loss Ereignisse auf der Grundlage eines bestimmten Kriteriums wie z.B beim Verlust der Descrambler-Synchronisation, einer erhöhten Anzahl von Empfangsfehlern, MLT3-Fehler, oder durch Energieverlust generieren kann. Dies ermöglicht die Detektion von Verbindungsabbrüchen innerhalb von weniger als einer Millisekunde.

3.1.2. Time Domain Reflectometry (TDR)

ist ein Instrument zur Beobachtung und Analyse von Diskontinuitäten und Impedanzänderungen in Drähten und Kabeln. Ethernet-Transceiver verwenden TDR zur Bestimmung der Qualität der Kabel, Steckverbinder und Abschlüsse sowie zur Abschätzung der Kabellänge. Einige der möglichen Probleme, die diagnostiziert werden können, sind Öffnungen, Kurzschlüsse, Fehlanpassungen der Kabelimpedanz, schlechte Steckverbinder, Fehlanpassungen der Abschlüsse, Kreuzfehler, Kreuzkurzschlüsse und alle anderen Diskontinuitäten entlang des Kabels. Mittels TDR kann auch festgestellt werden, welches Adernpaar (TX/RX) einen Fehler aufweist und wie groß der ungefähre Abstand zu dem Fehlerpunkt dazu ist. TDR ist ein allgemeiner Mechanismus und wird von diversen Chipherstellern implementiert.

3.1.3. Bit Error Rate (BER) Monitor

Der BER Monitor bezeichnet einen Monitor, der kontinuierlich die Bitfehlerrate überwacht und aufzeichnet. Über die Bitfehlerrate lassen sich Rückschlüsse auf die Übertragungs-

qualität des Kanals folgern. Auch diese Funktionalität wird von diversen Chipherstellern unterstützt.

3.1.4. FEQ Monitor

Der FEQ Monitor bezeichnet eine bestimmte Monitoring-Funktion von Ethernet-Chips des Herstellers Renesas, welche die Amplitude des Signals in einem Kabel überwachen kann. Wenn das Signal aufgrund eines Kabelproblems ein anomales Verhalten aufweist, kann der Ethernet-Transceiver dieses Ereignis erkennen und ein entsprechendes Ereignis melden, wenn z.B. ein bestimmter Wert über- oder unterschritten wird. Diese Funktionalität wurde bereits ausgiebig in einer Vorstudie der Projektpartner [1] analysiert.

3.1.5. Active Link Cable Diagnostic (ALCD)

Active Link Cable Diagnostic ist eine in Ethernet-Transceivern des Herstellers TI implementierte Funktion zur Schätzung der Kabellänge während einer aktiven Verbindung. Hierzu wird eine passive digitale Signalverarbeitung auf der Grundlage angepasster Daten verwendet und auf Basis dieser die zur Schätzung der Kabellänge durchgeführt.

3.1.6. Matched Cable Diagnostic

Matched Cable Diagnostic ist eine Funktionalität, die von Ethernet-Transceivern des Herstellers Microchip bereitgestellt wird. Mit deren Hilfe ist es möglich, die Länge des verwendeten Kabels im 100MBit Modus zu schätzen. Somit bildet es eine ähnliche Funktionalität wie die ALCD Funktion von TI ab.

3.2. Weitere Hilfsmittel für die Signalanalyse

Zusätzlich zu den fertigen Analysefunktionalitäten existieren auch eine Reihe weiterer Hilfsmittel, mit denen weitere Signalanalysen durchgeführt und unterstützt werden können. Diese liefern nicht zwingend einen direkten Qualitätsparameter, erzeugen aber Meta-Informationen, aus denen weitere Rückschlüsse gezogen werden können oder erlauben die Manipulation der Datensignale um z.B. spezielle Signale zu erzeugen, die gut analysiert werden können.

3.2.1. Arbitrary Signal Generation

In der Regel durchlaufen Ethernet-Pakete einige zusätzliche Stufen bevor das Signal auf das Kabel übertragen wird. So werden die Daten z.B. codiert und durchlaufen einen sogenannten Scrambler. Dies führt dazu, dass über die regulären Datenschnittstellen, keine speziellen Datensignale generiert werden können. Um dies zu umgehen, erlauben einige Transceiver die Deaktivierung bestimmter solcher Stufen, z.B. den Scrambler, um definierte Signalformen generieren zu können.

3.2.2. Energy Detector

Energie Detektoren sind dazu in der Lage, die Signalstärke auf einem Kabel zu bestimmen. Basierend auf einem IIR-Filter verfügt dieser Energie-Detektor über eine ausgezeichnete Reaktionszeit und Zuverlässigkeit. Der Filterausgang wird mit vordefinierten Schwellenwerten verglichen, um über das Vorhandensein oder Fehlen eines ankommenden Signals zu entscheiden. Der Energiedetektor implementiert auch eine Hysterese-Funktion, um Jitter bei der Signalerkennung zu vermeiden. Letztendlich wird diese Funktion auch dazu verwendet, um über ein Link-Down-Ereignis zu entscheiden. Diese Funktionalität wird von Transceivern des Herstellers Texas Instruments bereitgestellt. [2].

3.2.3. Linked Cable Status

Der Linked Cable Status liefert den aktuellen Status der Ethernetverbindung. Der Transceiver erkennt hierbei eine Polaritätsumkehrung, Kabelvertauschungen (MDI vs. MDI-X als Teil des Auto-Negotiation-Protokolls), und einen Frequenzversatz relativ zum Link-Partner. Zudem wird eine Schätzung der Kabellänge (im 100MBit Modus) sowie eine Schätzung der Kabelsignalqualität durchgeführt. Weitere Einzelheiten werden in [3] beschrieben.

3.2.4. Link Quality Monitor

Der Link Quality Monitor bietet einen Mechanismus zur Erkennung und Warnung des Systems vor sich ändernden oder verschlechternden Verbindungseigenschaften. Der Link Quality Monitor ermöglicht eine Methode zur Generierung eines Alarms, wenn die Anpassung der digitalen Signalverarbeitung (engl. Digital Signal Processing (DSP)) auf einen Satz von Werten außerhalb des normalen und erwarteten Bereichs aufgelöst wird. Dies kann z.B. aufgrund von Änderungen im empfangenen Signal auftreten, die auf ein potenzielles Problem mit Verkabelung, Steckverbindern oder Abschlüssen hinweisen können. Die Software kann Schwellenwerte für die DSP-Parameter programmieren, die zur Unterbrechung des Systems verwendet werden sollen. Von der Software wird erwartet, dass sie anfänglich angepasste Werte liest und dann die Schwellenwerte auf der Grundlage eines erwarteten gültigen Bereichs programmiert. Dieser Mechanismus macht sich die Tatsache zunutze, dass die DSP-Anpassung in einem kleinen Bereich bleiben sollte, sobald eine gültige Verbindung hergestellt wurde. Auf diese Weise kann das System so abgestimmt werden, dass es je nach Wunsch empfindlich oder tolerant gegenüber Parameteränderungen ist. [4]

3.2.5. Ultrasound Inspection

Die Ultrasound Inspection wurde von Lawrence Livermore National Laboratories für die Kabeldiagnose entwickelt [5]. Bei dieser Methode werden Ultraschallwellen von einem Ultraschallwandler zu den Kabeln gesendet. Diese mechanischen Wellen werden von

den gesunden und beschädigten Oberflächen des Kabels unterschiedlich stark reflektiert. Der Wandler nimmt die reflektierten Schallwellen auf und berechnet ein visualisiertes Ergebnis, um Kabelfehler zu lokalisieren. Kabel können mit dieser Technik nur bis zu einer Länge von 9 m bis 15 m untersucht werden, da die Signale schnell gedämpft werden.

3.2.6. DC Method and Sound Injection

Eine typische Methode zur Messung des Kabelwiderstands ist die *DC Method and Sound Injection*. Dabei wird ein konstanter Strom in das Kabel eingespeist und der Spannungsabfall gemessen oder umgekehrt. Diese Methode eignet sich besonders für die Erkennung von Kurzschlüssen und Kabelfehlern mit geringem Widerstand [5]. Die Positionsbestimmung eines Kurzschlusses kann durch den Widerstand jedes Kabelendes gemessen werden, da dieser Wert proportional zur Länge des Kabels bis zur Fehlerstelle ist.

Bei Sound Injection wird ein Spannungs- oder Stromsignal in das Kabel eingekoppelt und das elektrische oder magnetische Feld entlang des Kabels gemessen. Die eingekoppelte Spannung oder der eingekoppelte Strom ist ein Wechselstromsignal in einem Bereich zwischen 60 Hz und 450 kHz, das mit einem Sensor erfasst werden kann [6]. Zur Erkennung eines Kurzschlusses wird ein Strom verwendet. Das Kabel wird mit dem Magnetfeldsensor abgetastet, bis das eingespeiste Signal verschwindet. An dieser Stelle befindet sich der Kurzschluss. Zur Erkennung von Leerlauf Fehlern im Kabel wird eine Spannung angelegt. Ein Sensor zur Messung des elektrischen Feldes wird verwendet, um den Kabelfehler zu lokalisieren. Das Kabel wird so lange abgetastet, bis der Ton verschwindet, was den Ort des Fehlers anzeigt.

Mit der Schalleinkopplungsmethode können Kurzschluss und Leerlauf im Kabel erkannt und lokalisiert werden, und sie eignet sich zur Erkennung von Kabelfehlern nur bei ungeschirmten Kabeln.

3.2.7. Capacitive and Inductive Sensors

Basierend auf der Messung der Kapazität bei offenen Stromkreisen oder der Induktivität bei Kurzschluss können Rückschlüsse auf den Status des Kabels gezogen werden. Die Kapazität und Induktivität des Kabelsystems können vor der Prüfung gemessen und gespeichert werden. Die Kapazität bei Leerlauf und die Induktivität bei Kurzschluss des Kabelsystems sind proportional zur Kabellänge. Die Genauigkeit des kapazitiven Sensors ist ähnlich wie bei der Reflektometriemethode. Da der induktive Sensor jedoch empfindlich auf die metallische Struktur um den Leiter herum reagiert, ist die Lokalisierung der Störungen weniger genau im Vergleich zur Genauigkeit der Reflektometriemethoden [7]. Beide Messmethoden sind kostengünstiger als Reflektometriemethoden und werden in kleinen eingebetteten Systemen eingesetzt. Bei der Kapazitäts- oder Induktivitätsmessung kann nur ein Kurzschluss oder ein offener Stromkreis erfolgreich lokalisiert werden.

3.3. 14.0 Protokolle für das Geräte-Monitoring

Für die Überwachung der Kabelqualität in Ethernet-basierten industriellen Bussystemen ist es nicht nur ausreichend, die Kabeleigenschaften zu analysieren. Idealerweise sollen diese Informationen auch zentralisiert zur Verfügung gestellt werden können, so dass die einzelnen Geräte überwacht werden und ggf. rechtzeitig Handlungsempfehlungen vorgeschlagen werden können. Hierzu existieren vielzählige Protokolle, die ihren Ursprung aus unterschiedlichen Bereichen, wie der Netzwerktechnik oder der Industrieautomatisierung haben. Die folgenden Kapitel geben einen Überblick der im Kontext des Projektes als relevant gesehene Protokolle.

3.3.1. OPC UA

OPC UA wurde als der Nachfolger der klassischen OPC-Technologie entwickelt, um die technischen Mängel zu beheben die in Verbindung mit dieser einherkommen. Verglichen mit der OPC-Technologie bietet OPC UA einen konsistenten und integrierten Adressraum, der es einem einzelnen OPC UA Server erlaubt, gezielt Daten, historische Daten, Alarmer und Ereignisse bereitzustellen [8]. Zusätzlich definiert OPC UA mit seinem Service-Modell eine Reihe von Diensten, die es einem Client erlauben, auf die Daten des OPC UA Adressraums zugreifen zu können. Die Inhalte des Adressraums werden durch wohldefinierte Informationsmodelle beschrieben.

Die OPC UA Systemarchitektur modelliert OPC UA Clients und Server als interagierende Partner. Der OPC UA Server stellt Daten zur Verfügung, indem er sein Informationsmodell offenlegt, während der OPC UA Client die vom Informationsmodell des OPC UA Servers bereitgestellten Daten konsumiert. OPC UA Dienste definieren die APIs (Application Programming Interfaces), die es den OPC UA Clients ermöglichen, mit den OPC UA Servern zu interagieren. Im Allgemeinen besteht ein typischer OPC UA-Client oder -Server aus drei Softwareschichten:

- OPC UA Kommunikations-Stack - implementiert die verschiedenen Datenkodierungsmechanismen, Nachrichtensicherheit und Transportprotokolle, die durch die OPC UA Technologie definiert sind.
- OPC UA Client oder Server SDK - implementiert allgemeine OPC UA Funktionalitäten einschließlich OPC UA Services. Das SDK ist keine obligatorische Funktion, doch wenn es genutzt wird, reduziert es den Entwicklungsaufwand der Client- oder Server-Anwendung.
- Client- oder Server-Anwendung - verwendet den OPC UA Kommunikations-Stack und das SDK zum Senden und Empfangen von OPC UA Nachrichten. In dieser Schicht können spezifische Funktionalitäten implementiert werden.

Das OPC UA Informationsmodell basiert auf dem OPC UA Metamodell [9]. Das OPC UA Informationsmodell stellt nicht nur die reinen Daten zur Verfügung, sondern legt auch die Semantik der bereitgestellten Daten offen. Die OPC UA Informationsmodellierung

erfolgt immer auf der Server-Seite, kann jedoch von angeschlossenen OPC UA Clients aufgerufen und modifiziert werden. Die durch das Informationsmodell von OPC UA Servern bereitgestellten Daten werden als eine Menge von Knoten dargestellt, die durch Attribute beschrieben und durch Referenzen miteinander verbunden sind [9]. Diese vom OPC UA Server dargestellten Daten basieren auf den acht Basisknoten und ihren Attributen, wie in Abb. 3 dargestellt. Jeder OPC UA Knoten hat einen eindeutigen Zweck. Beispielsweise wird der Knoten *Variable* verwendet, um den Wert eines Feldgerätes zu modellieren, während der Knoten "DataType" einfache und strukturierte Datentypen des Wertes des variablen Knotens modelliert. Je nach dem Zweck eines OPC UA Knotens können sie unterschiedliche Sätze von Attributen haben. Es gibt jedoch einige Attribute, die allen OPC UA-Knoten gemeinsam sind.

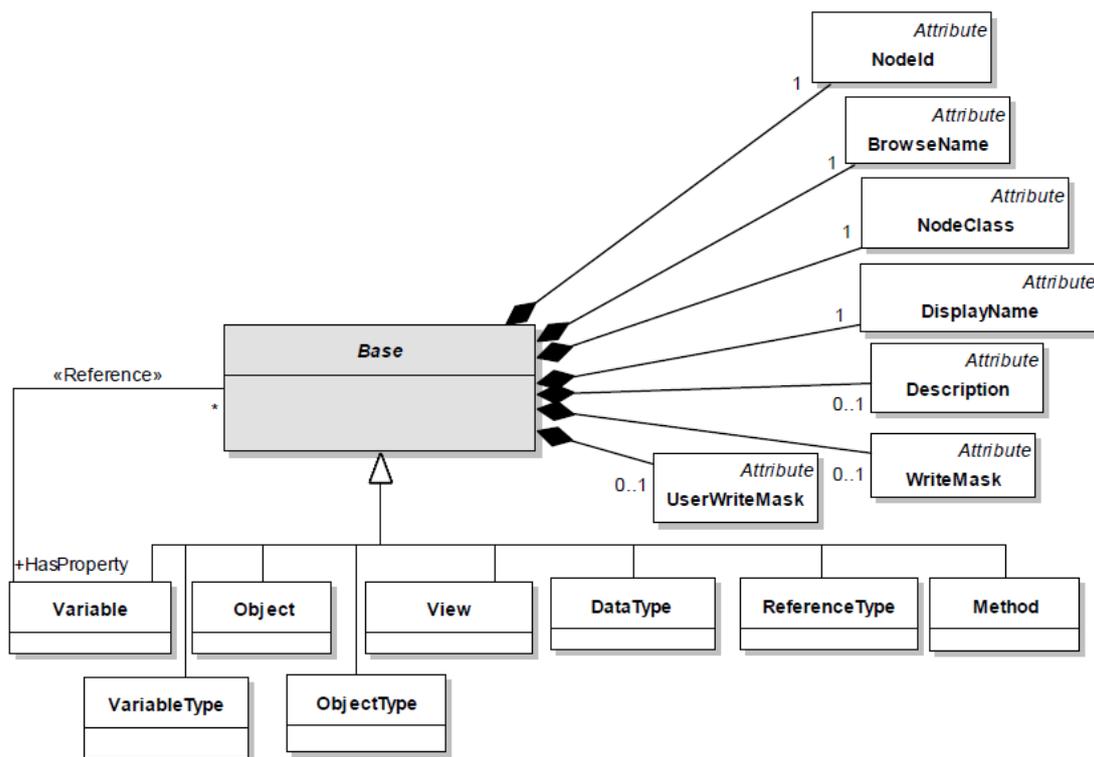


Abbildung 3: OPC UA Meta Model [9]

3.3.2. SNMP

Das SNMP ist ein Netzwerkprotokoll, welches überwiegend für die Überwachung und Steuerung von Netzwerkgeräten zuständig ist. Hierzu zählen in der Regel Geräte wie Router, Switches, Drucker oder Firewalls. Das Protokoll wurde kontinuierlich weiterentwickelt und existiert mittlerweile in der Version 3. Die SNMP Architektur definiert zwei Typen von Geräten:

- Agent - Dieser Teil läuft üblicherweise auf dem überwachten/gesteuerten System. Er erlaubt Managern den Zugriff auf die internen Daten, die in Form einer Tabelle angeordnet sind.
- Manager - Der Manager wird auf den jeweiligen Monitoring-Komponenten ausgeführt. Sie überwachen die Netzwerkgeräte, indem sie über die Agents Daten abgreifen und/oder verändern.

Die Organisation der Daten erfolgt über sogenannte Management Information Base (MIB). Diese beschreiben die verfügbaren Daten durch eine eindeutige Object Identifier (OID), die als Referenz des Wertes dient, dem Wert selbst, sowie zusätzliche Metainformationen. Diese Metainformationen enthalten z.B. den Datentyp des jeweiligen Werts.

4. Anforderungserhebung

In diesem Kapitel werden die Anforderungen, die an das System gestellt wurden, zusammengefasst. Basierend auf einer Umfrage der im PA teilnehmenden Unternehmen wurde der aktuelle Stand der Technik untersucht und die wichtigsten Anforderungen erhoben.

4.1. Befragung der Unternehmen

Das Gesamtziel des Projektes war die Konzeption und Entwicklung eines kontinuierlichen und kostengünstigen Analysesystems für Ethernet-basierte industrielle Bussysteme. Um ein solches System zu entwickeln, müssen in erster Linie die entsprechenden Rahmenparameter und Schlüsselanforderungen gefunden werden, um eine zugrunde liegende Systemspezifikation erstellen zu können. Hierzu ist vor allem wichtig zu berücksichtigen, welche Anforderungen Unternehmen als spätere Kunden oder Nutzer eines solchen Systems an eben dieses erheben. Um genau diese Informationen einzuholen, wurde ein detaillierter Fragebogen erstellt und an die im PA vertretenen Unternehmen verteilt. Dieser Fragebogen beinhaltet zahlreiche Fragen, verteilt auf verschiedene Kategorien rund um die Nutzung von Ethernet in den Produkten, Systemen und dem Umfeld der befragten Unternehmen. Durch allgemeine Fragen zu den Unternehmen und den Produkten der PA Mitglieder wurde versucht, auf die Use-Cases der Befragten Rückschlüsse zu ziehen. So wird z.B. aus Abb. 4 deutlich, dass ein Großteil der beteiligten Unternehmen und deren Repräsentanten im Projekt im Entwicklungsbereich des Maschinenbaus und/oder der Geräte- und Systementwicklung tätig sind.

Von größter Bedeutung sind natürlich die technischen Anforderungen an das System. Hierzu zählen z.B. die in den Produkten oder in dem Umfeld genutzten Technologien für die Industriekommunikation, sowie die damit verbundenen Rahmenparameter. Um hier für das Projekt eine Spezifikation erstellen zu können, deren Konzeption und Umsetzung später Anklang in der Anwendung findet, müssen ebenfalls durch die Befragung des PA die Wünsche der Unternehmen gesammelt und entsprechend berücksichtigt werden.

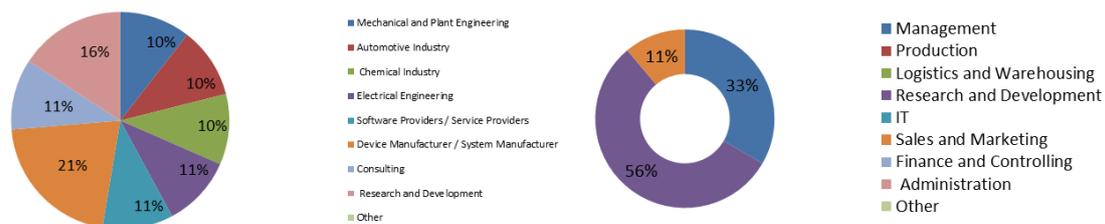


Abbildung 4: Anwendungs- und Tätigkeitsfelder der befragten PA Unternehmen (links) und die Tätigkeitsbereiche der jeweiligen Firmenrepräsentanten (rechts)

4.2. Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen

Basierend auf den Ergebnissen der Umfragen, sowie auf den Recherchen zum Stand der Technik stellte sich heraus, dass die gewünschten Funktionalitäten noch nicht in die bisher verfügbaren Standardprodukte implementiert sind. Aus diesem Grund wurden Schlüsselanforderungen an das zu entwickelnde System gestellt, die erfüllt werden sollten.

4.2.1. Allgemeine technische Anforderungen

Für das Projekt ergeben sich diverse Anforderungen, die in enger Absprache mit dem PA abgestimmt wurden. Hierzu gehören:

- Die Analyse muss während des Betriebs kontinuierlich durchführbar sein. Es soll nicht notwendig sein, z.B. ein Gerät für die Analyse aus dem Netzwerk nehmen zu müssen.
- Für die Analyse der Kabelqualität sollen keine zusätzlichen Signale erzeugt werden. Die reine Ethernet-Kommunikation soll für die Analyse genügen.
- Die abdeckbare Topologie muss variabel sein. Wie in Kap. 4.2.3 gezeigt wird, existieren unterschiedliche Ansätze zur Kabel-Überwachung von Ethernet-basierten Geräten. So ist es z.B. möglich, eine Analyse in den Netzwerk-Switches aber auch in den Endgeräten direkt vorzunehmen. Die Mehrheit der PA-Mitglieder bevorzugt hierbei die Analyse direkt in den Endgeräten. Dennoch soll ein modulares Konzept angestrebt werden, um möglichst alle Gerätetypen damit ausstatten zu können.
- Das System konzentriert sich vorerst auf die Analyse des laut der Umfrage am häufigsten verwendeten Ethernet-Standards - 100BASETX.
- Die Nutzer-Schnittstellen sollen sowohl über das OPC UA als auch über das SNMP Protokoll bereitgestellt werden, um eine einfache Integration in existierende Systeme zu ermöglichen.

4.2.2. Wirtschaftliche Anforderungen

Auch hinsichtlich der wirtschaftlichen Anforderungen ergeben sich einige wichtige Punkte, die zu erfüllen sind, um eine breite Nutzbarkeit der Ergebnisse zu erreichen.

- Das System muss kostengünstig sein. Aus den Umfrageergebnissen wurde sehr deutlich, dass sich die Mehrkosten für die geplanten Analyse-Erweiterungen auf weniger als 1€ belaufen sollten. Die Hälfte der Unternehmen würde sich sogar Kosten unter 0,50€ wünschen.

4.2.3. Anforderungen an die Überwachungsarchitekturen

Für die Architektur der Überwachungsfunktionen können grundsätzlich drei unterschiedliche Herangehensweisen in Betracht gezogen werden. Zum einen die zentrale Überwachung innerhalb von Netzwerk-Infrastruktur Elementen, zum anderen eine verteilte Überwachung innerhalb der jeweiligen Netzwerkknoten.

4.2.3.1. Überwachung innerhalb der Netzwerkknoten

Die erste Möglichkeit besteht in der Überwachung der Kommunikationssignale innerhalb der Netzwerkknoten (engl. Customer Premises Equipment (CPE)), genauer gesagt am RX-Port des CPE. Dieses Szenario ist in Abb.5 dargestellt. Ein Nachteil dieser Art der Kommunikationsüberwachung ist, dass nur die Signale der Empfängerleitungen beobachtet werden können. Ist die Kommunikation auf der Übertragungsleitung gestört, ist die Detektion mit dieser Methode nicht möglich.

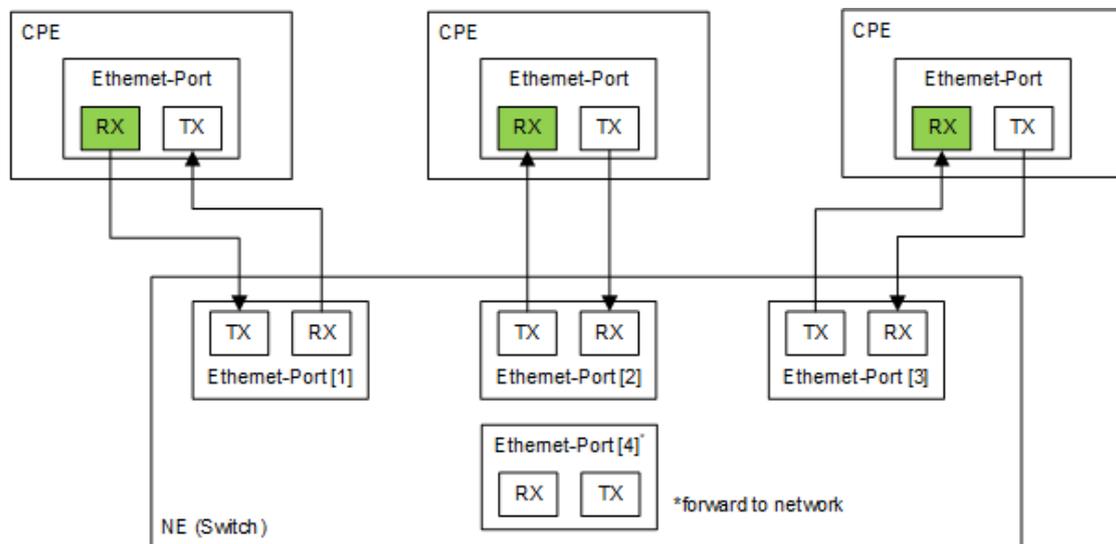


Abbildung 5: Monitoring der Empfangssignale an einem CPE

4.2.3.2. Überwachung innerhalb des Netzwerkequipments

Die Beobachtung der Kommunikationssignalintegrität auf der Seite der Netzwerkausrüstung (engl. Network Equipment (NE)), z.B. Netzwerk-Switch, stellt eine weitere mögliche Architektur dar. Ein Vorteil dieser Methode liegt in der zentralisierbaren Überwachung, so dass ein Monitoring eingeführt werden kann, ohne dass andere Netzwerkkomponenten Überwachungsfunktionen unterstützen können müssen. Dadurch wird die Möglichkeit einer kostengünstigen Erweiterung gegeben. Allerdings besteht auch hier der Nachteil

darin, dass nur die RX-Pfade sinnvoll überwacht werden können. Diese Architektur ist in Abb. 6 gezeigt, die überwachten Ports sind hervorgehoben.

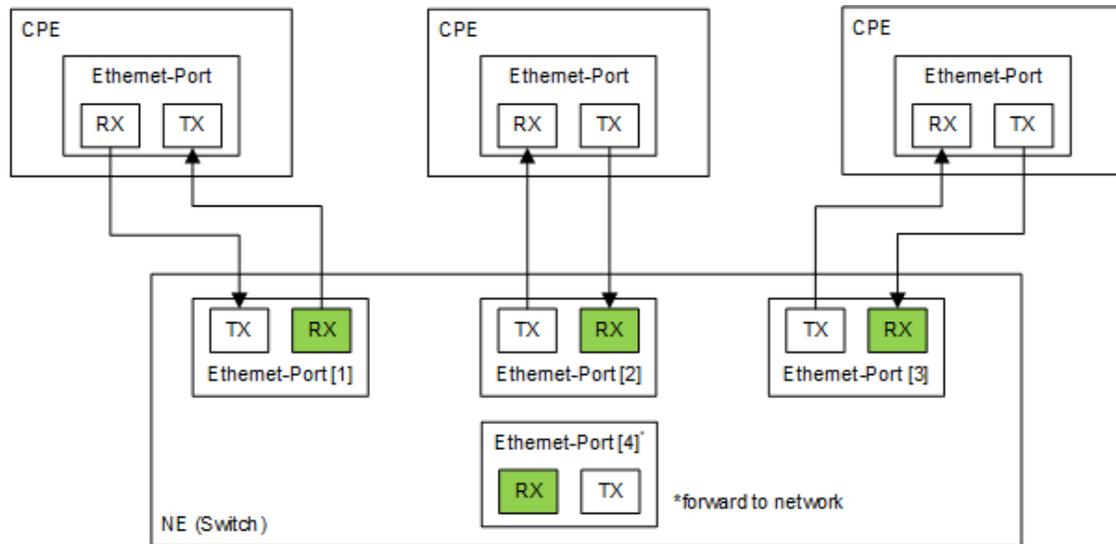


Abbildung 6: Monitoring der Empfangssignale an einem NE

4.2.3.3. Überwachung aller Endpunkte

Die dritte Methode zur Überwachung der Kommunikationssignalintegrität ist eine Kombination der beiden zuvor beschriebenen Methoden. Die Signalintegrität kann auf beiden Netzseiten, CPE und NE, überwacht werden. Der große Vorteil besteht hierbei, dass alle Leitungen (RX und TX) überwacht werden, wie in Abb. 7 dargestellt. Die überwachten Ports sind hervorgehoben.

4.2.3.4. Überwachung in einem verketteten Netzwerk

In industriellen Netzwerken trifft man häufig verkettete Topologien. Hierbei sind die CPE intern mit einem Netzwerkschicht ausgestattet. So können kettenähnliche Topologien aufgebaut werden, ohne das zentrale Element benötigt werden. Der Nachteil dieser Architektur besteht in der Ausfallsicherheit, da durch den Verlust einer Verbindung eine komplette Kette aus dem Netzwerk genommen wird. Hier ist eine kontinuierliche Überwachung demnach umso wichtiger. Abb. 8 zeigt einen solchen exemplarischen Aufbau, die überwachten Ports sind hervorgehoben.

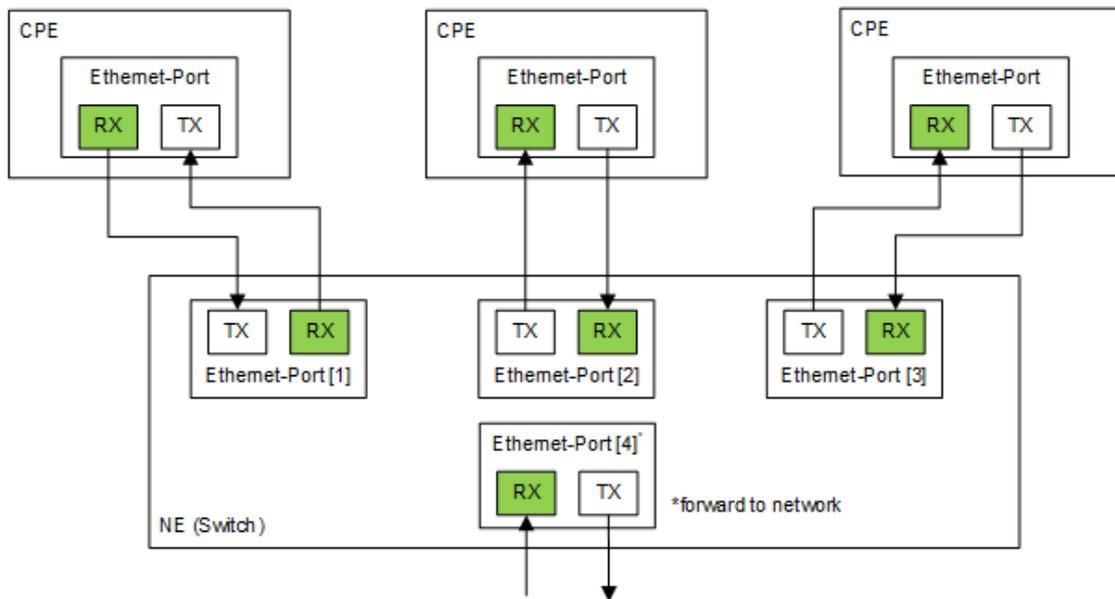


Abbildung 7: Monitoring der Empfangssignale sowohl an einem NE als auch an einem CPE

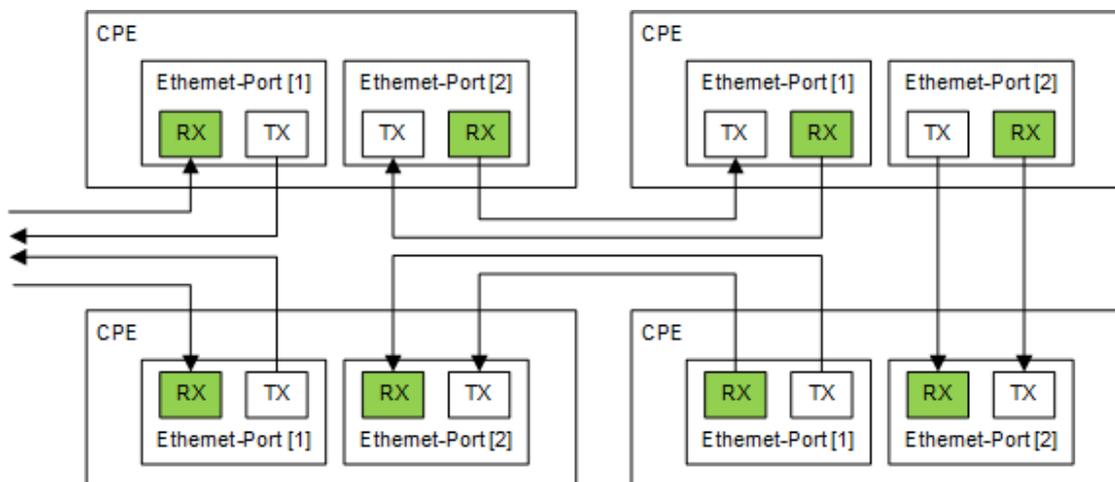


Abbildung 8: Monitoring der Empfangssignale an einem NE in einem verketteten Netzwerk

5. Technische Grundlagen der Leitungsüberwachung

5.1. 100BASE-TX Ethernet-Schnittstelle

Mit dem IEEE 802.3 wurde 1983 eine Standardisierung für Koaxial-Kabel eingeführt, die auch für die Ethernet eingesetzt wird. Insbesondere in diesem Bereich werden heutzutage Twisted-Pair-Kabel mit mindestens 4 Kabelbündeln eingesetzt, wie es in Abbildung 9 dargestellt ist. Für die vorrangig eingesetzte Kommunikationsanwendung wird eine Doppelpaar-voll-duplex-Differentialstruktur verwendet. Ein Paar ist für die Datenübertragung (Transmission) vorgesehen, die als TX+ und TX- bezeichnet wird. Ein zweites Paar ist für den Datenempfang (Reception) vorgesehen, die als RX+ und RX- bezeichnet wird. Die Datenübertragung erfolgt peer-to-peer, also ausschließlich zwischen zwei Netzwerkknoten, wobei RX und TX mit den entsprechenden Knoten verbunden ist. [10]

In diesem Projekt wurde sich auf die Betrachtung des fast Ethernet Standard 100BASE-TX, sowie auf eine maximale Übertragungstrecke von 100m verständigt. Hierzu soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass es insbesondere in der theoretischen Betrachtung auch zu verallgemeinerten Aussagen kommt, also auch zu Kabelsystemen, die von dieser Spezifikation abweichen. Die hier betrachteten Kabel können mit dem Transmission-Line-Kabel-Modell beschrieben werden, wie es im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

5.2. Kabelmodell und Kabelimpedanz

Die Übertragungsleitung eines Ethernet Kabels kann mit Hilfe der Telegraphengleichungen beschrieben werden [11], wobei die unterschiedlichen Zustände von Spannung und Strom im TX- und RX-Pfad zwischen zwei Netzwerkknoten definiert werden. Das Kabel wird hierzu in infinitesimal kleinen Segmenten betrachtet und mit einem "distributed-element model" mit den Parametern RGLC beschrieben, wie es in Abbildung 9 dargestellt ist. Die Parameter beschreiben dabei:

- R: den seriellen Widerstandsbelag [Ω/m] des Leiters, vorrangig bedingt durch das Leitermaterial und harten Kabelfehlern, wie zum Beispiel der Kurzschluss oder die Unterbrechung
- L: die verteilte Induktivität, hauptsächlich beeinflusst durch das Magnetfeld und die Selbstinduktivität [H/m]
- G: der Leitwert, der einen Leckstrom zwischen zwei Leitern oder zwischen einem Leiter und dem Massepotential beschreibt [S/m] - Isolationsfehler [S/m]
- C: die verteilte Kapazität zwischen zwei Leitern oder zwischen einem Leiter und dem Massepotential, hauptsächlich beeinflusst durch den Abstand zwischen den und die dielektrischen Eigenschaften des Isolationsmaterials [F/m]

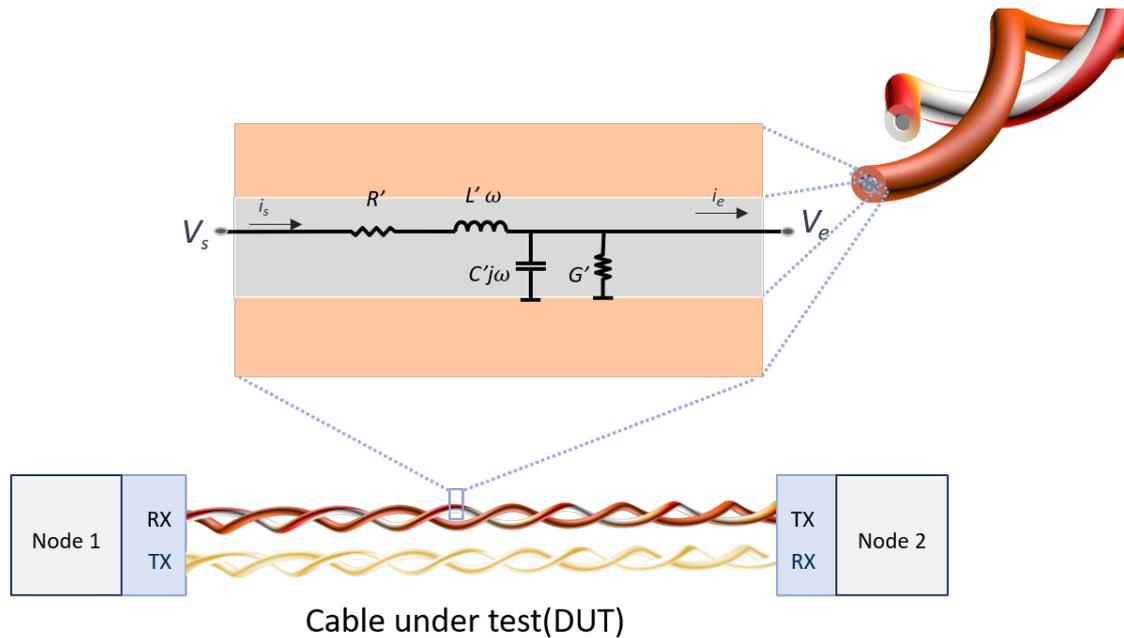


Abbildung 9: Kabelstruktur und -modell des Ethernet-Kabels

Diese Modellparameter (RGLC) sind damit abhängig von der Kabelstruktur, dem Kabeltyp und dem jeweiligen Betriebszustand, also auch einem Kabelfehler. Bei einem intakten Kabel ist zu erwarten, dass diese Größen eine einwandfreie Signalübertragung erlauben und nur hinsichtlich der Kabellänge skalieren. Es ist davon auszugehen, dass die Signalförm nur geringfügig beeinflusst oder aber gedämpft wird. Im dauerhaften Betrieb einer kabelgebundenen Kommunikation kann es nun durch Havarien, mechanische und thermische Beanspruchung aber auch durch eine hohe Betriebsdauer (calendar aging) zu einer Veränderung dieser Parameter kommen und somit zu einem Verlust der Übertragungssicherheit, wofür im vorliegenden Vorhaben eine wirtschaftliche Überwachungstechnologie entwickelt werden soll. Diese Veränderungen oder auch Kabelfehler können in unterschiedliche Kategorien gegliedert werden. Hierbei unterscheidet man plötzliche und allmähliche Änderungen. Plötzliche Änderungen, die auch zahlenmäßig am häufigsten auftreten sind im Wesentlichen auf Unfälle, Havarien oder aber eine falsche Bedienung bei Steckverbindungen zurückzuführen. Die daraus resultierenden Kurzschlüsse oder auch Kabelunterbrechungen führen in der Regel zu sehr deutlicher Änderung der Modellparameter.

Bei den allmählichen Änderungen kommt es entsprechend nur zu langsamen Veränderungen über die Zeit, die bezogen auf einen Anfangszustand beobachtet werden müssen. Insbesondere bei den allmählichen Änderungen können sich unterschiedliche Effekte überlagern, die eine Verschlechterung der Übertragungsqualität bedingen. Hierbei kann es zu einer Dämpfung des Signals kommen, was im Wesentlichen durch den R und den G Parameter beschrieben wird. Dabei spricht man von einem resistiven Effekt.

Weiterhin kann es zu einer Verzerrung oder Verschleifung der Signalform kommen, was im Wesentlichen durch den C oder den L Parameter beschrieben wird. Man spricht von einem Kapazitiv-Induktiv-Fehler. Wenn es zu einer deutlichen Änderung aller Parameter kommt, dann ist von einer Impedanzfehlanspassung auszugehen, was zusätzlich zu Signal-Reflexionen führen kann und somit zur Störung der Signalübertragung. Die verschiedenen Fehlerfälle sollen im nächsten Abschnitt näher erläutert werden.

5.3. Einfluss der Impedanz auf das MLT-3 Signal

Für das „Fast Ethernet 100BASE-TX“ wird ein MLT-3 modulierte Signal als Basis-Signalform verwendet. Dieses ist durch 3 diskrete Zustände (Spannungsebenen) 0, +1 und -1V definiert. Im Normalbetrieb werden die eingehenden Signale verstärkt, um mögliche Dämpfungen der Amplitude auszugleichen. Daraus resultiert eine Anforderung an das Vorhaben, das zu überwachende Signal bereits vor dem Netzwerkknoten zu überwachen. Das MLT-3 Signal ist im Weiteren gekennzeichnet durch eine Signalfrequenz von 125 MHz, woraus eine Periodendauer von 8ns resultiert. Entsprechend der Definition hat bei einem intakten Kabel ein Übergang von einem Zustand in den nächsten innerhalb von 4ns zu erfolgen. Wenn die Übergangszeit mehr als 4ns beträgt, kann es zu Dekodierungsfehlern und somit zu einem Datenverlust am RX Knoten kommen. Für das Projekt wurde demnach ein Ansatz verfolgt, die Qualität der Signalform zu bewerten. Abbildung 10 veranschaulicht dazu qualitativ den Einfluss eines resistiven mit einem überlagert kapazitiv-induktiven Fehlers, der zu einer leichten Dämpfung und einer Verschleifung des MLT-3 Signals führt, was durch eine Abtastung des Signals erfasst werden soll.

5.3.1. Resistiver Fehler

Ein resistiver Fehler ist auf die Änderung der Leitfähigkeit im Leiter oder aber eine Änderungen in der Isolation zurückzuführen. Diese Änderung wirkt sich unmittelbar auf die spezifizierte maximale Amplitude der MLT-3 Signale aus. Im derzeitigen Stand der Technik werden im Normalbetrieb die Netzwerkknoten versuchen diese Dämpfung auszugleichen, weshalb aktuelle Systeme noch zuverlässig arbeiten, obwohl schon möglicherweise schwerwiegende Störungen oder Abweichungen vom Normalzustand der Übertragungsleitung bestehen. Erst bei Erreichen einer Verstärkungsgrenze können die definierten Spannungspegel nicht mehr erreicht werden, womit der RX-Knoten das eingehende Signal nicht mehr dekodieren kann. Abbildung 11 zeigt hierzu die Darstellung mehrere Signal-Zustandswechsel über die Zeit. Im Fall eines intakten Kabels ist deutlich die Übergangszeit, als wichtiger Qualitätsindikator für die Übertragungsqualität zu erkennen und eines Kabels mit resistivem Fehlerwert und einer damit verbundenen Signaldämpfung.

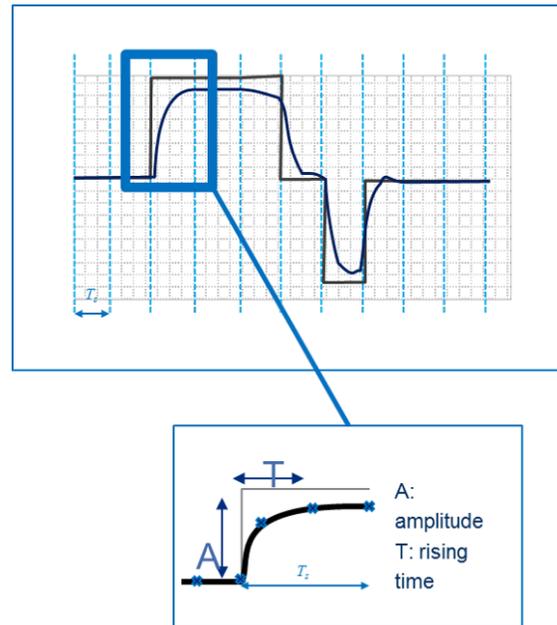


Abbildung 10: Ein vereinfachtes Schema zur passiven Methode, sowie die wichtigen zu beobachtenden Größen

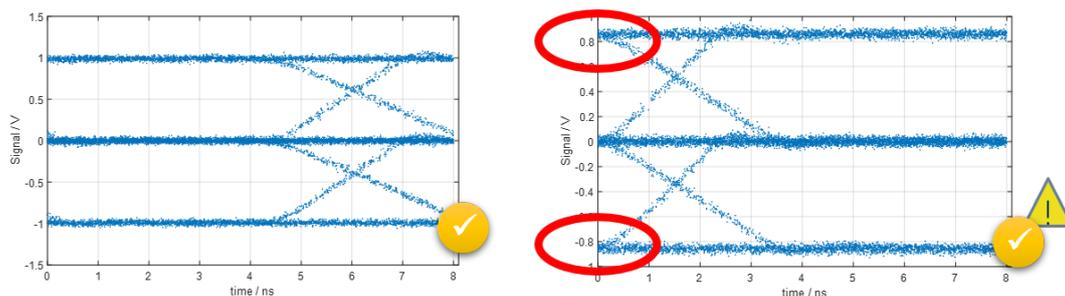


Abbildung 11: Neuabtastung bei einem resistiven Fehler, die Amplitude beträgt weniger als +1V/-1V

5.3.2. Kapazitiver und Induktiver Fehler

Kapazitive und Induktive Fehler sind auf die Änderung der dielektrischen Eigenschaften zurück zu führen. Ursachen hierfür sind eher kabelinnere Phänomene, die sich auf die Isolation (Isolationsmaterial) auswirken. Hierzu wurde bereits die Alterung des Isolationsmaterials benannt, was durch die Zeit, temperaturbedingte Ursachen, mechanische Beanspruchung oder aber eindringende Feuchtigkeit verursacht werden kann. In einem weniger wahrscheinlichen Szenario kann die Induktivität des Isolationsmaterials die Reaktanz des Kabels beeinflussen. Diese Einflüsse führen zu einer globalen Änderung der Kabelimpedanz und zu einem Verschleifen des Signals, wie es in Abbildung 12

dargestellt ist. Durch die Reduzierung kritischer Zeitkonstanten wird die Einstellzeit von 4ns zwischen zwei Zuständen überschritten, womit das Signal nicht mehr dekodiert werden kann.

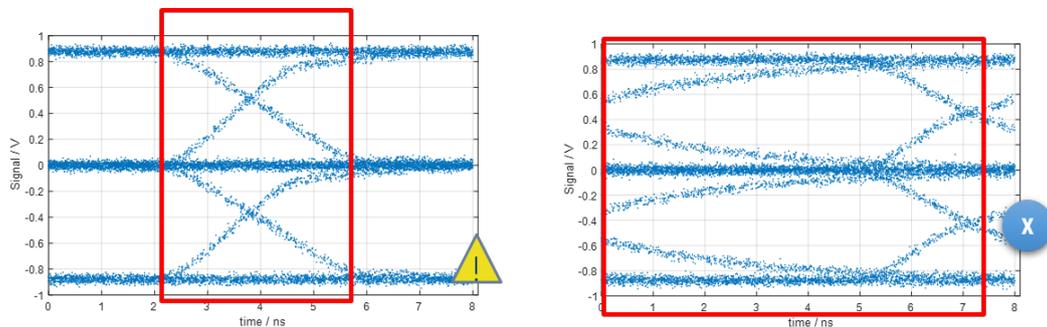


Abbildung 12: Neuabtastung bei einem kapazitiven Fehler, die Stabilitätsperiode beträgt mehr als 4ns

5.4. Methode zur Überwachung

In der Literatur wird zwischen aktiven und passiven Verfahren zur Überwachung von Kabelfehlern oder allgemein zur Messung von Kabeleigenschaften unterschieden. Im Folgenden werden beide Ansätze diskutiert und mit den Anforderungen im Projekt gegenübergestellt.

5.4.1. Aktive Methoden

Aktive Methoden basieren in der Regel auf dem Einsatz eines spezifischen Testsignals, was in die Übertragungsstrecke eingepreßt werden muss. Störungen oder auch Änderungen müssen am RX-Knoten oder als Reflexion am TX-Knoten erfasst werden. Die Eigenschaften der zum Einsatz kommenden Testsignale unterscheiden sich zwischen den Verfahren, sind aber definiert und somit im Vorfeld bekannt. Eine wesentliche Voraussetzung für diese Verfahren ist das Aussetzen der eigentlichen Kommunikation, da diese das Verfahren stören würde. In diesem Segment gibt es einige etablierte Verfahren, die sich im Wesentlichen aufgrund der Eigenschaften des Testsignals unterscheiden. Darunter zählen die Time Domain Reflectometry (TDR), Frequency Domain Reflectometry, Time-Frequency Domain Reflectometry (TFDR) und Impedanzspektroskopie (IS), die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

5.4.1.1. Time Domain Reflectometry (TDR) Die TDR [12] ist eine aktive Methode, die auf dem Prinzip der Zeitbereichsreflektometrie basiert. Kurz nach der Einprägung des Testsignals am TX Knoten (bei der TDR ein Impuls), wechselt dieser in den RX-Modus, um das reflektierte Signal zu erfassen. Wenn keine Reflexion erfasst wird, dann handelt es sich um ein optimal impedanzangepasstes System, Kennzeichen eines intakten

Kommunikationskabeln. In jedem anderen Fall werden Reflexionen empfangen, die auf verschiedenen Störungen oder auch Unterbrechungen des Kabels zurückzuführen sind. Impedanzsprünge führen zu Reflexionen des Testsignals. Ein Beispiel für einen Kabelfehler bei 30 cm ist in Abbildung 13 dargestellt.

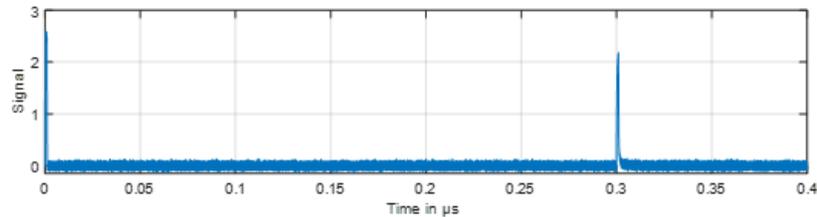


Abbildung 13: TDR auf ein fehlerhaftes Kabel angewendet

5.4.1.2. Time-Frequency Domain Reflectometry (TFDR) Die TFDR Methode basiert auf der TDR-Methode, wobei der wesentliche Unterschied in der Art des Testsignals liegt [12]. Anstelle des Impulses kommt hier ein gaußförmiges Chirp-Signal zum Einsatz, wie es in Abbildung 14 zu sehen ist. Das reflektierte Signal wird bei der TFDR mit dem Originalsignal kreuz-korreliert, um sowohl die Verzögerung als auch die Dämpfung des Testsignals zu überprüfen.

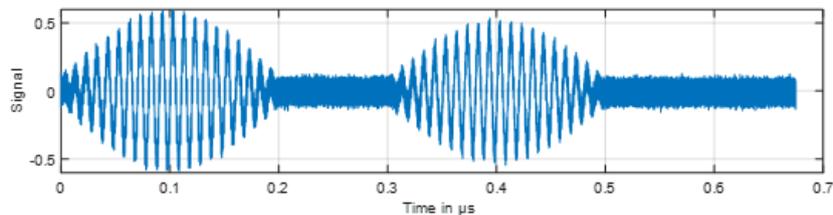


Abbildung 14: TFDR auf ein fehlerhaftes Kabel angewendet

5.4.1.3. Frequency Domain Reflectometry (FDR) Ähnlich wie TDR und TFDR basiert die FDR auf der Reflektometrie, allerdings im Frequenzbereich [12]. Das Anregungssignal, typischerweise ein Sinussignal mit unterschiedlichen Frequenzen, wird ebenso in das Kabel eingeprägt und bei vorhandenen Störungen als Reflexion wieder erfasst, was ein korrespondierendes Frequenzspektrum besitzt. Der in Abbildung 15 dargestellte Verlauf wurde durch eine Frequenz-Zeit-Transformation ausgewertet.

5.4.1.4. Impedance Spectroscopy Die Impedanzspektroskopie [11] ähnelt im Grundsatz der FDR-Methode, da auch hier ein Testsignal mit einer spezifischen spektralen Information zum Einsatz kommt. Der Hauptunterschied besteht in der Art und Weise der Messung. Während bei der FDR im Frequenzbereich die Reflexion des Testsignals

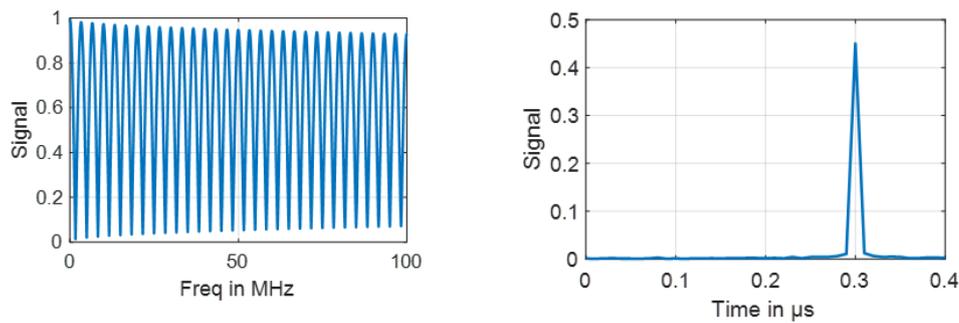


Abbildung 15: FDR auf ein fehlerhaftes Kabel angewendet

ausgewertet wird, so wird hier die absolute Impedanz des Kabels gemessen, womit unterschiedliche Anschlussmöglichkeiten bestehen. Im Falle eines Kabelfehlers enthält die Systemantwort typischerweise ein pseudoperiodisches Signal, wobei die Periode eine zusätzliche Aussage zum Ort des Kabelfehlers ermöglicht.

5.4.2. Passive Methoden

Die passiven Methoden basieren in der Regel auf Algorithmen, Kabel oder besser die Signalübertragung im laufenden Betrieb zu charakterisieren. Für diese Verfahren werden keine aufwendigen Testsignale benötigt, es wird nur die laufende Kommunikation benötigt. In diesem Segment sind ebenso verschiedene Verfahren etabliert, wie zum Beispiel: die „Bit-Error Rate“ oder das „Eye Pattern“ Diagramm

5.4.2.1. Bit-Error Rate and Packet Error Ratio (BER and PER) In einem intakten Kommunikationspfad wird zwischen zwei Netzwerkknoten die Bitfolge vollständig übertragen. Im Falle eines Bit- oder Codierungsfehlers, Rauschen oder sonstigen Störungen, passiert es, dass die Bitfolge nicht vollständig übertragen wird, was über eine Prüfsumme die mit übertragen wird kontrolliert werden kann. Dieses Verfahren analysiert die Kommunikation im s.g. „Transport Layer“. Es werden also keine Spannungen oder Ströme analysiert. Eine Analyse auf dem physikalischen Layer ist demzufolge mit diesen Methoden nicht möglich.

5.4.2.2. Systemidentifikation durch Impulsantwort/Sprungantwort Die Signale einer laufenden Kommunikation stellen letztendlich das Testsignal dar. Diese Signale erfahren entsprechend der Impedanz und damit des Zustands des Kabels eine Verformung, wie es schematisch in Abbildung 16 dargestellt ist und woraus bei konstanter Last die Übertragungsfunktion abgeleitet werden kann [13]. Diese Eigenschaften lassen sich mit Systemen zweiter oder dritter Ordnung beschreiben. Für dieses Verfahren wird jedoch eine hinreichende Abtastung des Signals benötigt, um zum Beispiel die Anstiegszeit ableiten zu können.

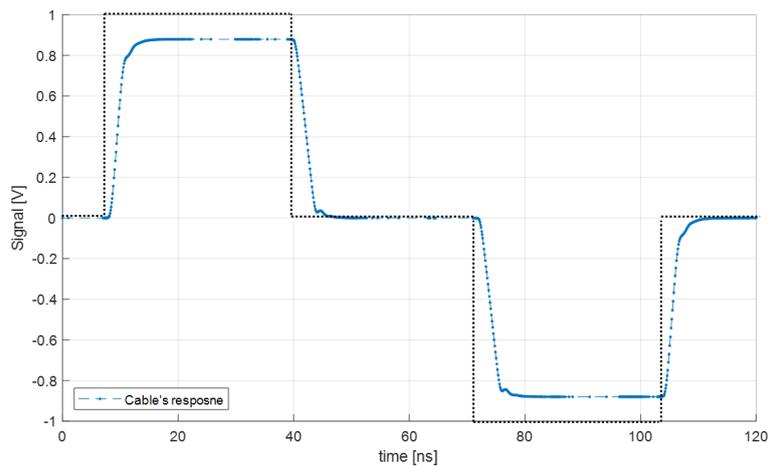


Abbildung 16: Impulsantwort eines Kabels mit MLT3-Signal

5.4.2.3. Eye Pattern (Augendiagramm) Das „Eye Pattern“ Diagramm [14] wird zur visuellen Identifizierung der verschiedenen Potentialebenen und der Zustandsübergänge auf dem physikalischen Layer verwendet. Das Diagramm wird in der Regel über eine komplette Sampling-Sequenz gebildet und würde bei idealem Verlauf ein klares Auge erkennen lassen. Bei Störungen würde das Auge schrumpfen oder die Struktur verändern.

5.4.2.4. Konstellationsdiagramm Das Konstellationsdiagramm [15] wird typischerweise eingesetzt, um ein digitales Modulationsschema zu visualisieren. Die Amplituden der jeweiligen Zustände werden in einem vier Quadranten Diagramm dargestellt, wobei die Messpunkte, also die Potentialniveaus auf dem physikalischen Layer, Wolken um einen Erwartungswert bilden. Weitere statistische Verfahren, wie die Standardabweichung oder der Signal-Rausch Abstand dienen dazu den Zustand der Kommunikation zu beschreiben.

5.5. Lösungsansatz – Vorgeschlagene Methode

Für den Lösungsansatz ist eine Vielzahl von verschiedenen Aspekten zu berücksichtigen gewesen. Neben den technischen Möglichkeiten und der prinzipiellen theoretischen Machbarkeit galt es, einen Ansatz zu wählen, der den Projektvorstellungen entspricht. Hier ist im Wesentlichen die Wirtschaftlichkeit der Lösung zu benennen, um letztendlich einen wirklichen Mehrwert für den Endnutzer darstellen zu können. Außerdem besteht die Zielstellung eines fest implementierten Diagnosealgorithmus, der im Betrieb den Zustand der Kommunikationsleitung überwachen kann. Es galt dementsprechend einen Konsens aus hinreichender Funktionalität (Sensitivität) und im besonderen Maße der Wirtschaftlichkeit der Lösung zu erzielen.

Wohingegen aktive Methoden eine quantitative Fehleranalyse (Lokalisierung, Fehlerart) erlauben, ist es jedoch erforderlich, die laufende Kommunikation zu unterbrechen, um das Anregungssignal einprägen zu können. Diese Unterbrechung ist für diese Anwendung nicht erwünscht. Konventionelle passive Methoden können auch bei laufender Kommunikation eingesetzt werden, verfügen jedoch nicht über die hohe Aussagekraft oder benötigen für den hier vorliegenden Frequenzbereich bezüglich der Überabtastung für eine nicht hinreichende Performance. Für die Erfüllung des Nyquist-Shanon-Theorems müsste die Abtastfrequenz eines ADCs für eine Signalfrequenz von 125 MHz bei mindestens 375 MHz liegen, wobei damit noch nicht sichergestellt ist, die Signalübergänge (4ns) und auch nicht die Impulsform eines gedämpften Signals sichtbar zu machen. Dies wird aber notwendig, um zum Beispiel auch Kapazitiv-Induktive Fehler identifizieren zu können. Eine Hardware, die über derartige Eigenschaften verfügt, wurde als Ziel für dieses Projekt kategorisch ausgeschlossen.

Als Zwischenergebnis im Arbeitspaket 2 wurde sich mit den Projektpartnern auf eine Hardwarekonfiguration verständigt. Dies war mit der Vorstellung einer neuartigen Methode verbunden, dass passive Verfahren der Systemidentifikation in Verbindung mit einem „Undersampling“ Ansatz zu realisieren. Dies bedeutet, dass man durch Faltung mit Abtastfrequenzen deutlich unterhalb des Nyquist-Shanon-Theorems Aussagen über höherfrequente Bereiche generiert. Es besteht sogar die Möglichkeit, parasitäre Signale außerhalb des interessanten Frequenzbereichs (Bandbreite von 31,25 MHz) zu vermeiden.

Damit wurde es möglich, eine wirtschaftliche Hardwareplattform zu identifizieren, wie es im Abschnitt 6 näher erläutert wird. Der hier vorgeschlagene Ansatz und die Art der Signalinterpretation sollen im Weiteren näher erläutert werden.

5.5.1. Undersampling (Unterabtastung)

Die Unterabtastung ermöglicht die Abtastung eines Signals, bei dem die Abtastfrequenz eines ADCs kleiner ist als die kritische Frequenz des Nyquist-Shanon-Theorems, die mindestens das Zweifache der Signalfrequenz beträgt. In der Regel werden jedoch deutlich höhere Abtastraten verwendet, insbesondere wenn man Signalformen rekonstruieren möchte, wie es im vorliegenden Fall beabsichtigt wird. Typischerweise wird die Unterabtastung für periodische Signale verwendet. In Abbildung 17 wird hierzu als ein Beispiel ein sinusförmiger Verlauf erfasst, dessen Amplitude gleich der des Eingangssignals ist, aber mit deutlich unterschiedlichen Frequenzen [16, 17].

Die Wahl einer Abtastfrequenz für den ADC steht in direktem Zusammenhang mit der Abtastrate des Originalsignals [18]. Außerdem ist es stets erwünscht, so viele Messpunkte wie möglich zu erhalten, um das Signal korrekt zu rekonstruieren. In diesem Fall würde das rekonstruierte unterabgetastete Signal dem Ausgangssignal entsprechen. Bei Kommunikationssignalen wie dem MLT-3, bei denen die Information kodiert ist, wird ein Undersampling Ansatz jedoch zu einem weiteren zufälligen Signal führen, wie es in Abbildung 18 dargestellt ist. Dieses Signal besitzt die entsprechende Charakteristik mit 25% -1 Signalen, 25% +1 Signalen und 2 Mal 25% dem Zustand 0 Signale. Um nun eine nutzbare Information zu erzielen, ist ein weiterer Verarbeitungsschritt erforderlich.

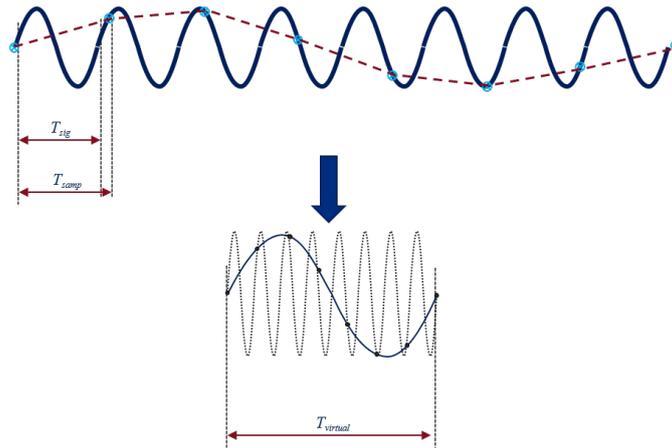


Abbildung 17: Beispiel einer unterabtasteten Sinuswelle [18]

In Rahmen dieses Projektes wurden nun 3 verschiedene Ansätze zur Impulsantwortrekonstruktion diskutiert

- Sortierung der Absolutwerte
- Neuabtastung
- Histogramm Methode

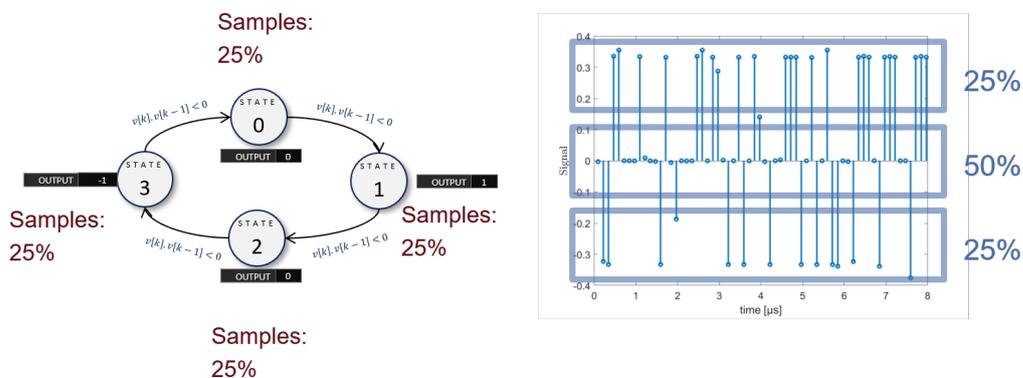


Abbildung 18: MLT3 Signal-Amplitudenverteilung

5.5.2. Wiederherstellung der Sprungantwort durch Sortieren der Absoluten Werte der Amplituden des Signales

Durch die Sortierung der vorzeichenlosen Absolutwerte des abgetasteten Signals stellt sich ein charakteristisches Bild ein, das eine qualitative Information zur Impulsform

beinhaltet. Gehen wir von einem nahezu idealen Impulsmuster (MLT-3) aus, so würde sich ein charakteristisches Bild mit zwei Plateaus +1 und 0 einstellen. Das +1 Plateau beschreibt die Amplitudenwerte der -1 und +1 Zustände und das 0 Plateau das Rauschen im Kommunikationssignal, wie es in Abbildung 19 dargestellt ist. Die Übergangszeit, also die Samples zwischen dem +1 und 0 Plateau beschreiben die Fehlerfälle oder Störungen, die sich auf dem physikalischen Layer direkt auf die Impulsform des Kommunikationssignals auswirken [18].

Ein Nachteil dieses Verfahrens resultiert aus der Absolutwertbildung. Es besteht keine Möglichkeit, zwischen dem -1 und dem +1 Zustand zu unterscheiden. Damit ist es nicht möglich, zum Beispiel Offset-Fehler, zum Beispiel durch eine Kabelaufladung, zu identifizieren. Ein weiterer Nachteil dieses Lösungsansatzes besteht in der Darstellung der Zustandsübergänge, die letztendlich mit einer Sigmoidfunktion vergleichbar sind und sich somit von einer normalen Impulsantwort unterscheiden. Außerdem besteht eine hohe Rauschempfindlichkeit.

Abbildung 19 illustriert die Simulationsergebnisse eines resistiven Fehlers. Dieser ist durch eine starke Dämpfung gekennzeichnet, also kleine Amplitudenwerte, bei einer gleichzeitig moderaten Übergangszeit.

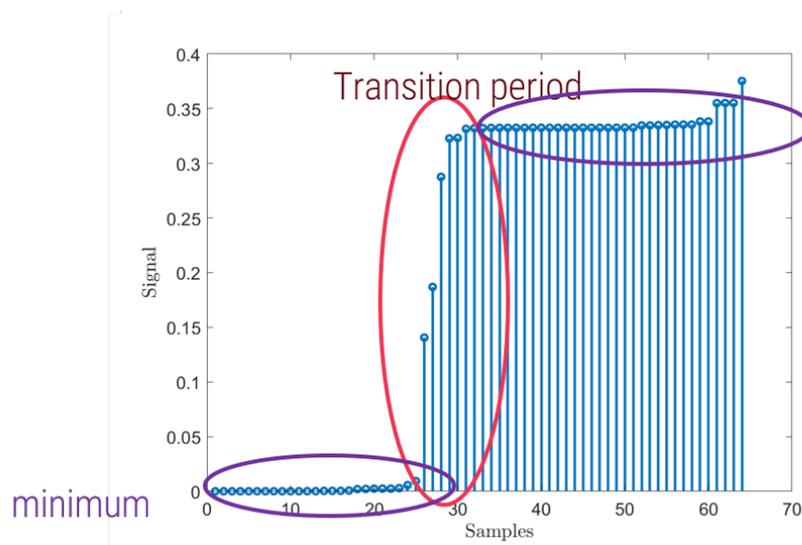


Abbildung 19: Sortieren der Absolutwertmethode angewendet auf einem Kabel mit Resistivem Fehler

5.5.3. Wiederherstellung der Impulsantwort durch Resampling (Neuabtastung)

Wenn die Amplitudenwerte der Spannungen mit den entsprechenden Zeitstempeln gespeichert werden können - dies ist möglich durch die Verwendung einer festen Abtastrate (wie im Projekt), oder durch die Speicherung des Zeitwerts - ergibt sich die Möglichkeit, das Signal im Zeitbereich neu abzutasten. Im vorliegenden Fall ist zu erwarten, dass die

Varianz der Zustandsübergänge in einem Zeitfenster zwischen 0 und 8ns liegt. Damit wird durch das Resampling des Zeitwerts in einem Zeitfenster durch Modulo eine Rekonstruktion des Signals möglich. Ein Beispiel für eine mögliche Ausgabe ist in Abbildung 20 dargestellt.

Auf Basis dieses Algorithmus ist es möglich, die Zustandsübergänge visuell darzustellen. Es ist weiterhin möglich, die unterschiedlichen Spannungsniveaus der drei logischen Zustände (+1,-1,0), sowie die Übergangszeit zu unterscheiden. Daher ist diese Methode in der Lage alle möglichen Fehlerfälle zu erkennen. In Abbildung 20 ist beispielhaft ein kapazitiver Fehler mit einer etwas verzögerten Zustandsübergangszeit dargestellt. Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass keine direkt maschinenlesbaren Merkmale zur Verfügung stehen, da die Grafik nur eine unsortierte Punktwolke darstellt.

Ein weiterer Nachteil ergibt sich in der Startphase einer Überwachung, die zunächst unvorhersehbar ist, da es keine Informationen über die Anfangszeit der Kommunikation und der Phase des ursprünglichen Signals gibt. Diese Probleme sind durch mögliche Sortier- und Kontrolltheorie-Algorithmen lösbar. Dennoch stellt sich die Frage nach der Implementierbarkeit aufgrund sehr ressourcenaufwendiger Algorithmen, insbesondere bei echtzeitfähigem Betrieb.

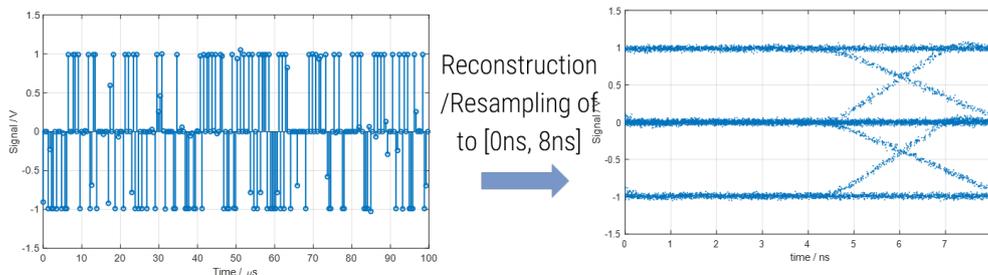


Abbildung 20: Resamplingmethode (Wiederabtastung) angewendet auf einem Kabel mit kapazitivem Fehler

5.5.4. Histogramm

Die Histogrammmethode bietet einen statistischen Ansatz für den Signalstatus. Idealerweise sollten die Amplitudenwerte der Spannungsebenen 0, 1 und -1 jeweils im Bereich von 50%, 25% und 25% liegen. In der Praxis wird sich ein vergleichbares Verhalten zeigen, obwohl Rauschen und Übergangszeiten in das Histogramm mit eingearbeitet sind. Bei einem intakten Kabel wird erwartet, dass in dem Histogramm die Anzahl der Ereignisse vom Zustand 0 doppelt so groß ist wie die Anzahl der Zustände 1 und -1, was zu einer symmetrischen Verteilung der Werte führt. Der rein resistive Fehler ist in den Amplitudenwerten sichtbar, die typischerweise zwischen +1V und -1V liegen sollten. Die Übergangszeit, also die kapazitiv-induktiven Einflüsse, erzeugen einen abklingenden Exponentialwert um die Amplitudenwerte, die aufgrund des Rauschens mit dem Gauß Profil summiert werden. Diese Methode bietet eine maschinenlesbare, rechnerisch

einfache Methode, um die Qualität des Kommunikationspfads ausschließlich auf Basis des Signals zu bewerten. Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch in der Möglichkeit, eine Aussage über den Fehlertyp zu generieren sowie Rückwirkungen durch die Messanordnung identifizieren. Ein Beispiel für die Histogramm-Methode, angewendet mit einem kleinen kapazitiven Fehler, ist in Abbildung 21 dargestellt.

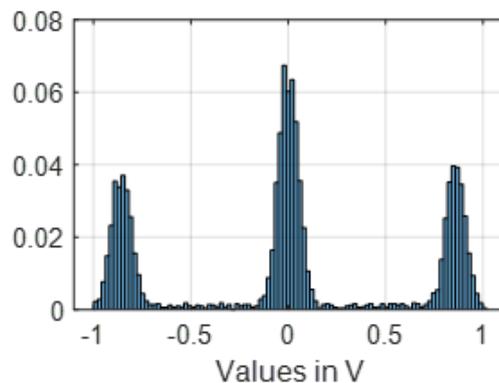


Abbildung 21: Histogrammmethode angewendet auf einem Kabel mit kapazitivem Fehler

5.6. Simulationsergebnisse

Im nachfolgenden Abschnitt werden die aus dem vorherigen Abschnitt diskutierten Methoden hinsichtlich ihrer Sensitivität zur Fehlererkennung simuliert. Alle drei Fälle wurden mit einem intakten Aufbau, einem leichten oder auch weichen Fehler sowie einem schweren weichen Fehler simuliert und hinsichtlich der Fehlerarten verglichen.

5.6.1. Resistiver Fehler

Der resistive Fehler ist typischerweise auf eine Impedanzänderung des Innenleiters zurückzuführen und führt zu einer Amplitudenabnahme der logischen Spannungspegel +1 und -1. Wenn der Amplitudenpegel auf einen Wert kleiner als ein zulässiger Mindestpegel sinkt, dann geht das Signal und damit die Information verloren. Für die Erkennung dieses Fehlerfalls eignen sich die drei Methoden in gleicher Weise. Im Fall der Impulsantwortrekonstruktion wird das Plateau der Absolutwerte im Betrag gedämpft, wenn der Widerstand zunimmt. Ein ähnliches Verhalten würde sich auch bei dem neu abgetasteten und rekonstruierten Signal einstellen. Im Falle der Histogramm-Methode würde die Widerstandserhöhung hauptsächlich zu einer Verschiebung auf der x-Achse führen. Entsprechende Verläufe sind für die drei Methoden in Abbildung 22 gegenübergestellt.

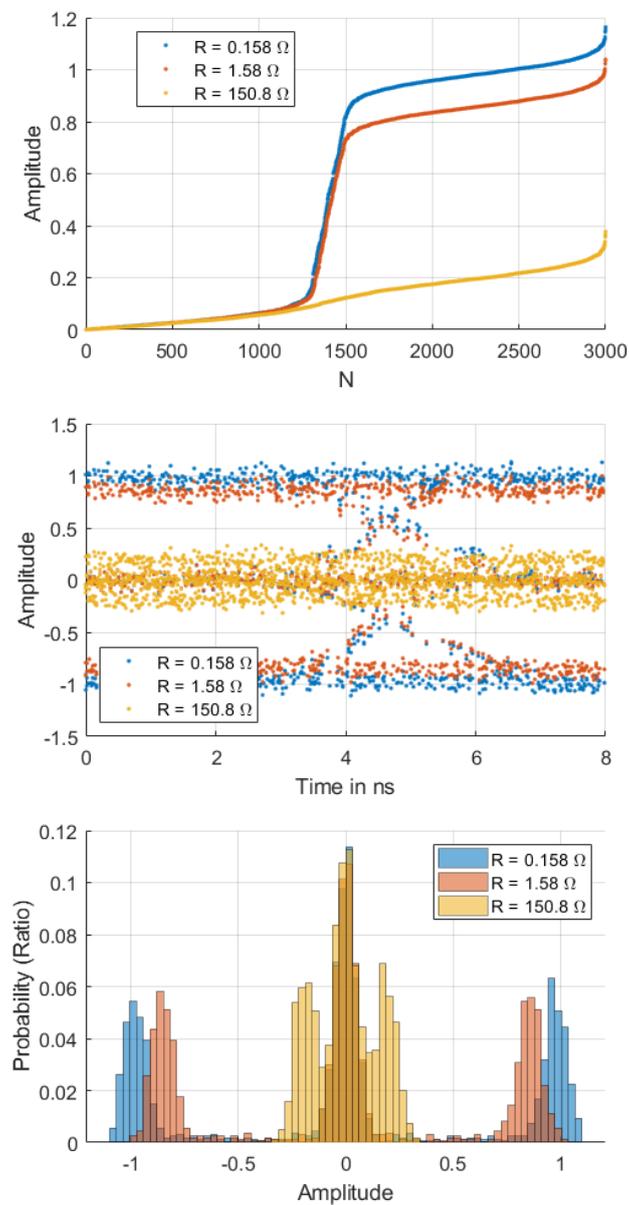


Abbildung 22: Simulation eines fehlerhaften Kabels mit resistivem Fehler auf sortierten Absolutwert (oben), Resampling-Methode (Mitte) und Histogramm (unten), mit ideal, leichtem Fehler in 3 verschiedenen Szenarien: keiner, leichter und schwerer resistiver Fehler

5.6.2. Kapazitive-Induktiver Fehler

Der kapazitiv-induktive Fehler, hauptsächlich verursacht durch den kapazitiven Teil des Kabels, beeinflusst im Wesentlichen die Zeitdauer der Zustandsübergänge. Steigt die Zeit über 4 ns, so wird die Rekonstruktion des Signals nicht mehr ohne Informationsverlust erfolgen. Bei dem Verfahren der Impuls-Rekonstruktion wird die Änderung der Übertragungszeit durch die Sortierung der Absolutwerte sichtbar, in dem der Übergangsbereich abflacht und zu einer geringeren Stabilität des Signals führt. Auch bei der Resampling-Methode wird die Verlängerung der Übergangszeit direkt im Schaubild sichtbar. Bei der Histogramm-Methode bilden sich zwischen den Bereichen +1, 0 und -1 mehrere neue Zonen, was auf die Breite der Übertragungsperiode zurückzuführen ist. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 23 gegenübergestellt.

5.6.3. Reflexion

Wenn die Impedanz des Kabels und des Endgerätes nicht übereinstimmen, kommt es an den Übergängen zu Reflexionen, die den Kommunikationspfad stören. Die Information könnte dadurch verfälscht werden, wenn der Reflexionskoeffizient eine kritische Höhe erreicht. Visuell könnte die Reflexion als eine Kombination aus resistivem und kapazitiv-induktivem Fehler klassifiziert werden. Abbildung 24 zeigt hierzu das neu abgetastete Signal, was aufgrund der Kollision zu einem Verlust der charakteristischen Wellenform führt. Bei der Rekonstruktion der Impulsantwort erstreckt sich die Übergangszeit im Grenzfall auf das gesamte Signal. Bei der Histogramm-Methode stellen sich wiederum zusätzliche Regionen zwischen den Zuständen -1, 0 und +1 ein und haben eine höhere Häufigkeit als das eigentliche Signal selbst.

5.6.4. Diskussion

Unter den verglichenen Methoden erscheint die Resampling Methode aus Sicht der Fehlererkennung am besten geeignet, da diese alle Fehlertypen insbesondere weiche Fehler erkennen konnte. Dieses Verfahren hat aber den großen Nachteil, keine maschinenlesbaren Merkmale zu liefern. Ein nachgeschalteter Bilderkennungsalgorithmus wäre zwar denkbar, erhöht dabei zusätzlich die Komplexität des Algorithmus und den ohnehin schon hohen Ressourcenbedarf. Aus Gründen der Praxistauglichkeit und der Echtzeitfähigkeit sowie der Kompatibilität mit kostengünstigen Mikrocontrollern erweist sich die Histogramm-Methode für das Vorhaben als der beste Algorithmus. Dieser hat das Potential alle Fehlertypen nur durch die Überwachung der Amplitudenniveaus zu bestimmen. Die Implementierung erfordert einen Algorithmus zur linearen Klassensortierung, der auch unter Berücksichtigung der Echtzeitfähigkeit auf einem Mikrocontroller implementiert werden kann. Daher wurde dieser Algorithmus für die weitere Verwendung im Vorhaben ausgewählt. Für die noch bestehenden Defizite bei der Identifizierung von Reflexionen kommt es zu einer Modifikation, die im nächsten Kapitel näher erläutert wird.

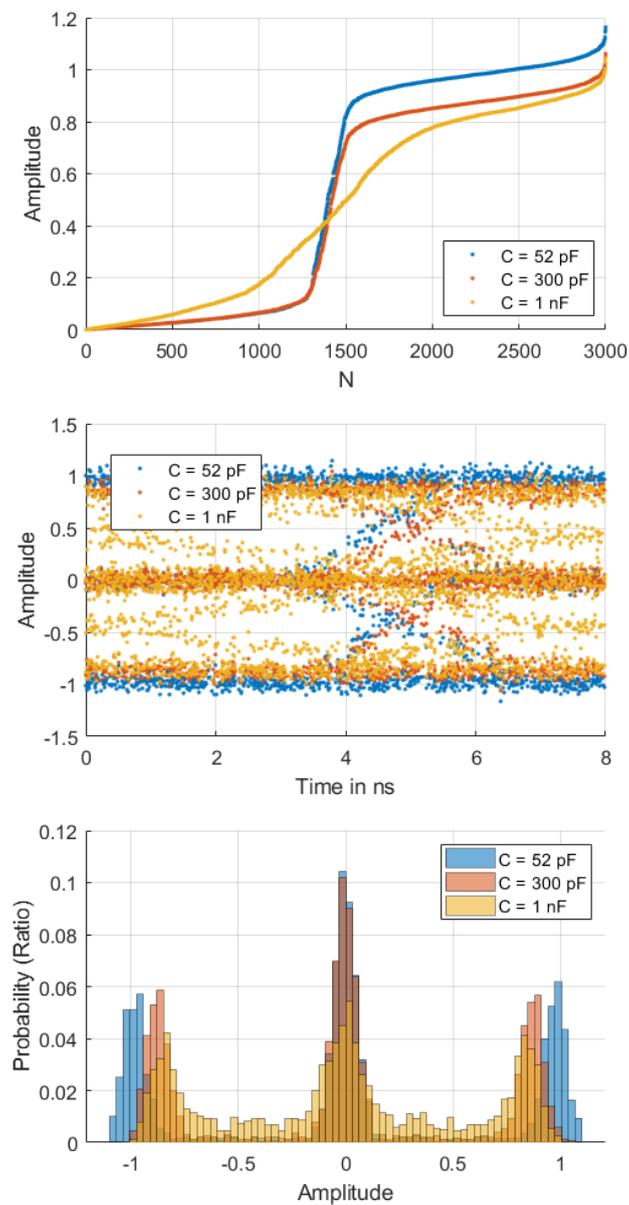


Abbildung 23: Simulation eines fehlerhaften Kabels mit kapazitivem/induktivem Fehler auf sortierten Absolutwert (oben), Resampling-Methode (Mitte) und Histogramm (unten) in 3 verschiedenen Szenarien: keiner, leichter und schwerer kapazitiver Fehler

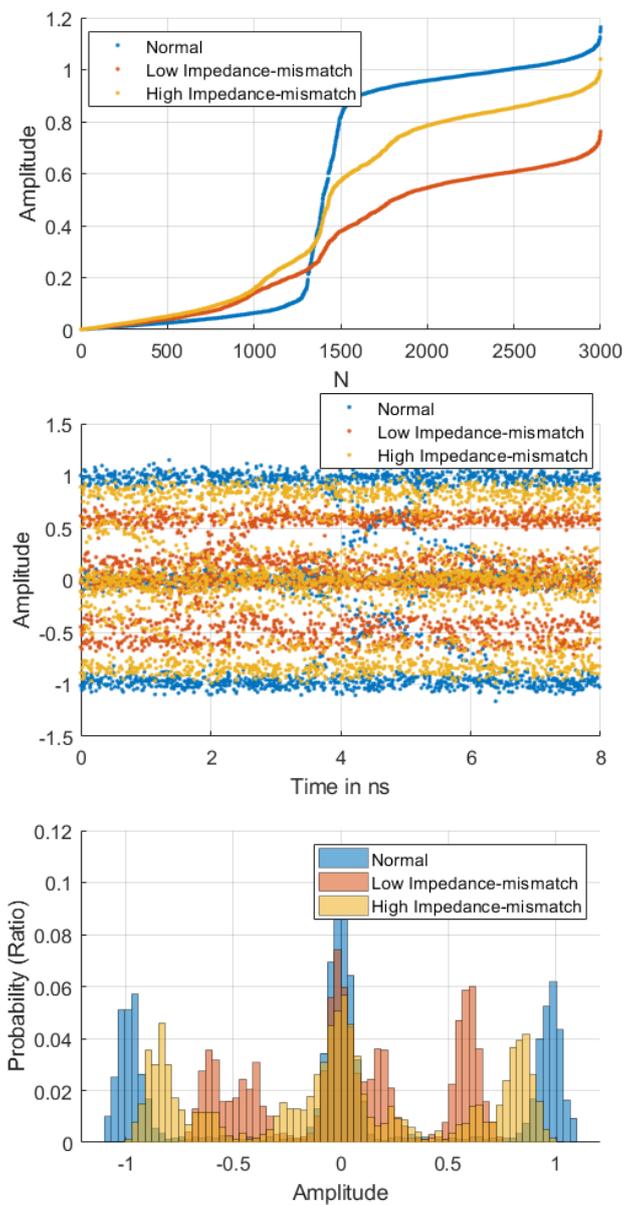


Abbildung 24: Simulation eines fehlerhaften Kabels mit Reflexion auf sortierten Absolutwert (oben), Resampling-Methode (Mitte) und Histogramm (unten) in 3 verschiedenen Szenarien: keiner, leichter und schwerer Fehler

6. Umsetzung der Leitungsüberwachung

Für die Umsetzung der Leitungsüberwachung sind mehrere Komponenten notwendig. Nachfolgend werden das Konzept, die Komponenten und die Umsetzung der Leitungsüberwachung erläutert.

6.1. Konzept und Systemdesign

In Abbildung 25 ist das Konzept der der Kosibus Elektronik dargestellt.

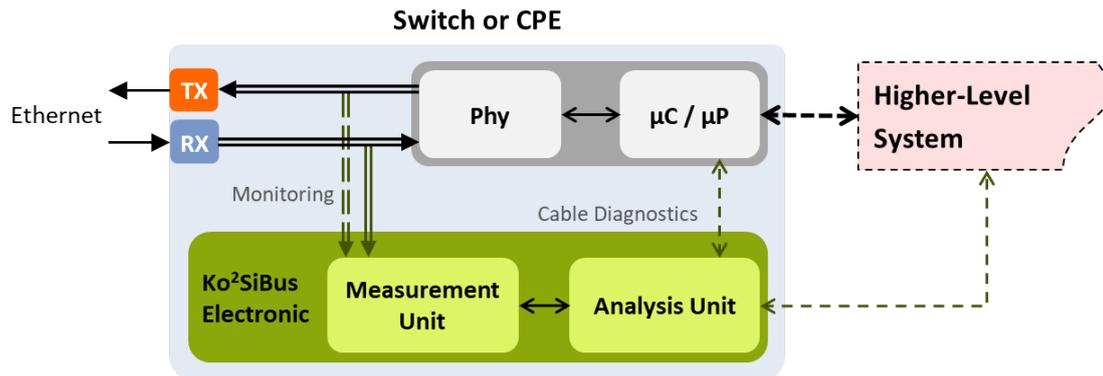


Abbildung 25: Konzept der Kosibus Elektronik

Das zu analysierende Ethernet-Signal wird in dem Endgerät oder Switch auf der Leitung abgegriffen. Dazu wird eine analoge Elektronik (Messeinheit) benötigt, mit der das Signal möglichst verlustfrei abgegriffen und verstärkt werden kann. Mittels einer nachfolgenden Analyseeinheit erfolgt die Weiterverarbeitung und Berechnung der Qualitätsparameter. Das übergeordnete System kann dann über eine Standard Schnittstelle wie SPI auf die berechneten Parameter zugreifen.

6.2. Methoden zur Leitungsüberwachung

Im Folgenden werden unterschiedliche Methoden zur Analyse der Ethernet-Signale vorgestellt.

6.2.1. Spitzenwertdetektor

Mit einem Spitzenwertdetektor kann der maximale Wert eines zeitlich veränderlichen Signals bestimmt werden. Wird die Detektorschaltung ausreichend schnell ausgelegt, so dass dem Ethernet-Signal gefolgt werden kann, erhält man als Ergebnis den Verlauf der Amplitude des Signals.

Die Herausforderung beim Entwurf einer solchen Schaltung besteht in der hohen Frequenz (125 MHz) des zu untersuchenden Signals und daraus benötigten schnellen

Operationsverstärker und Dioden. Dazu wurden mehrere Schaltungsvarianten simuliert und miteinander verglichen.

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse einer Schaltung mit dem Operationsverstärker LMH6628 mit einer schnellen Schalt-Diode dargestellt. Der Operationsverstärker verfügt über eine Transitfrequenz von 300MHz.

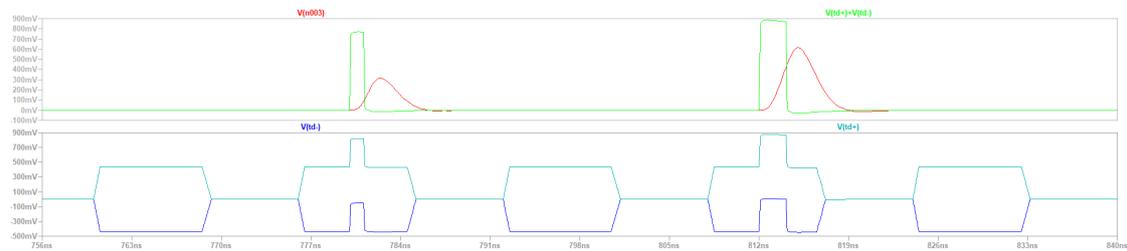


Abbildung 26: Simulationsergebnisse einer Spitzenwertdetektorschaltung

In dem unteren Diagramm sind die zwei differentiellen Ethernet-Signale dargestellt. Beide Signale wurden zu zwei Zeitpunkten mit einem Störimpuls beaufschlagt. Im oberen Diagramm ist die Differenz der beiden Ethernet-Signale grün dargestellt. Der rote Signalverlauf zeigt den Ausgang der Spitzenwertdetektorschaltung.

Die Simulation zeigt, dass mit Bauelementen mit entsprechend hohen Übertragungsbreiten eine Spitzenwertdetektorschaltung für Ethernet-Signale aufgebaut werden kann. Bei einer Realisierung auf einer Leiterplatte würden die negativen (kapazitiven und induktiven) Einflüsse der Leiterbahnen die Übertragungsfrequenz der Schaltung noch verringert werden.

6.2.2. Auswertung der Signalstatistik

Ein weiterer Ansatz aus der Signalform auf die Kabelqualität zu schließen, beruht darauf, die Verteilung der Ethernet-Signale statistisch auszuwerten.

Treten Veränderungen an einem Ethernet-Kabel, z.B. durch Beschädigungen an der Isolation auf, führt dies zu einer Veränderung der primären Kabelkenngrößen (R , L , C , G). Damit tritt eine Veränderung der Übertragungseigenschaften, wie z.B. Verringerung der Bandbreite, auf. Dies führt unweigerlich zu einer Veränderung der Häufigkeitsverteilung der übertragenen Signale. Somit lassen sich durch die Ermittlung und Auswertung der Häufigkeitsverteilung der übertragenen Symbole, bzw. Spannungspegel, Aussagen über auftretende Veränderungen am Kabel treffen und Warnung ausgeben bevor die Verbindung unterbrochen wird.

Ein zufällig durchmischter (scrambled) 100 Base-TX Ethernet-Datenstrom hat im Mittel eine Verteilung von 25% -1V, 50% 0V und 25% 1V Signalen. In Abb. 27 ist der zeitliche Verlauf und die Verteilung der Werte für eine ideale MLT3-Signalfolge dargestellt.

Im Standard ISO/IEC 11801 sind die Kategorien (cat) von paarweise verdrehten Kabeln

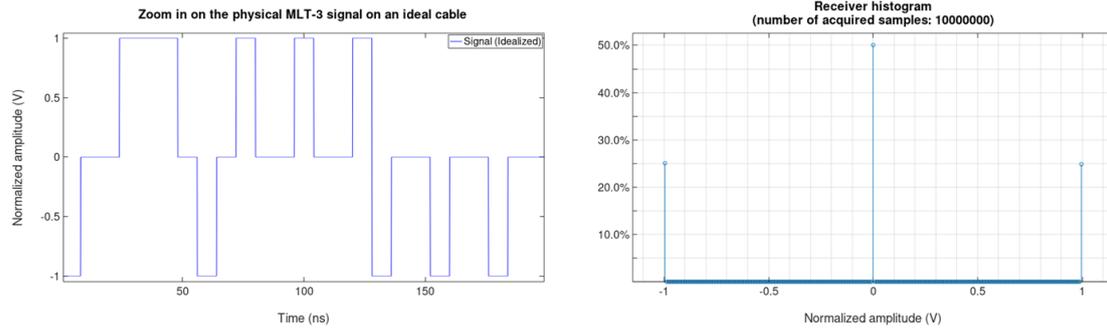


Abbildung 27: Beispiel für ein ideales MLT 3-Signal

definiert. Die einzelnen Kategorien spezifizieren bestimmte Übertragungseigenschaften der Datenkabel, wie z.B. die Impedanz, die Bandbreite und die Dämpfung, die sich aus den primären Leitungsparametern ergeben. Die charakteristische Impedanz im 100BASE-TX Standard ist für alle Kabel auf $100\ \Omega$ festgelegt. Kabel nach Kategorie cat5, bzw. cat5e müssen eine Übertragungsbandbreite von 100 MHz, Kabel nach Kategorie cat6 250 MHz und cat 7 600 MHz aufweisen.

Wird ein der Bandbreite eines cat 5 Kabel entsprechender Tiefpass (100 MHz) hinzugefügt, ergibt sich der Abb.28 in dargestellte Signalverlauf und die dazugehörige Verteilung. Im linken Diagramm ist das ideale MLT3 Signal blau und das gefilterte Signal grün dargestellt.

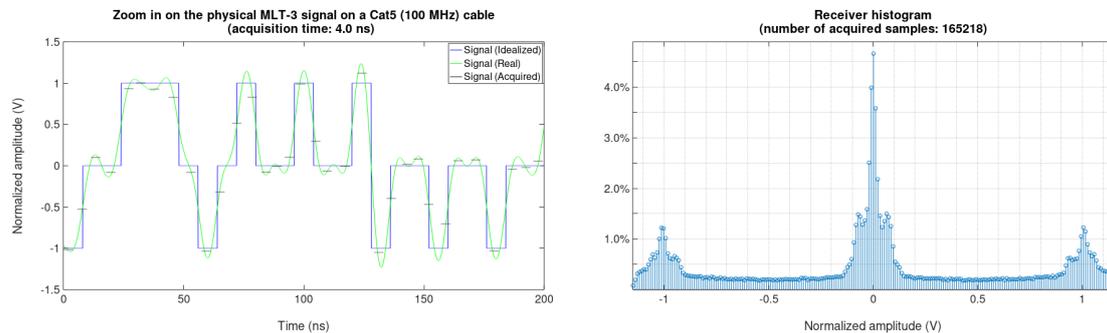


Abbildung 28: MLT 3 Signalübertragung auf einem cat 5 Kabel

Durch die zufälligen Abtastzeitpunkte (kurz waagerechte Striche) werden auch Spannungspegel aufgenommen, die zwischen den MLT 3-Pegeln liegen. Dadurch ergibt sich eine Verteilung der Werte in dem Histogramm. Die Häufungen von Spannungswerten lassen sich aber noch eindeutig den drei Pegeln zuordnen.

Tritt nun eine Veränderung an dem Kabel auf, vergrößert sich die Induktivität oder Kapazität der Übertragungsstrecke. Die resultiert in einer verringerten Übertragungsbandbreite. In Abb. 29 sind die Ergebnisse der Simulation mit einer Bandbreite von 80 MHz (rot) dargestellt. Zum Vergleich sind die idealen (blau) und realen Signale (blau) abgebildet.

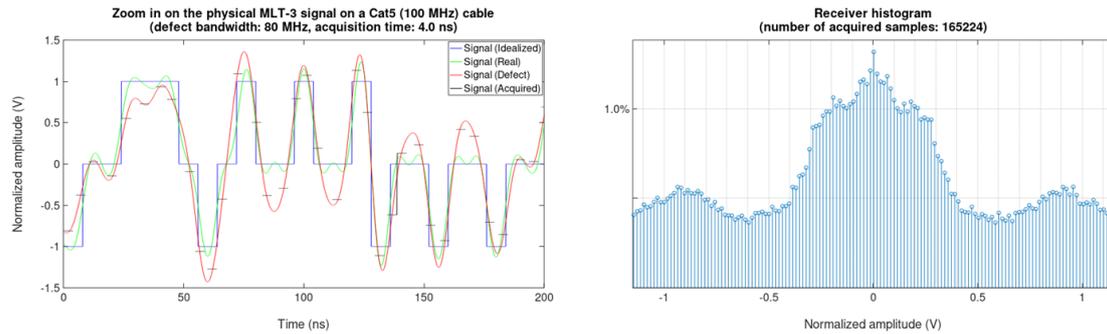


Abbildung 29: MLT 3 Signalübertragung mit verringerter Bandbreite

Im Histogramm rechts ist deutlich der Unterschied zu der Verteilung in Abbildung 28 zu erkennen. Bei den drei Signalpegeln treten zwar noch gehäuft Werte auf, die Verteilung ist aber wesentlich breiter gestreut.

Die Simulationen zeigen, dass sich Veränderungen an den Übertragungseigenschaften eines Ethernet-Kabels durch die Auswertung der Signalstatistik auswerten lassen.

6.2.3. Fazit

Mit den Simulationen der zwei vorgestellten Methoden zur Leitungsanalyse wurde die Realisierbarkeit untersucht. Mit der ersten Methode, dem Spitzenwertdetektor, kann aber nur dem Verlauf der Amplitude gefolgt oder Störimpulse detektiert werden. Mit der zweiten Methode, der Analyse der Signalstatistik kann durch den Einfluss auf die Übertragungsbandbreite auf die Kabelparameter geschlossen werden. Da sich Veränderungen am Kabel, wie z.B. durch Beschädigung der Isolation, primär auf die Kapazität und Induktivität des Kabels auswirken, wurde sich im Projektkonsortium auf die Umsetzung der zweiten Methode verständigt.

6.3. Messeinheit

Mit der Messeinheit werden die Ethernet Signale möglichst verlustfrei abgegriffen, gewandelt und anschließend an die Analyseeinheit zur weiteren Verarbeitung weitergeleitet.

6.3.1. Schaltungsvarianten

Folgende Schaltungsvarianten können für die Umsetzung genutzt werden.

FPGA und ADC

Das Ethernet-Nutzsignal hat eine Frequenz von 125 MHz. Soll das Signal vollständig erfasst werden, ist eine Abtastfrequenz von min. 250 MSPS nötig, was wiederum den Einsatz kostenintensiver Hardwarekomponenten (ADC, FPGA) erforderlich macht. Für

einen Analog-Digital-Wandler mit einer entsprechend hohen Abtastrate von 250 MSPS, wie der ADS4229 vom Hersteller Texas Instruments, betragen die Kosten ca. 50€. Zur Auswertung der Signale wird ein FPGA benötigt, diese sind ab ca. 30€ erhältlich. Somit ist diese Variante mit Kosten von 100€ deutlich zu teuer für eine Umsetzung in Endgeräten.

Mikrocontroller mit schnellem ADC

Eine weitere Möglichkeit, die Verteilung der übertragenen Symbole zu erfassen, besteht in der Unterabtastung des Nutzsignals. Am Markt sind Mikrocontroller mit integrierten schnellen ADCs verfügbar. Der Mikrocontroller LPC4370 vom Hersteller NXP hat beispielsweise einen 80 MSPS AD-Wandler integriert. Damit kann das 125 MHz Ethernet Signal nicht mehr komplett abgetastet werden. Durch den im Ethernet-Phy enthaltenen Scrambler wird das Signal pseudozufällig übertragen. Das bedeutet, die Verteilungst Statistik kann auch erfasst werden, wenn zu zufälligen Abtastzeitpunkten Werte ermittelt werden. Hier ist darauf zu achten, dass die Abtastfrequenz kein ganzzahliger Teiler der Nutzfrequenz ist. Der ADC im LPC4370 besitzt eine ausreichend schnelle Sample & Hold Stufe, um die Signale erfassen zu können. Bei dieser Variante würden Kosten von ca. 10€ für den Mikrocontroller anfallen.

Standard-Mikrocontroller

Standard Mikrocontroller mit Cortex-M Rechenkernen unterschiedlicher Hersteller sind zu geringen Stückkosten (ab ca. 2€) verfügbar. Sie beinhalten typischerweise Analog-Digital-Wandler im kHz-Bereich, maximal bis 1 MSPS. Diese integrierten AD-Wandler haben eine zu hohe Integrationszeit. Das Signal würde durch den Tiefpass, den die Eingangskapazität und der Innenwiderstand bilden, gefiltert, d.h. gemittelt werden. Eine Auswertung der Verteilung wäre somit nicht mehr möglich. Durch die Nutzung eines externen Sample & Hold-Schaltkreises können auch diese günstigen Controller für die Signalerfassung und Auswertung verwendet werden.

6.3.2. Schaltungsentwurf

Aus den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Varianten wurde die dritte, d.h. der Standard Mikrocontroller mit externem Sample & Hold-Glied, für die Umsetzung ausgewählt. Diese Variante ist die kostengünstigste der vorgestellten Varianten. Weiterhin flexibel einsetzbar, kann z.B. die Messeinheit an bestehenden Komponenten mit integrierten ADC angebunden werden.

In Abbildung 30 ist der Aufbau der Messeinheit dargestellt.

Die Signale wurden mittels eines Übertragers ausgekoppelt, galvanisch getrennt und anschließend mit einem Operationsverstärker an den neuen Arbeitspunkt angepasst.

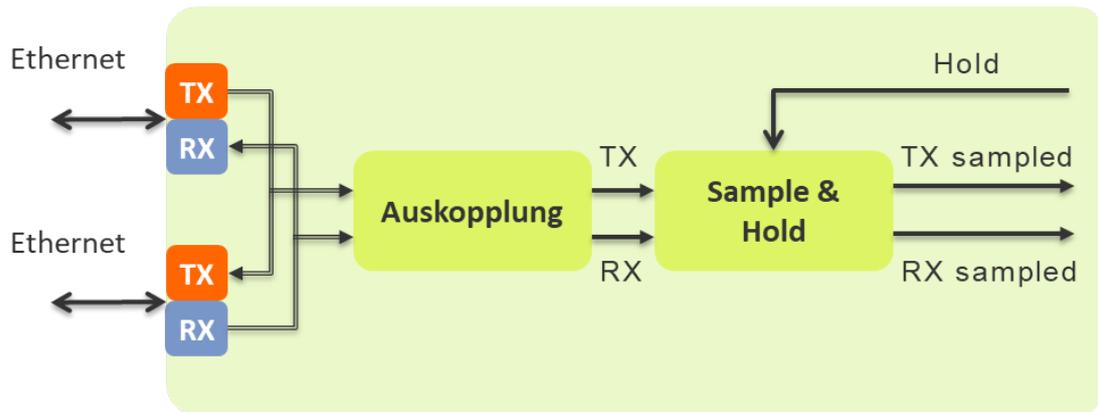


Abbildung 30: Aufbau der Messeinheit

Für die Unterabtastung des Signals wurde ein OPA615ID Sample & Hold Schaltkreis vom Hersteller Texas Instruments eingesetzt. Dieser verfügt über eine hohe Bandbreite von 730 MHz und hohe Slew-Rate (Anstiegszeit).

Mittels des Eingangs „Hold Control“ kann die Abtastung des Signals von der Analyse-einheit aus gesteuert werden. Die ausgekoppelten und verstärkten Ethernet Signale werden mit dem Eingang S/H In+ verbunden. Der Schaltplan der Messeinheit ist im Abbildung 32 aufgeführt.

6.3.3. Layout und Fertigung der Messeinheit

Nach Erstellung des Schaltplanes wurde die erstellte Schaltung in einem Leiterplattenentwurf umgesetzt. Anschließend wurde die gefertigte Platine bestückt und in Betrieb genommen.

In Abb.33 sind das erstellte Platinen Layout und die gefertigte und bestückte Platine dargestellt.

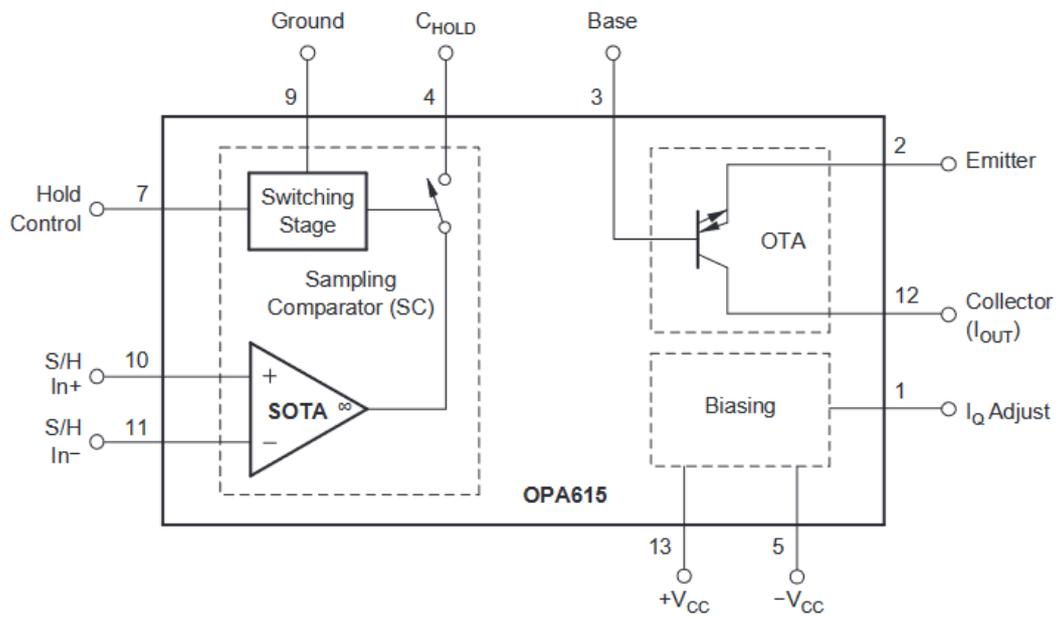


Abbildung 31: Aufbau des Sample & Hold Schaltkreises

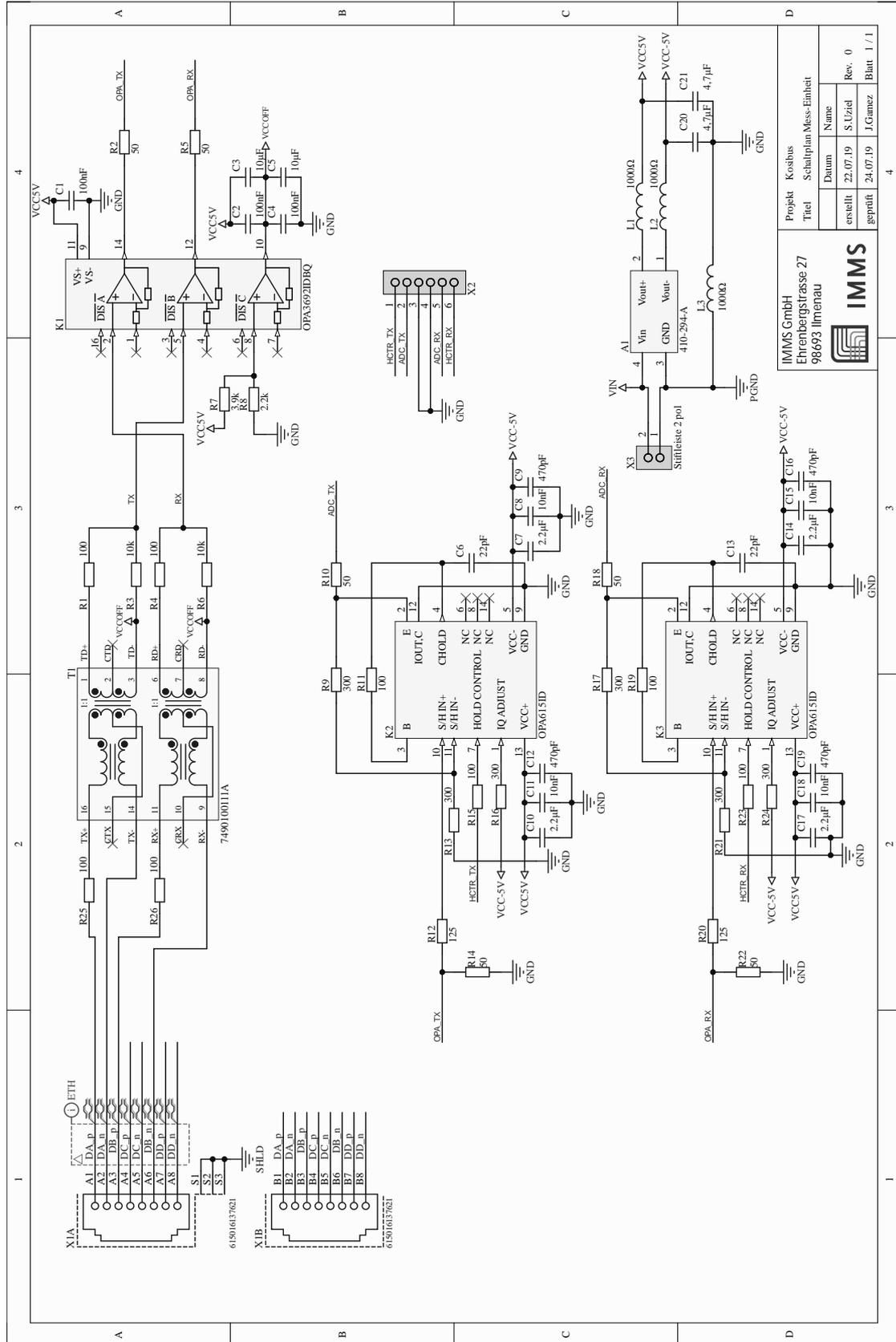


Abbildung 32: Schaltplan der Messeinheit

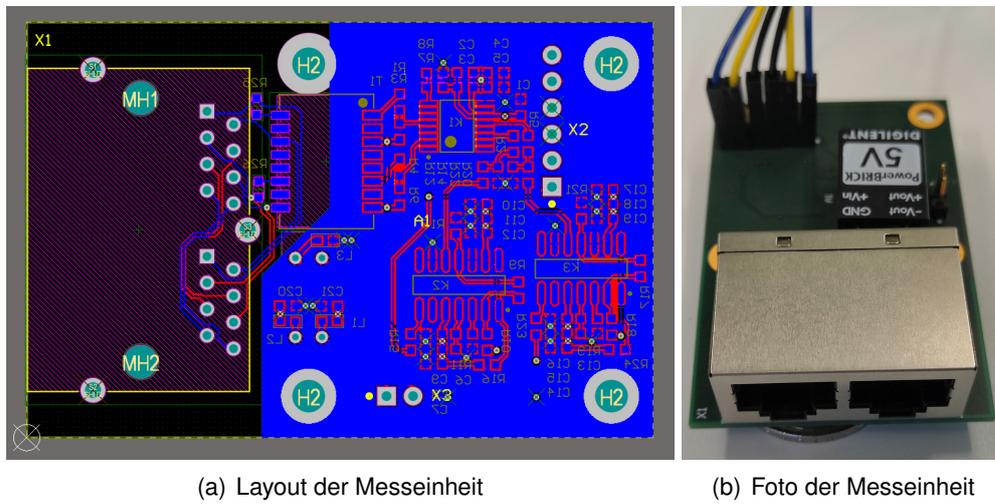


Abbildung 33: Messeinheit

6.4. Analyseeinheit

Für die Umsetzung der Analyseeinheit wurde ein Evaluierungsboard NRF52840-DK der Firma Nordic Semiconductor genutzt. Mit der Analyseeinheit werden die abgetasteten Ethernet-Signale erfasst und weiterverarbeitet, um eine statistische Verteilung der übertragenen Symbole zu berechnen.

6.4.1. Signalerfassung

In diesem Schritt erfolgt die Synchronisierung des externen Sample & Hold Schaltkreises mit dem internen Analog-Digital-Wandler, um die unterabgetasteten Werte zu erfassen. Ein interner Timer wird verwendet, um das Steuersignal für die Sample & Hold-Schaltung zu erzeugen und gleichzeitig den ADC zu aktivieren. Bei der derzeitigen Implementierung werden 1000 Abtastwerte für jede Leitung (TX und RX) erfasst. Der ADC erfasst alle 15 μ s - abwechselnd zwischen beiden Leitungen - Werte. Die Abtastwerte werden im internen Speicher des Mikrocontrollers für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte gespeichert.

6.4.2. Verteilung der Werte

Da die Erfassung der Werte zufällig erfolgt, werden im nächsten Schritt die erfassten Daten nach ihrem Wert in 32 Bereiche sortiert. diese Verteilung der Symbole kann als Histogramm mit 32 Stützstellen visualisiert werden.

6.4.3. Symbol Identifikation

Die zuvor generierte Verteilung wird weiterverarbeitet, um die Position und die Häufigkeit der MLT-3-Symbole (+, - und 0) zu identifizieren. Der Algorithmus wurde entwickelt, um Offset und/oder Asymmetrie des abgetasteten Signals herauszurechnen.

Der erste Schritt besteht darin, die Position des 0-Symbols zu identifizieren, indem ein gewichteter Mittelwert berechnet und danach die Verteilung in der Umgebung untersucht wird. Dann werden die lokalen Maxima links und von rechts des 0-Symbols gesucht, um die Position der Symbole + und - zu ermitteln. Um die Punkte zu identifizieren, werden die Werte jeweils zwei aufeinanderfolgenden Stellen für den Vergleich verwendet. Auf diese Weise kann der Fall berücksichtigt werden, dass der Wert eines Symbols genau in der Mitte zweier Bereiche liegt.

6.4.4. Berechnung der Qualitätsparameter

Im letzten Schritt werden die Parameter berechnet, die die Qualität des Signals beschreiben. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

- Activity

Der Parameter Activity zeigt an, ob ein Signal vorhanden ist. Findet keine Kommunikation statt, z.B. wenn die Leitungen unterbrochen sind, liegen alle aufgenommenen Werte zusammen im Histogramm. Der Aktivitätsparameter wird berechnet, indem die Anzahl der Abtastwerte in der Maximalverteilung von der Gesamtzahl der Abtastwerte subtrahiert wird.

- Clarity

Der Parameter Clarity ist eine Schätzung, wie leicht die Symbole innerhalb der Verteilung zu finden sind. Er wird berechnet, indem die Häufigkeiten aller erkannten Symbole (+, - und 0) in der Verteilung addiert werden. Ein hoher Clarity-Wert zeigt scharfe Übergänge und stabile Werte des MLT-3-Signals an, während ein niedriger Clarity-Wert anzeigt, dass die Symbole verschwommen und schwer zu identifizieren sind.

- Asymmetry

Die Asymmetrie zeigt an, wie ausgewogen die Verteilung ist. In einer idealen Verteilung haben die Symbole + und - jeweils eine Häufigkeit von 25% und das Symbol 0 eine Häufigkeit von 50%. Die Asymmetrie wird berechnet, indem das Ungleichgewicht zwischen den Symbolen + und - und das Ungleichgewicht zwischen dem Symbol 0 und der Kombination der beiden anderen Symbole addiert wird.

- Amplitude

Die Amplitude gibt den Abstand zwischen den Symbolen + und - an. Dies ist nützlich, um eine eventuelle Dämpfung, die durch das Kabel verursacht wird, zu identifizieren.

6.5. Test und Messungen

6.5.1. Test der Messeinheit

Zunächst wurde die Funktion der Messeinheit verifiziert. Dazu wurde die Messeinheit in eine bestehende Ethernet-Kommunikation eingebunden und die Signale mit dem Oszilloskop aufgezeichnet.

In Abbildung 34 sind die Signale, Ethernet (gelb) und das abgetastete Signal (grün) dargestellt. Die einzelnen Pegel des MLT3-Signals sind im oberen Verlauf deutlich zu erkennen. Die Übertragungsbandbreite des verwendeten Sample & Hold Glieds ist ausreichend hoch, es treten keine Verzerrungen im Signal auf, der Verlauf des grünen Signals nach dem Sample & Hold Glied entspricht dem des gelben Original-Signals.

In der Abbildung 35 sind mehrere Abtastzeitpunkte dargestellt.

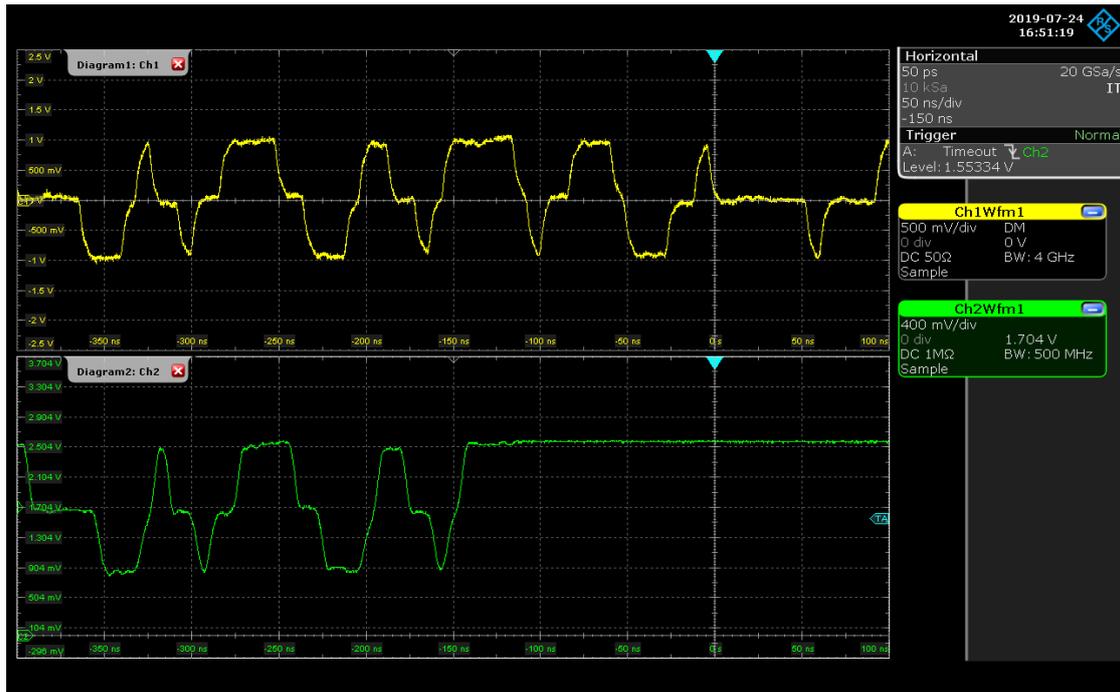


Abbildung 34: Signal vor (gelb) und nach (grün) Sample & Hold Stufe

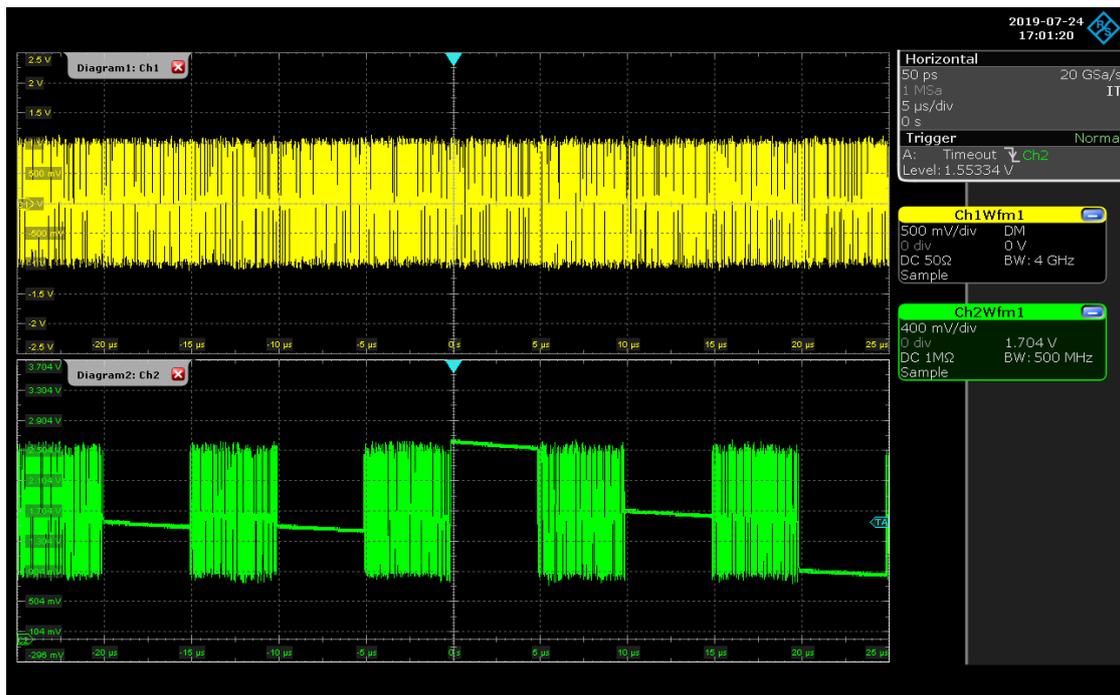


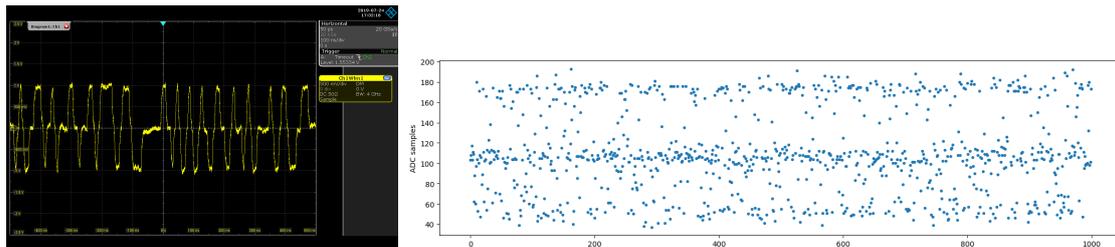
Abbildung 35: Signalfolge vor (gelb) und nach (grün) Sample & Hold Stufe

6.5.2. Test der Mess- und Analyse Einheit

Für den Test und die Messungen wurde ein Aufbau aus Mess- und Analyseeinheit verwendet, welcher im Kapitel 8.1 näher beschrieben ist. Die berechneten Werte wurden von der Analyseeinheit per UART an einen PC übertragen und dort visualisiert.

Test mit Standard Cat 5-Kabel

In diesem Test wurden die Signale einer Übertragung über ein intaktes Cat 5-Kabel aufgezeichnet und ausgewertet.



(a) Ethernet Signale

(b) gesampelte Werte

Abbildung 36: Ethernet-Signal und aufgenommene Werte ohne Beeinflussung

In Abbildung 36 ist das übertragene Ethernet Signal (a) und die aufgenommenen ADC-Werte (b) dargestellt. Das daraus berechnete Histogramm ist in Abbildung 37 zu sehen.

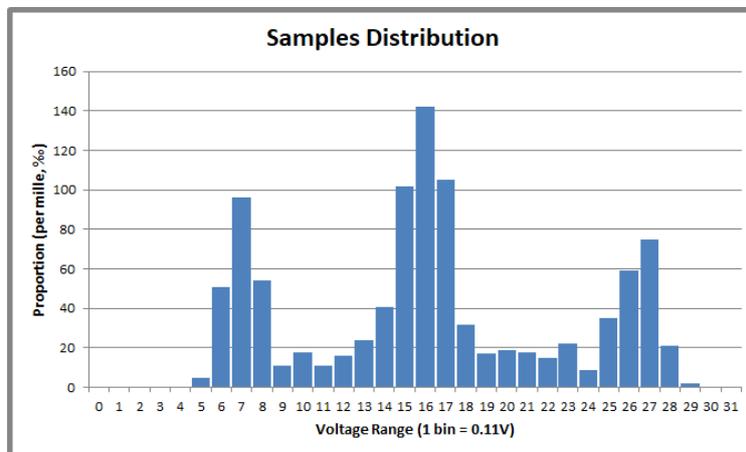


Abbildung 37: Histogramm ohne Beeinflussung

Es lassen sich dabei deutlich die 3 Spannungspegel in dem Histogramm unterscheiden.

Test mit einer zusätzlichen Kapazität von 47pF

In einem nächsten Test wurde eine zusätzliche Kapazität von 47pF an die Leitung zugeschaltet. Mit dieser zusätzlichen Kapazität soll eine Veränderung der Übertragungseigenschaften, wie sie z.B. durch eine Beschädigung am Kabel auftritt nachgestellt werden.

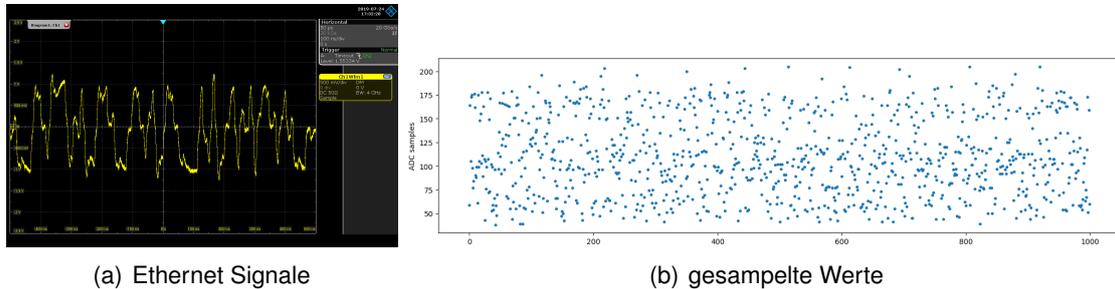


Abbildung 38: Ethernet-Signal und aufgenommene Werte mit zusätzlicher Kapazität von 47pF

Bei dem übertragenen Ethernet-Signal (siehe Abbildung 38) sind deutliche Störungen im Signalverlauf zu erkennen. Auch die aufgenommenen ADC-Werte zeigen eine breitere Streuung als im ersten Testscenario.

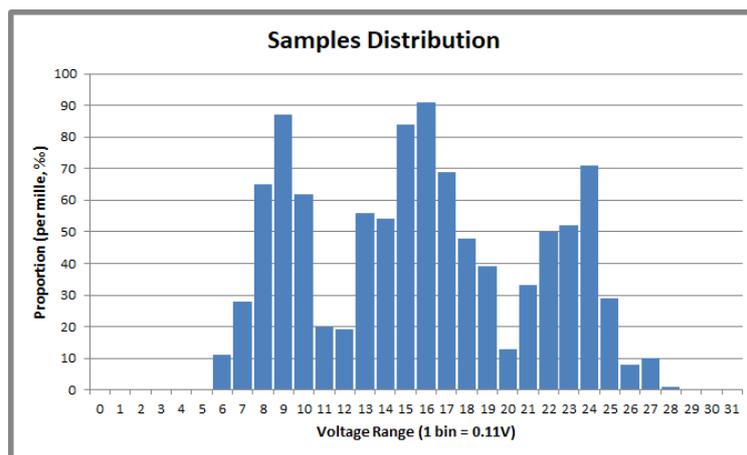


Abbildung 39: Histogramm mit zusätzlicher Kapazität von 47pF

In dem berechneten Histogramm (Abbildung 39) sind die einzelnen Signalpegel noch zu erkennen aber weiter verteilt.

Test mit einer zusätzlichen Kapazität von 100pF

Bei dem nächsten Test wurde die Kapazität auf 100 pF erhöht. Die Ethernet Signale (Abbildung 40) sind jetzt deutlich gestört. Die Datenübertragung hat bei diesem Test aber noch funktioniert.

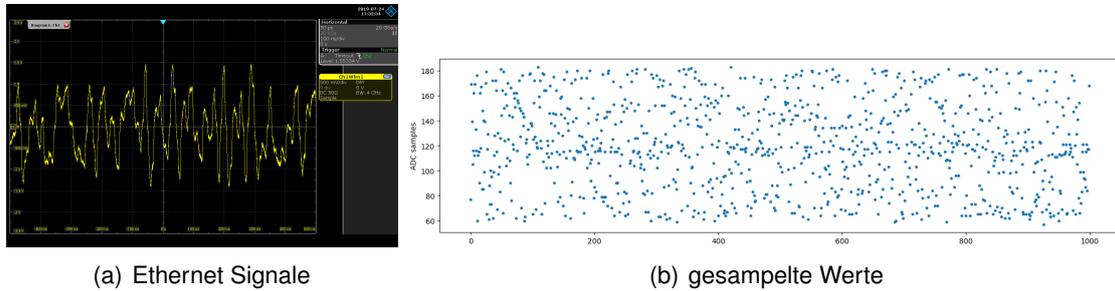


Abbildung 40: Ethernet-Signal und aufgenommene Werte mit zusätzlicher Kapazität von 100pF

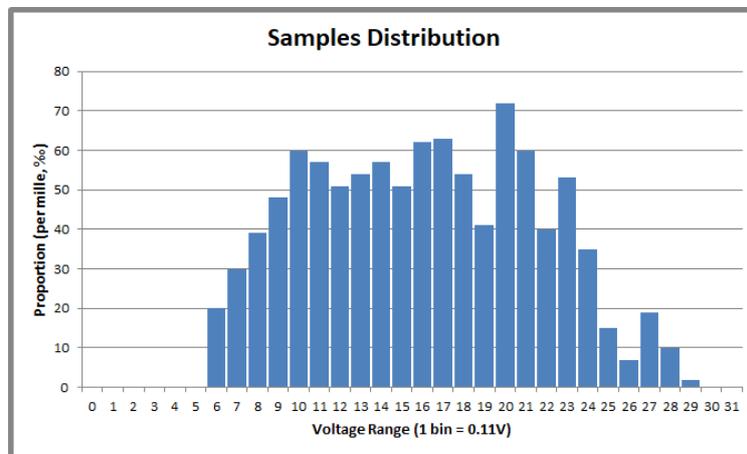


Abbildung 41: Histogramm mit zusätzlicher Kapazität von 100pF

In den 3 Testszenarien wurden folgende Qualitätsparameter ermittelt:

Messung	Activity	Clarity	Asymmetry	Amplitude
normale Bedingungen	753	531	53	20
47 pF Kapazität	825	450	129	15
100 pF Kapazität	868	362	151	11

Tabelle 1: Übersicht der ermittelten Kable-Qualitätsparameter der Messszenarien

Der Wert Clarity, der angibt wie gut sich die einzelnen Spannungspegel (1,0,-1) unterscheiden lassen, sinkt dabei deutlich bei der Verschlechterung der Übertragungseigenschaften.

Bei den Testmessungen konnte gezeigt werden, dass sich mit den entworfenen Hardware- und Analyse-Komponenten die Qualitätsparameter einer 100base-tx Ethernet-Verbindung überwachen lassen.

7. Integration in ein Gesamtsystemkonzept

Eine kontinuierliche Signalüberwachung erfordert mehrere Schritte und Komponenten. Um diese zusammenzuführen ist ein Gesamtsystemkonzept erforderlich. Es müssen z.B. Schnittstellenspezifikationen erarbeitet werden, die dann implementiert und auf die Systeme übertragen werden können. Dies gilt sowohl für Schnittstelle zwischen Messtechnik und Signal(weiter)-verarbeitung, als auch für die Kommunikation mit übergeordneten Systemen. Die folgenden Kapitel zeigen sowohl die Gesamtsystemarchitektur, als auch die detaillierten Schnittstellenbeschreibungen.

Für die Integration der Messkonzepte und -Systeme wird zudem eine zusätzliche Einheit, die Interfacing Unit (IU) vorgestellt. Diese steuert und konfiguriert die Messungen und stellt die Ergebnisse entsprechend über Nutzerschnittstellen nach außen bereit.

7.1. Gesamtsystemkonzept

Das entwickelte Gesamtsystemkonzept verfolgt das Ziel der Modularität. Es soll möglich sein, den erarbeiteten Ansatz z.B. sowohl als abgeschlossenes funktionierendes System (z.B. in Form eines Demonstrators) als auch nur in Teilen nutzen zu können, z.B. als Grundlage für die Integration in bereits existierende Systeme. Hierzu wird die Gesamtarchitektur sowohl logisch als auch physisch in drei Bestandteile gegliedert: eine Messeinheit (engl. Measurement Unit (MU)) (s. Kap. 7.2), eine Analyseeinheit (engl. Analyzing Unit (AU)) (s. Kap. 7.3) und eine Schnittstelleneinheit (engl. IU) (s. Kap. 7.4). Abb. 42 zeigt den Aufbau der Gesamtarchitektur.

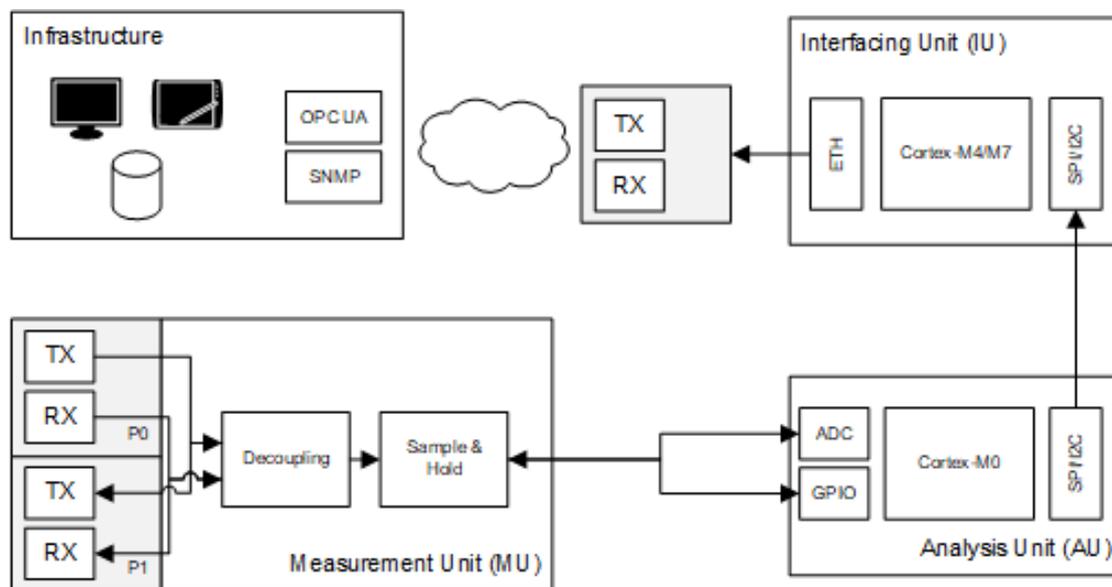


Abbildung 42: Aufbau der Gesamtsystemarchitektur

7.2. Messeinheit

Die MU ist für das Erfassen der Signale auf den Kommunikationsleitungen zuständig. Hierzu werden die Signale auf dem Ethernetkabel abgegriffen, entkoppelt und gesampelt. Die Messeinheit verfügt über zwei physische Ethernet Ports, einen Eingang (P0) und einen Ausgang (P1). Die Signale am Eingangsport werden intern abgegriffen und wieder auf den Ausgangsport gelegt. Somit ist es z.B. sehr einfach möglich, die MU in existierende Umgebungen einzubinden, ohne die aktuelle Verkabelung verändern zu müssen.

Eine detaillierte Beschreibung der MU ist in Kap. 6.3 gegeben.

7.3. Analyseinheit

Die AU erhält als Eingabe die gesammelten Messwerte der MU. Dort werden diese dann entsprechend der in Kap. 5 und Kap. 6 beschriebenen Methoden und Implementierungen analysiert und in qualifizierbare Werte umgewandelt. Diese Werte werden anschließend in einem internen Registerdatensatz vorgehalten und nach außen zur Verfügung gestellt. Nachfolgende Komponenten, wie die IU sind somit in der Lage, die Werte über eine fest definierte Registerschnittstelle abzugreifen. Diese Schnittstelle und deren Werte werden in Kap. 7.6 näher beschrieben.

Eine detaillierte Beschreibung der AU ist in Kap. 6.4 gegeben.

7.4. Schnittstelleneinheit

Die IU bildet die eigentliche Integration des Messsystems in höhere Schichten ab. Um eine Integration des Gesamtsystems in höhere Systeme zu ermöglichen, transferiert die IU die analysierten Messwerte der AU über diverse Kommunikationsprotokolle. Aufgrund der Anforderungserhebung (s. Kap. 4) stellt das System aktuell sowohl eine SNMP als auch eine OPC UA Schnittstelle bereit, über die die gemessenen Daten abgerufen werden können. Zudem erlauben die Schnittstellen eine Konfiguration des Systems. Hierzu implementiert die IU nicht nur die Schnittstellen zur AU, sondern stellt auch die entsprechenden Softwarekomponenten bereit, um die Integration über die genannten Protokolle abbilden zu können.

7.4.1. Hardwareplattform

Als Hardwareplattform für die IU kommt ein STM32F769IDISCOVERY¹ Development Kit zum Einsatz. Dieses bietet zum einen hinsichtlich Performance genügend Rechen- und Speicherressourcen um die gewünschten Schnittstellenimplementierungen ausführen zu können. Zum anderen verfügt die Plattform über ein LCD-Display, welches sich hervorragend als zusätzliches Feature zu Demonstrationszwecken eignet.

¹<https://www.st.com/en/evaluation-tools/32f769idiscovery.html>

7.4.2. Softwarearchitektur

Eines der neben der Funktionalität und der Erfüllung der Anforderungen obersten Ziele der gewählten Softwarearchitektur ist es, eine Modularität, Flexibilität und Skalierbarkeit hinsichtlich der Gesamtarchitektur, der zu verwendenden Protokolle und der Anzahl an zu überwachenden AU zu gewährleisten.

Dier Architektur erlaubt es z.B. sehr schnell und flexibel auf Änderungen in der Registerbeschreibung der AU reagieren zu können. Hierfür ist in der Software eine generische Registerbeschreibung hinterlegt, die ein einfaches Mapping auf die Strukturen der jeweiligen Protokollimplementierungen (z.B. OPC UA, SNMP) ermöglicht. Das Hinzufügen neuer Register oder Abänderungen erfolgen somit sehr schnell und flexibel.

Ein weiterer Vorteil der gewählten Softwarearchitektur besteht in der Modularität. So werden gemeinsam genutzte Bestandteile wiederverwendet, was wiederum zu einer internen Konsistenz der Daten führt. Werden z.B. Konfigurationsänderungen über eine bestimmte Schnittstelle getätigt, so hat dies umgehend auch Auswirkungen auf die anderen Protokollimplementierungen. Dies wird durch die Verwendung eines gemeinsamen Datenpools möglich.

Abb. 43 zeigt das Blockdiagramm der Softwarearchitektur innerhalb der IU. Die wichtigsten Bestandteile werden im Folgenden kurz erläutert.

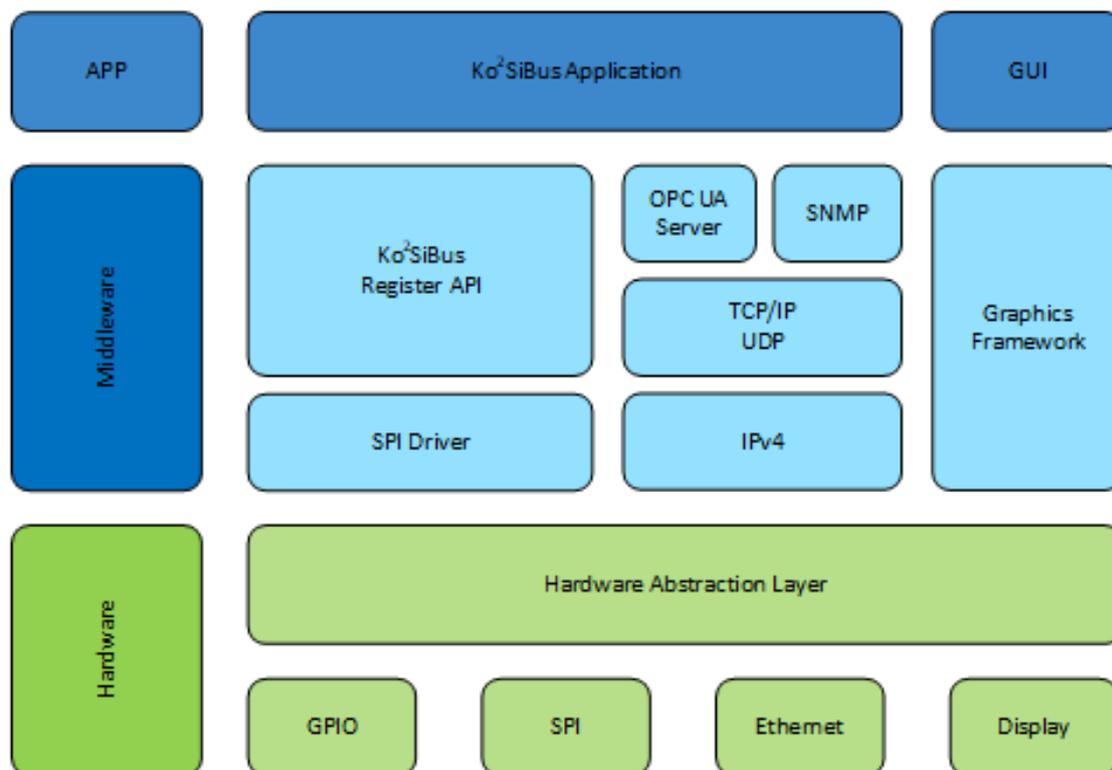


Abbildung 43: Softwarearchitektur der Schnittstelleneinheit

7.4.2.1. Hardwareabstraktion

Die Hardwareabstraktion bildet die Schicht zwischen der Hardware-Peripherie und der Software. Hier sind, z.B. die Treiber für die Ethernetschnittstelle und die SPI-Kommunikation zur AU implementiert, die benötigt werden, um im Netzwerk und mit der AU zu interagieren. Des Weiteren sind Bestandteile wie General Purpose In Out (GPIO) und Displaytreiber integriert.

7.4.2.2. Middleware

Die Middleware besteht aus mehreren Bestandteilen. Sie beinhaltet die Basissoftware und die Kommunikationsstacks, die für die darüber liegende Anwendung benötigt werden. Diese Basissoftwarekomponenten bestehen aus:

- Dem Lightweight IP (LwIP) TCP/IP Protokollstapel - Dieser bietet die Grundfunktionalität für die Kommunikation über das TCP/IP Protokoll (Version 4). Zudem beinhaltet der Protokollstapel die Implementierung des SNMP Agents.
- Dem OPC UA Server - Hierfür wurde der frei verfügbare open62541² Protokollstapel auf die genutzte Zielplattform portiert. Der Protokollstapel bietet die benötigte Funktionalität, um einen OPC UA Server betreiben zu können.
- Dem SPI Treiber. Dieser Treiber implementiert das SPI-basierte Kommunikationsprotokoll zwischen der IU und der AU (s. Kap 7.5.2).
- Der Ko²SiBus Register-API - Hier sind alle Registerzugriffe implementiert, die für die Abfrage der jeweiligen Werte und für die Konfiguration benötigt werden.

7.4.2.3. Anwendung

Die Ko²SiBus Anwendung stellt die oberste Instanz innerhalb der Softwarearchitektur dar. Hier findet das Mapping der Mess- und Konfigurationswerten zwischen den Registern der AU und den gewählten Kommunikationsprotokollen (OPC UA, SNMP) statt. Dies wird intern über entsprechende Softwarestrukturen realisiert, die einfach hinsichtlich neuer Protokolle und/oder Register erweitert werden können. Hierzu werden die jeweiligen Register in Strukturen beschrieben, die neben ihren eigentlichen Parametern zur Auswertung (z.B. Adresse und Bitmaske) auch entsprechende Verlinkungen zu den einzelnen Protokoll-Handlern beinhalten. Abb. 44 zeigt die Definition dieser Datenstruktur, während Abb. 45 eine exemplarische Konfiguration mehrerer Register zeigt.

7.5. Schnittstellenbeschreibungen

Für eine durchgängige Integration ist es wichtig, eindeutige Schnittstellen zwischen den Teilsystemen zu definieren und zu spezifizieren. Aufgrund der Architektur ergeben sich

²<https://open62541.org/>

```

/** This struct contains all information for creating and handling the
 * nodes via SNMP and OcpUa protocol.*/
typedef struct st_nodeInitStruct
{
    /** this is the name of the node */
    char name[NODE_NAME_SIZE];
    /** this is the size of the value which is read or write from the register */
    en_nodeSize_t size;
    /** Static variable*/
    void* statVar;
    /** this is the number of the register on which this node value is stored */
    uint8_t regNum;
    /** this is the number of bits this value is shift to the left in the
     * register ( second byte means shift of 8 bits therefore this value is 8) */
    uint8_t bitNumShiftLeft;
    /** this defines the access on the node value */
    en_nodeAccess_t access;
    /** this is a reference to information of the node especially for the
     * snmp protocol */
    st_SnmpVariable_t *snmp;
    /** this is a reference to information of the node especially for the
     * ocpua protocol */
    st_OpcUaNode_t *ocpUa;
    /** this variable indicates how often the register values are read. The
     * value of this variable is the time in ms. If the selected time is not
     * over the get function (e.g. App_getByte() ) returns the latest value*/
    uint32_t timeIntervalInMs;
    /** Optional conversion function */
    f_convert conv;
    /** last value retrieved */
    uint32_t lv;
    /** timeout to retrieve a new value. */
    uint32_t tc;
}st_nodeInitStruct_t;

```

Abbildung 44: Listing der Datenstruktur eines Registerwertes, welcher über verschiedene Anwendungsprotokolle angesprochen werden kann

```

/** This struct contains all information for creating and handling the nodes via SNMP and OcpUa protocol.
 * If you change the number of lines in this struct array don't forget to adjust the NUMBER_OF_NODES define
 */
st_nodeInitStruct_t NodesInit_nodes[NUMBER_OF_NODES] =
{
    { "CH0-Activity-Val",    U16,  NULL,          REG_CH0_ACTIVITY,  REG_VAL_SHIFT,    READ_ONLY,    &snmpID[0], &opcuFolder[0], 0, check_val},
    { "CH0-Activity-Thr",  U16,  NULL,          REG_CH0_ACTIVITY,  REG_THR_SHIFT,   READ_AND_WRITE, &snmpID[1], &opcuFolder[0], 0, check_val},
    { "CH0-Activity-Thr-En", FLAG, NULL,        REG_IRQ_ENABLE,   IRQ_CH0_ACT,     READ_AND_WRITE, &snmpID[2], &opcuFolder[0], 0, NULL},
    { "CH0-Activity-Thr-Cnt", U32,  &irqcnt[IRQ_CH0_ACTIVITY], REG_INV,          REG_SHIFT_INV,   READ_ONLY,    &snmpID[3], &opcuFolder[0], 0, NULL},
};

```

Abbildung 45: Listing der Initialisierung mehrere Registerzugriffspunkte

die Schnittstellen zwischen der MU und AU, zwischen der AU und IU und zwischen der IU und den Anwendern bzw. den Entwicklern, die das System in ihrer jeweiligen Umgebung nutzen und integrieren wollen. Die folgenden Kapitel zeigen diese Schnittstellen im Detail.

7.5.1. Schnittstelle zwischen Messeinheit und Analyseeinheit

Die Analyse- und Messeinheit ist im Detail in Abschnitt 6.3 und 6.4 beschrieben. Die Sample & Hold Glieder der Messeinheit können über ein Eingangssignal von der Analyseeinheit gesteuert werden. Die Ausgänge der S & H Glieder liefern ein unterabtastetes analoges Signal an die Analyseeinheit.

7.5.2. Schnittstelle zwischen Analyseeinheit und Schnittstelleneinheit

Die Schnittstelle zwischen der AU und der IU muss differenziert betrachtet werden. Anwendungsseitig bietet die AU eine Registerschnittstelle an, über die auf Mess- und Konfigurationswerte zugegriffen werden kann. Diese Schnittstelle wird im Detail in Kap. 7.6 beschrieben. Auf der unteren Ebene kommt ein eigens definiertes Protokoll zum Einsatz, welches es erlaubt einen Register-basierten Zugriff auf die Mess- und Konfigurationswerte innerhalb der AU durchzuführen. Dieses Protokoll ist in 32Bit-Befehle aufgeteilt.

Zu Beginn wird ein Kommando übertragen, welches neben einem Command-Identifizierer (Bits 31-24) auch die Register-ID (Bits 23-16) beinhaltet, gefolgt von Füllwerten, die auf Empfängerseite ignoriert werden. Wurde das Kommando entsprechend empfangen, wird direkt eine Bestätigung in Form eines Code-Wortes zurückgesendet. Im folgenden Schritt werden je nach Befehl, die Registerwerte beschrieben oder gelesen. Abb. 46 zeigt die Sequenzdiagramme für Schreiboperationen (links) und Leseoperationen (rechts).

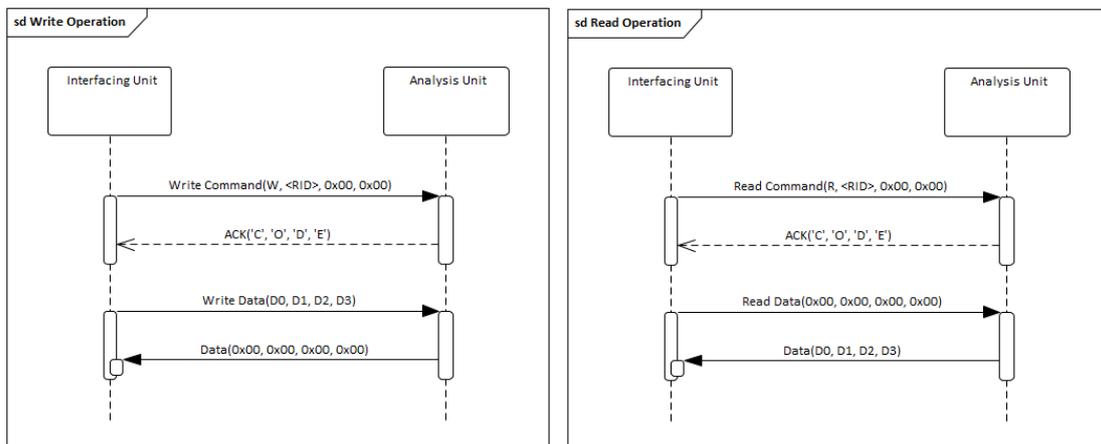


Abbildung 46: Ablauf der Schreib- und Leseoperationen auf der Registerschnittstelle zwischen der Schnittstelleneinheit und der Analyseeinheit

7.6. Registerbeschreibungen

Für die Konfiguration der Messungen und für das Abgreifen der gemessenen Daten wird seitens der Analyseeinheit eine Register-basierte Schnittstelle angeboten, die entsprechend von der Schnittstelleneinheit implementiert wird. Die folgenden Kapitel zeigen die jeweiligen verfügbaren Register mit den entsprechenden Konfigurations- und Abfragewerten.

7.6.1. Übersicht

Tab. 2 gibt einen Überblick aller verfügbaren Register. Die Register der Qualitätsparameter sind zweimal vorhanden, um für jeden der beiden Messkanäle (Rx/Tx) getrennt die gleiche Funktionalität bereit zu stellen.

Adresse	Name	Beschreibung	Reset Wert
0x00	CH0_ACTIVITY	Threshold und Messwert der Kanalaktivität (Kanal 0)	0x01900000
0x01	CH0_CLARITY	Threshold und Messwert der Kanalklarheit (Kanal 0)	0x01C20000
0x02	CH0_ASYMMERTY	Threshold und Messwert der Kanalsymmetrie (Kanal 0)	0x00640000
0x03	CH0_AMPLITUDE	Threshold und Messwert der Kanalamplitude (Kanal 0)	0x000D0000
0x04	CH0_DISTRIBUTION	Symbolverteilung (Kanal 1)	0x00000000
0x05	CH1_ACTIVITY	Threshold und Messwert der Kanalaktivität (Kanal 1)	0x01900000
0x06	CH1_CLARITY	Threshold und Messwert der Kanalklarheit (Kanal 1)	0x01C20000
0x07	CH1_ASYMMERTY	Threshold und Messwert der Kanalsymmetrie (Kanal 1)	0x00640000
0x08	CH1_AMPLITUDE	Threshold und Messwert der Kanalamplitude (Kanal 1)	0x000D0000
0x09	CH1_DISTRIBUTION	Symbolverteilung (Kanal 0)	0x00000000
0x0A	IRQ_STATUS	Interrupt Status für beide Kanäle	0x00000000
0x09	IRQ_ENABLE	Interrupt Enable für beide Kanäle	0x00000000
0x09	INTERNAL_TEMP	Interne Temperatur	0x00000000
0x09	SINE_WAVE	Sinus Testsignal	0x00000000

Tabelle 2: Registerbeschreibung: Liste der verfügbaren Register

7.6.2. CHX_ACTIVITY (0x00/0x05)

Der Activity-Parameter schätzt die Kommunikationsaktivität auf dem Kabel. Wenn keine Kommunikation über das Kabel stattfindet, ändert sich das Signal nicht wesentlich, und die meisten Abtastwerte liegen nahe beieinander. Der Aktivitätsparameter kann Werte zwischen 0 und 1000 annehmen. Ein sehr niedriger Aktivitätswert kann darauf hinweisen,

dass das Kabel abgezogen oder eines der Geräte ausgeschaltet ist. Das Register ist in zwei ganzzahlige 16-Bit Felder aufgeteilt. Das MS-Wort ist R/W und speichert die Schwellenwert für die die Interrupt-Generierung. Das LS-Wort ist schreibgeschützt und speichert die intern gemessenen Werte. Ein Interrupt wird erzeugt, wenn der gemessene Wert kleiner oder gleich dem Schwellenwert ist und das entsprechende Interrupt-Flag im INTERRUPT_ENABLE-Register (0x0B) gesetzt ist.

Feld	Beschreibung	Default Wert	Zugriff
Bits 31 - 16	Interrupt Threshold	400 (0x190)	Lesen/Schreiben
Bits 15 - 0	Messwert	N/A	Lesen

Tabelle 3: Registerbeschreibung: Activity (Adresse 0x00, 0x05)

7.6.3. CHX_CLARITY (0x01/0x06)

Der Parameter Clarity schätzt, wie deutlich die Pegel ('-', '0' oder '+') voneinander unterschieden werden können. Der Wert berechnet sich als Summe der Anteile der Null-, positiven und negativen Werte. Der Clarity-Wert variiert zwischen 0 und 1000. Ein niedriger Clarity-Wert kann darauf hinweisen, dass zu viel Rauschen auf dem Kanal vorhanden ist oder dass das Kabel eine hohe Kapazität aufweist.

Das Register ist in zwei 16-Bit Felder aufgeteilt. Das MS-Wort ist R/W und speichert die der Schwellenwert für die Interrupt-Generierung. Das LS-Wort ist schreibgeschützt und speichert die intern gemessenen Werte. Ein Interrupt wird erzeugt, wenn der gemessene Wert kleiner oder gleich dem Schwellenwert ist und das entsprechende Interrupt-Flag im INTERRUPT_ENABLE-Register (0x0B) gesetzt ist.

Feld	Beschreibung	Default Wert	Zugriff
Bits 31 - 16	Interrupt Threshold	450 (0x1C2)	Lesen/Schreiben
Bits 15 - 0	Messwert	N/A	Lesen

Tabelle 4: Registerbeschreibung: Clarity (Adresse 0x01, 0x06)

7.6.4. CHX_ASYMMETRY (0x02/0x07)

Die Kanalasymmetrie schätzt das Verhältnis zwischen den einzelnen Spannungspegeln. Im Idealfall ist der Anteil positiver und negativer Werte gleich hoch und ihr kombinierter Anteil gleich der Null-Werte. Die Asymmetrie wird als Differenz im Verhältnis zwischen positiven und negativen Niveaus plus die Differenz im Verhältnis zwischen dem Nullniveau und den kombinierten Anteil an positiven und negativen Werten berechnet. Der Asymmetrie-Parameter kann Werte zwischen 0 und 2000 annehmen. Das Register CHX_ASYMMETRY ist in zwei 16-Bit Felder aufgeteilt. Das MS-Wort ist R/W und speichert die Schwellenwert für die Interrupt-Generierung. Das LS-Wort ist schreibgeschützt und speichert die intern gemessenen Werte. Ein Interrupt wird erzeugt, wenn

der gemessene Wert größer oder gleich dem Schwellenwert ist und das entsprechende Interrupt-Flag im INTERRUPT_ENABLE-Register (0x0B) gesetzt ist.

Feld	Beschreibung	Default Wert	Zugriff
Bits 31 - 16	Interrupt Threshold	100 (0x064)	Lesen/Schreiben
Bits 15 - 0	Messwert	N/A	Lesen

Tabelle 5: Registerbeschreibung: Asymmetry (Adresse 0x02, 0x07)

7.6.5. CHX_AMPLITUDE (0x03/0x08)

Die Amplitude misst den Abstand zwischen positiven und negativen Symbolen im Histogramm. Die Maßeinheit sind Histogramm-Bins, wobei der Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Bins etwa 0,11V beträgt. Ein niedriger Amplitudenwert kann darauf hinweisen, dass das Signal durch das Kabel gedämpft wird. Das Register CHX_AMPLITUDE ist in zwei 16t-Felder aufgeteilt. Das MS-Wort ist R/W und speichert die Schwellenwert für die Interrupt-Generierung. Das LS-Wort ist schreibgeschützt und speichert die intern gemessenen Werte. Ein Interrupt wird erzeugt, wenn der gemessene Wert kleiner oder gleich dem Schwellenwert ist und das entsprechende Interrupt-Flag im INTERRUPT_ENABLE-Register (0x0B) gesetzt ist.

Feld	Beschreibung	Default Wert	Zugriff
Bits 31 - 16	Interrupt Threshold	100 (0x000D)	Lesen/Schreiben
Bits 15 - 0	Messwert	N/A	Lesen

Tabelle 6: Registerbeschreibung: Amplitude (Adresse 0x03, 0x08)

7.6.6. CHX_SYMBOL_DISTRIBUTION (0x04/0x09)

Das Symbolverteilungsregister speichert den Anteil der Messwerte, die ein Symbol darstellen ('-', 0 und '+'). Das Register ist in vier 8-Bit Werte aufgeteilt, die den Prozentsatz des entsprechenden Symbols widerspiegeln. Das Register ist schreibgeschützt.

Feld	Beschreibung	Zugriff
Bits 31 - 24	Anteil undefinierte Werte	Lesen
Bits 23 - 16	Anteil '-' Werte	Lesen
Bits 15 - 8	Anteil '+' Werte	Lesen
Bits 7 - 0	Anteil '0' Werte	Lesen

Tabelle 7: Registerbeschreibung: Symbol-Distribution (Adresse 0x04, 0x09)

7.6.7. INTERRUPT_STATUS (0x0A)

Zeigt die Quellen eines oder mehrerer Interrupts an. Das Register ist schreibgeschützt, und wird beim Lesen des Registers zurückgesetzt.

Bit	Kanal	Beschreibung
Bits 31 - 16	N/A	Unbenutzt
Bits 15 - 12	N/A	Unbenutzt
Bits 11	Kanal 1	Amplitude Interrupt
Bits 10	Kanal 1	Asymmetry Interrupt
Bits 9	Kanal 1	Clarity Interrupt
Bits 10	Kanal 1	Activity Interrupt
Bits 7 - 4	N/A	Unbenutzt
Bits 3	Kanal 0	Amplitude Interrupt
Bits 2	Kanal 0	Asymmetry Interrupt
Bits 1	Kanal 0	Clarity Interrupt
Bits 0	Kanal 0	Activity Interrupt

Tabelle 8: Registerbeschreibung: Interrupt Status (Adresse 0x0A)

7.6.8. INTERRUPT_ENABLE (0x0B)

Über dieses Register lassen sich Interrupts aktivieren/deaktivieren. Das Schreiben einer 1 in ein Bit aktiviert den jeweiligen Interrupt.

Bit	Kanal	Beschreibung	Default Wert
Bits 31 - 16	N/A	Unbenutzt	0
Bits 15 - 12	N/A	Unbenutzt	0
Bits 11	Kanal 1	Amplitude Interrupt	1
Bits 10	Kanal 1	Asymmetry Interrupt	1
Bits 9	Kanal 1	Clarity Interrupt	1
Bits 10	Kanal 1	Activity Interrupt	1
Bits 7 - 4	N/A	Unbenutzt	0
Bits 3	Kanal 0	Amplitude Interrupt	1
Bits 2	Kanal 0	Asymmetry Interrupt	1
Bits 1	Kanal 0	Clarity Interrupt	1
Bits 0	Kanal 0	Activity Interrupt	1

Tabelle 9: Registerbeschreibung: Interrupt Enable (Adresse 0x0B)

7.6.9. INTERNAL_TEMPERATURE (0x0C)

Dieses Register speichert den Temperaturwert des internen Temperatursensors. Der Wert wird automatisch alle 100 ms aktualisiert. Der Wert wird als ein vorzeichenbehafteter 32-Bit Wert interpretiert (2er-Komplement), das die Temperatur in Schritten darstellt. Jede Stufe beträgt 0,25 °C.

7.6.10. SINE_WAVE (0x0D)

Zur Erzeugung eines Testsignals wird eine Sinuswelle berechnet. Die Sinuswelle hat eine Frequenz von 1 Hz, eine Amplitude von 500 und ein Offset von 500 (Werte von 0 bis 1000). Der Registerwert wird alle 10 ms aktualisiert.

7.7. Schnittstelle zu den übergeordneten Systemen

Wie aus den Anforderungen 4 ersichtlich wird, ist es für die Akzeptanz und Integrierbarkeit eines solchen Systems erforderlich entsprechende standardisierte Schnittstellen nach außen anzubieten. Gemäß den Anforderungen werden in Ko²SiBus die beiden Schnittstellen OPC UA und SNMP integriert.

7.7.1. OPC UA

Für die Integration der OPC UA wird die quelloffene Implementierung *open62541*³ genutzt. Diese wurde auf die Ko²SiBus-Plattform portiert und angepasst und in die Kap. 7.4.2 beschriebene Architektur integriert.

Um die Messdaten letztendlich über die OPC UA Schnittstelle zur Verfügung zu stellen, wird ein Datenmodell bereitgestellt, welches die Messdaten in sogenannten OPC UA Nodes bereitstellt. Es sind die in Kap. 7.6 beschriebenen Werte, gruppiert nach den jeweiligen Kanälen verfügbar.

7.7.2. SNMP

Die Implementierung der SNMP Schnittstelle beruht auf dem genutzten LwIP TCP-IP Stapel. Auch hier sind die Messwerte in das entsprechende SNMP Datenmodell integriert. Hierbei kommen Object Identifier (OID) zum Einsatz, um Werte zu identifizieren. Zusätzlich zur eigenen Implementierung wurde im Projekt eine Management Information Base (MIB) erfasst. Eine MIB enthält Beschreibungen, wo welche Informationen zu finden sind und z.B. welche Datentypen sie besitzen. Durch den Import dieser MIB können SNMP-Manager auf die Ko²SiBus-Messdaten zugreifen.

³<https://open62541.org/>

8. Demonstrator

Der in dem Projekt entwickelte Demonstrator bildet die gesamte Kette der kontinuierlichen Signalanalyse ab, mit dem Ziel die entwickelten Methoden und Plattformen präsentieren und zu verifizieren. Zudem soll der Demonstrator von Dritten als Integrationsmöglichkeit genutzt werden können, um z.B. eigene Geräte, Prototypen und Entwicklungen mit der Ko²SiBus-Elektronik ausstatten zu können. Die folgenden Kapitel beschreiben die jeweiligen Demonstratoren im Detail.

8.1. Integrationsdemonstrator

Der Integrationsdemonstrator bildet nur einen Teil der Signalverarbeitungskette ab. Er wurde hauptsächlich zum Test und der Verifikation bei der Entwicklung der Analyseeinheit verwendet. Weiterhin kann er von potenziellen Anwendern genutzt werden, um die Integration in eigene Produkte zu testen.

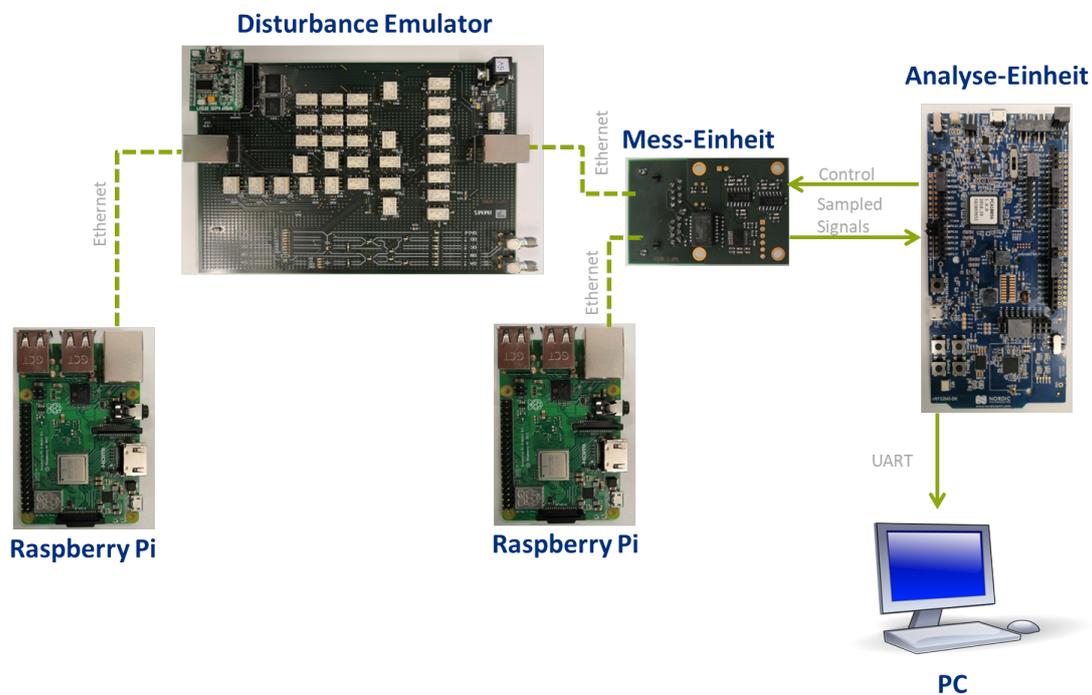


Abbildung 47: Aufbau des Integrationsdemonstrators

Der Aufbau dieses Demonstrators ist in Abbildung 47 dargestellt. Seine Hauptbestandteile sind die Mess- und die Analyseeinheit. Die Daten der Analyseeinheit werden über die UART-Schnittstelle des Mikrocontrollers direkt zu einem PC übertragen und können dort analysiert und visualisiert werden. Weitere Bestandteile sind 2 Raspberry Pis, mit denen der zu analysierende Nutzdatenstrom erzeugt wird. Mit dem Disturbance-Board,

welches im nächsten Kapitel näher beschrieben wird, kann die Kabel-Qualität künstlich verändert werden.

8.2. Messedemonstrator

Der Messedemonstrator bildet die komplette Signalanalyse-Kette ab, mit dem Ziel die in dem Projekt getätigten Entwicklungen vor allem der Öffentlichkeit in ansprechender Form präsentieren zu können. Zudem zeigt der Demonstrator ein mögliches Frontend zur Betrachtung und Analyse der Daten, um potenziellen Anwendern eine Integrationsmöglichkeit aufzeigen zu können. Die folgenden Kapitel beschreiben den Messedemonstrator im Detail.

8.2.1. Gesamtaufbau

Der Messedemonstrator beinhaltet in erster Linie die in dem Projekt entwickelten Einheiten (Messeinheit, Analyseeinheit, Schnittstelleneinheit), die zu einem Gesamtsystem mit Gehäuse und Integrationskonzept entwickelt und umgesetzt wurden (s. Kap. 8.2.2). Um eine variable Netzwerkumgebung abbilden zu können, kommen zusätzliche Geräte zum Einsatz, mittels derer zum einen die Menge des Datentransfers im Netz beeinflusst werden kann und zum anderen auch die gemessene Leitung manipuliert wird, z.B. um eine Verschlechterung des Kabels zu simulieren. Abb. 49 zeigt die Gesamtarchitektur des Messedemonstrators.

Das Ko²SiBus Analysegerät, dessen Aufbau näher in Kap. 8.2.2 beschrieben wird, ist für die Messungen der Kabelqualität zuständig. Daneben bilden zwei RaspberryPi⁴ Embedded Computer eine Infrastruktur für den Demonstrator, mit den folgenden Aufgaben:

- Bereitstellung eines drahtlosen Netzwerkzugriffs auf den Demonstrator. Dadurch kann der Demonstrator ad-hoc ohne zusätzliche Netzwerkinfrastruktur betrieben werden. Dieser Aspekt ist sehr wichtig hinsichtlich der Mobilität des Demonstrators.
- Künstliche und steuerbare Erzeugung von Netzwerkverkehr, um Auswirkungen auf die Messungen zu untersuchen. Somit können Stör-Einflüsse sehr gut demonstriert werden.
- Implementierung des exemplarischen Frontends zur Integration des Analysegeräts in existierende Umgebungen (s. Kap. 8.2.4). Dadurch wird den Anwendern ein Beispiel gegeben, wie sie eine solche Messtechnik nutzen können.

Zudem kommt eine Eigenentwicklung des IMMS zum Einsatz: das Disturbance Board. Dieses erlaubt es, die Qualität eines Kabels gezielt zu beeinflussen, indem dem Kabel zusätzliche Widerstände und Kapazitäten zugeschaltet werden können. Abb. 48 zeigt dieses Disturbance-Board. Links und rechts sind mittig die jeweiligen Ethernet-Ports angebracht, über die die Änderungen eingespeist werden. In der Mitte des Boards sind die entsprechenden Relais, die für die Beschaltung der Widerstände und Kapazitäten

⁴<https://www.raspberrypi.org/>

zuständig sind. Im unteren Bereich wird zu Demonstrationszwecken die aktuelle Beschaltung visualisiert.

Oben links ist eine zusätzliche USB-Schnittstelle angebracht, über die eine Veränderung der Kabelqualität automatisiert und programmierbar erfolgen kann, so dass auch hier eine Steuerung über die Embedded Computer möglich ist.

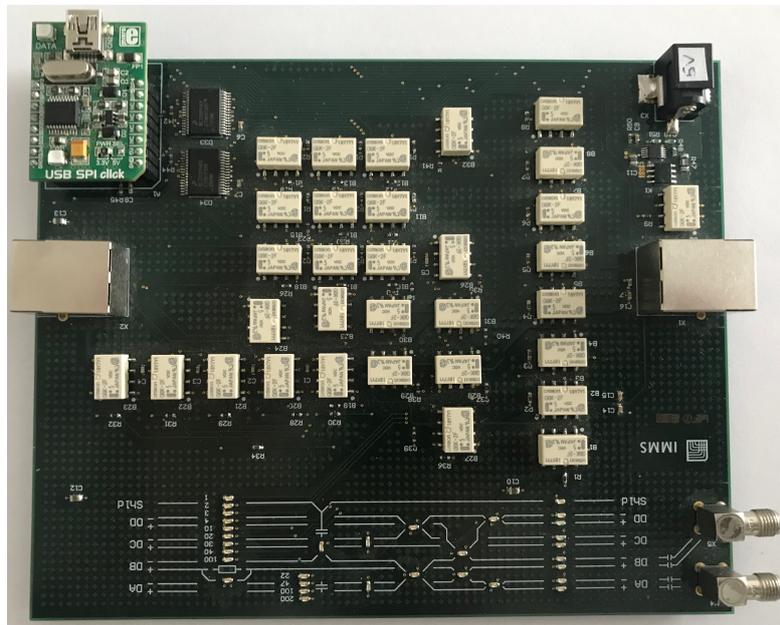


Abbildung 48: Disturbance-Board des IMMS

8.2.2. Aufbau des Analysegeräts

Das Analysegerät bildet die Kernkomponente des Demonstrators. Die Hauptkomponenten des Analysegeräts (Messeinheit, Analyseeinheit, Schnittstelleneinheit) sind in dem Messedemonstrator vollständig in einem Gehäuse integriert. Zusätzlich werden weitere Peripheriegeräte verbaut. Hierzu zählen neben den Hauptkomponenten:

- Ein Netzwerk-Switch, mit dessen Hilfe ein echtes Feldgerät mit integriertem Switch emuliert wird. Dadurch kann das Gerät ohne zusätzliche Infrastrukturelemente in ein bestehendes Netzwerk eingehängt werden.
- Einem USB-Hub zur Stromversorgung
- Einem Ethernet-Port-Splitter, der Teil der Messeinheit ist und es erlaubt Ethernet-Signale für die Analyse auszukoppeln

Abb. 50 zeigt den systematischen Aufbau des Analysegeräts, während die integrierten Ergebnisse in Abb. 51 zu sehen sind. Die linke Abbildung zeigt das geöffnete Gehäuse

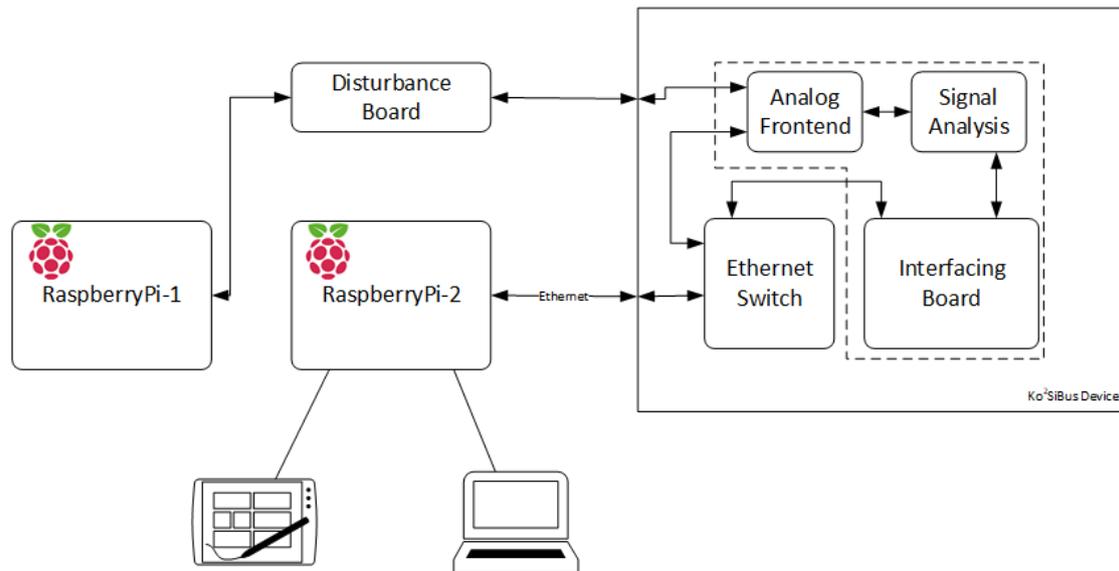


Abbildung 49: Systematischer Aufbau des Messedemonstrator Gesamtsystems

mit den internen Komponenten. Die rechte Abbildung zeigt die fertige Integration, wie sie in dem Messedemonstrator zum Einsatz kommt.

8.2.3. Zugriff über Standard-Clients

Dadurch, dass das Analysegerät und der Demonstrator standardisierte Schnittstellen anbieten, ist es dementsprechend auch möglich, über Standardtools darauf zuzugreifen. Für die Präsentation des Demonstrators werden hierfür die beiden frei verfügbaren Tools *UA-Expert*⁵ für den Zugriff über OPC UA und *PowerSNMP Free Manager*⁶ für den Zugriff über SNMP genutzt.

8.2.4. Zugriff und Visualisierung über IoT-Plattform

Um potenziellen Anwendern aufzeigen zu können, wie sie ein solches hier entwickeltes System integrieren können, implementiert der Messedemonstrator eine zusätzliche Visualisierungskomponente auf einem der in Kap. 8.2.1 gezeigten embedded Computer in Form einer IoT-Plattform. Diese setzt auf den in Kap. 7.7 beschriebenen Schnittstellen (OPC UA, SNMP) auf und visualisiert die in 7.6 beschriebenen Messwerte. Hierzu kommt eine Kombination mehrere Frameworks zum Einsatz, die speziell auf die Speicherung und Visualisierung von sich zeitlich verändernden Daten ausgelegt ist:

- Die Basis für die Datenerfassung bildet das Node-Red⁷ Framework. Dieses ist

⁵<https://www.unified-automation.com/products/development-tools/uaexpert.html>

⁶<https://www.dart.com/pages/powersnmp-free-manager>

⁷<https://nodered.org/>

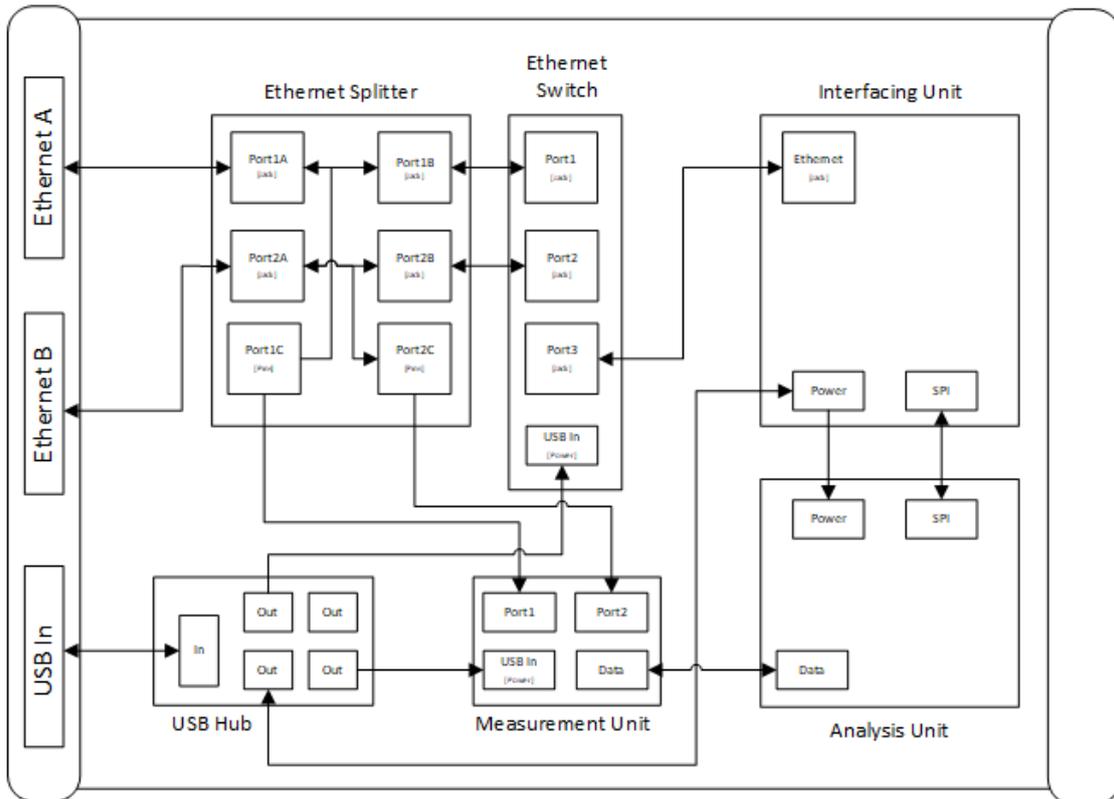


Abbildung 50: Systematischer Aufbau des Analysegeräts



Abbildung 51: Gehäuseintegration des Analysegeräts

zuständig für den Datenabgriff des Analysegeräts über die definierten Schnittstellen (OPC UA, SNMP). Nachdem die Daten abgegriffen wurden, speichert das Framework diese in einer Datenbank.

- Eine InfluxDB⁸ Datenbank speichert die Messdaten, die zuvor von dem Analysegerät abgegriffen wurden.
- Die Messdaten werden über ein webbasiertes Grafana⁹ Frontend visualisiert. Dabei werden die in 7.6 beschriebenen Messdaten angezeigt. Neben einer Live-Ansicht ist es durch die Speicherung der Daten in einer Datenbank auch möglich, historische Werte zu betrachten.

8.2.4.1. Node-Red Backend

Das Node-Red-Backend ist Teil der IoT-Plattform und stellt die Verknüpfung zwischen den Schnittstellen des Analysegeräts und der Datenspeicherung dar. Dabei werden mittels Connectoren Daten von der Schnittstelle abgegriffen und in Flows injiziert. Diese Flows sind Teil einer nahezu frei kombinierbaren Kette an Aktionen, die nach Bedarf konfiguriert und programmiert werden können. Falls erforderlich, können somit in diesen Flows Daten aufbereitet oder gefiltert werden. Durch eine gezielte Verkettung, Konfiguration und Programmierung, können somit die gewünschten Daten zwischen Systemen ausgetauscht werden. In diesem Fall werden die Daten über die OPC UA Schnittstelle entgegengenommen, aufbereitet, formatiert und in die InfluxDB Datenbank geschrieben. Abb. 52 zeigt den Gesamtflow des Ko²SiBus Backends.

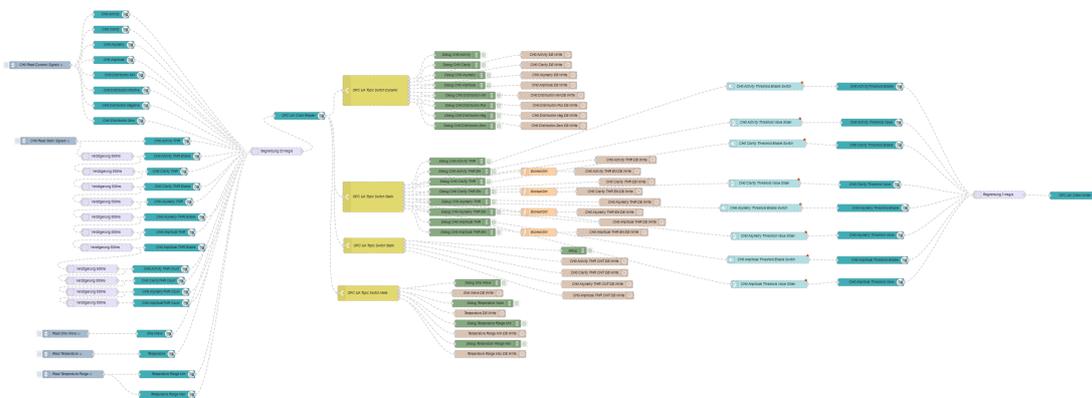


Abbildung 52: Node-Red-Flow im IoT-Backend

8.2.4.2. InfluxDB

⁸<https://www.influxdata.com/>

⁹<https://grafana.com/>

InfluxDB ¹⁰ ist eine quelloffene Implementierung einer Time Series Data Base (TSDB). Die Datenbank ist so aufgebaut, dass jeder Kanal und jeder Wert seine eigenen Einträge besitzen. Diese werden dann im nächsten Schritt über das Grafana-Dashboard mit den entsprechenden Visualisierungen verknüpft.

8.2.4.3. Grafana Dashboard

Um potenziellen Anwendern eine Möglichkeit zur Nutzung und Visualisierung der Daten aufzuzeigen, zeigt eine speziell für den Demonstrator entwickelte Visualisierung aktuelle und historische Messwerte. Abb. 53 zeigt den Visualisierung-Screen des entwickelten Grafana-Frontends in Form eines Dashboards. In der linken oberen Spalte sind die aktuellen Messwerte zu sehen. Direkt daneben werden die jeweiligen Konfigurationen und Informationen zu den entsprechenden Interrupts gezeigt. Hier kann z.B. analysiert werden, wie oft ein konfigurierter Grenzwert über oder unterschritten wurde. Auf der rechten Seite sowie in dem unteren Teil des Frontends kann der zeitliche Verlauf der jeweiligen Werte betrachtet werden. Während die rechte Seite jeweils die historischen Daten zu den Live-Daten zeigt, werden im unteren Abschnitt die Symbolverteilungen visualisiert.

Jeder zu analysierende Kanal bietet sein eigenes Dashboard. Jedoch steht es dem Nutzer frei, sich seine eigenen Dashboards nach seinen Wünschen und Anforderungen zu konfigurieren.

Neben der Nutzung des im Messedemonstrator integrierten Frontends ist es natürlich auch weiterhin möglich, über Drittanbieter-Software oder eigene Implementierungen auf die entsprechenden Werte zuzugreifen, insofern die entsprechenden Schnittstellen implementiert werden.

¹⁰<https://www.influxdata.com/>



Abbildung 53: Beispielhafte Visualisierung der Messwerte durch den Messedemonstrator

9. Zusammenfassung

Im Projekt Ko²SiBus wurde ein neues Messverfahren konzeptioniert und implementiert, welches in neue oder bestehende Systeme integriert werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojektes entstand eine kontinuierliche und kostengünstige Signalüberwachung für industrielle Bussysteme und wurde anhand eines Demonstrator verifiziert.

9.1. Erfahrungen aus dem Projekt

Die technischen Grundlagen für eine Überwachung von industriellen Bussystemen werden in Kapitel 5 ausgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Methode der Unterabtastung für dieses System geeignet ist. Diese Methode wird in diesem Abschnitt ausführlich dargestellt und im weiteren Verlauf für die Umsetzung des Systems verwendet.

In Kapitel 6 wird die Umsetzung der Leitungsüberwachung dargelegt. Zunächst wird das Konzept und Systemdesign der entwickelten Elektronikkomponenten vorgestellt und anschließend Methoden und Schaltungsvarianten näher erläutert. Die Umsetzung dieses Konzepts in eine Mess- und Analyse-Einheit wird nachfolgend beschrieben. Zum Abschluss werden die durchgeführten Tests und Messungen der entwickelten Elektronik dokumentiert.

Die Integration der entworfenen Elektronikkomponenten in ein Gesamtsystem wird in Kapitel 7 dargelegt. Die implementierten Schnittstellen und Softwarekomponenten zwischen den einzelnen Systembestandteilen werden hier erläutert.

Kapitel 8 beschreibt den Aufbau der Demonstratoren sowie deren Handhabung.

9.2. Fazit

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Die entwickelten Methoden erlauben das Monitoring von Ethernet-Leitungen im Betrieb, ohne in die eigentliche Kommunikation einzugreifen. Dies wurde in Form eines Prototyps implementiert und dessen Tauglichkeit in Laborversuchen nachgewiesen. In den nächsten Schritten wird das System in reale Industrielandschaften integriert und dort evaluiert. Anschließend soll versucht werden, die Konzepte direkt in Ethernet-basierte Feldbus-Geräte zu integrieren.

9.3. Mögliche zukünftige Arbeiten

Die in dem Projekt entwickelten Methoden und deren Implementierungen haben gezeigt, dass eine kontinuierliche und kostengünstige Signalanalyse möglich und realisierbar ist.

Dies wurde auch mit den im Projekt entstandenen Demonstratoren validiert. Um nun diese Methoden auch produktreif zu machen, müssen die einzelnen Bestandteile so integriert werden, dass eine Nutzung z.B. innerhalb Standard-Ethernet PHYs möglich wird. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Methoden entsprechend in Hardware-Modelle überführt werden, so dass eine Chip-Erstellung oder Integration möglich wird. Hierzu sind die Projektpartner bereits in engem Austausch und planen hier weiter zusammen zu arbeiten.

A. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleisteten Arbeiten stehen in direktem Zusammenhang mit der Erreichung der angestrebten Projektziele und sind notwendig und angemessen. Die Richtung und Art sowie der Umfang der Arbeiten wurde während der Treffen des PA mit den Unternehmen abgestimmt.

B. Durchgeführte Transfermaßnahmen

Im Folgenden werden die einzelnen durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer aufgelistet.

B.1. Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden wissenschaftlichen Arbeiten mit direkter Beteiligung der Forschungsstellen veröffentlicht.

- A Cost-Efficient and Continuous Ethernet Cable Diagnosis Technique based on Undersampling, Kallel, Ahmed Yahia and Uziel, Sebastian and Schappacher, Manuel and Sikora, Axel and Keutel, Thomas and Kanoun, Olfa, 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)

B.2. Nichtwissenschaftliche Veröffentlichungen

Neben den im vorigen Abschnitt erwähnten wissenschaftlichen Arbeiten wurde auch eine Reihe von Artikeln mit industriellem oder populärwissenschaftlichem Fokus mit direkter Beteiligung der Forschungsstellen veröffentlicht.

- Überwachen von Ethernet-Kabeln - Kontinuierliche Signalanalyse für Ethernet, Elektronik-Ausgabe 8/2020 "Industrial Transformation"
- Ko²SiBus – Kontinuierliche und kostengünstige Signalanalyse für Ethernet-basierte Bus-Systeme, Jahresbericht IMMS 2019

B.3. Wissenstransfer innerhalb des projektbegleitenden Ausschusses

Während der Projektlaufzeit wurden regelmäßig Treffen des PA abgehalten, bei denen den Teilnehmern der aktuelle Projektstand vorgestellt wurde und intensiv diskutiert werden konnte. Die folgenden Treffen fanden mit Teilnahme von Projektvertretern der Forschungsstellen statt:

- **12. April 2017:** Kickoff-Meeting mit dem PA in Offenburg
- **21. Februar 2018:** Sitzung des PA in Offenburg
- **26. September 2018:** Sitzung des PA in Chemnitz
- **12. März 2019:** Sitzung des PA in Ilmenau
- **06. November 2019:** Sitzung des PA in Frankfurt (wurde abgesagt)
- **23. März 2020:** Abschließende Sitzung des PA als Webkonferenz

Zudem wurden Prototypen innerhalb des PA zur Verfügung gestellt, die aktuell dort getestet und integriert werden.

B.4. Wissenstransfer innerhalb der DFAM

Der Projektfortschritt wurde regelmäßig auf den Frühjahrs- und Herbsttagungen der DFAM vorgestellt. Die folgenden Treffen fanden mit Teilnahme von Projektvertretern der Forschungsstellen statt:

- **18. April 2018:** DFAM-Frühjahrstagung
- **20. September 2018:** DFAM-Herbsttagung
- **10. April 2019:** DFAM-Frühjahrstagung
- **29. September 2019:** DFAM-Herbsttagung

B.5. Wissenstransfer auf Messen

Das Projekt wurde mit Poster und einem Demonstrator auf verschiedenen Messen präsentiert. Hierzu zählen:

- **25. -27. Juni 2019:** Sensor und Test in Nürnberg (Prototyp des Demonstrators)
- **23. -27. Juni 2019:** Science Fair im Rahmen der IWIS 19 (Prototyp des Demonstrators)

C. Weitere Transfermaßnahmen

Die erzielten Ergebnisse sind für eine Reihe weiterer Transfermaßnahmen vorgesehen:

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Wissenstransfer in die Industrie	Ergebnisberichte, Workshops, bilaterale Beratungsgespräche	Workshops	Nach Projektabschluss
Aufbau eines Demonstrators im Rahmen des I4.0 Kompetenzzentrum Ilmenau	Ergebnispräsentation	IMMS	Nach Projektabschluss
Aufbau eines Demonstrators im Rahmen des „Transfermarkt Digitalisierung“ an der HS Offenburg	Ergebnispräsentation	Hochschule Offenburg	Nach Projektabschluss
Vorstellung des Demonstrators und der Lösung im Rahmen einer Stammtisch-Veranstaltung des I4.0 Kompetenzzentrum in Ilmenau	Workshop/ Ergebnispräsentation	Workshops in Ilmenau	Q3 2020
Beantragung/ Durchführung eines Folgeprojekts	Nutzung und Weiterentwicklung der Ergebnisse	-	Nach Projektabschluss

D. Abkürzungsverzeichnis

Abk. Abkürzung

AU Analyzing Unit

CPE Customer Premises Equipment

DSP Digital Signal Processing

GPIO General Purpose In Out

IU Interfacing Unit

Ko²SiBus „Kontinuierliche und kostengünstige Signalüberwachung für industrielle Bussysteme“

LwIP Lightweight IP

MIB Management Information Base

MU Measurement Unit

NE Network Equipment

OID Object Identifier

OPC UA Open Platform Communication Unified Architecture

PA Projekt begleitenden Ausschuss

SNMP Simple Network Management Protocol

TI Texas Instruments

TSDB Time Series Data Base

E. Abbildungsverzeichnis

1.	Genereller Anwendungsfall der kontinuierlichen Signalüberwachung	5
2.	Übersicht der Arbeitspakete innerhalb des Projekts	7
3.	OPC UA Meta Model [9]	14
4.	Anwendungs- und Tätigkeitsfelder der befragten PA Unternehmen (links) und die Tätigkeitsbereiche der jeweiligen Firmenrepräsentanten (rechts) .	16
5.	Monitoring der Empfangssignale an einem CPE	18
6.	Monitoring der Empfangssignale an einem NE	19
7.	Monitoring der Empfangssignale sowohl an einem NE als auch an einem CPE	20
8.	Monitoring der Empfangssignale an einem NE in einem verketteten Netzwerk	20
9.	Kabelstruktur und -modell des Ethernet-Kabels	22
10.	Ein vereinfachtes Schema zur passiven Methode, sowie die wichtigen zu beobachtenden Größen	24
11.	Neuabtastung bei einem resistiven Fehler, die Amplitude beträgt weniger als +1V/-1V	24
12.	Neuabtastung bei einem kapazitiven Fehler, die Stabilitätsperiode beträgt mehr als 4ns	25
13.	TDR auf ein fehlerhaftes Kabel angewendet	26
14.	TFDR auf ein fehlerhaftes Kabel angewendet	26
15.	FDR auf ein fehlerhaftes Kabel angewendet	27
16.	Impulsantwort eines Kabels mit MLT3-Signal	28
17.	Beispiel einer unterabtasteten Sinuswelle [18]	30
18.	MLT3 Signal-Amplitudenverteilung	30
19.	Sortieren der Absolutwertmethode angewendet auf einem Kabel mit Resistivem Fehler	31
20.	Resamplingmethode (Wiederabtastung) angewendet auf einem Kabel mit kapazitivem Fehler	32
21.	Histogrammmethode angewendet auf eineM Kabel mit kapazitivem Fehler	33
22.	Simulation eines fehlerhaften Kabels mit resistivem Fehler auf sortierten Absolutwert (oben), Resampling-Methode (Mitte) und Histogramm (unten), mit ideal, leichtem Fehler in 3 verschiedenen Szenarien: keiner, leichter und schwerer resistiver Fehler	34
23.	Simulation eines fehlerhaften Kabels mit kapazitivem/induktivem Fehler auf sortierten Absolutwert (oben), Resampling-Methode (Mitte) und Histogramm (unten) in 3 verschiedenen Szenarien: keiner, leichter und schwerer kapazitiver Fehler	36
24.	Simulation eines fehlerhaften Kabels mit Reflexion auf sortierten Absolutwert (oben), Resampling-Methode (Mitte) und Histogramm (unten) in 3 verschiedenen Szenarien: keiner, leichter und schwerer Fehler	37
25.	Konzept der Kosibus Elektronik	38
26.	Simulationsergebnisse einer Spitzenwertdetektorschaltung	39

27.	Beispiel für ein ideales MLT 3-Signal	40
28.	MLT 3 Signalübertragung auf einem cat 5 Kabel	40
29.	MLT 3 Signalübertragung mit verringerter Bandbreite	41
30.	Aufbau der Messeinheit	43
31.	Aufbau des Sample & Hold Schaltkreises	44
32.	Schaltplan der Messeinheit	45
33.	Messeinheit	46
34.	Signal vor (gelb) und nach (grün) Sample & Hold Stufe	49
35.	Signalfolge vor (gelb) und nach (grün) Sample & Hold Stufe	49
36.	Ethernet-Signal und aufgenommene Werte ohne Beeinflussung	50
37.	Histogramm ohne Beeinflussung	50
38.	Ethernet-Signal und aufgenommene Werte mit zusätzlicher Kapazität von 47pF	51
39.	Histogramm mit zusätzlicher Kapazität von 47pF	51
40.	Ethernet-Signal und aufgenommene Werte mit zusätzlicher Kapazität von 100pF	52
41.	Histogramm mit zusätzlicher Kapazität von 100pF	52
42.	Aufbau der Gesamtsystemarchitektur	54
43.	Softwarearchitektur der Schnittstelleneinheit	56
44.	Listing der Datenstruktur eines Registerwertes, welcher über verschiedene Anwendungsprotokolle angesprochen werden kann	58
45.	Listing der Initialisierung mehrere Registerzugriffspunkte	58
46.	Ablauf der Schreib- und Leseoperationen auf der Registerschnittstelle zwischen der Schnittstelleneinheit und der Analyseeinheit	59
47.	Aufbau des Integrationsdemonstrators	65
48.	Disturbance-Board des IMMS	67
49.	Systematischer Aufbau des Messedemonstrator Gesamtsystems	68
50.	Systematischer Aufbau des Analysegeräts	69
51.	Gehäuseintegration des Analysegeräts	69
52.	Node-Red-Flow im IoT-Backend	70
53.	Beispielhafte Visualisierung der Messwerte durch den Messedemonstrator	72

F. Tabellenverzeichnis

1.	Übersicht der ermittelten Kable-Qualitätsparameter der Messszenarien	53
2.	Registerbeschreibung: Liste der verfügbaren Register	60
3.	Registerbeschreibung: Activity (Adresse 0x00, 0x05)	61
4.	Registerbeschreibung: Clarity (Adresse 0x01, 0x06)	61
5.	Registerbeschreibung: Asymmetry (Adresse 0x02, 0x07)	62
6.	Registerbeschreibung: Amplitude (Adresse 0x03, 0x08)	62
7.	Registerbeschreibung: Symbol-Distribution (Adresse 0x04, 0x09)	62
8.	Registerbeschreibung: Interrupt Status (Adresse 0x0A)	63
9.	Registerbeschreibung: Interrupt Enable (Adresse 0x0B)	63

Literatur

- [1] D. F. für Automatisierung und Mikroelektronik e.V. DFAM, "Instandhaltungstaugliches messgerät," Tech. Rep. Nr. 10/2015, 2015.
- [2] T. Instruments, *DP83867IR/CR Robust, High Immunity 10/100/1000 Ethernet Physical Layer Transceiver*.
- [3] T. Instruments, *AN-1508 DP83849 Cable Diagnostics*.
- [4] N. Semiconductor, *DP83849 Cable Diagnostics*.
- [5] J. C. e. a. J. Schonfeld, O. Gruelich, "Wire integrity research (wire) pilot study," tech. rep., NASA AMES Research Center, August 2000.
- [6] J. B. H. et al, "Facilities engineering – electrical exterior facilities, , technical manual 5-684," tech. rep., NAVFAC MO-200, AFJMAN 32-1082, Departments of the Army, Navy, and the Air Force, Washington D.C., 1996.
- [7] C. M. F. Y. C. Chung, N. N. Amarnath, "Capacitance and inductance sensor circuits for detecting the lengths of open- and short-circuited wires," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58 (8), no. 8, pp. 2459–2502, 2009.
- [8] O. Foundation, "Opc unified architecture specification part 1: Overview and concepts, release 1.03," tech. rep., 2015.
- [9] O. Foundation, "Opc unified architecture specification part 3: Address space model, release 1.03," tech. rep., 2015.
- [10] "Ieee standards for local and metropolitan area networks: Supplement - media access control (mac) parameters, physical layer, medium attachment units, and repeater for 100mb/s operation, type 100base-t (clauses 21-30)," *IEEE Std 802.3u-1995 (Supplement to ISO/IEC 8802-3: 1993; ANSI/IEEE Std 802.3, 1993 Edition)*, pp. 1–415, Oct 1995.

- [11] Q. Shi and O. Kanoun, "Wire fault diagnosis in the frequency domain by impedance spectroscopy," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 8, pp. 2179–2187, 2015.
- [12] Q. Shi and O. Kanoun, "A new algorithm for wire fault location using time-domain reflectometry," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 1171–1178, 2013.
- [13] H. Riege, "High-frequency and pulse response of coaxial transmission cables with conductor, dielectric and semiconductor losses," tech. rep., CERN, 1970.
- [14] E.-S. Cho, J.-s. Shim, H.-S. Park, J.-W. Lee, J.-h. Lee, and E.-J. Ryu, "Method and apparatus for measuring signal quality using eye pattern," Jan. 29 2008. US Patent 7,324,903.
- [15] A. S. Tanenbaum, "Network protocols," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 13, no. 4, pp. 131–132, 1981.
- [16] R. Munjal, F. Wendler, and O. Kanoun, "Impedance measurement system for bioimpdance spectroscopy using under sampling," in *International Workshop on Impedance Spectroscopy*, pp. 8–10, 2016.
- [17] A. J. Silva, "Reconstruction of undersampled periodic signals," pp. 5–12, Massachusetts Institute of Technology, Research Laboratory of Electronics, 1986.
- [18] A. Y. Kallel, S. Uziel, M. Schappacher, A. Sikora, T. Keutel, and O. Kanoun, "A cost-efficient and continuous ethernet cable diagnosis technique based on undersampling," in *2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, vol. 2, pp. 695–700, IEEE, 2019.