

Erprobung: Digitale Automatische Kupplung

Phase II

Prüfbericht Datenkommunikation

Abschlussbericht

DAK-Dokument: 60226-06-DAK-Phase II – Prüfbericht
Datenkommunikation

Auftraggeber: DB Systemtechnik GmbH

Datum: 17.05.2023

Ansprechpartner:


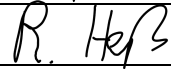
Prof. Dr.-Ing. Stefan Witte Email: Stefan.Witte@owita.com Telefon: 05261/702 5763

Roland Heß, Dipl.-Ing. Email: Roland.Hess@owita.com Telefon: 05261/28896-15

Änderungsverzeichnis

Version	Autor	Änderungen	Datum
0.4	RH/WT/NF	Erstellung des Dokuments, Entwurfsversion	15.02.2023
0.5	RH	Redaktionelle Korrekturen	22.03.2023
1.0	RH/WT	Endfassung	17.05.2023

Dokumenten-Abnahme

Version		Datum	Unterschrift
1.0	Stefan Witte	24.05.23	
	Roland Heß	24.05.23	

Inhaltsverzeichnis

1	Messtechnik Datenkommunikation.....	6
1.1	Leitungen und Komponenten des Testsystems	6
1.1.1	Hardwareaufbau im Testsystem	7
1.1.2	Aufbau der verschiedenen Kommunikationsnetze	10
1.1.3	Aufbau der Testsoftware	11
1.1.4	Communication Test und Test der Verfügbarkeit	12
1.1.5	Bestimmung von Anzahl, Reihenfolge und Ausrichtung der Wagen.....	13
1.2	Testaufbau zur Messung der Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme	15
1.2.1	SPE und WiFi	15
2	Beschreibung von Wagen und Wagengruppen	16
3	Nach- und Stresstests im Stillstand	18
3.1	Single Pair Ethernet	18
3.1.1	Performance Messungen	18
3.1.2	Messung der Kommunikationsdistanz ohne Repeater.....	19
3.1.3	Überbrückung einer intakten Kupplung	19
3.1.4	Einfügen einer Stub Leitung.....	20
3.2	Powerline Kommunikationsdistanz.....	20
3.3	Untersuchung von WiFi Kommunikationsproblemen.....	22
4	Kommunikationstests und Betriebserprobung in Streckenfahrten	24
4.1	Messfahrten Kommunikation.....	25
4.1.1	Messfahrt Rankweil – Langen am Arlberg	25
4.1.2	Messfahrt Langen am Arlberg – Selzthal	26
4.1.3	Messfahrt Selzthal – Eisenerz - Gstatterboden	26
4.1.4	Messfahrt Selzthal – Niklasdorf	28
4.1.5	Messfahrt Niklasdorf – Wien	28
4.1.6	Messfahrt Goldau – Biasca – Limmattal	29
4.1.7	Messfahrt Limmattal – Biasca – Basel	32
4.1.8	Messfahrt Basel – Minden	35
4.1.9	Messfahrt Nürnberg – Minden	36
4.2	Zusammenfassung der Messfahrten zum Test der Datenkommunikation	37
4.2.1	WiFi-Kommunikation	37
4.2.2	Powerline-PLUS.....	38
4.2.3	Single-Pair-Ethernet.....	39
5	Evaluierung von Kontaktunterbrechungen in Streckenfahrten.....	41
5.1	Evaluierung von Kontaktunterbrechungen mit Logikanalysator (Messfahrten in Tschechien).....	41
5.2	Evaluierung von Kontaktunterbrechungen mit Oszilloskop	43
5.2.1	Messfahrt Kassel – Bebra.....	43

5.2.2	Minden – Saarbrücken	43
5.2.3	Messfahrten Minden – Heessen – Minden	45
5.2.4	Messfahrt Minden – Bebra	47
5.2.5	Messfahrt Bebra – Lichtenfels	48
5.2.6	Pendelfahrt Lichtenfels – Probstzella – Lichtenfels	48
5.2.7	Messfahrt Lichtenfels – Mannheim	50
5.3	Zusammenfassung und Ausblick	53
6	Literaturverzeichnis	56

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1:	INSTALLATIONEN IN DEN WAGEN	7
ABBILDUNG 2:	STRUKTURELLER AUFBAU DES TESTSYSTEMS IN DER WAGENBOX	8
ABBILDUNG 3:	STRUKTURELLER AUFBAU DES ENERGIE- UND KOMMUNIKATIONSSYSTEMS IM MESSWAGEN	9
ABBILDUNG 4:	NETZWERKAUFBAU/KONFIGURATION INNERHALB DER WAGEN	10
ABBILDUNG 5:	TRENNUNG DER NETZWERKE DURCH IP-SUBNETZE UND VLANS	11
ABBILDUNG 6:	STRUKTURELLER AUFBAU DER KOMMUNIKATION	11
ABBILDUNG 7:	KOMMUNIKATIONSMODELL IM VERSUCHSAUFBAU	12
ABBILDUNG 8:	MESSUNG DER VERFÜGBARKEIT/TRAIN INTEGRITY MITTEL ICMP-PAKETEN	13
ABBILDUNG 9:	SORTIERUNG DER REIHENFOLGE ANHAND DER LEISTUNGSMESSUNG	14
ABBILDUNG 10:	PERFORMANCE MESSUNGEN MIT SPE	18
ABBILDUNG 11:	SPE-KOMMUNIKATIONSTEST ÜBER DURCHGEHENDE LEITUNG	19
ABBILDUNG 12:	TEST DER POWERLINE-PLUS FORWARD DISTANCE IN EINER WAGENGRUPPE	21
ABBILDUNG 13:	TEST MIT DUMMY-WAGEN	21
ABBILDUNG 14:	EMPFANGSLEISTUNG AM WIFI-ACCESSPOINT (GEMESSEN MIT WIFI-ACCESSPOINT)	22
ABBILDUNG 15:	MESSUNG DER WIFI-EMPFANGSLEISTUNG ÜBER VERSCHIEDENE KUPPLUNGSVERBINDUNGEN	23
ABBILDUNG 16:	EVENTHÄUFIGKEIT DER KOMMUNIKATIONSUNTERBRECHUNGEN VON GOLDA NACH BIASCA	30
ABBILDUNG 17:	ÜBERWACHUNG VON KONTAKTEN MIT LOGIKANALYSATOR (1)	41
ABBILDUNG 18:	STÖRUNGEN MIT BURST-PULSEN	42
ABBILDUNG 19:	STÖRUNGEN MIT BURST-PULSEN (ZOOM)	42
ABBILDUNG 20:	AUSSCHNITT EINER KONTAKTUNTERBRECHUNG (ZWEIDRAHTLEITUNG 1, WG. 2 ZU WG. 6)	42
ABBILDUNG 21:	ÜBERWACHUNG VON KONTAKTEN MIT LOGIKANALYSATOR (2)	43
ABBILDUNG 22:	VERSUCHSAUFBAU MESSFAHRT MINDEN - SAARBRÜCKEN	44
ABBILDUNG 23:	AUFZEICHNUNG VON STÖRUNGEN AUF DER STROMLEITUNG	45
ABBILDUNG 24:	ZOOM DER STÖRUNGEN AUF DER STROMLEITUNG	45
ABBILDUNG 25:	MESSSYSTEM MIT WIDERSTANDSNETZWERK	45
ABBILDUNG 26:	MESSUNG EINER KONTAKTUNTERBRECHUNG EINER BEKANNT DEFEKTEN KUPPLUNGSSTELLE	46
ABBILDUNG 27:	STÖRUNGEN AUF DER DURCHGEHENDEN ZWEIDRAHTLEITUNG	46
ABBILDUNG 28:	POWERLINE-PLUS MIT LANGEM SEGMENT ZWISCHEN MASTER UND REPEATER-SLAVE	47
ABBILDUNG 29:	AUFBAU DER MESSUNG DURCH EINE WAGENGRUPPE	48
ABBILDUNG 30:	AUFBAU DER MESSUNGEN IN DER MESSFAHRT LICHTENFELS – PROBSTZELLA – LICHTENFELS	49
ABBILDUNG 31:	MESSERGEBNIS DER ZWEITEN WAGENGRUPPE	49
ABBILDUNG 32:	AUFBAU DER MESSUNGEN IN DER MESSFAHRT LICHTENFELS – MANNHEIM	50
ABBILDUNG 33:	EINBRUCH DER SPANNUNG AUF DER STROMLEITUNG DURCH KONTAKTUNTERBRECHUNG	51
ABBILDUNG 34:	STÖRUNGEN AUF DER ZWEIDRAHTLEITUNG ZUM ZEITPUNKT DER POWERLINE-PLUS-UNTERBRECHUNG	52
ABBILDUNG 35:	STÖRUNGEN VOR DER KONTAKTUNTERBRECHUNG	52
ABBILDUNG 36:	EINFLUSS DER KONTAKTUNTERBRECHUNG AUF ZYKLISCHE KOMMUNIKATION BEIM POWERLINE-PLUS	53

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Auto Carriage Connection
AK	Automatische Kupplung (ohne Elektro-Kupplung)
CAN	Controller Area Network
DAK	Digitale Automatische Kupplung
EDDP	European Dac Delivery Programme
FEC	Forward Error Correction
FPS	Frames per second
ICMP	Internet Control Message Protocol
IPC	Industrial PC
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OPC UA	Open Platform Communication/Unified Architecture
PLC	Powerline Communication
RTT	Round Trip Time
SGV	Schienengüterverkehr
SNR	Signal to noise ratio
SPE	Single-Pair-Ethernet (IEEE 802.3cg/10Base-T1L)
TCP	Transmission Control Protocol
TRDP	Train Realtime Data Protocol
TTD	Train Topology Detection (Powerline-PLUS)
TTDP	Train Topology Discovery Protocol
UDP	User Datagram Protocol
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VLAN	Virtual Local Area Network

1 Messtechnik Datenkommunikation

In der Phase II des Projekts erfolgte vorrangig die Evaluierung der Kommunikationssysteme in Betriebsszenarien. Hierzu wurden folgende Gruppen von Tests durchgeführt:

- Nachweis von Betriebsfunktionen über die Kommunikationssysteme,
- Messungen zur Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme.

Nach Zwischenergebnissen konnten Probleme von Kommunikationssystemen auf vereinzelte Kontaktabbrüche in den Elektrokupplungen zurückgeführt werden. Um die Zuverlässigkeit von Kontakten untersuchen zu können, wurde zusätzliche Messtechnik aufgebaut:

- Messung von Kontaktunterbrechungen mittels Logikanalysator,
- Messung von Kontaktunterbrechungen und Störungen auf der Leitung mittels Oszilloskop.

1.1 Leitungen und Komponenten des Testsystems

Der Aufbau des Testsystems wurde im Vergleich zum System in Phase I (Messungen im statischen Zustand), teilweise geändert.

- 1) Nach Entscheidung der EDDP-Gruppe¹, Single-Pair-Ethernet (SPE) als Zweidrahtkommunikationssystem auf die Short-List zu setzen, wurde für die Phase II im DAC4EU-Projekt der Austausch des vorhandenen CAN-FD-Kommunikationssystems gegen SPE vorgenommen. Die Leitungsinstallation wurde nicht verändert.
- 2) Es wurde weiterhin entschieden, in der Phase IIa (bis Juni 2022) zunächst drei Kommunikationssysteme (Powerline-PLUS, WiFi und SPE) parallel in Streckenfahrten zu evaluieren. Da mit WiFi und SPE zwei Ethernet-basierte Technologien parallel betrieben werden sollten, musste das Ethernet-Switch zur Trennung der Netzwerke durch ein VLAN-fähiges Switch (IEEE 802.1Q) ersetzt werden. In der Phase IIb wurde WiFi nicht weiter getestet.
- 3) Es wurde eine zusätzliche Kommunikationssystemausrüstung in einem Messwagen installiert. Dieses dient der Simulation der Lok während der Erprobung. Der Kommunikationssystemaufbau ist in den wesentlichen Bestandteilen identisch zu den auf den Wagen verbauten Systemen. Im System des Messwagens konnte im Unterschied zu den Güterwagen auf USV und Batterie verzichtet werden.

¹ EDDP (European Dac Delivery Programme) WP1 SG3 (Communication Technology)

1.1.1 Hardwareaufbau im Testsystem

Der Aufbau der Wagen wurde für die Phase II nicht grundlegend geändert. Die Installationen der Kabel, Wagenbox und Anschlussbox wurden beibehalten. Bei den Wagen in Phase IIb wurden die beiden Zweidrahtleitungen aufgrund der Verfügbarkeit des zuvor verwendeten Kabeltyps als kombinierte Leitung verlegt ($2 \times 2 \times 0,5 \text{ mm}^2$). Der Schirm der Kommunikationsleitungen ist bei keinem Wagen mit dem Wagenpotential verbunden. Die Position der Wagenbox unterscheidet sich je nach Wagentyp. Grundsätzlich wurde die Wagenbox als Schaltschrank an einem Wagenende montiert. Bei den Container-Tragwagen (Sgmmns) und den modularen Wagen (m^2 -Wagen, Uas) wurden die Wagenboxen etwa in der Mitte des Wagens montiert. Die Kupplungsleitungen wurden in eine Kupplungsanschlussbox geführt und auf entsprechende Klemmen aufgelegt. Dies war notwendig, um beliebige Kupplungstypen in gleicher Weise mit dem Wagen verbinden zu können. Grundsätzlich sollte in Zukunft eine definierte (und standardisierte) Steckverbindung zwischen Kupplung und Wagen bestehen.

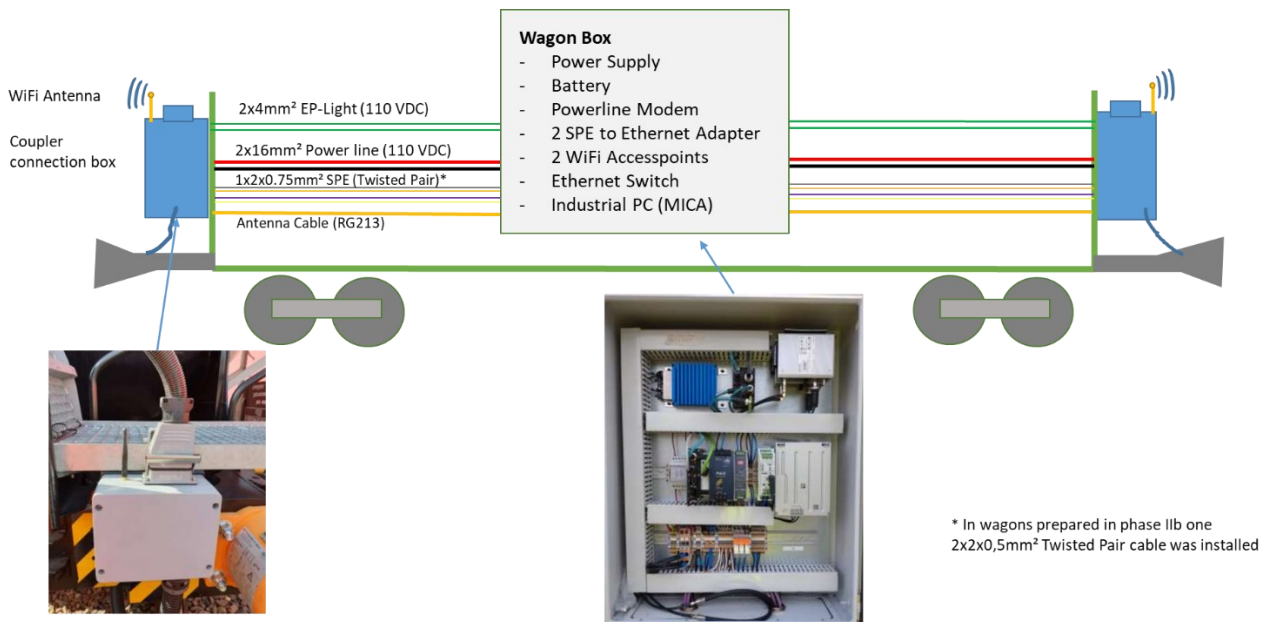


Abbildung 1: Installationen in den Wagen

Neben den Kommunikations- und Energieleitungen ($110 \text{ V}_{\text{DC}}$ und EP-Bremse) wurde auch ein Antennenkabel (Kabeltyp RG213) von der Wagenbox zu jeder Kupplungsanschlussbox verlegt, um eine Funkverbindung über den Berner Raum zu realisieren. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass die HF-Verbindungen regelmäßig überprüft werden müssen, da Vibrationen in einigen Fällen zu losen Verbindungen geführt haben. Praxistaugliche HF-Kabelverbindungen für den Güterverkehr herzustellen ist aufwändig und sollte daher vermieden werden.

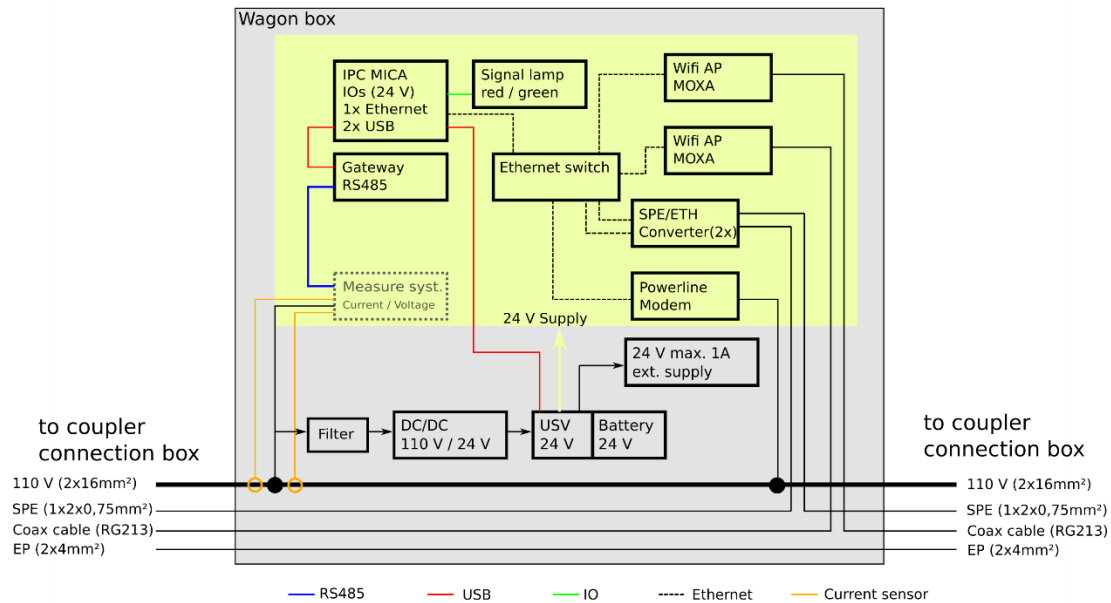


Abbildung 2: Struktureller Aufbau des Testsystems in der Wagenbox

Im Testsystem der DAC4EU Phase IIa sind drei Kommunikationssysteme integriert (siehe Abbildung 2). Die Steuerung der Kommunikationssysteme und die Verwaltung wagenspezifischer Parameter erfolgen durch den Industrie-PC (IPC, MICA). Alle Kommunikationskomponenten sind intern via Ethernet durch ein Managed Ethernet Switch verbunden. Das Ethernet-Switch stellt zum einen die Konnektivität der Wagenkomponenten her, und dient zum anderen beim SPE- und WiFi-Kommunikationssystem zusätzlich zur Durchleitung der Zugkommunikation. Bei Wagen, die an der Phase IIa beteiligt waren, wurde das Ethernet-Switch durch ein Managed Switch mit VLAN-Funktionalität ersetzt (Modell FL Switch 2608, Phoenix Contact).

Zur Anbindung von SPE wurde ein Medienkonverter genutzt (Funktionsmuster der OWITA GmbH). Dieser setzt den 10 Mbit/s SPE Physical-Layer auf 10Base-T Ethernet um. Die SPE-Signalleitungen (SPE+ und SPE-) wurden in allen Wagen mit der Zweidrahtleitung 1 verbunden.

Das Powerline-PLUS Modem wurde direkt mit der 110-V_{DC}-Stromleitung verbunden. Diese Verbindung dient nur der Kommunikation, da die Spannungsversorgung des Modems durch die 24-V_{DC}-Anbindung über das 24-V-Boardnetz sichergestellt wird. Zusätzlich besteht eine Ethernet-Verbindung an das Managed Ethernet Switch.

Zur WiFi-Kommunikation wurde ein MOXA-Accesspoint (Modell AWK-3131A) eingesetzt. Dieses Gerät besitzt einen speziellen ACC-(Auto Carriage Connection)-Modus, welcher ein automatisches Aushandeln von AP-/Client-Rollen zwischen den Wagen realisiert. Zum Ende der Phase IIa wurde das WiFi-Kommunikationssystem nicht weiter getestet und die WiFi-Accesspoints daher abgeschaltet.

Weiterhin wurde in jedem Wagen ein Filter installiert, welches zwischen dem DC/DC-Wandler (110 V_{DC} zu 24 V_{DC}) und der 110-V_{DC}-Stromleitung installiert wurde. Das Filter wurde von der plc-tec AG bereitgestellt, um die durch die Schaltnetzteile verursachten Störungen der Powerline-PLUS

Kommunikation zu filtern. Zwischen dem Netzteil und dem 24-V_{DC}-Boardnetz wurde eine USV mit Lithium-Batterie installiert (Modelle QUINT UPS 24DC/24DC/20 und UPS-BAT/LION/24DC/120WH, Phoenix Contact). Die USV dient der Versorgung der Messtechnik bei Ausfall der 110-V_{DC}-Spannungsversorgung während der Fahrten.

Weiterhin wurde eine Signalleuchte an der Wagenbox angebracht, welche den Einschaltzustand der 110-V_{DC}-Versorgung abbildet. Die Signalleuchte leuchtet bei eingeschalteter Versorgungsspannung rot.

Der Aufbau des Systems im Messwagen ist ähnlich zum Aufbau in den übrigen Wagen. Der Unterschied besteht im Wesentlichen in der Versorgung (230 V_{AC} anstatt 110 V_{DC}) und darin, dass keine USV im Messwagen benötigt wird. Weiterhin sind im Messwagen Sicherungseinrichtungen für die Energieversorgung vorhanden. Diese bestehen aus einem Leitungsschutzschalter für die 110-V_{DC}-Versorgung der Wagen und einem Isolationswächter (Modell IsoRw425, Fa. Bender), welcher den Isolationswert des IT-Netzes (110 V_{DC}) überwacht.

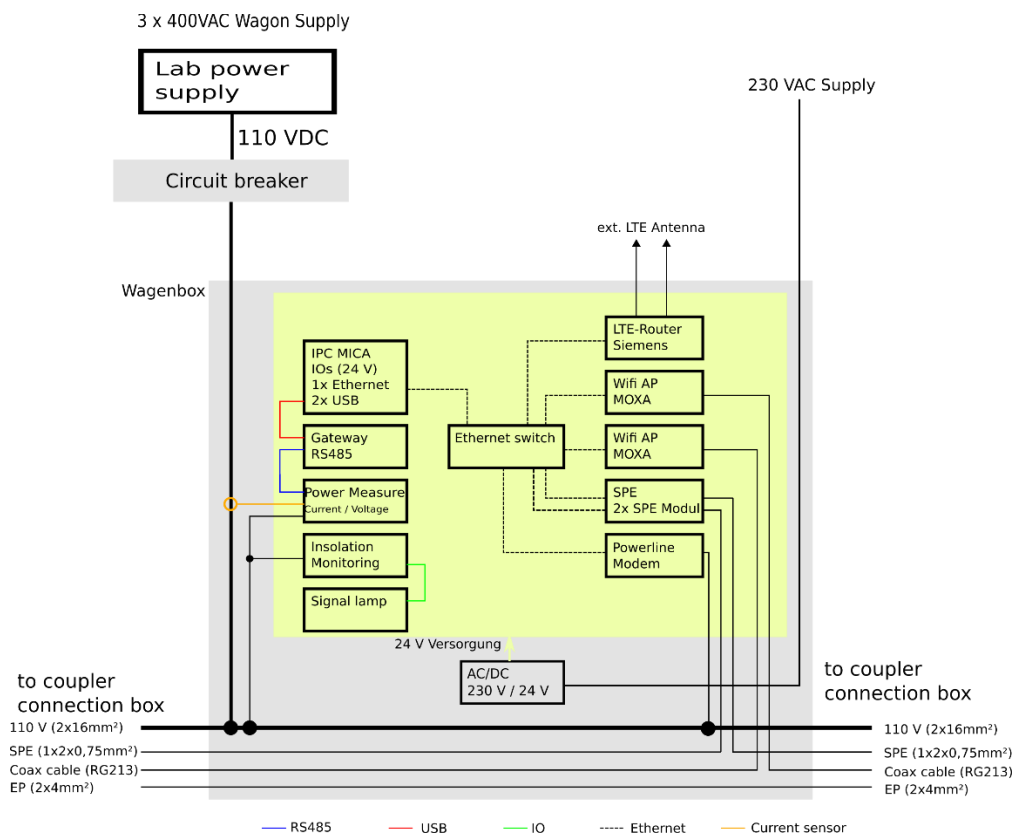


Abbildung 3: Struktureller Aufbau des Energie- und Kommunikationssystems im Messwagen

Der Isolationswächter misst den Isolationswiderstand des Zugversorgungssystems gegen den geerdeten Wagenkasten und signalisiert über einen Signalausgang den unkritischen Zustand über einen grünen Leuchtmelder. Die Signalschwelle liegt bei 40 kOhm. Bei einem kleineren Isolationswert eines Leiters der Stromleitung gegenüber der Wagenmasse bzw. dem Schienenpotential wird die grüne Leuchte automatisch abgeschaltet.

Die 110-V_{DC}-Versorgungsspannung, die am Messwagen in den Zug eingespeist wird um die Wagen zu versorgen wurde durch ein Labornetzgerät der Fa. Elektro Automatik realisiert, welches die geforderten 30 A zur Erreichung der 3 kW bereitstellen kann. Der maximale Ausgangsstrom wurde bei dem Labornetzteil auf 32 A eingestellt, da sich beim Einschalten des Zuges mit 19 Wagen bereits gezeigt hat, dass die Schaltnetzteile in den Wagen durch gleichzeitiges Einschalten einen hohen Strom verursachen. Das Labornetzteil begrenzt im Gegensatz zu einem Industrienetzteil den Strom auf den eingestellten und Wert und lässt keinen kurzzeitigen Überstrom zu.

1.1.2 Aufbau der verschiedenen Kommunikationsnetze

In jedem Wagen sind die Kommunikationskomponenten über ein Managed Ethernet Switch verbunden. Die Trennung der einzelnen Kommunikationssysteme (WiFi, SPE) erfolgt über eine VLAN-Konfiguration und ist ausschließlich zum parallelen Betrieb der Kommunikationssysteme ohne gegenseitige Beeinflussung notwendig (Abbildung 4).

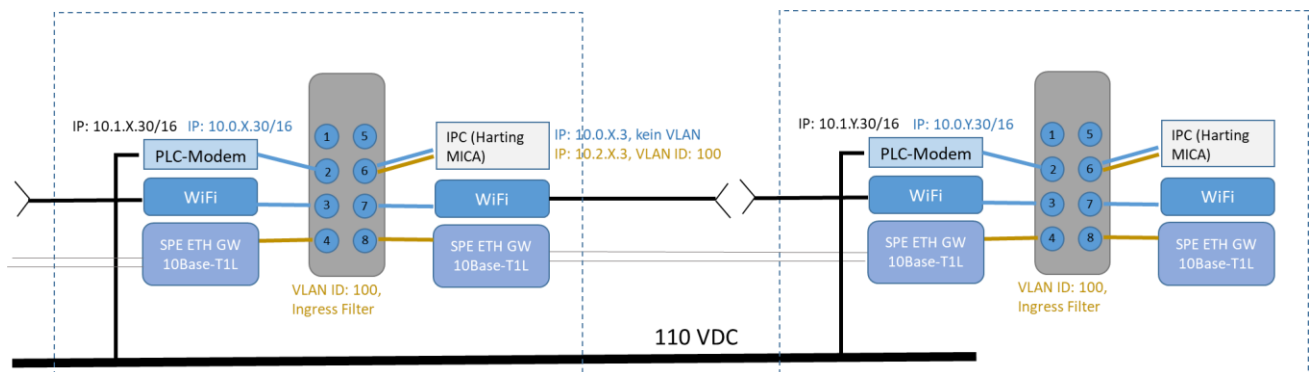


Abbildung 4: Netzwerkaufbau/Konfiguration innerhalb der Wagen

Zur Trennung sind jeweils die Ports 3 und 7 des Ethernet-Switches für das WiFi-System, und die Ports 4 und 8 für das SPE-System reserviert. Die SPE-Ports sind in den Ethernet-Switches so konfiguriert, dass eine Kommunikation ausschließlich mit VLAN ID 100 funktioniert (Aktivierung des Ingress-Filters). In der VLAN-Gruppe 100 befindet sich noch der Port 6, an den die MICA angeschlossen ist. Dadurch kann von der MICA auf die Ports 4 und 8 unter Nutzung der VLAN ID 100 zugegriffen werden. Hierzu sind in der MICA zwei IP-Adressen konfiguriert, die IP-Adressen $10.0.<Wagennummer>.3/16$ und die IP-Adresse $10.2.<Wagennummer>.3/16$ mit VLAN-ID 100. Wird eine Kommunikation vom Messwagen zu einem anderen Wagen aufgebaut, so kann über die Wahl der IP-Adresse das Kommunikationssystem bestimmt werden. Dieses gilt für WiFi und SPE. Die Kommunikation über Powerline-PLUS läuft hiervon separat. Die Daten zur Initialisierung und Verfügbarkeit werden vom Powerline-PLUS-Modem ermittelt und nur zur Darstellung und Speicherung an die MICA übertragen. Zur Trennung des Powerline-PLUS-Netzwerkes von den anderen Netzwerken ist in den Powerline-PLUS-Modems für das Netzwerk-Interface ein separates Subnetz definiert. Routing zwischen dem wageninternen Netzwerk und dem Powerline-PLUS-Netzwerk ist im Powerline-PLUS-Modem abgeschaltet.

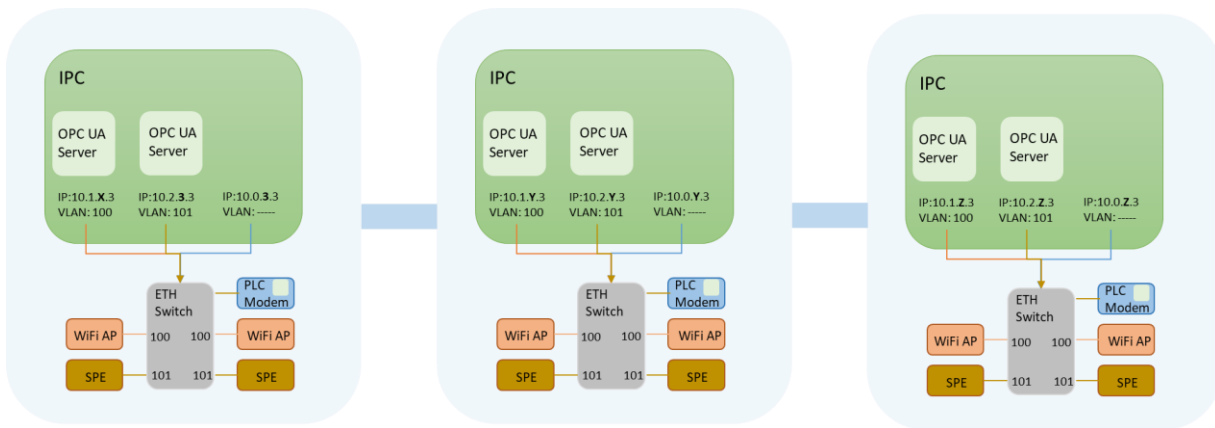


Abbildung 5: Trennung der Netzwerke durch IP-Subnetze und VLANs

1.1.3 Aufbau der Testsoftware

Die Umsetzung der Testfunktionen ist teilweise von den Kommunikationssystemen abhängig. Hierzu wurde ein Konzept zur Kommunikation in einer Vorstudie erstellt [1]. Die umgesetzten Funktionen zum Test der Betriebsfunktionen orientieren sich an dem Kommunikationsmodell (Abbildung 6). Es handelt sich grundsätzlich um drei Ebenen: Eine hardwarenahe Komponente (Modem/GW), ein Technologie-Adapter und eine Applikationsebene zur Anbindung von Services.

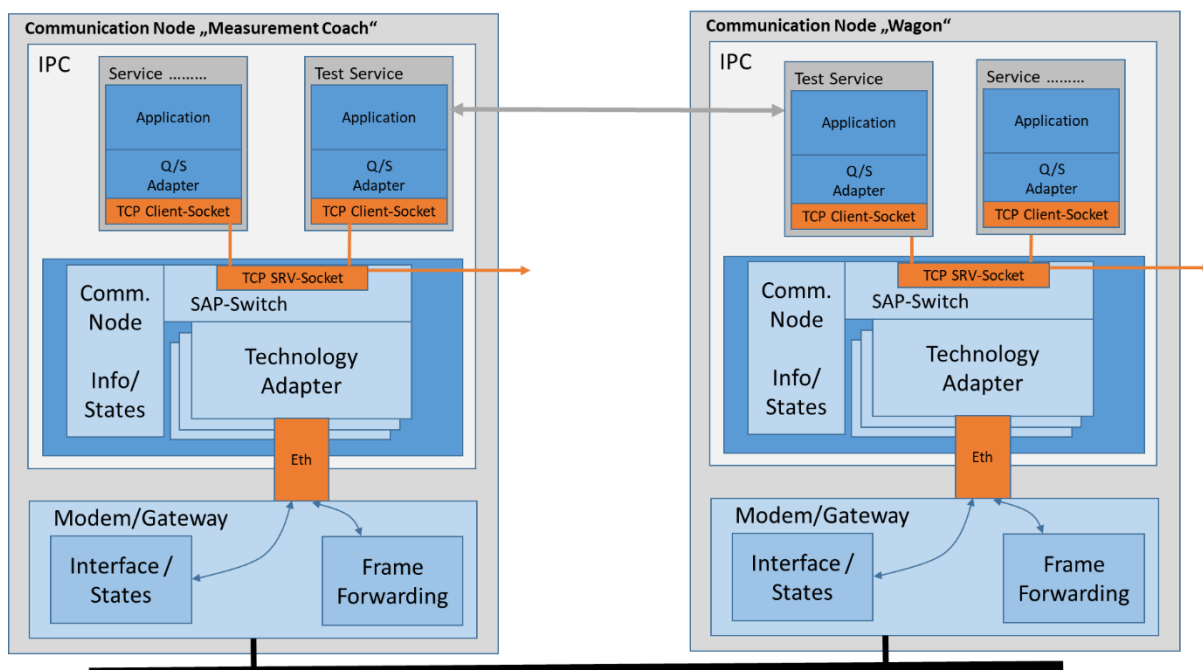


Abbildung 6: Struktureller Aufbau der Kommunikation

Die unterste Schicht als Anbindung zum spezifischen Kommunikationssystem in Form von Modems und Gateways/Konvertern ist durch die entsprechenden Hardwarekomponenten vorgegeben.

Als Vermittlungsschicht, die das jeweilige Kommunikationssystem versteht, sowie die Initialisierung des Kommunikationssystems und die Zuginitialisierung organisiert, dient der Technologieadapter.

Dieser beinhaltet ein Service-Accesspoint-Switch (SAP-Switch), welches eine einheitliche Schnittstelle für Services bereitstellt, die über das Kommunikationssystem Daten austauschen möchten. Als Basistechnologie ist hierfür OPC UA [2] ausgewählt worden. Als zukünftige Technologie wird hier voraussichtlich TRDP (Train Real Time Data Protocol, IEC 61375-2-3) genutzt werden.

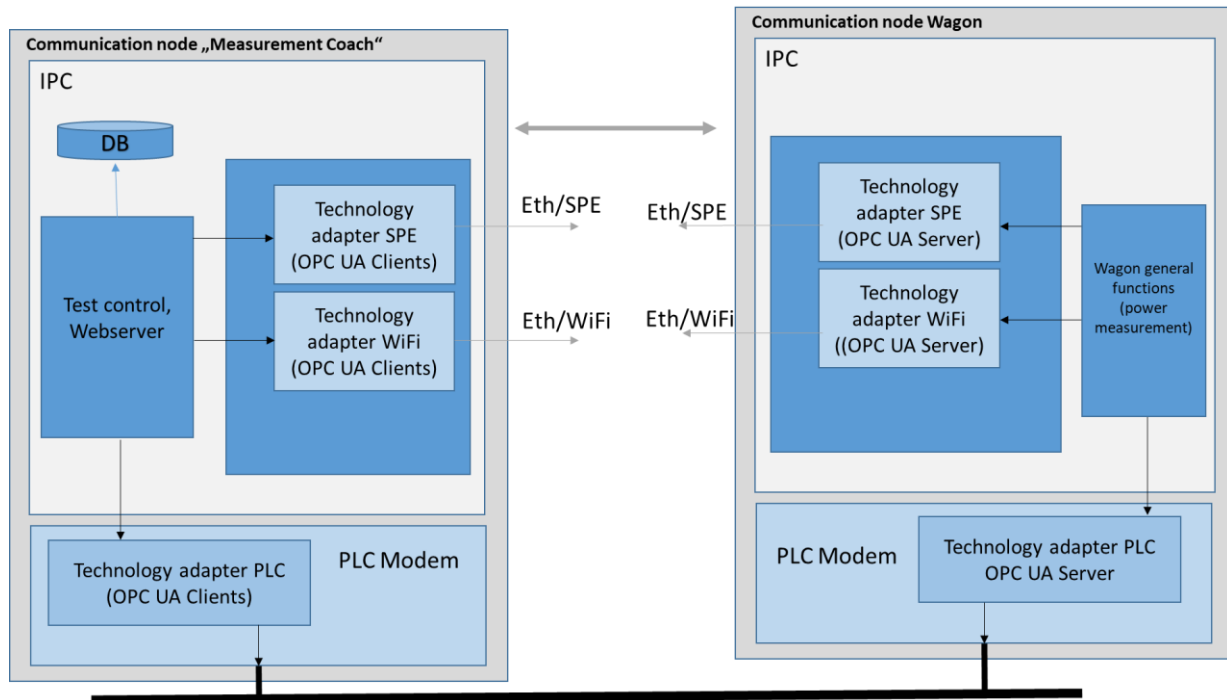


Abbildung 7: Kommunikationsmodell im Versuchsaufbau

Der Technologieadapter für WiFi und SPE befindet sich vollständig im IPC (MICA). Der Technologieadapter für das Powerline-PLUS-System wurde im Powerline-PLUS-Modem integriert. Zur Realisierung des Technologieadapters wurde ein OPC-UA-Server in den Wagen installiert. Im OPC-UA-Server wurden entsprechende OPC-UA-Nodes angelegt, die den Wagenstatus abbilden. Im Messwagen wurden der Technologieadapter durch OPC-UA-Clients realisiert. Für jeden identifizierten Wagen wurde eine Client-Instanz zur direkten Kommunikation mit dem Wagen angelegt.

1.1.4 Communication Test und Test der Verfügbarkeit

Bei der Initialisierung des Zuges erfolgt die Erkennung der Reihenfolge. Ist die Reihenfolge bestimmt, wird über einen zyklischen Mechanismus im Intervall von 100 ms ein ICMP-Ping-Request-Paket (Ping) an den IPC des letzten Wagens, bzw. bei Powerline-PLUS an das letzte Powerline-PLUS-Modem im Wagenverbund zur Feststellung der Verfügbarkeit gesendet. Die Messung der Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme wird gleichzeitig als Funktion zur Integritätsprüfung genutzt. Das gesendete ICMP-Paket wird vom TCP/IP-Stack automatisch mit einem Reply beantwortet. Der Empfang der Antwort wird im Messwagen registriert. Jedes ICMP-Ping-Request-

Paket erhält zudem eine eindeutige ID, sodass ein doppeltes Antwortpaket erkannt werden kann. Es werden die folgenden Parameter im Intervall von 1000 ms erfasst:

- Gesendete ICMP-Pakete,
- Empfangene ICMP-Pakete,
- Verloren gegangene Pakete,
- Messung der Round-Trip-Time (RTT): Maximale und mittlere RTT im Messzeitraum,
- Fehlercounter, wenn länger als 1000 ms keine Antwort empfangen wurde.

Die Generierung des ICMP-Pakets ist Teil des Technologie-Adapters im Messwagen.

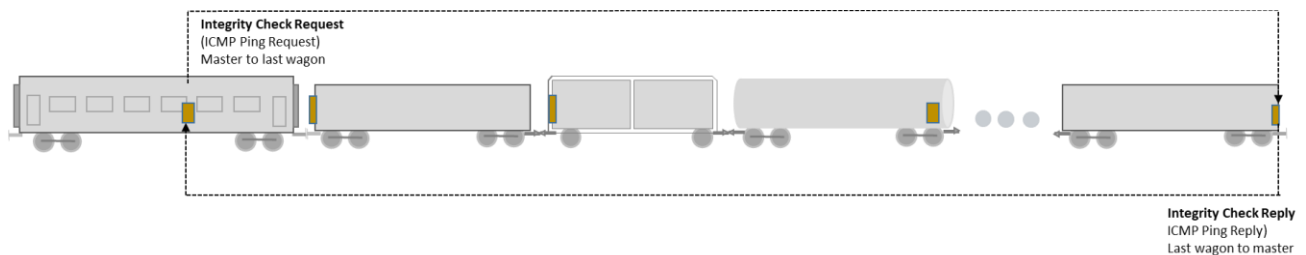


Abbildung 8: Messung der Verfügbarkeit/Train Integrity mittel ICMP-Paketen

Nachdem beim SPE-Kommunikationssystem während der Messfahrten eine zunehmend höhere Anzahl von Paketfehlern identifiziert wurde, musste das Testsystem erweitert werden. In der Erweiterung erfolgte eine separate ICMP-Ping-Kommunikation vom Messwagen zu jedem einzelnen folgenden Wagen, sowie eine ICMP-Ping-Kommunikation vom letzten Wagen zu jedem einzelnen Wagen bis zum Messwagen. Durch diesen Mechanismus lassen sich bis zu zwei gleichzeitige Unterbrechungen der Kommunikation (Kontakte/Leitung) identifizieren und lokalisieren.

Beim Powerline-PLUS-System wurden zwei Mechanismen zur Identifikation der Verfügbarkeit der Kommunikation genutzt. Es wurde zum einen eine Layer-2-basierte integrierte Funktion des Systems genutzt. Beim Powerline-PLUS-System werden Nachrichten, welche durch den Master initiiert sind („Ping“), durch den letzten Wagen wieder zurück an den Master gespiegelt („Pong“). Durch das Ausbleiben der „Pong“- Nachrichten wird nach einer definierten Zeit von einigen 100 ms ein Integritätsevent angezeigt.

Zum anderen wurde die oben beschriebene Funktion mittels ICMP-Ping-Paketen, welche auch für SPE und WiFi genutzt wurde, parallel betrieben.

1.1.5 Bestimmung von Anzahl, Reihenfolge und Ausrichtung der Wagen

Beim Powerline-PLUS wird die Reihenfolge der Wagen anhand der Signallaufzeiten bestimmt. Nach erfolgreicher Durchführung des TTD-Prozesses (Train Topology Detection) kann die erkannte Topologie aus dem System mittels Script ausgelesen werden. Das Ergebnis der Detektion wurde zur Verifizierung des Ergebnisses aufgezeichnet.

Sowohl WiFi als auch SPE sind segmentierte Ethernet-Systeme. In jedem Wagenknoten erfolgt im Ethernet-Switch entweder die Vermittlung der Ethernet-Pakete zum Wagen selbst oder die Weiterleitung zum nächsten Wagen. Somit sind die Voraussetzungen für eine Erkennung der Anzahl der Wagen und der Reihenfolge identisch. Zur Erkennung der Anzahl der Wagen wird ein Scan der Wagen durchgeführt, d.h. es wird gezielt nach den Adressen der bekannten Wagen gesucht. Dieses Vorgehen kann nur hier im bekannten Testumfeld eingesetzt werden. Für eine spätere Lösung im Betrieb muss ein alternativer Ansatz entwickelt werden, bei dem die Wagen ihre IP-Adressen dynamisch zugewiesen bekommen oder durch ein definiertes Schema selbständig setzen (vgl. TTDP – Train Topology Discovery Protocol, IEC 61375-2-5).

Zur Bestimmung der Reihenfolge wurde ein System umgesetzt, bei dem auf die Leistungsmessung der Stromleitung innerhalb der einzelnen Wagen zurückgegriffen wurde. Bei diesem Ansatz erfolgt die Messung der Leistung auf der 110-V_{DC}-Versorgungsleitung in jedem Wagen. Nach dem Initialisierungsprozess sind die vorhandenen Wagen durch einen Scan-Prozess bekannt. Nun werden die Leistungsdaten der Wagen auf der 110-V_{DC}-Versorgung mittels OPC UA abgefragt. Hierzu sind in jedem Wagen zwei Stromsensoren installiert, jeweils ein Sensor eingangs- und ausgangsseitig der 110-V_{DC}-Versorgungsleitung. Über die Spannungs- und Strommessung wird die Leistung festgestellt und als Mittelwert aus den beiden Sensorwerten zur Verfügung gestellt. Sollte ein Sensor keine Messwerte liefern wird nur ein Sensorwert genutzt.

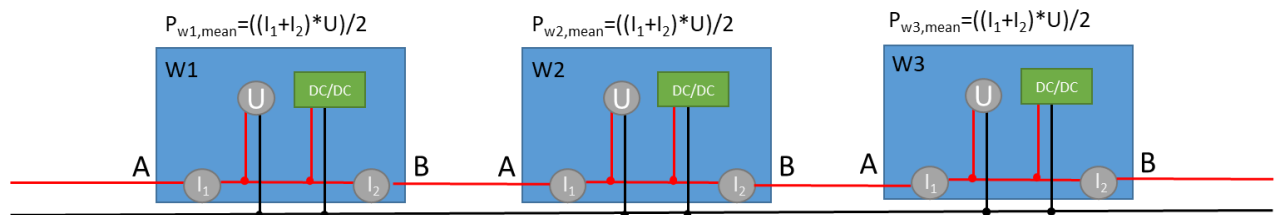


Abbildung 9: Sortierung der Reihenfolge anhand der Leistungsmessung

Nachdem im Technologieadapter des Masters (Messwagen) alle Leistungen bekannt sind, erfolgt die Sortierung der Wagen mit absteigender Leistung (Wagen mit geringster gemessener Leistung in der Stromleitung befindet sich am Ende des Zugverbands). Die Ausrichtung des Wagens wird anhand der Stromflussrichtung bestimmt. Wagen mit positivem Strommesswert fahren in Richtung der A-Seite, Wagen mit negativem Strommesswert fahren in B-Richtung.

Dieses Verfahren unterscheidet sich zu dem im Ethernet-Train-Backbone (ETB), [3]) definierten Verfahren, welche auf Nachbarschaftserkennung auf Netzwerkebene basieren. Es sollten hier ein alternatives Verfahren und die dazu notwendigen Randbedingungen evaluiert werden.

1.2 Testaufbau zur Messung der Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme

1.2.1 SPE und WiFi

Die Messung der Verfügbarkeit der Kommunikationssysteme wird gleichzeitig als Funktionsansatz zur Integritätsprüfung genutzt. Hierzu wird vom Messwagen ein ICMP-Ping-Paket generiert, welches zum letzten Wagen gesendet wird. Die IP-Adresse des letzten Wagens wird aus dem Ergebnis der Zuginitialisierung gewonnen. Die ICMP-Pakete werden mit einem Zyklus von 100 ms generiert. Die vom letzten Wagen empfangenen ICMP-Pakete werden als ICMP-Ping-Reply-Pakete wieder zurück an den Messwagen gesendet. Aus den empfangenen Reply-Nachrichten kann die RTT (Round-Trip-Time) als Information generiert werden. Es wird für jedes Kommunikationssystem sowohl die maximale und minimale RTT als auch die Anzahl gesendeter und empfangener Pakete registriert. Weiterhin wird bei einem Ausbleiben der Antwortpakete für mehr als 900 ms ein Integrity-Counter hochgezählt.

2 Beschreibung von Wagen und Wagengruppen

Der Aufbau der Wagen und Wagengruppen befindet sich im Manteldokument des Zwischenberichts. An dieser Stelle erfolgt eine Ergänzung der spezifischen Eigenschaften der Wagen.

Jedem Wagen wurde eine Wagennummer zugeordnet (Tabelle 1). Die Nummer des Wagens wurde von der Kommunikationsplatte abgeleitet, welche im Wagen (Wagenbox) installiert war. Die Systeme mit den Nummern 12 und 13 wurden für Versuche im Labor genutzt.

Tabelle 1: Zuordnung Wagennummern zu Wagengruppen

Wagennummer (Kommunikation)	Kupplungen	Wagentyp	UIC-Nummer
Messwagen (0)			
1	Voith SK, DAK	Z	37 80 7824 377-1
2	Voith DAK	H	21 80 2470 520-2
3	Voith AK, SK	E	31 80 5375 261-0
4	Voith AK	Z	37 80 7824 376-3
5	Voith AK	H	21 80 2470 787-7
6	Voith DAK, AK	E	31 80 5375 306-3
7	Dellner DAK, SK	Z	37 80 7824 375-5
8	Dellner DAK	H	21 80 2470 687-9
9	Dellner SK, DAK	E	31 80 5375 131-5
10	Voith DAK	S	37 80 4505 281-8
11	Voith DAK	Z	37 80 7824 940-6
14	Voith AK	H	21 80 2470 570-7
15	Dellner DAK	S	37 80 4505 277-6
16*	Dellner DAK	U	31 80 9300 017-8
17*	Dellner DAK	Z	37 80 7824 939-8
18*	Voith DAK	S	37 80 4505 278-4
19*	Voith DAK	U	31 80 9300 018-6
20*	Voith DAK	F	33 87 6771 791-5
21*	Dellner DAK	S	37 80 4505 268-5
22*	Dellner DAK	F	33 87 6771 699-0

** Wagen wurden erst in Phase IIb aufgerüstet, Wagen mit AK wurden in Phase IIb mit einer E-Kupplung ausgestattet*

Tabelle 1 zeigt die Wagennummern und die Zugehörigkeit zur entsprechenden Wagengruppe. In Phase IIa lassen sich die Wagen in drei Gruppen einteilen:

- Wagen mit Dellner DAK,
- Wagen mit Voith DAK. An vier Kupplungen befand sich ein elektrischer Entkupplungsmechanismus. Dieser hat für die Untersuchung der Kommunikationssysteme keine Relevanz.
- Wagen mit Voith AK: Bei diesen Wagen war keine E-Kupplung vorhanden. Diese Wagen wurden für Streckenfahrten mit einem Überbrückungskabel zwischen den Kupplungsanschlussboxen der beiden Wagenseiten überbrückt. Die Überbrückungskabel haben eine Länge von 3 bzw. 4 Metern und verbinden die Stromleitung, die beiden Zweidrahtleitungen sowie die EP-Leitung.

In der Phase IIb wurden die Wagen mit Voith AK mit einer modifizierten Variante der E-Kupplung ausgestattet. Somit wurden nur noch Überbrückungskabel zwischen den Wagengruppen benötigt.

3 Nach- und Stresstests im Stillstand

In der Phase II wurden weitere Tests ergänzend zur Phase I durchgeführt. CAN-FD wurde in Phase II durch SPE (Single Pair Ethernet) ersetzt. Entsprechende Performance-Messungen wie bei den Kommunikationssystemen WiFi und Powerline-PLUS wurden analog zur Phase I für SPE nachgeholt.

Nach der Entscheidung des EDDP, nur SPE und Powerline-PLUS als präferierte Kommunikationssysteme weiter zu betrachten, wurden zusätzliche Stresstests durchgeführt. Diese betrafen insbesondere die Kommunikationsdistanz der Kommunikationssysteme als auch Sonderfälle der Kommunikation.

3.1 Single Pair Ethernet

3.1.1 Performance Messungen

Analog zu den Messungen für das WiFi- und das Powerline-PLUS-System wurden auch Performance-Messungen für das SPE durchgeführt. Die Messungen erfolgten nach den Streckenfahrten in Österreich.

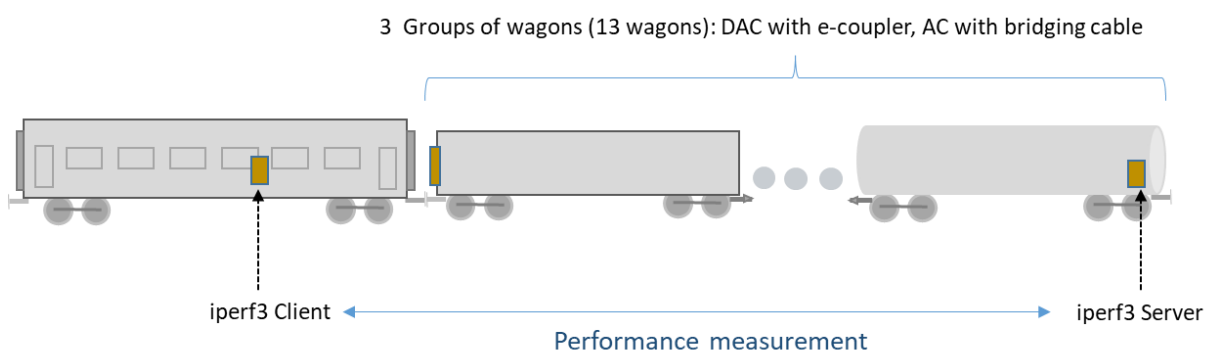


Abbildung 10: Performance Messungen mit SPE

Die Performance-Messungen wurden analog zu den Messungen in Phase I durchgeführt [4]. Im Unterschied zu den Wagengruppen in Phase I wurden die Messungen mit 14 Teilnehmern im Netzwerk (13 Güterwagons und ein Messwagen) durchgeführt.

Tabelle 2: Performance Messungen für SPE

Data rate (TCP Transmission)	Frames per Second (UDP Transmission)	Error rate	Latency (RTT)
7.5 MBit/s	6669 FPS	PER 10^4 (0 % @ 213293 Frames)	min: 3.47 ms avg: 3.65 ms max: 4.12 ms

Die Performance-Messungen zeigen, dass SPE die Anforderungen an das Kommunikationssystem deutlich erfüllt. SPE weist insbesondere bei der Latenz (Messung der RTT – Round Trip Time) sehr gute Werte auf.

3.1.2 Messung der Kommunikationsdistanz ohne Repeater

Zur Messung der Kommunikationsdistanz ohne Repeater stand eine Wagengruppe bestehend aus sechs Wagen mit Kupplungen eines Herstellers bereit. An den äußeren Wagen wurde jeweils ein Laptop zur Messung der Datenkommunikation an das Ethernet-Switch im Wagen angeschlossen (Abbildung 11). Bei den mittleren Wagen wurden die SPE-Adapter von den Zweidrahtleitungen entfernt und eine Brücke gesetzt. Somit entstand eine durchgehende Leitung zwischen den beiden SPE-Adaptoren der äußeren Wagen. Die Segmentlänge ohne Repeater betrug so ca. 105 Meter. Diese Messung dient dem Nachweis des EDDP-Kriteriums, mindestens 100 m Segmentlänge ohne Repeater überbrücken zu können.

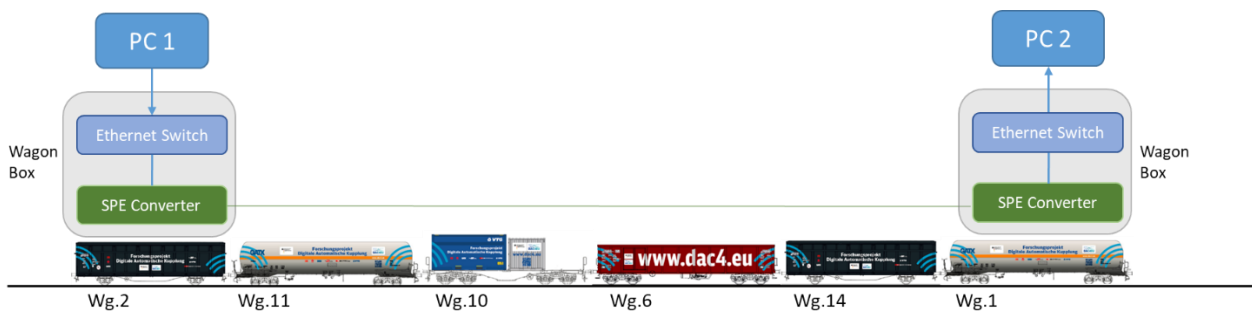


Abbildung 11: SPE-Kommunikationstest über durchgehende Leitung

Ergebnis: Die Kommunikation über das Segment war ohne Kommunikationsprobleme möglich.

3.1.3 Überbrückung einer intakten Kupplung

Ein gegebenenfalls kritischer Anwendungsfall könnte die Überbrückung einer intakten Kupplung darstellen. Hierbei überlagern sich die Signale aus der Kupplungsverbindung mit den Signalen durch das Überbrückungskabel. Durch die unterschiedliche Signallaufzeit könnte es bei langen Überbrückungskabeln zu Problemen bei der Übertragung kommen.

Testfall: Ein SPE-Link zwischen zwei Wagen ist aufgebaut. Das Überbrückungskabel wird gesteckt und die Kommunikationsfähigkeit überprüft.

Ergebnis: Die Kommunikationsfähigkeit nach dem Stecken des Überbrückungskabels war gegeben. Allerdings ist der Link zwischen den beiden Verbindungspartnern kurzzeitig eingebrochen und hat sich sofort wieder aufgebaut. Es wird vermutet, dass die Kanaländerung zu einer neuen Kanalschätzung seitens der SPE-PHYs geführt hat und somit der Link neu aufgebaut werden musste.

3.1.4 Einfügen einer Stub Leitung

Eine besondere Herausforderung für Kommunikationssysteme besteht in Stichleitungen (Stub-lines), welche nicht mit dem Wellenwiderstand der Leitung abgeschlossen sind. An den Enden dieser Leitungen treten dann Reflektionen auf, welche zur Signalstörung und Symbolfehlern führen können. Dieser Fall könnte im Zug zum Beispiel bei einer fehlerhaften Verkabelung auftreten oder bei einem Gerätedefekt.

Ergebnis: Es zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei dem Hinzufügen des Überbrückungskabels. Die Kommunikationsfähigkeit nach dem Hinzufügen der Stub-Leitung war gegeben. Der Link wurde zwischendurch abgebaut und wieder aufgebaut. Es wird vermutet, dass die Kanaländerung zu einer neuen Kanalschätzung seitens der SPE-PHYs geführt hat und somit der Link neu aufgebaut werden musste.

Dieses Verhalten kann kritisch werden, wenn eine Widerstandsänderung der Kupplungskontakte zu einem derart veränderten Kanal führt, dass eine erneute Kanalschätzung nötig wird. Die resultierende Linkunterbrechung für einige hundert Millisekunden (ca. 700 – 900 ms) führt zur Unterbrechung der Kommunikation und kann Safety-Funktionen stören.

3.2 Powerline Kommunikationsdistanz

Das Powerline-PLUS-Kommunikationssystem kommuniziert über die 110-V_{DC}-Versorgungsleitung. Hierzu wird das Signal (Paket) nach einer definierten Anzahl von Powerline-PLUS-Slaves wiederholt (Forward Distance). Die maximale Kommunikationsdistanz kann somit über die Erhöhung der Forward Distance festgestellt werden. Die Forward Distance wurde in verschiedenen Konfigurationen in der getesteten Wagengruppe, bestehend aus sieben Wagen, mit DAK-E-Kupplungen ermittelt.

Die Einstellung der Forward Distance hat einen Einfluss auf die Performance des Powerline-PLUS-Kommunikationssystems. Ziel ist die stabile Kommunikation mit einer möglichst großen Forward Distance, d.h. möglichst wenigen Repeater-Slaves. Jeder zusätzliche Repeater im Kommunikationssystem führt zu einer höheren Latenz bzw. weniger Datenbandbreite. Weiterhin sollte die Anforderung von ca. 100 m ohne Repeater erreicht werden.

Versuchsablauf:

Nach Einschalten der Versorgungsspannung wurde im Master die Forward Distance (zwischen zwei und vier) eingestellt und der Verbindungsaufbau gestartet. Nach aufgebauter Verbindung wurde versucht, mittels Ping den am weitesten entfernten Wagen zu erreichen. Konnte der Wagen nicht erreicht werden oder zeigte sich eine instabile Ping-Verbindung, wurde der Test als nicht bestanden gewertet.



Abbildung 12: Test der Powerline-PLUS Forward Distance in einer Wagengruppe

Mit der Forward Distance 2² konnte das Powerline-PLUS in jeder Wagenkonfiguration betrieben werden. Forward Distance 3 funktionierte in einer Konfiguration, in einer weiteren Testkonfiguration mit dem Master auf der anderen Seite der Wagengruppe konnte jedoch keine stabile Verbindung erreicht werden. Die ICMP-Ping Kommunikation zum letzten Slave wurde nur sporadisch beantwortet, der Integrity-Check zeigte einen Integrity-Fehler an. Die Wagen in der Wagengruppe wurden in dieser Konstellation allerdings korrekt erkannt.

Zu den Ergebnissen muss angemerkt werden, dass die verwendete Verkabelung für eine Nutzung als Kommunikationsleitung nicht optimal ist. In den DAC4EU-Wagen wurden zwei separate 16 mm² Leitungen verwendet, welche in einem Wellrohr verlegt sind.

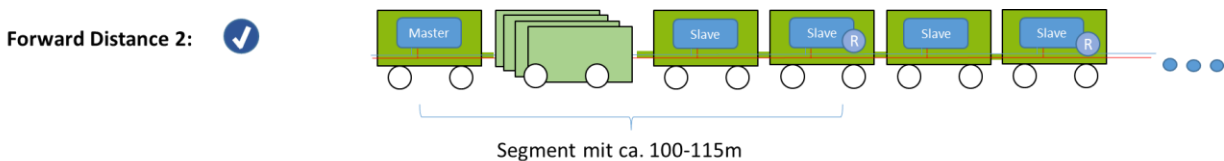


Abbildung 13: Test mit Dummy-Wagen

In einem späteren Versuch wurden Dummy-Wagen mit einer Leitung bestehend aus 2x10 mm² in Twisted-Pair-Ausführung ausgerüstet (empfohlene Leitung des EDDP). Hierbei wurde eine Segmentlänge vom Master zum ersten Repeater von ca. 100 – 115 m erreicht. Unter Verwendung einer geeigneten Leitung wird das Kriterium der Überbrückung von 100 m erreicht. Es ist davon

² In der Betriebserprobung (Streckenfahrten) wurde das Powerline-PLUS immer mit der Forward Distance 2 betrieben.

auszugehen, dass bei Verwendung der Twisted-Pair-Leitung auch eine entsprechend größere Forward Distance erreicht wird.

3.3 Untersuchung von WiFi Kommunikationsproblemen

Die Streckenfahrten in Österreich und in der Schweiz zeigten ein sehr instabiles WiFi-Kommunikationssystem. Verbindungen zum letzten Wagen brachen für wenige Sekunden bis hin zu einigen Stunden ab. Während der Tests in Österreich und der Schweiz war aufgrund des engen Zeitrahmens keine genauere Analyse der Probleme möglich. Daher wurde nach den Streckenfahrten einige Tests unternommen, um die Probleme zu identifizieren.

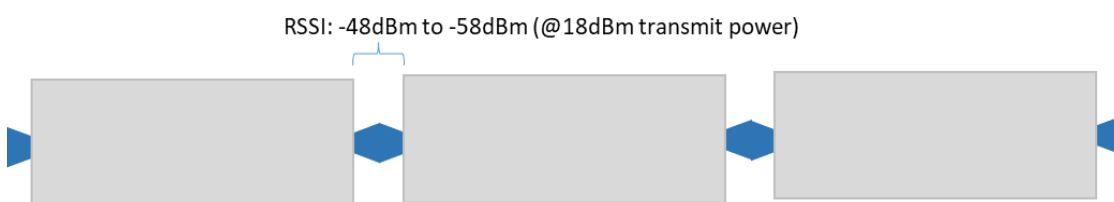


Abbildung 14: Empfangsleistung am WiFi-Accesspoint (gemessen mit WiFi-Accesspoint)

Zunächst wurden verschiedene Wagenverbindungen bezüglich der WiFi-Empfangsleistung untersucht (Abbildung 14). Hier zeigten sich Werte von -58 dBm bis zu -48 dBm bei einer Sendeleistung von 18 dBm. Die Werte wurden durch Auslesen des Gerätestatus am WiFi-Accesspoints ermittelt. Die Messung der direkten Dämpfung der Übertragung im Berner Raum mit den verwendeten Antennen wurde in Phase I durchgeführt und hat etwa 45 – 50 dB Dämpfung ergeben, gemessen im 2,4 GHz ISM-Band. Zur Dämpfung hinzuzurechnen sind die Koaxialleitungen von der Wagenbox bis zur Kupplungsanschlussbox und die HF-Verbinder. Die Leitungen haben etwa eine Dämpfung von 0,42 dB/m bei 2,4 GHz. Somit ergeben sich bei einer Wagenverbindung, bei der eine Wagenbox auf der gegenüberliegenden Seite der überbrückten Kupplung liegt, eine zusätzliche Dämpfung von ca. 10 dB durch die Kabel. Damit sind die gemessenen Empfangsleistungen als valide zu bewerten.

Im weiteren Versuch wurde untersucht, ob sich Wagenseiten eines Wagens miteinander verbinden können und ob eine Verbindung über einen passiven Wagen hinweg möglich ist. Dazu wurden in mehreren Versuchen Accesspoints deaktiviert und anschließend untersucht, welche Verbindungen möglich sind (Abbildung 15).

In einer ersten Messung wurde die Verbindung zur Kupplung (2) unterbrochen. Eine Verbindung von Kupplung (1) zur Kupplung (3) wurde mit einer Empfangsleistung von -70 dBm aufgebaut. Ein ähnlicher Wert konnte bei der Verbindung von Kupplung 3 zu Kupplung 5 gemessen werden. Dies ist insgesamt eine unerwartet hohe Empfangsleistung, da die Antennen von den massiven Wagen, welche über das Schienenpotential geerdet sind, abgeschirmt werden. Ein Einfluss durch Reflektionen von nebenstehenden Fahrzeugen ist als wahrscheinlich zu bewerten. Ein weiterer

Versuch ergab eine Empfangsleistung von Kupplung 3 zu Kupplung 6 von -92 dBm. Damit ist diese Verbindung als schlecht einzustufen. Daher wurde die Datenrate durch den Accesspoint hier auf 1 Mbit/s eingestellt, um ein besseres SNR zu erreichen.

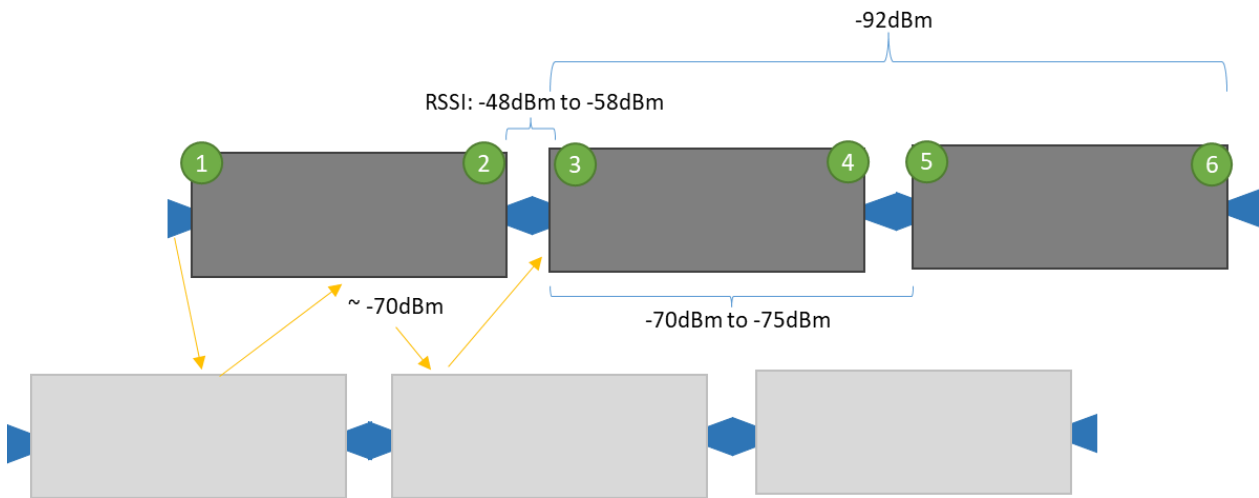


Abbildung 15: Messung der WiFi-Empfangsleistung über verschiedene Kupplungsverbindungen

Bei den Accesspoints wurde der ACC-Modus eingestellt. In diesem Modus handeln die Accesspoints automatisch die Rolle des Accesspoints und des Clients aus. Zuvor befinden sich die Accesspoints im Suchmodus, um Geräte in Reichweite zu finden mit denen eine Verbindung aufgebaut werden kann. In diesem Modus bleibt der Accesspoint mehrere Minuten. Aus der Liste der möglichen Geräte wird dann ein Accesspoint mit dem höchsten RSSI ausgewählt. Dieser Mechanismus hat während der Streckenfahrten grundsätzlich funktioniert, da die Verbindung über die Kupplungsstelle den besten RSSI-Wert hat. Der Accesspoint kehrt allerdings bei Unterschreiten einer definierten Schwelle (-60 dBm) in den Suchmodus zurück. Dies hat vermutlich bei Verbindungen, die nahe der -60 dBm Schwelle liegen, zu einem Verbindungsabbruch geführt. Während der Streckenfahrten kann sich die Dämpfung schon aufgrund der Bewegung der HF-Kabel und Steckerverbindungen sowie des Wetters vergrößern.

Hinweis: Bei dem im EDDP diskutierten WiFi-System, welches auf der Short-List der möglichen Kommunikationssysteme für den SGV (Schienengüterverkehr) war, sind die Antennen und WiFi-Transceiver in der E-Kupplung integriert. Dies konnte allerdings nicht getestet werden, da eine Integration von Antennen/Transceivern in die E-Kupplungen nicht möglich war.

4 Kommunikationstests und Betriebserprobung in Streckenfahrten

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messfahrten, die in der Phase II durchgeführt worden sind. In den ersten Messfahrten (1-3) wurde das Testsystem in Betrieb genommen. Die Messfahrten mit Auswertungen der Datenkommunikation erfolgten ab der Messfahrt (4). Ab der Messfahrt (9) wurden bei dem SPE-Kommunikationssystem zunehmend Ausfälle der Kommunikation registriert. Um diese Ausfälle näher zu analysieren, wurde das Testsystem hinsichtlich der Lokalisierung der Kommunikationsfehler angepasst.

Tabelle 3: Messfahrten Datenkommunikation und Evaluierung von Kontaktunterbrechungen

Nr.	Land	Datum	Orte	Kommentar
1	DE	18.10.2021	Minden - Ludwigshafen	Einrichtung Kommunikationstechnik
2	DE	15.11.2021	Mannheim – Ingolstadt	Einrichtung Kommunikationstechnik
3	DE	02.02.2022	Mannheim – Bruchsaal	Einrichtung Kommunikationstechnik
4	AU	11.02.2022	Rankweil – Langen am Arlberg	Messung Kommunikation (Installation/Inbetriebnahme SPE)
5	AU	14.02.2022	Langen am Arlberg – Selzthal	Messung Kommunikation
6	AU	16/17.02.2022	Selzthal – Eisenerz - Gstatterboden	Messung Kommunikation
7	AU	22.02.2022	Selzthal – Niklasdorf	Messung Kommunikation
8	AU	25.02.2022	Niklasdorf – Wien	Messung Kommunikation
9	CH	11.03.2022	Goldau – Biasca (via Gotthardbasistunnel) – Goldau (via Gotthardbasistunnel) – Limmatal	Messung Kommunikation
10	CH	21.03.2022	Limmatal – Biasca (via Gotthard Bergstrecke) – Basel (via Gotthard Bergstrecke)	Messung Kommunikation
11	CH/DE	31.03.2022	Basel - Minden	Messung Kommunikation
12	DE	28.04.2022	Nürnberg - Minden	Messung Kommunikation
13	CZ	26.07.2022	Brünn - Budweis	Messungen Logikanalysator
14	CZ	27.07.2022	Budweis – Pilsen	Messungen Logikanalysator
15	CZ	29.07.2022	Pilsen (Rundfahrt)	Messungen Logikanalysator
16	CZ	01.08.2022	Pilsen – Most	Messungen Logikanalysator
17	CZ	02.08.2022	Most – Pilsen	Messungen Logikanalysator
18	DE	16.08.2022	Kassel – Bebra	Messungen Oszilloskop
19	DE	16./17.10.2022	Minden – Saarbrücken	Messungen Oszilloskop
20	DE	09.11.2022	Minden – Heessen – Minden	Messungen Oszilloskop
21	DE	10.11.2022	Minden – Heessen - Minden	Messungen Oszilloskop
22	DE	14.11.2022	Minden - Bebra	Messungen Oszilloskop
23	DE	15.11.2022	Bebra - Lichtenfels	Messungen Oszilloskop
24	DE	16.11.2022	Lichtenfels - Probstzella – Lichtenfels	Messungen Oszilloskop
25	DE	17.11.2022	Lichtenfels - Mannheim	Messungen Oszilloskop

Nach der Lokalisierung einer Fehlerstelle wurde die Ursache gemäß dem Ausschlussverfahren ermittelt. Als Ergebnis dieser Untersuchung wurde in den folgenden Messfahrten der Fokus auf das Monitoring der Kontakte und ihr Verhalten während der Streckenfahrten gelegt. Hierzu wurde zunächst ein Messaufbau mit einem Logikanalysator (13-17) realisiert. Dieser Aufbau zeigte viele Störungen auf, sodass in weiteren Messungen (18-25) verschiedene Messungen mit einem Oszilloskop durchgeführt wurden.

4.1 Messfahrten Kommunikation

4.1.1 Messfahrt Rankweil – Langen am Arlberg

Vor der Messfahrt von Rankweil nach Langen am Arlberg wurden erstmals die SPE-Adapter zur Kommunikation mit Single-Pair-Ethernet über die Zweidrahtleitungen installiert. Bei der Messfahrt wurden alle drei Kommunikationssysteme (Powerline-PLUS, SPE und WiFi) getestet.

Tabelle 4: Zugkonfiguration Rankweil – Langen am Arlberg

WG 0 (MW)	WG1	WG10	WG11	WG2	WG6	WG14	WG4	WG5	WG3	WG9	WG8	WG15	WG7
--------------	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----

Tabelle 5: Ergebnisse Rankweil – Langen am Arlberg

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	OK	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms)	1* (Ausfall für 448 Sekunden)	0	0
Integritätsprüfung ICMP (Intervall 100 ms)			
Gesendete/Empfangene Pakete	57465/52632	58220/58215	58386/58386
Paketverlust	8,4%	< 0,001%	0%
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK
Kommentar	Zunächst Reihenfolge nicht korrekt erkannt. Nach Behebung eines Sensorfehlers war die Erkennung korrekt.		

4.1.2 Messfahrt Langen am Arlberg – Selzthal

Tabelle 6: Zugkonfiguration Langen am Arlberg - Selzthal

WG 0 (MW)	WG1	WG10	WG11	WG2	WG6	WG14	WG4	WG5	WG3	WG9	WG8	WG15	WG7
--------------	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----

Tabelle 7: Ergebnisse Langen am Arlberg – Selzthal

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	NEIN	NEIN	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsevents (Ausfall > 1000 ms)	5	0	0
Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)			
Gesendete/Empfangene Pakete	273301/209239	275133/275025	294796/294793
Paketverlust	23,4%	< 0,001%	~ 0%
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK
Kommentar			

Bei dieser Messfahrt, wie auch bei den anderen Messfahrten, wurde eine sehr hohe Anzahl an Paketfehlern beim WiFi-Kommunikationssystem identifiziert. Weiterhin wurden die Paketfehler bei SPE analysiert. Es wurden hier vier Ereignisse identifiziert, welche eine Häufung von 7-8 Burstfehlern aufwiesen. Die Ausfallzeit mit 700 – 800ms hat somit kein Integritätsevent ausgelöst.

4.1.3 Messfahrt Selzthal – Eisenerz - Gstatterboden

Die Messfahrt wurde nur mit 12 Güterwagen durchgeführt, da Wagen 8 aufgrund eines Defekts ausgestellt wurde.

Tabelle 8: Zugkonfiguration Selzthal – Gstatterboden

WG 0 (MW)	WG7	WG15	WG9	WG3	WG5	WG4	WG14	WG6	WG2	WG11	WG10	WG1
--------------	-----	------	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	------	------	-----

Tabelle 9: Ergebnisse Selzthal – Gstatterboden (Hinfahrt)

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	OK	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms)	0 (bis Ausfall d. Kommunikation)	0*	0
Integritätsprüfung ICMP (Intervall 100 ms)			
Gesendete/Empfangene Pakete	20994/20994 (bis Ausfall d. Kommunikation)	108759/108729	108858/108855
Paketverlust	nicht bestimmbar	< 0,001	~ 0%
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK

Auf der Hinfahrt wurde beim WiFi-System nach ca. 35 Minuten ein Ausfall der Kommunikation zum letzten Wagen identifiziert. Das WiFi-System hat bis zum Ende der Hinfahrt die Kommunikation nicht neu aufgebaut.

Auf der Rückfahrt konnte das Powerline-PLUS Kommunikationssystem nicht erfolgreich in Betrieb genommen werden. Es wurden nicht alle Wagen identifiziert und die Kommunikation zum letzten Wagen war nicht möglich. Der Grund hierfür konnte nachfolgend gefunden werden: Zwischen Hin- und Rückfahrt wurde nur ein „Warmstart“ des Powerline-PLUS-Masters durchgeführt. Dies führte mit der getesteten Software-Variante in manchen Fällen zu Initialisierungsfehlern. Bei einem Kaltstart (Reset der Versorgungsspannung) trat das Problem nicht auf.

Beim Test des SPE-Kommunikationssystems wurden keine Paketfehler identifiziert.

4.1.4 Messfahrt Selzthal – Niklasdorf

Tabelle 10: Zugkonfiguration Selzthal – Niklasdorf

WG 0 (MW)	WG3	WG5	WG4	WG14	WG6	WG2	WG11	WG10	WG1	WG7	WG15	WG8	WG9
--------------	-----	-----	-----	------	-----	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----

Tabelle 11: Ergebnisse Selzthal – Niklasdorf

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	OK	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms)	Integrität bis 12:53	0	0
Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)	Ausfall WG11-WG10 Später: Ausfall WG2-WG11		
Gesendete/Empfangene Pakete	53933/19444	44263/44248	44794/44793
Paketverlust	nicht bestimmbar	< 0,001	~ 0%
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK

Die Analyse von Paketfehlern beim SPE-System hat ergeben, dass wie bei den Messungen vorher einzelne Burstfehler mit einer Länge von ca. 700 ms aufgetreten sind. Diese Fehler führten daher nicht zu einem Integritätsereignis.

4.1.5 Messfahrt Niklasdorf – Wien

Die Messfahrt von Niklasdorf nach Wien wurde aufgrund eines defekten Wagens in einer Wagengruppen nur mit neun Wagen durchgeführt.

Die Messungen wurden um die Identifikation der Round-Trip-Zeiten (RTT) erweitert.

Tabelle 12: Zugkonfiguration Niklasdorf – Wien

WG 0 (MW)	WG3	WG5	WG4	WG14	WG6	WG2	WG11	WG10	WG1
--------------	-----	-----	-----	------	-----	-----	------	------	-----

Tabelle 13: Ergebnisse Niklasdorf – Wien

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	OK	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms)	27 Events	0	0
Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)	1 Event > 3 Min 6 Events 10 – 26 Sek 20 Events < 10 Sek		
Gesendete/Empfangene Pakete	109733/102412	110686/110669	111022/111021
Paketverlust	6,7 %	< 0,001	~ 0%
Round Trip Time (max., avg.)	998ms*, 46.5 ms	21.5 ms, 2.58 ms	34.6 ms, 20.1 ms
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK
Kommentar		Startup Problem mancher SPE-Adapter	

* Werte ab 1000 ms werden verworfen, da diese nicht mehr innerhalb des gültigen Intervalls eintreffen

Die Analyse von Paketfehlern beim SPE-System hat ergeben, dass wie bei den Messungen vorher einzelne Burstfehler mit einer Länge von ca. 800 ms aufgetreten sind. Diese Fehler führten daher nicht zu einem Integritätsereignis. Beim WiFi-System wurde eine maximale Ausfallzeit von 209 Sekunden identifiziert.

4.1.6 Messfahrt Goldau – Biasca – Limmattal

Tabelle 14: Zugkonfiguration Goldau – Biasca

WG 0 (MW)	WG1	WG10	WG11	WG2	WG6	WG14	WG4	WG5	WG3	WG7	WG15	WG8	WG9
--------------	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----

Tabelle 15: Ergebnisse Godau – Biasca

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	OK	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms) Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)	129	1 Ausfall von 14 folgenden Paketen (ca. 1,4 Sekunden)	0
Gesendete/Empfangene Pakete	64680/56035	65666/65396	67449/67448
Paketverlust	6.7 %	0.41 %	~ 0%
Round Trip Time (max., avg.)	999ms*/64.7 ms	16.3ms/ 3.75ms	187.8ms/50.82ms
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK

* Werte ab 1000 ms werden verworfen, da diese nicht mehr innerhalb des gültigen Intervalls eintreffen

Nach Analyse der SPE-Paketfehler sind bei der Fahrt im Unterschied zu den vorangegangenen Fahrten auch Einzel-Fehler aufgetreten. Bei dieser Fahrt wurde zum ersten Mal eine Ausfallzeit > 1 Sekunde festgestellt, welches zu einer fehlerhaften Integritätsprüfung führen würde.

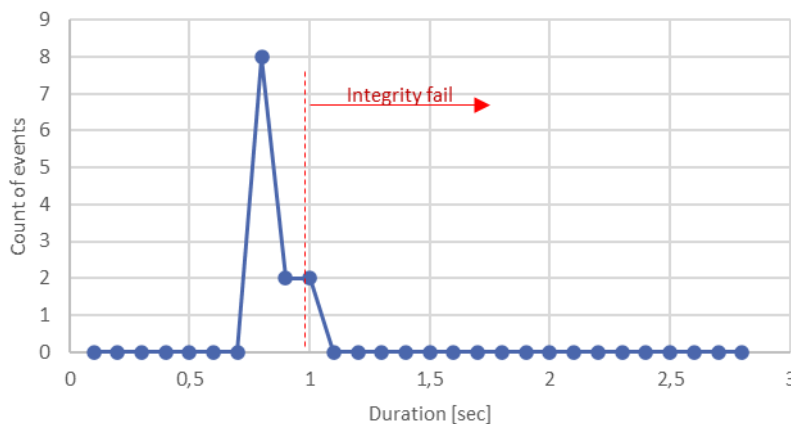


Abbildung 16: Eventhäufigkeit der Kommunikationsunterbrechungen von Golda nach Biasca

Bei der Rückfahrt wurde der Messwagen auf die andere Seite des Zuges umgesetzt. Dadurch war die Position des Messwagens zwischen Lok und Wagen 9. Weiterhin wurde die Rückfahrt mit aktivierter EP-Bremse durchgeführt. Es wurden einige Schnellbremsungen mit EP-Bremse durchgeführt.

Tabelle 16: Ergebnisse Biasca - Limmattal

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	NEIN	NEIN	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms)	213	83	0
Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)			
Gesendete/Empfangene Pakete	109733/102412	93297/ 90720	93423/ 93398
Paketverlust	6.8 %	2.6 %	< 0.1%
Round Trip Time (max., avg.)	998ms*/126 ms	28.9ms, 4.48ms	629ms/51.9ms
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK

* Werte ab 1000 ms werden verworfen, da diese nicht mehr innerhalb des gültigen Intervalls eintreffen

Bei der Initialisierung des SPE- und des WiFi-Systems wurde die Reihenfolge der letzten beiden Wagen vertauscht. Daraufhin wurden die gemessenen Leistungsdaten aus Strom und Spannung der 110-V_{DC}-Stromleitung, auf deren Basis die Sortierung der Reihenfolge basiert, analysiert. Die Leistungen liegen insbesondere am Ende des Zuges relativ nah beieinander. Der vorletzte Wagen hat ca. 2 Watt Leistung weniger gemessen als der letzte Wagen. Dies ist wahrscheinlich durch Leistungsschwankungen auf der Stromleitung sowie unsynchronisierte Messung der Leistungsdaten auf den Wagen begründet.

Die Analyse der SPE-Kommunikation hat ergeben, dass Ausfälle von bis zu 4 Sekunden aufgetreten sind. Im Unterschied zu den vorhergehenden Fahrten sind im SPE-Kommunikationssystem signifikante Paketverluste aufgetreten.

Analyse möglicher Ursachen für die Paketfehler:

- Nach Untersuchung des zeitlichen Auftretens der Paketfehler beim SPE und Powerline-PLUS kann kein Zusammenhang mit der Tunnelfahrt sowie den Schnellbremsungen festgestellt werden.

- Während der Standzeit in Biasca wurden Kommunikationsdaten aufgenommen. Hier wurde innerhalb der Aufzeichnung (ca. eine Stunde) kein Paketfehler für das SPE und Powerline-PLUS festgestellt.
- ⇒ Es liegt der Verdacht nahe, dass mindestens eine Elektrokupplung im Vergleich zu den vorhergehenden Fahrten schlechtere elektrische Verbindungseigenschaften aufweist.

Auch beim Powerline-PLUS-Kommunikationssystem sind die Fehlerraten im Vergleich zu den Fahrten in Österreich gestiegen. Die Paketfehler führten allerdings nicht zu einem Ausfall der Zugintegrität.

4.1.7 Messfahrt Limmattal – Biasca – Basel

Aufgrund der Probleme beim SPE-Kommunikationssystem mit vergleichsweise hohen Paketfehlerraten und Ausfällen bei der Fahrt von Biasca nach Limmattal wurde eine Überwachung aller Verbindungen vom Messwagen zu den folgenden Wagen und vom letzten Wagen zum Messwagen eingerichtet. Dadurch lassen sich zwei gleichzeitig auftretende Verbindungsfehler erfassen und ihre Position lokalisieren. Um das Kommunikationssystem nicht zu überlasten, wurde die weitere Verbindungsprüfung mit einer geringeren Zykluszeit (250ms) durchgeführt.

Tabelle 17: Zugkonfiguration Limmattal – Biasca

WG 0 (MW)	WG1	WG10	WG11	WG2	WG6	WG14	WG4	WG5	WG3	WG7	WG15	WG8	WG9
--------------	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----

Tabelle 18: Ergebnisse Limmattal – Biasca

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	OK	OK	OK
Reihenfolge korrekt	OK	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsevents (Ausfall > 1000 ms)	135	16	0
Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)			
Gesendete/Empfangene Pakete	130846/86299	132091/130417	132155/ 132132
Paketverlust	34.1%	1.27%	< 0.1%
Round Trip Time (max., avg.)	999ms*/74.7ms	56.8ms/ 3.9ms	168.8ms/51.1ms

Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK
--------------------------------	---	---	----

* Werte ab 1000 ms werden verworfen, da diese nicht mehr innerhalb des gültigen Intervalls eintreffen

Wie in Tabelle 18 zu sehen, treten die Paketverluste der SPE-Kommunikation weniger auf als in der Messfahrt zuvor. Allerdings ist ihr Auftreten in Hinsicht auf die Integritätsereignisse nach wie vor in einem inakzeptablen Bereich.

Beim WiFi-Kommunikationssystem wurden Ausfälle mit längeren Zeiten registriert, welche zu einem insgesamt sehr hohen Paketverlust geführt haben.

Tabelle 19: Richtungsabhängige SPE Paketverluste Limmattal - Biasca

Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Zugende*		Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Messwagen*
Messwagen	WG1	0		WG9	WG8	0
Messwagen	WG10	3		WG9	WG15	0
Messwagen	WG11	3		WG9	WG7	0
Messwagen	WG2	3		WG9	WG3	0
Messwagen	WG6	596		WG9	WG5	0
Messwagen	WG14	596		WG9	WG4	0
Messwagen	WG4	595**		WG9	WG14	0
Messwagen	WG5	596		WG9	WG6	0
Messwagen	WG3	596		WG9	WG2	668
Messwagen	WG7	597		WG9	WG11	668
Messwagen	WG15	596		WG9	WG10	665**
Messwagen	WG8	598		WG9	WG1	672
Messwagen	WG9	598		WG9	Messwagen	672

* Die unterschiedlich hohen richtungsabhängigen Paketverluste hängen mit einem späteren Einschaltzeitpunkt der Funktion zusammen

** Die Paket-Streams zur Messung der Paketverluste sind voneinander unabhängig. Daher können sich auch zwischen schlechteren Werten leicht bessere Verlustwerte ergeben.

Die Messung der richtungsabhängigen Paketverluste für das SPE-Kommunikationssystem zeigt eine eindeutige Schwachstelle zwischen Wagen 2 und Wagen 6. In beiden Richtungen tritt hier der Großteil der Paketverluste auf.

Vor der Rückfahrt wurde der Messwagen auf die andere Seite des Zuges umgesetzt. Dadurch war die Position des Messwagens zwischen Lok und Wagen 9.

Tabelle 20: Rückfahrt Biasca - Basel

	WiFi	SPE	Powerline-PLUS
Erkennung der Wagenanzahl	nur 11 Wagen erkannt	OK	OK
Reihenfolge korrekt	nur 11 Wagen erkannt	OK	OK
Erkennung der Ausrichtung	OK	OK	nicht vorhanden
Integritätsereignisse (Ausfall > 1000 ms)	111	86	0
Integritätscheck ICMP (Intervall 100 ms)			
Gesendete/Empfangene Pakete	136101/126753 (nur bis Wagen 11)	137528/134308	137585/137568
Paketverlust	6.68%	2.34%	< 0.1%
Round Trip Time (max., avg.)	999ms*/53.2ms	433.6ms/ 3.9ms	225.6ms/51.9ms
Integrierte Integritätsprüfung	-	-	OK

* Werte ab 1000ms werden verworfen, da diese nicht mehr innerhalb des gültigen Intervalls eintreffen

Beim WiFi-Kommunikationssystem wurden bei Abfahrt nur elf Wagen erkannt. Die Verbindung zu den letzten beiden Wagen war unterbrochen. Daher wurde die Integritätsprüfung nur bis zum Wagen 11 durchgeführt.

Tabelle 21: Richtungsabhängige SPE Paketverluste Biasca - Basel

Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Zugende*	Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Messwagen*
Messwagen	WG9	0	WG1	WG10	7
Messwagen	WG8	0	WG1	WG11	7
Messwagen	WG15	0	WG1	WG2	7
Messwagen	WG7	0	WG1	WG6	1241
Messwagen	WG3	0	WG1	WG14	1247
Messwagen	WG5	0	WG1	WG4	1243
Messwagen	WG4	0	WG1	WG5	1244
Messwagen	WG14	0	WG1	WG3	1240
Messwagen	WG6	0	WG1	WG7	1241
Messwagen	WG2	1292	WG1	WG15	1253
Messwagen	WG11	1294	WG1	WG8	1247
Messwagen	WG10	1294	WG1	WG9	1238**
Messwagen	WG1	1295	WG1	Messwagen	1254

** Die unterschiedlich hohen richtungsabhängigen Paketverluste hängen mit einem späteren Einschaltzeitpunkt der Funktion zusammen*

*** Die Paket-Streams zur Messung der Paketverluste sind voneinander unabhängig. Daher können sich auch zwischen schlechteren Werten leicht bessere Verlustwerte ergeben.*

Die Messung der richtungsabhängigen Paketverluste beim SPE-System ergab ein ähnliches Bild zur Hinfahrt (Limmattal – Biasca). In beiden Richtungen wurde der Großteil der Paketverluste zwischen Wagen 6 und Wagen 2 registriert. Es wurde eine Analyse der möglichen Ursachen durchgeführt. Mit den Beobachtungen der Paketverluste in Österreich, dass viele Burst-Fehler im Bereich von 7 – 8 Paketen aufgetreten sind lag der Verdacht nahe, dass eine Verbindungsunterbrechung oder eine Änderung des Kommunikationskanals zu einer Linkunterbrechung führt, welche eine Ausfallzeit von 0,8 – 1,5 Sekunden zur Folge hat und somit zum Integritätsverlust führt kann.

Folgende Fehlermöglichkeiten wurden identifiziert:

- Möglichkeit eines fehlerhaften SPE-Adapters: Defekter Adapter mit Wackelkontakt oder defektes Kabel.
- Anschlüsse der Kommunikationskabel in den Klemmen fehlerhaft (Wagenbox und Kupplungsanschlussbox).
- Kontakte in der Kupplung oder E-Kupplung defekt.

Entsprechende Maßnahmen zur Evaluierung der Fehlerstelle erfolgten in den weiteren Messfahrten (Messfahrten Basel – Minden, Nürnberg – Minden).

4.1.8 Messfahrt Basel – Minden

In den folgenden Messfahrten wurde der Fokus auf die Untersuchung der Kommunikationsprobleme beim SPE-Kommunikationssystem gelegt.

Vor der Messfahrt Basel – Minden wurde an der Kupplungsstelle zwischen Wagen 2 und Wagen 6, welche in den Messfahrten zuvor als problematisch identifiziert wurde, folgende Maßnahmen zur Evaluierung des Fehlers unternommen:

- Die Klemmverbindungen der Leitungen in der Wagen- und Kupplungsanschlussboxen wurden neu gesteckt.
- Die SPE-Adapter der betreffenden Verbindung wurden gegen Adapter aus anderen Wagen getauscht, um einen Hardwarefehler der Adapter auszuschließen.

Tabelle 22: Wagenreihenfolge Messfahrt Basel - Minden

WG 0 (MW)	WG3	WG5	WG4	WG14	WG6	WG2	WG11	WG10	WG1	WG9	WG8	WG15	WG7
--------------	-----	-----	-----	------	-----	-----	------	------	-----	-----	-----	------	-----

Tabelle 23: Richtungsabhängige SPE Paketverluste Basel - Minden

Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Zugende*		Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Messwagen*
Messwagen	WG3	0		WG7	WG15	0
Messwagen	WG5	0		WG1	WG8	0
Messwagen	WG4	0		WG7	WG9	0
Messwagen	WG14	0		WG7	WG1	0
Messwagen	WG6	0		WG7	WG10	9
Messwagen	WG2	476		WG7	WG11	9
Messwagen	WG11	475		WG7	WG2	10
Messwagen	WG10	476		WG7	WG6	499
Messwagen	WG1	480		WG7	WG14	489
Messwagen	WG9	479		WG7	WG4	496
Messwagen	WG8	478		WG7	WG5	499
Messwagen	WG15	478		WG7	WG3	499
Messwagen	WG7	480		WG7	Messwagen	613

Die Tabelle zeigt die Ergebnisse eines Abschnitts der Messfahrt (Basel – Raststatt). In weiteren Abschnitten wurden vergleichbare Ergebnisse ermittelt. Die Paketfehlerrate betrug (an der Kuppelstelle Wagen 6 zu Wagen 2) in beiden Richtungen etwa 0,6 %.

Wie in Tabelle 24 zu sehen, haben die Maßnahmen zur Überprüfung der Kabelverbindungen und Tausch der SPE-Adapter keinen Erfolg gebracht. Nach wie vor entstand zwischen Wagen 6 und Wagen 2 ein deutlicher Paketverlust. Im Vergleich zur Messfahrt Biasca – Basel betrug die Fehlerrate nur ein Viertel. Dies könnte aber auch auf die unterschiedliche Streckentopologie zurückzuführen sein.

4.1.9 Messfahrt Nürnberg – Minden

Nachdem die Kabelverbindungen und SPE-Adapter als Ursache in der Messfahrt von Basel nach Minden ausgeschlossen werden konnten, wurden bei der betreffenden Verbindung zwischen Wagen 2 und Wagen 6 die SPE-Kommunikation von Zweidrahtleitung 1 auf Zweidrahtleitung 2 getauscht.

In Unterschied zu den vorhergehenden Messfahrten bestand der Zug nur aus einer Wagengruppe mit insgesamt neun Wagen.

Tabelle 24: Wagenreihenfolge Messfahrt Nürnberg - Minden

WG 0 (MW)	WG1	WG10	WG11	WG2	WG6	WG14	WG4	WG5	WG3
--------------	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----

Tabelle 25: Richtungsabhängige SPE Paketverluste Limmattal – Biasca

	Empfänger	Paketfehler Richtung Zugende*		Sender	Empfänger	Paketfehler Richtung Messwagen*
Messwagen	WG1	0		WG3	WG5	0
Messwagen	WG10	0		WG3	WG4	0
Messwagen	WG11	0		WG3	WG14	0
Messwagen	WG2	0		WG3	WG6	0
Messwagen	WG6	25		WG3	WG2	26
Messwagen	WG14	25		WG3	WG11	25
Messwagen	WG4	25		WG3	WG10	25
Messwagen	WG5	25		WG3	WG1	26
Messwagen	WG3	26		WG3	Messwagen	26

Die Paketfehlerrate betrug (an der Kuppelstelle Wagen 6 zu Wagen 2) in beiden Richtungen etwa 0,05 %.

Wie bei den vorhergehenden Messfahrten ist die Fehlerstelle zwischen Wagen 2 und Wagen 6 klar erkennbar. Im Unterschied zu den vorhergehenden Messungen ist die Fehlerrate deutlich geringer. Aus der Evaluierung der Kommunikationsprobleme wurde folgender Schluss gezogen:

- Es sind keine Probleme der Anschlüsse und der SPE-Adapter nachgewiesen worden.
- Der Tausch der Zweidrahtleitungen hatte dagegen eine deutlich niedrigere Fehlerrate zur Folge. Damit liegt der Schluss nahe, dass die Fehler der SPE-Kommunikation auf Probleme der Druck-Feder-Kontakte in der Kupplungsstelle zurückgehen. Die Kontakte der Zweidrahtleitung 2 scheinen ebenfalls betroffen, allerdings weniger ausgeprägt. Eine optische Begutachtung der Kontakte hat keine offensichtliche Fehlerstelle ergeben.

4.2 Zusammenfassung der Messfahrten zum Test der Datenkommunikation

4.2.1 WiFi-Kommunikation

Der Test der WiFi-Kommunikation in der Betriebserprobung ergab eine unzureichende Zuverlässigkeit. Das WiFi-Kommunikationssystem ist in dem verwendeten Aufbau nicht als Kommunikationssystem für den Güterverkehr geeignet. Die Störungen der Kommunikation waren durch zwei verschiedene Fehlerbilder gekennzeichnet:

- Ausfall der Kommunikation für wenige Pakete bis hin zu einigen Sekunden,
- Ausfall der Kommunikation für dutzende Sekunden bis hin zum vollständigen Verlust der Kommunikation.

Die Fehlerbilder werden auf zwei verschiedene Ursachen zurückgeführt: Die „kurzen“ Unterbrechungen, welche für sich genommen bereits ein Problem für die Integritätsfunktion darstellen, sind auf Interferenzen mit anderen Kommunikationssystemen oder durch Interferenz mit Funkstrecken anderer Wagenverbindungen über Reflektion zu erklären. Bei dem verwendeten

Gerät wird im Modus „ACC – Auto Carriage Connection“ ein spezifischer Kanal gewählt. Bei Reflektionen durch vorbeifahrende Züge bzw. in Tunneln kann es daher zu derartigen Störungen kommen.

Länger andauernde Störungen sind nach Untersuchung der WiFi-Kommunikation auf Grenzwerte der ACC-Funktion zurückzuführen. Wenn Schwellen des Empfangspegels unterschritten werden, dann sucht das Gerät nach neuen Verbindungspartnern. In dieser Zeit ist die Verbindung zur anderen Wagenseite unterbrochen. Ein erneuter Aufbau kann nach ca. 30 Sekunden erfolgen, sofern dann der Empfangspegel des gegenüberliegenden WiFi-Adapters im zulässigen Bereich liegt. Eine Absenkung der Schwelle führt dagegen dazu, dass sich die Adapter nicht mehr zuverlässig mit der gegenüberliegenden Wagenseite verbinden, sondern mit einem beliebigen anderen Wagen in Reichweite. Damit ist dann keine durchgängige Kommunikation mehr möglich.

Bei der getesteten WiFi-Kommunikation handelt es sich bezüglich der Installation nicht um die Variante, die im EDDP diskutiert wurde. Bei der im EDDP diskutierten WiFi-Kommunikation sollte die Antenne in der E-Kupplung installiert werden. Es wird vermutet, dass dies ein erheblich besseres Ergebnis hinsichtlich der Verfügbarkeit der Kommunikation bedeutet hätte. Ebenfalls auffällig im Vergleich zu den stationären Tests der Phase I waren die hohen Latenzzeiten. Diese sind ebenfalls auf die Kommunikationsprobleme bei der Funkübertragung zurückzuführen. Der WiFi-Standard definiert einen Repeat-Mechanismus, sofern der Empfänger des Pakets kein Acknowledge an den Sender zurücksendet. Pakete werden mehrfach wiederholt, bevor die Übertragung mit einem Paketverlust verworfen wird. Bei einer interferenzbehafteten Funkstrecke kann daher bei WiFi eine mehrfache Latenz zur erfolgreichen Übertragung eines Pakets im Vergleich zur interferenzfreien Übertragung entstehen.

4.2.2 Powerline-PLUS

Das Powerline-PLUS Kommunikationssystem performt im Vergleich zu den anderen Kommunikationssystemen am besten. Es sind keine Ausfälle der Kommunikation (Verlust der Zugintegrität) in den Streckenfahrten identifiziert worden. Es wurden trotzdem einzelne Paketverluste registriert. Die Paketverluste stiegen am Ende der Streckenfahrten in der Schweiz an, es konnten allerdings keine Burst-Paketfehler wie bei den anderen Kommunikationssystemen identifiziert werden, wodurch die Feststellung der Zugintegrität gewährleistet blieb.

Die Strom- und Spannungsmessungen der DB Systemtechnik (siehe Bericht 60226-05-DAK-Phase-II-Elektrischer Teil) zeigten, dass Einbrüche der Spannung in einer Wagengruppe zu verzeichnen waren. Diese Einbrüche deuten auf kurzzeitige Unterbrechungen der Kontaktstellen der E-Kupplung hin. Unter der Voraussetzung, dass die kapazitive Kopplung der Kontaktstellen gering ist, führt die Unterbrechung der Kontakte beim Powerline-PLUS Kommunikationssystem zu einem Paketverlust sofern im Moment der Kontaktunterbrechung Powerline-Symbole übertragen werden³.

³ Ein Hinweis auf dieses Verhalten zeigt Abbildung 36

4.2.3 Single-Pair-Ethernet

Die SPE-Kommunikation wies in den Streckenfahrten eine zunehmend höhere Fehlerrate auf (Tabelle 26). Problematisch sind an der Stelle nicht einzelne Paketverluste, da diese von höheren Protokollschichten ausgeglichen werden müssen. Kritisch sind hier Ausfälle, die zu einer Ausfallzeit von mehreren 100 ms führen. Die Umsetzung von Safety-relevanter Kommunikation, für die eine zuverlässige Informationsübertragung im Sinne der Rechtzeitigkeit der Safety-Applikation notwendig ist (z.B. Zugintigrität, Steuerung der Bremse), wird damit im Bereich von unter einer Sekunde unmöglich.

Tabelle 26: Übersicht der SPE-Paketverluste auf den Streckenfahrten (4 – 12)

Testfahrt (Zuordnung siehe Tabelle 3)	Integritätsverlust	Paketverluste	Paketverlustrate
Nr. 4	0	5	0,008 %
Nr. 5	0	95	0.1 %
Nr. 6	0	30	0.03 %
Nr. 7	0	15	0.03 %
Nr. 8	0	17	0.02 %
Nr. 9/1	1	270	0.4 %
Nr. 9/2	83	2577	2.7 %
Nr. 10/1	16	1674	1.3 %
Nr. 10/2	86	3220	2.3 %
Nr. 11	19	1192	0.6 %
Nr. 12	1	97	0.05 %

Wie beim WiFi-Kommunikationssystem müssen die Paketverluste hier in zwei Klassen eingeteilt werden:

- a) Einzelpaketfehler: Diese können durch Störungen auf der Kommunikationsleitung entstehen. Hierzu ist bereits der Verlust eines Symbols mit einer Symboldauer von 13,33 ns ausreichend, da keine Fehlerkorrektur vorhanden ist.
- b) Burstfehler/längerer Ausfall der Kommunikation: Bei einer Unterbrechung von mehreren 100 ms kann davon ausgegangen werden, dass eine Linkunterbrechung stattgefunden hat (Linkabbruch und erneuter Linkaufbau). Um einen Linkabbruch bei SPE herbeizuführen, kann auch eine Änderung des Kanals ausreichen (siehe 3.1.4).

Die Untersuchung zu den Unterbrechungen der SPE-Kommunikation hat ergeben, dass im wesentlichen Paketverluste an einer Kupplungsstelle auftraten. Die betreffende Kupplungsstelle wies nach optischer Kontrolle keine offensichtliche Beschädigung der Kontakte auf. Weiterhin hat die Kommunikation im Stand und bei der Zuginitialisierung in allen Fällen problemlos funktioniert, sodass hier von ursächlichen Effekten durch mechanische Belastung bzw. Vibrationen ausgegangen werden muss. Eine Videoaufnahme der Fahrt an der betreffenden Kupplungsstelle hat gezeigt, dass Bewegungen in der Scharfenberg-Kupplung sowie der E-Kupplung erkennbar sind. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Kombination der Wagentypen und dessen Beladung in bestimmten Streckenszenarien eine Unterbrechung der Kommunikationskontakte hervorruft. Die Kontakte zur Stromversorgung (16 mm² Stromleitung) sind hiervon aufgrund der größeren Kontaktflächen vermutlich weniger betroffen. Weiterhin könnte das Reiben von Kontaktflächen schon zu einer hinreichenden Änderung des Kanals und damit zum Linkabbruch führen. Dies konnte allerdings nicht nachgewiesen werden.

Da die Übertragung der Kommunikation über die E-Kupplungen als Schwachstelle identifiziert wurde, sollte in den weiteren Tests diesbezüglich eine genauere Evaluierung der Kontakte während der Streckenfahrten erfolgen.

5 Evaluierung von Kontaktunterbrechungen in Streckenfahrten

Um ein genaueres Bild zu den Problemen der Unterbrechungen zu erhalten, wurden zunächst vier Kupplungsstellen mittels Logikanalysator hinsichtlich Kontaktunterbrechungen untersucht. Auf einer Streckenfahrt konnten Kontaktunterbrechungen festgestellt werden, allerdings wurde mit dem Testsetup generell ein hohes Maß an Störpulsen aufgezeichnet. In den weitergehenden Untersuchungen wurde das Testsystem modifiziert und Messungen an Kupplungsstellen mittels eines Oszilloskops durchgeführt.

5.1 Evaluierung von Kontaktunterbrechungen mit Logikanalysator (Messfahrten in Tschechien)

In den Messfahrten in Tschechien wurden die Kommunikationskontakte in verschiedenen Kupplungsstellen mit einem Logikanalysator (Saleae Logic-8) untersucht. Es wurde bei allen Messungen eine Sampling-Frequenz von 2 MHz eingestellt.

Zur Messung wurde der in Abbildung 17 skizzierte Aufbau in den Wagen 2 und Wagen 8 installiert. Von den beiden Wagen aus wurden jeweils die benachbarten Kupplungsstellen (Wagen 8: Wg. 2 und Wg. 6, Wagen 8: Wg. 9 und Wg. 15) überwacht. Zunächst wurde eine separate Ground-Leitung vom Logikanalysator zu den benachbarten Wagen gelegt und mit den Kommunikationskontakten verbunden. Im Wagen mit der Messtechnik wurden die Kontakte jeweils auf einen Eingang des Logikanalysators gelegt. Jeder Kontakt wurde separat über einen Pull-Down-Widerstand (6,8 kOhm) auf das Ground-Potential des Logikanalysators gelegt. Somit ergibt sich im normalen Zustand, d.h. wenn die Kupplungskontakte in Ordnung sind, ein High-Zustand.

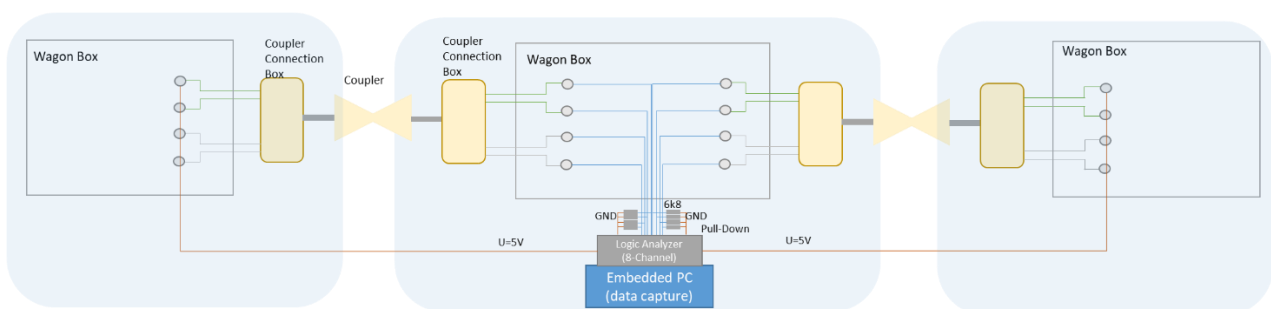


Abbildung 17: Überwachung von Kontakten mit Logikanalysator (1)

Der in Abbildung 17 dargestellte Aufbau wurde in der Messfahrt von Brünn nach Budweis zum ersten Mal in Betrieb genommen. Die Auswertung nach der Messfahrt hat eine hohe Anzahl von Pegeländerungen ergeben. Da die Änderungszeiten der Pulse sehr kurz waren lag die Vermutung nahe, dass es sich nicht um Kontaktunterbrechungen handelt, sondern um Störungen auf der Leitung. Diese Störungen lösen beim Logikanalysator eine Zustandsänderung aus und liegen im Bereich der Sample-Rate (ein bis zwei Sample-Zeiten, 500 ns – 1 µs). Es traten häufig Burst-Störungen auf (Abbildung 18, Abbildung 19). Die Störungen waren auf allen Kupplungsstellen und allen Leitungen identifizierbar.

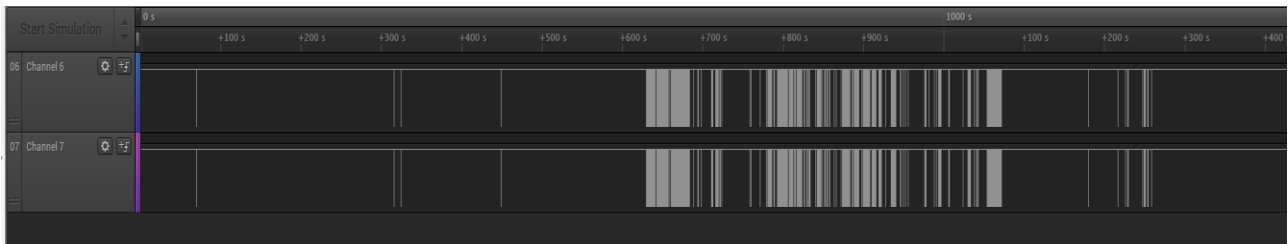


Abbildung 18: Störungen mit Burst-Pulsen

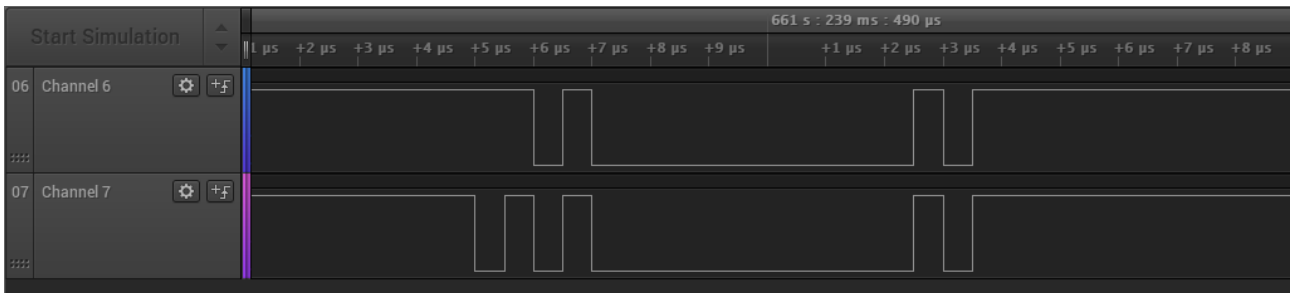


Abbildung 19: Störungen mit Burst-Pulsen (Zoom)

Neben den dargestellten Störungen konnten auch längere Einbrüche der Pulse gemessen werden (siehe Abbildung 20). Dies konnte allerdings nur auf einem Leitungspaar bei einer Messfahrt beobachtet werden. Bei dem Leitungspaar handelt es sich um die Zweidrahtleitung 1 von Wagen 2 zu Wagen 6. Hier wurden Unterbrechungen mit einer Dauer von 3 ms bis 19 ms nachgewiesen. Die Anzahl der Unterbrechungen lag bei 11, bei einer Messdauer von ca. 3 Stunden.

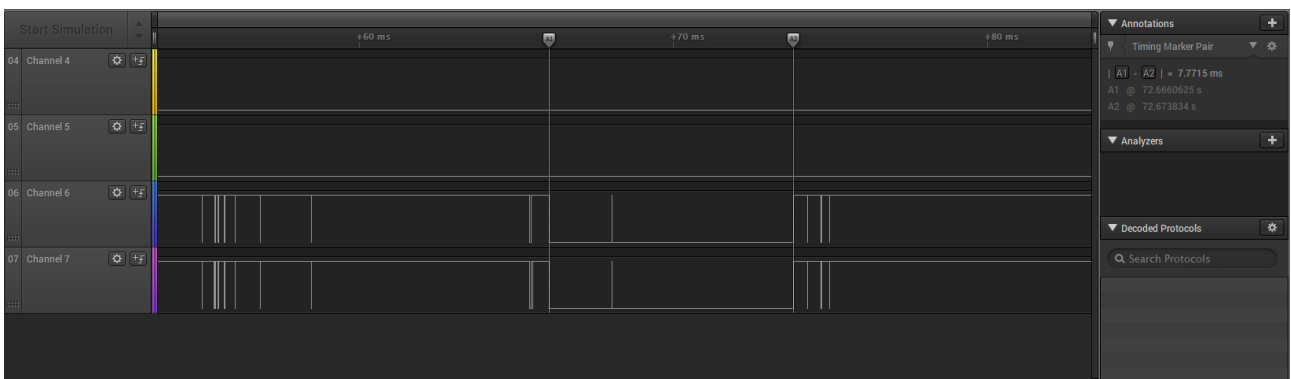


Abbildung 20: Ausschnitt einer Kontaktunterbrechung (Zweidrahtleitung 1, Wg. 2 zu Wg. 6)

Es wurde in den weiteren Fahrten in Tschechien versucht, die Ursache der Störpulse zu ermitteln. Folgende Ursachen wurden in Betracht gezogen:

- Einkopplung von Störungen durch den Fahrdraht: Störungen wurden in gleicher Weise auch während Fahrten mit Diesellok auf Strecken ohne Fahrdraht beobachtet.

- Stillstand: Im Stillstand wurden ebenfalls Störungen gemessen, allerdings im Vergleich zur Fahrt mit einer deutlich geringeren Anzahl.

Da die zusätzlichen Leitungen zur Versorgung der Kontakte mit der 5-V-Messspannung eine große Leiterschleife mit den zu messenden Zweidrahtleitungen aufspannen, können Störungen auch hierdurch eingekoppelt worden sein. Daher wurde der Aufbau dahingehend verändert, dass auf eine Einzelüberwachung der Kontakte verzichtet wurde und die Zweidrahtleitungen als Hin- und Rückleiter der Messspannung verwendet wurden.

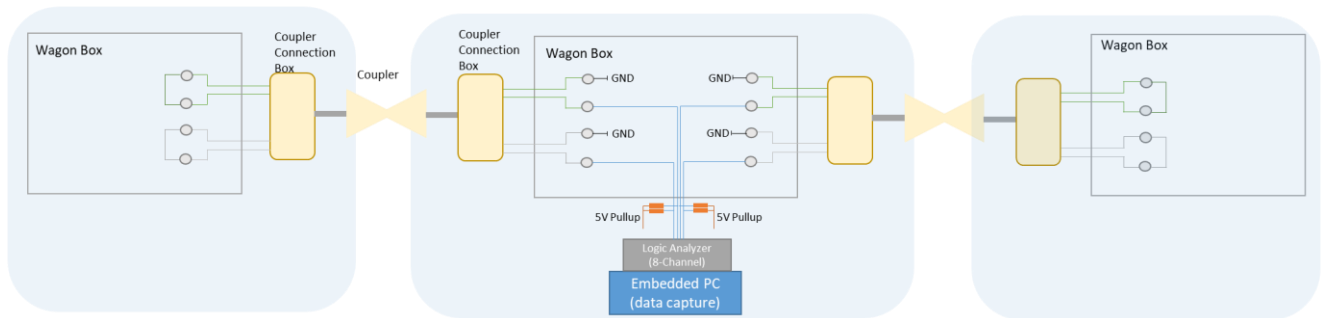


Abbildung 21: Überwachung von Kontakten mit Logikanalysator (2)

Der angepasste Aufbau hatte in den folgenden Messfahrten keine messbare Veränderung der Störungen zur Folge. Daher wurde als Quelle der Störungen eine Einkopplung direkt in die Kommunikationsleitungen vermutet.

5.2 Evaluierung von Kontaktunterbrechungen mit Oszilloskop

5.2.1 Messfahrt Kassel – Bebra

Bei der Messfahrt Kassel – Bebra wurde ein Labor-Oszilloskop (LeCroy) im Wagen 2 installiert (Messaufbau analog zu Abbildung 22). Es wurde versucht, Unterbrechungen der Zweidrahtleitungen aufzuzeichnen. Es konnten mit der Messtechnik, ggf. aufgrund des unzureichenden Duty-Cycles zwischen Messung und Speicherung der Messdaten, keine relevanten Erkenntnisse gewonnen werden.

5.2.2 Minden – Saarbrücken

In der Messfahrt von Minden nach Saarbrücken wurden zwei Kupplungsstellen überwacht. Dazu wurde ein USB-Oszilloskop (Picoscope 4444) mit differentiellen Tastköpfen verwendet, um insgesamt drei Zweidrahtverbindungen und die Powerline-PLUS-Verbindung zu überwachen (Abbildung 22). Die Zweidrahtleitung 1 wurde in jedem der beiden benachbarten Wagen mit einem 4,7 kOhm Widerstand an die 24-V-Batterie angeschlossen. Mit den Innenwiderständen der SPE-Adapter (jeweils 2 kOhm) bildet sich ein Spannungsteiler, über den im mittleren Wagen gemessen wird. Die Spannung im Spannungsteiler (1:9,4) bildet somit eine Offsetspannung, welche sich mit dem SPE-Signal überlagert. Dadurch können gleichermaßen SPE und Kontakte überwacht werden.

Zweidrahtleitung 2 zwischen Wagen 6 und Wagen 2 ist ebenfalls auf 24 V_{DC} aufgelegt. Der parasitäre Widerstand der SPE-Modems kann hier nicht genutzt werden, daher ist ein Widerstand von 1 kOhm als Messwiderstand installiert worden.

Zu betrachten ist jeweils die Leitungsinduktivität: Die Leitungsinduktivität treibt den Strom auf der Leitung durch die in der Induktivität gespeicherte Energie auch nach einer Unterbrechung weiter. Ebenso führt die Leitungskapazität beim Einschalten (Kontakt wieder geschlossen) zu Stromspitzen. Diese Effekte sollten Aufgrund der relativ kurzen Leitungen mit Längen von ca. 5 – 20 m und der damit verbundenen niedrigen Leitungsinduktivität und -kapazität im Verhältnis zu der erwarteten Unterbrechung im niedrigen Millisekundenbereich bis in den hohen Mikrosekundenbereich keine Rolle spielen.

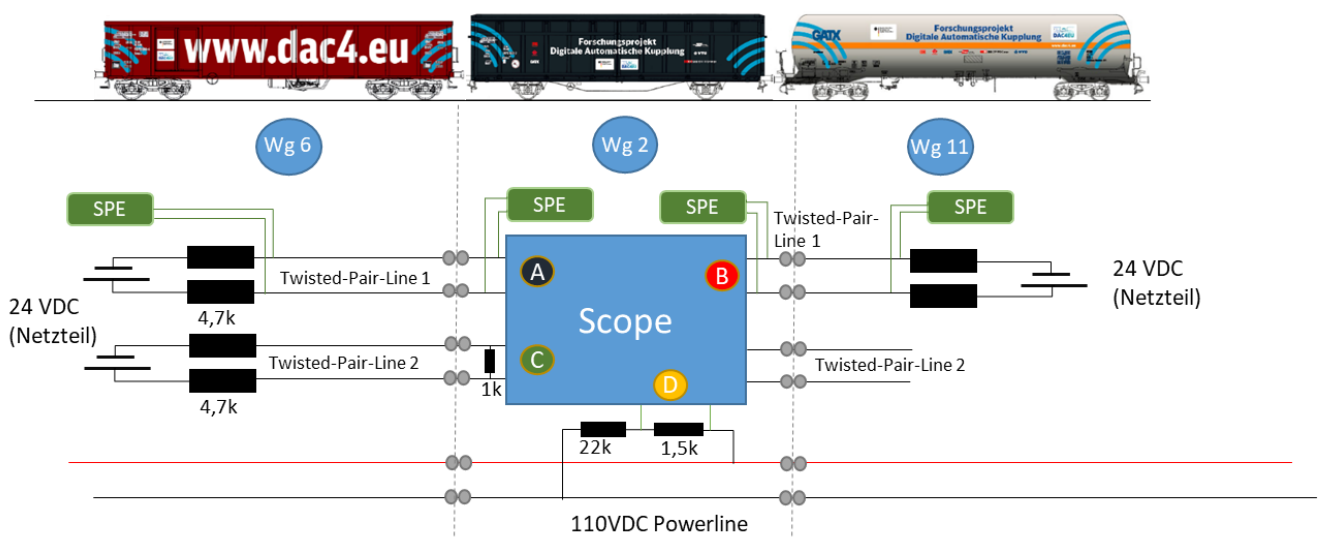


Abbildung 22: Versuchsaufbau Messfahrt Minden - Saarbrücken

Sampling-Rate: 12,5 MSamples/s,

Ergebnisse:

- Es wurden keine Unterbrechungen der Kommunikationsleitungen identifiziert.
- Auf der Stromleitung sind deutliche Störungen zu erkennen (Abbildung 23).
- Auf den Kommunikationsleitungen sind keine signifikanten Störungen zu sehen.
- Die Störungen auf der Stromleitung haben beim SPE-Kommunikationssystem nicht zu einer Linkunterbrechung geführt.

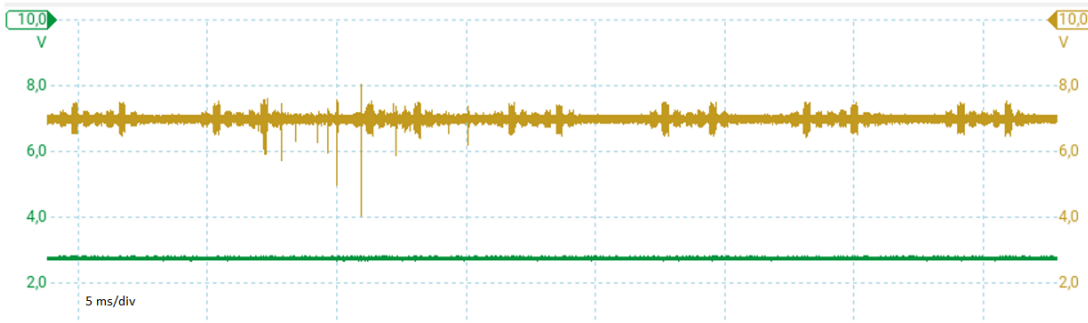


Abbildung 23: Aufzeichnung von Störungen auf der Stromleitung

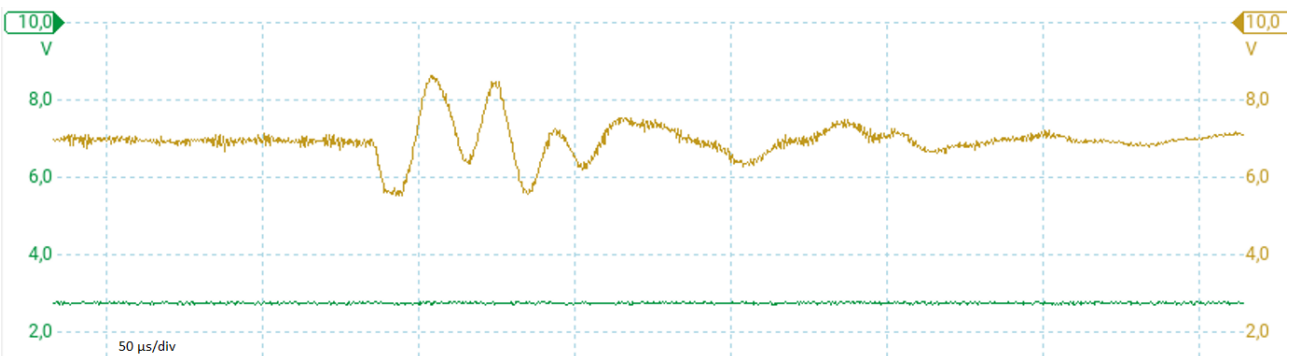


Abbildung 24: Zoom der Störungen auf der Stromleitung

5.2.3 Messfahrten Minden – Heessen – Minden

In den Messfahrten Minden – Heessen und Minden – Bebra wurde der Aufbau zur Messung von Unterbrechungen verändert. Da in der Messfahrt Minden – Saarbrücken keine Unterbrechungen an den beiden überwachten Kontaktstellen festgestellt werden konnten, sollten in der folgenden Messfahrt möglichst alle Kontaktstellen einer der beiden Zweidrahtleitungen überwacht werden. Dazu wurde eine durchgehende Leitung durch Überbrückung der Segmente in den Wagenboxen hergestellt. In jeder Wagenbox (17 Wagen) wurde zudem ein 3,3-kOhm-Widerstand installiert. Durch die Strommessung an einem Messshunt (mit 100-Ohm-Widerstand) im Messwagen sollte jede Unterbrechung der Leitung, sowie über den verminderten Strom auch die Position der Unterbrechung festgestellt werden können.

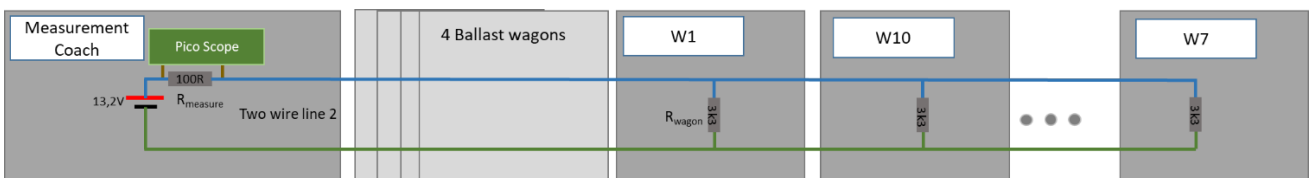


Abbildung 25: Messsystem mit Widerstandsnetzwerk

Die Funktionalität des Messsystems konnte beim Start der ersten Messfahrt Minden – Heessen beobachtet werden. Die Verbindung zum letzten Wagen (Wagen 7) hatte eine defekte E-Kupplung aus vorhergehenden Versuchen, dies war zuvor bekannt (Abbildung 26).

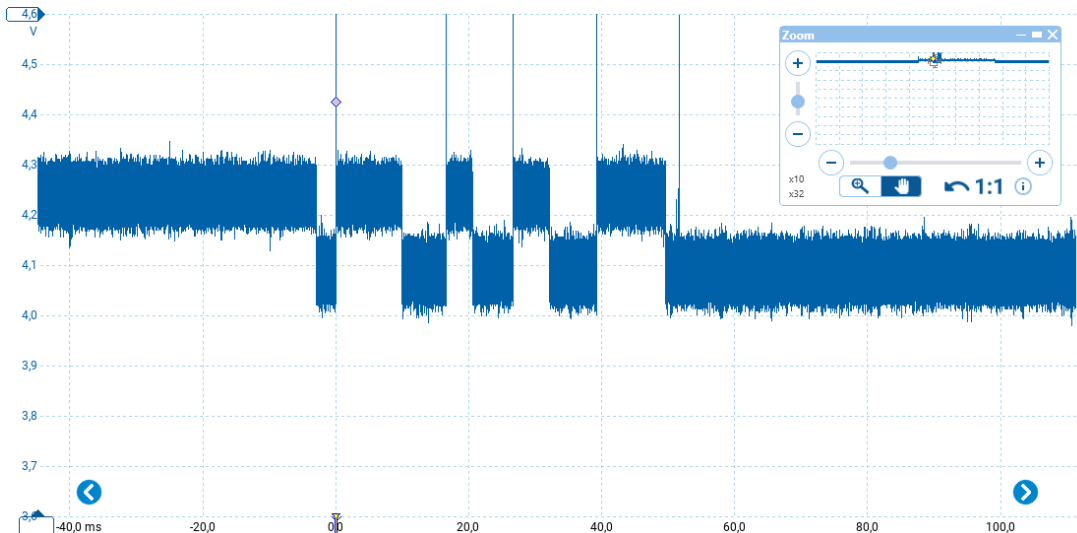


Abbildung 26: Messung einer Kontaktunterbrechung einer bekannt defekten Kupplungsstelle

Bei Anfahrt des Zuges stellte sich eine mechanische Schwingung an der Kupplung ein, welche zu einem Prelleffekt bei den Kontakten führte.

Entgegen der Erwartung konnten sonst keine Einbrüche des Stroms am Messshunt identifiziert werden, welche auf Kontaktunterbrechungen an anderen Stellen schließen lassen. Es wurden weiterhin Störungen auf der der Leitung gemessen, welche durch ggf. Einkopplung der anderen Zeitdrahtleitung oder der Stromleitung begründet sein könnten.

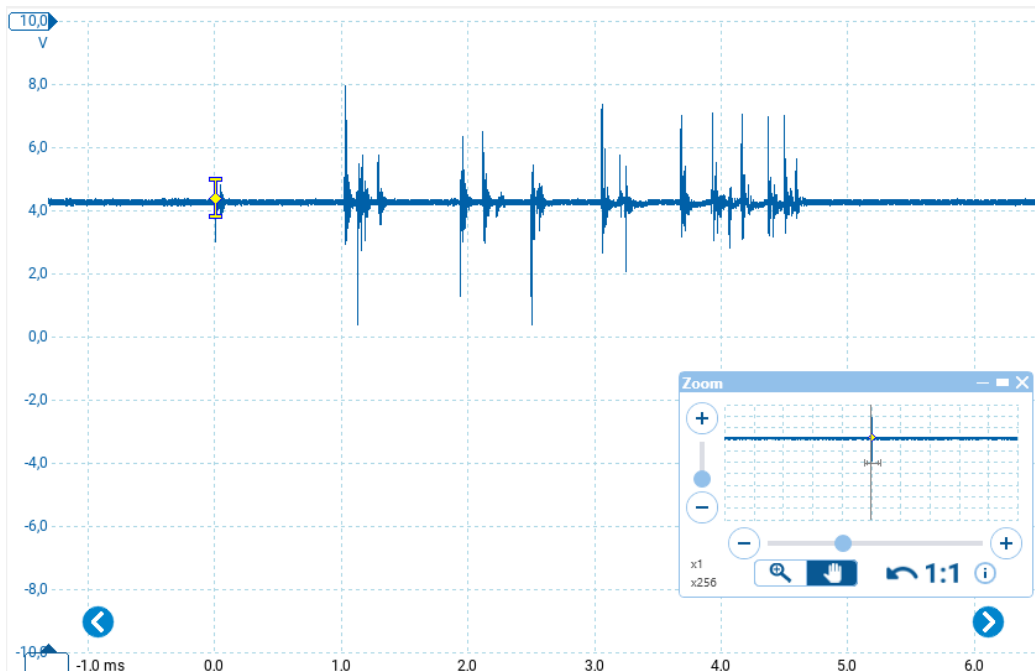


Abbildung 27: Störungen auf der durchgehenden Zweidrahtleitung

Die Störungen konnten oft während der Fahrt (z.B. Abbildung 27), vermehrt nach Vibrationen bzw. Längskräften durch Bremsen festgestellt werden. Störungen waren allerdings auch im Stand zu

beobachten. Diese traten dagegen mit einer deutlich kleineren Amplitude im Vergleich zu den Störungen während der Fahrt auf.

Neben den Messungen auf der zweiten Zweidrahtleitung zu den Kontaktunterbrechungen wurde das Powerline-PLUS Kommunikationssystem getestet. Hier war insbesondere der Testfall aufgrund der zusätzlichen Ballastwagen zwischen Messwagen und dem ersten DAK-Wagen von Bedeutung. Hierdurch hat sich die Leitungslänge bis zum ersten Powerline-PLUS-Repeater-Slave auf ca. 100 – 115 m Leitung erhöht. Das auf den Ballastwagen installierte Kabel unterschied sich von den auf den anderen DAK-Wagen installierten Kabeln: Hier wurde eine Twisted-Pair Stromleitung mit einem Leitungsquerschnitt von 10 mm² verwendet. Ein Kabel mit diesem Aufbau wird vom EDDP-Gremium⁴, welches sich mit der Energieversorgung im SGV beschäftigt hat, als zukünftige Stromleitung zurzeit favorisiert. Es weist im Vergleich zu den lose im Wellrohr verlegten einzelnen Leitungen einen konstanteren Wellenwiderstand auf und eignet sich daher deutlich besser für eine Kommunikationsübertragung.

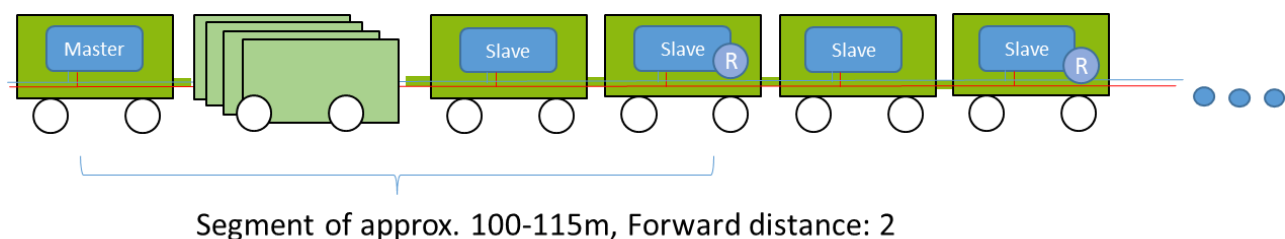


Abbildung 28: Powerline-PLUS mit langem Segment zwischen Master und Repeater-Slave

Ergebnis:

- Es wurden alle Wagen im Zugverband korrekt erkannt. Die vom Powerline-PLUS-Kommunikationssystem bestimmte Reihenfolge stimmte mit der realen Wagenreihung überein.
- Es wurden während der Fahrt keine Ausfälle der Integritätserkennung beobachtet.

5.2.4 Messfahrt Minden – Bebra

In der Messfahrt Minden – Bebra befand sich der Messwagen zwischen Lok und Wagen 7. Da die Verbindung von Wagen 7 zu Wagen 15 gestört bzw. dauerhaft unterbrochen war, wurde hier ein Überbrückungskabel installiert. Im Übrigen wurde der gleiche Messaufbau wie der für die vorhergehenden Messfahrten genutzt.

⁴ EDDP WP1 SG2

Wie während der vorigen Messfahrten konnten keine direkten Verbindungsunterbrechungen erkannt werden. Weiterhin wurden in gleicher Größe Störungen auf der Zweidrahtleitung gemessen.

5.2.5 Messfahrt Bebra – Lichtenfels

Um einen Eindruck von der Ursache der Störungen zu gewinnen, wurde zunächst der Messaufbau nur an einer Wagengruppe gemessen. Die Zweidrahtverbindung zwischen den Wagengruppen wurde an der Stelle zwischen Wagen 9 und Wagen 3 getrennt. Somit wurde die Messschleife nur mit fünf Wagen gemessen. Zwischen Wagen 7 und Wagen 15 war aufgrund einer defekten E-Kupplung ein Überbrückungskabel installiert.

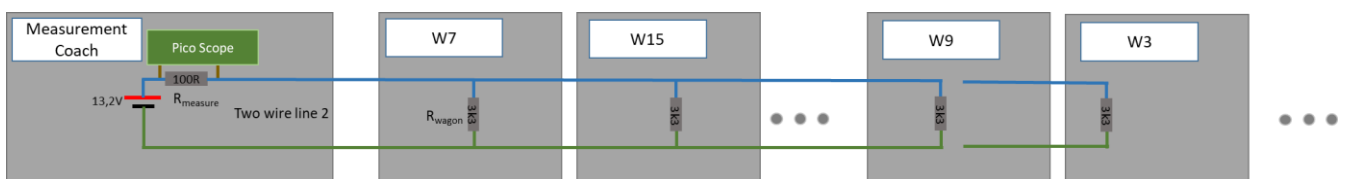


Abbildung 29: Aufbau der Messung durch eine Wagengruppe

Ergebnis:

- Die Messungen zeigten keine Verbindungsunterbrechungen,
- Es waren Störungen auf der Leitung erkennbar, allerdings weniger Störungen mit geringerer Amplitude im Vergleich zu den Messungen über den gesamten Zug.

Der Grund für ein besseres Ergebnis bezüglich der Störungen kann in der kürzeren Leitung des gemessenen Leitungssystems liegen, da über weniger Wagen gemessen wurde. Als weiterer Grund könnte eine Störquelle oder Kopplungsstelle außerhalb dieser Wagengruppe bestehen, über die Störungen auf die Zweidrahtleitung eingekoppelt werden.

5.2.6 Pendelfahrt Lichtenfels – Probstzella – Lichtenfels

Um die Störquelle weiter einzugrenzen, wurde das Messsystem mit dem Oszilloskop in der zweiten Wagengruppen installiert. Die größere zweite Wagengruppe (insgesamt 12 Wagen) wurde in zwei Gruppen mit 7 Wagen und 4 Wagen aufgeteilt.

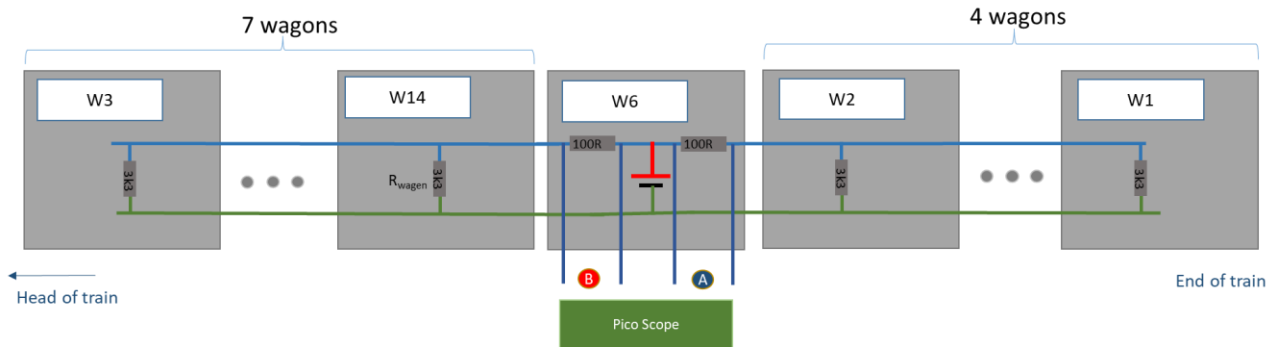


Abbildung 30: Aufbau der Messungen in der Messfahrt Lichtenfels – Probstzella – Lichtenfels

Ergebnis:

- Es konnten keine Unterbrechungen der Kontakte festgestellt werden,
- Es wurde eindeutig Nebensprechen auf der Verbindungsseite (A) in Richtung Zugende identifiziert. Auf dem Signal der Zweidrahtleitung 2 zeichnen sich die Powerline-PLUS-Pakete ab, die auf der Stromleitung übertragen werden.
- Es sind auf beiden Strängen starke Störungen erkennbar. Im Vergleich zur Messung der ersten Wagengruppe (Messfahrt Bebra – Lichtenfels) haben die Störungen eine deutlich größere Amplitude.

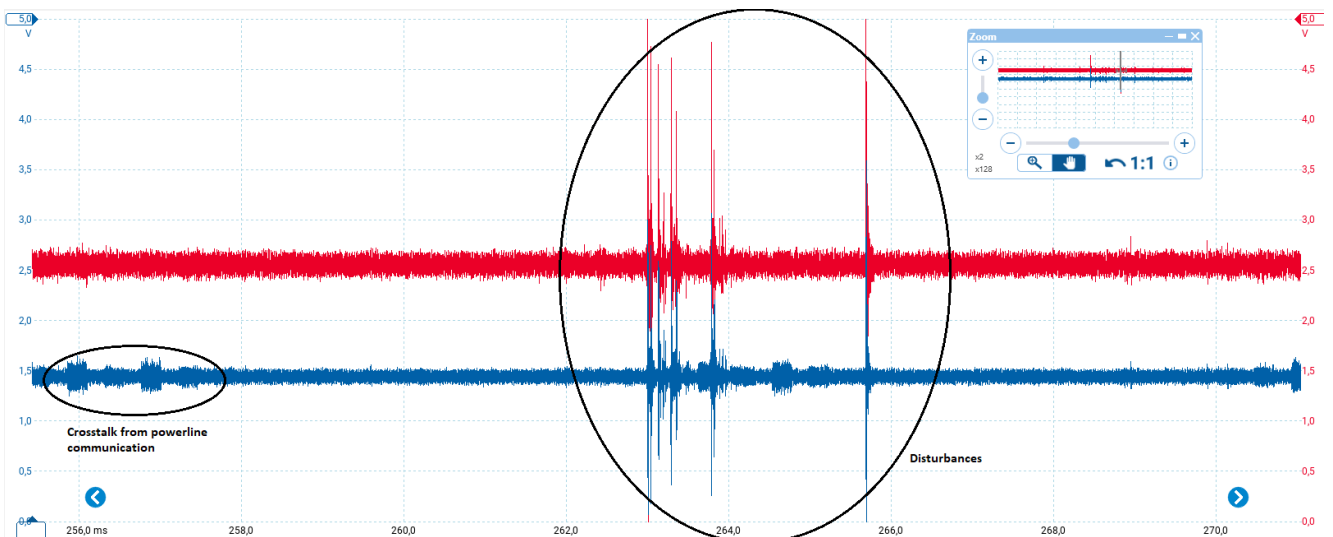


Abbildung 31: Messergebnis der zweiten Wagengruppe

Nach Analyse der Störungen wurde davon ausgegangen, dass eine Einkopplung der Störungen durch die Stromleitung auf die Zweidrahtleitungen die Ursache für die Störungen auf der Zweidrahtleitung darstellt. Auf der Zweidrahtleitung in Richtung Zugende (Abbildung 31, blaues Signal) scheint die Einkopplung stärker zu sein. Hier ist auch das Nebensprechen der Powerline-PLUS-Kommunikation zu beobachten. Man muss allerdings berücksichtigen, dass das Powerline-PLUS-Signal nur leicht über dem Rauschen liegt und das Rauschen in der anderen Richtung größer ist (rotes Signal).

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass eine Kopplung der beiden Leitungsstränge besteht, da der Strom zur Messung aus der gleichen Batterie entnommen wurde.

5.2.7 Messfahrt Lichtenfels – Mannheim

Bei der Messfahrt Lichtenfels – Mannheim befand sich der Messwagen am Ende des Zuges. Zwischen Lok und dem ersten DAK-Wagen wurden vierzehn beladene Ballastwagen eingefügt. Diese Zugkonfiguration führte zu sehr starken Längskräften, welche in den Ergebnissen der Messungen sichtbar waren.

Tabelle 27: Zugzusammenstellung Lichtenfels - Mannheim

14*Ballastwagen Faps											
Wg.1	Wg.10	Wg.11	Wg.2	Wg.6	Wg.14	Wg.4	Wg.5	Wg.18	Wg.19	Wg.20	Wg.3
						Wg.9	Wg.16	Wg.8	Wg.15	Wg.7	Wg.0 (MW)

Bei der Messfahrt wurde der Aufbau der Messungen verändert. Es wurden nun die Zweidrahtleitungen jeweils direkt an einen Messkanal angeschlossen und die Spannung auf der Stromleitung mit einem Spannungsteiler überwacht. Dafür wurde auf die Messung einer Richtung der Messschleife über die Zweidrahtleitung 2 verzichtet.

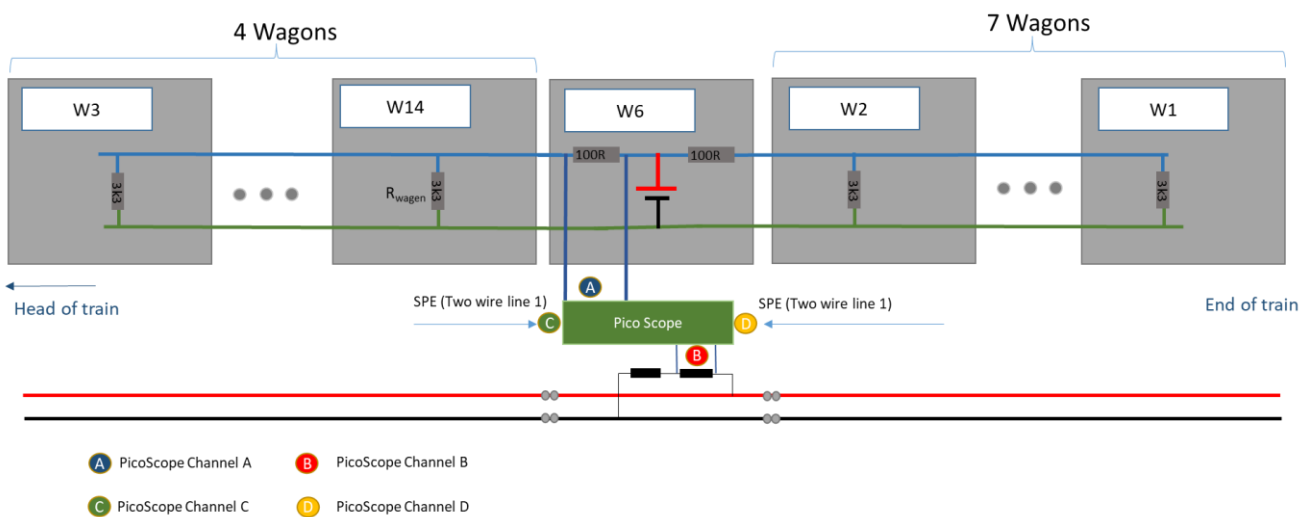


Abbildung 32: Aufbau der Messungen in der Messfahrt Lichtenfels – Mannheim

Ergebnis:

- Es konnte keine Unterbrechung der Kupplungskontakte in der Messschleife (Wagen 14 zu Wagen 3) der Zweidrahtleitung 2 festgestellt werden.

- Die Messungen der Stromleitung zeigten Unterbrechungen (Abbildung 33). Die Unterbrechungen traten nur am Anfang der Messfahrt auf, sanfteres Anfahren und Abbremsen seitens des Triebfahrzeugführers führten zu geringeren Krafteinwirkungen. Insgesamt konnten sechs Unterbrechungen aufgezeichnet werden, mit einer Dauer von ca. 1,2 ms bis ca. 6 ms. Die Mehrheit der Unterbrechungen lag im Bereich von 1,2 – 2,5 ms.

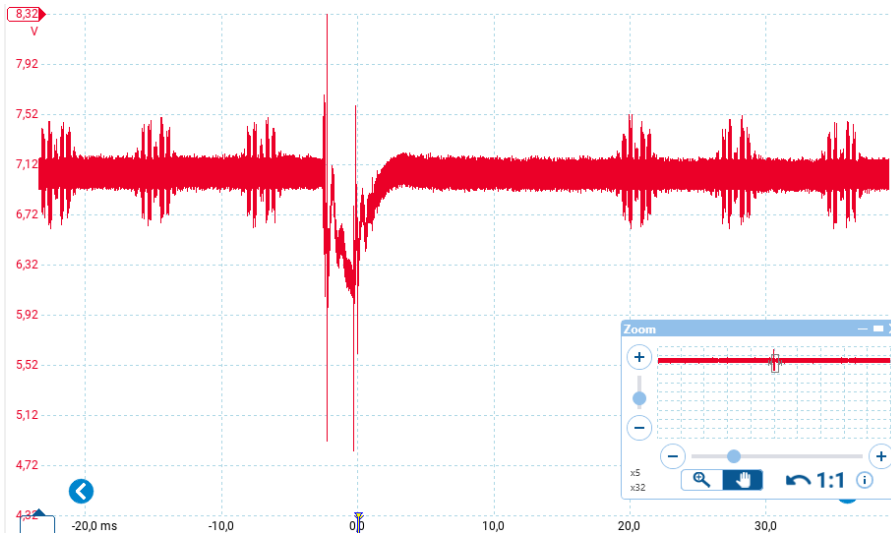


Abbildung 33: Einbruch der Spannung auf der Stromleitung durch Kontaktunterbrechung

- Bei Unterbrechungen der Stromleitungen sind ebenfalls signifikante Störungen auf der Zweidrahtleitung zu beobachten (Abbildung 34). Diese Effekte sind vermutlich nicht auf eine Unterbrechung der Kontakte der Zweidrahtleitung zurückzuführen. In diesem Fall müsste bei einer Unterbrechung im Bereich von einer Millisekunde ein deutlicher Einbruch des Messstroms zu sehen sein. Die Störungen resultieren vermutlich aus dem Nebensprechen der Stromleitung auf die Zweidrahtleitung. Die Spannungs- und Stromspitzen durch die Unterbrechung der Stromleitung führen zu einer Störung mit großer Amplitude auf der Zweidrahtleitung.

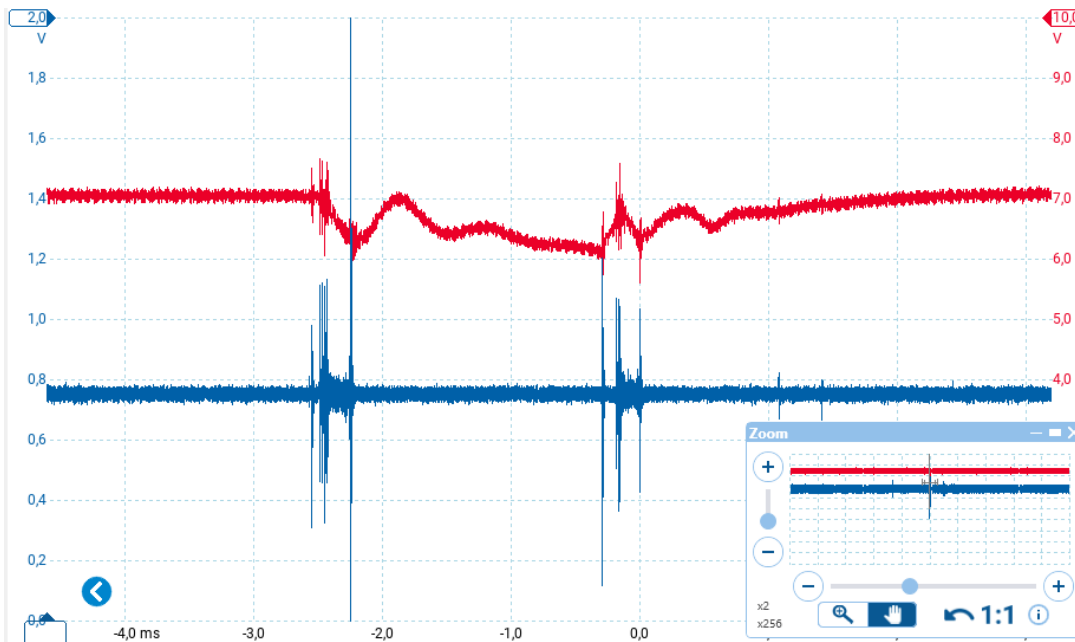


Abbildung 34: Störungen auf der Zweidrahtleitung zum Zeitpunkt der Powerline-PLUS-Unterbrechung

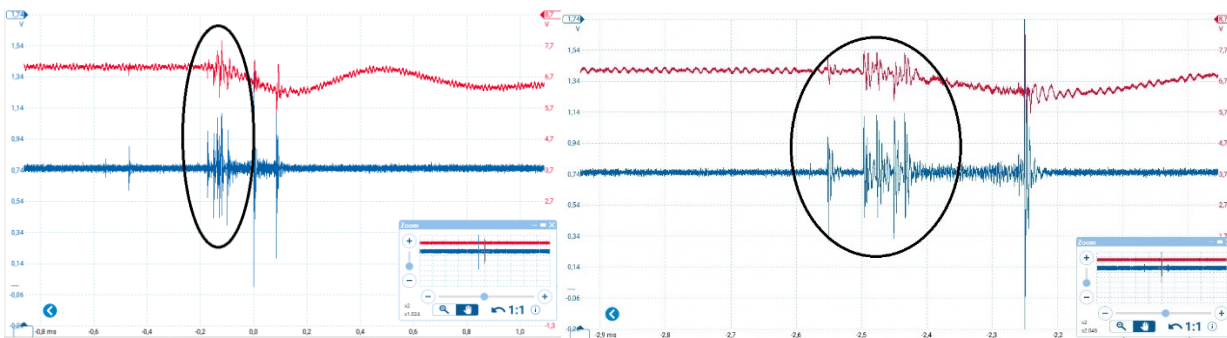


Abbildung 35: Störungen vor der Kontaktunterbrechung

- Interessant sind die Störungen, die vor dem offensichtlichen Kontaktabriss und dem damit verbundenen Einbruch der Spannung auf der Stromleitung und der Zweidraht-Leitung zu beobachten sind: Diese Art der Störungen ist auch ohne Einbruch der Spannung häufiger zu beobachten. Es könnte sich demnach bei einigen dieser Störungen um die Vorstufe zur Kontaktunterbrechung handeln. Diese „Beinahe-Unterbrechungen“ könnten dann durch Nebensprechen zu Störungen der SPE-Kommunikation führen.
- Es sind auch Auswirkungen der Kontaktunterbrechungen auf das Powerline-PLUS-Kommunikationssystem zu beobachten. Bei einigen der Kontaktunterbrechungen, die während der Übertragung eines Powerline-PLUS-Pakets auftraten, wurde die zyklische Kommunikation nach der Kontakt-Unterbrechung für ca. 20 ms ausgesetzt. Dies ist vermutlich auf Timeouts zurückzuführen, die sich bei einem Ausfall eines Pakets

aufaddieren. Eine Kontaktunterbrechung führt also zu einem Paketverlust, was jedoch keinen relevanten Einfluss auf Safety-Kommunikationsprotokolle hätte, bei denen Resilienz gegenüber einfachen Paketverlusten durch Implementierungen in höheren Protokollschichten erreicht wird.

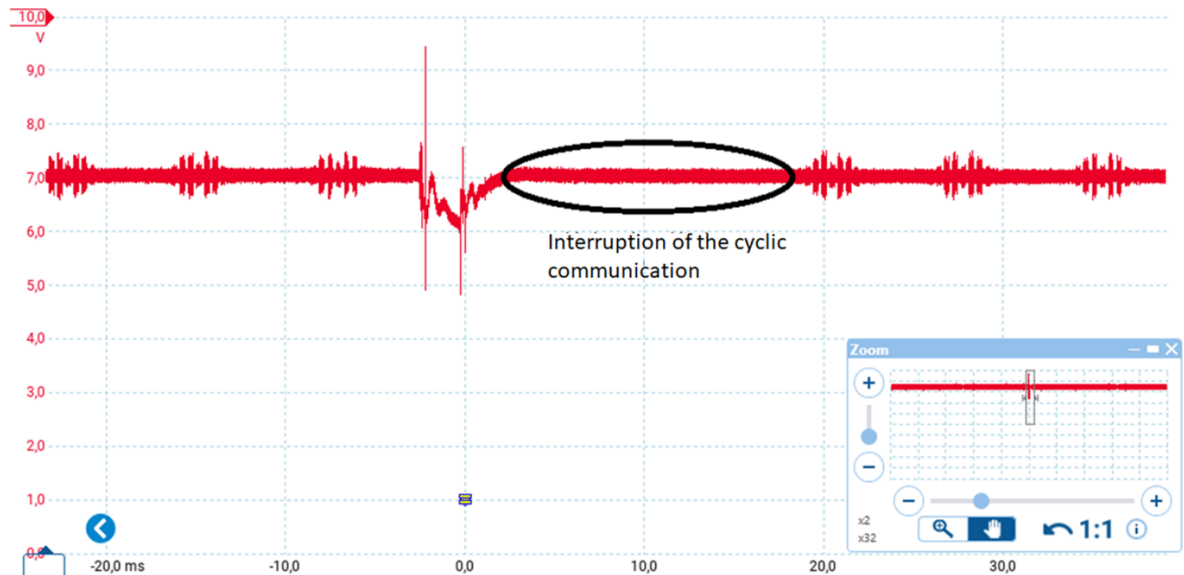


Abbildung 36: Einfluss der Kontaktunterbrechung auf zyklische Kommunikation beim Powerline-PLUS

5.3 Zusammenfassung und Ausblick

Während der Messfahrten konnte gezeigt werden, dass eine Kommunikation über die Kupplungen sowohl mit Powerline-PLUS als auch mit SPE möglich ist. Im Stand während der Initialisierung der Kommunikationssysteme gab es grundsätzlich keine Probleme. Eine durchgängige Kommunikationsverbindung war bei jeder Inbetriebnahme möglich. Während der Fahrt zeigten sich Unterschiede zwischen den Kommunikationssystemen. Das WiFi-Kommunikationssystem wurde in der installierten Form (WiFi-Komponenten, Funkverbindung über den Berner Raum) als ungeeignet bewertet.

Messungen der Stromleitung zeigten, dass zumindest in einer der beiden Wagengruppen Kontaktunterbrechungen von wenigen Millisekunden durch mechanische Kräfte auftreten. Weiterhin lassen die Messungen darauf schließen, dass es Mikrounterbrechungen im Bereich von 100 μ s oder kleiner gibt, die zu Störungen auf den Leitungen führen. Ob es sich bei diesen Effekten um eine vollständige Kontaktunterbrechung handelt, oder lediglich eine kurzzeitige Widerstandsänderung, kann nicht abschließend beurteilt werden. Für die Stromversorgung über die Stromleitung hat dieser Effekt grundsätzlich keine Relevanz, solange keine Funkenbildung an den Kontaktstellen entsteht und zu einer langfristigen Beschädigung der Kontakte führt. Dies kann aktuell nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da die Störpulse auf der Zweidrahtleitung auch aus einer sehr kurzzeitigen Funkenbildung in den Stromleitungskontakten resultieren können.

Die Auswirkungen auf die Powerline-PLUS-Kommunikation sind gering: Hier kann es zu wenigen sporadischen Paketverlusten kommen, was sowohl die Messungen der Verfügbarkeit als auch die Messungen mit dem Oszilloskop gezeigt haben. Die Überwachung der Zugintegrität über das Powerline-PLUS-Kommunikationssystem wurde durch die Unterbrechungen nicht beeinflusst. Die Resilienz des Powerline-PLUS-Kommunikationssystems gegenüber dem SPE-Kommunikationssystem kann bezüglich Störungen auf der Leitung als auch gegenüber Unterbrechungen als größer bezeichnet werden.

- Durch die OFDM-Modulation (Orthogonal Frequency Division Multiplex) und Codierungsverfahren, welche FEC (Forward Error Correction) erlauben, können kurzzeitige Fehler teilweise kompensiert bzw. korrigiert werden.
- Durch die Link-freie Kommunikation führt eine kurze Unterbrechung nicht zu einem erneuten Linkaufbau (im Unterschied zum SPE-Kommunikationssystem).

Bei der SPE-Kommunikation traten dagegen sporadische Paketverluste als auch längere Unterbrechungen der Kommunikation von einigen Sekunden auf. Die Paketverluste nahmen im Verlauf der Messfahrten zu (siehe Tabelle 26). Sporadische Paketverluste wurden vermutlich durch eingekoppelte Störungen verursacht. Auf der gemessenen Schleife durch mehrere Wagen (Kapitel 5.2.5) konnte eine Kopplung der Stromleitung zur Zweidrahtleitung nachgewiesen werden. Sowohl die Signale der Powerline-PLUS-Kommunikation als auch Unterbrechungen der Stromleitungen konnten ebenfalls auf der Zweidrahtleitung gemessen werden. Da in der anderen Wagengruppe keine derartige Kopplung sichtbar war, müssen die Gründe für die Kopplung in der betreffenden Wagengruppe entweder in dem Typ der E-Kupplung oder in einer fehlerhaften Leitungsinstallation vermutet werden. Hier ist weiterhin zu berücksichtigen, dass eine einfache Installation der Kommunikationskabel vorgenommen wurde, bei der der Schirm der Kommunikationsleitung nicht mit der Masse (Wagenkasten bzw. Schienenpotential) verbunden ist. Eine Optimierung der Störfestigkeit der Leitungsführung zur Verbesserung der SPE-Robustheit gilt es zu untersuchen.

Unterbrechungen der SPE-Kommunikation von einigen 100 ms bis zu wenigen Sekunden sind wahrscheinlich auf eine Linkunterbrechung der SPE-Verbindung zurückzuführen. Es gibt zwei Effekte, die zu einer Linkunterbrechung beim SPE führen können:

- Kontaktunterbrechungen in der Verbindungstechnik bzw. den Kupplungskontakten,
- Änderung des Kommunikationskanals, welche zu einer fehlerhaften Echo-Unterdrückung führt.

Spätere Untersuchungen mit einem Logikanalysator konnten in einer Messfahrt Unterbrechungen nachweisen. Weitere Messungen mit einem Oszilloskop und einer Überwachung aller Kontaktstellen einer Zweidrahtleitung zeigten dagegen keine Unterbrechung der Zweidrahtleitung. Unterbrechungen mit einer längeren Dauer (>700 ms) konnten auf eine spezifische Kupplungsstelle zurückgeführt werden (Wg.2 zu Wg.6). Eine Beschädigung der E-Kupplung war nicht offensichtlich, kann aber als Ursache nicht ausgeschlossen werden. Würde man die Fehler an der vermeintlich

defekten Kupplungsstelle herausrechnen, dann würde man auch beim SPE-Kommunikationssystem zu sehr guten Ergebnissen kommen. Das Problem der Resilienz gegenüber derartigen Fehlern ist damit aber nicht gelöst.

Weitere Untersuchungen in einem Laboraufbau haben ergeben, dass Unterbrechungen und Störungen von bis zu 500 μs keine Linkunterbrechung zur Folge haben. Dies betrifft sowohl vollständige Unterbrechungen als auch deutliche Kanaländerungen. Unterbrechungen in einem Zeitbereich von 500 μs bis ca. 10 ms führen zu einer Linkunterbrechung und damit einer Unterbrechung der Kommunikation von 0,8 bis 1,2 Sekunden. Unterbrechungen von Kupplungskontakten in diesem Zeitbereich werden als wahrscheinlich angesehen. Unterbrechungen im Bereich von 10 ms bis 200 ms führen dagegen nicht zu einem erneuten Linkaufbau. Innerhalb dieses Zeitbereichs synchronisieren sich die beiden SPE PHYs wieder und die Kommunikation läuft weiter. Nach der Definition der State-Machines im SPE-Standard [5] müsste sich die Kommunikation bis zu einer Unterbrechung von 200 ms wieder erholen. Damit würde sich der im SPE-Adapter verwendete SPE-PHY nicht standardkonform verhalten. Dies gilt allerdings nur unter der Bedingung, dass die Übertragungsparameter des Kommunikationskanal vor und nach der Unterbrechung vergleichbar sind. Ansonsten müsste der Kanal durch einen erneuten Verbindungsaufbau neu geschätzt werden. Bereits das Reiben von Kontakten führt nach [6] zu einem veränderten elektrischen Verhalten. Ob dies bereits zu einer Link-Unterbrechung beim SPE führt, kann als unwahrscheinlich angenommen werden.

In weiteren Untersuchungen bezüglich der Kommunikationstechnik sollte daher der Fokus auf folgende Aspekte gelegt werden:

- Im Rahmen der Umstellung der Stromversorgung von 110 V_{DC} auf 400 V_{AC} (zweiphasig) sollten die Auswirkungen auf die Kommunikationssysteme (Powerline-PLUS und SPE) untersucht werden.
- Das auffällig hohe Nebensprechen zwischen der Stromleitung und den Kommunikationsleitungen sollte untersucht werden. Hier ist es sinnvoll die Stelle aufzufinden, an der die Kopplung besonders groß ist und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Die Auswirkungen auf das SPE-Kommunikationssystem bezüglich der Fehlerrate sind zu untersuchen.
- Störungen auf den Zweidrahtleitung im Allgemeinen sind zu untersuchen. Diese können durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. das Verbinden des Leitungsschirms an definierten Punkten mit dem Wagenpotential verringert werden.
- Im SPE-Adapter wurde nur der Physical Layer Chip eines Herstellers (Texas Instruments) verwendet. Das Verhalten bei Kontaktunterbrechungen und Toleranz eines vergleichbaren Physical Layer Chips (Analog Device) sollte untersucht und den Ergebnissen des anderen Bausteins gegenübergestellt werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] S. Witte, S. Gerke, R. Hess und K. Röckemann, „Erstellung eines Konzeptes für die EU-weite Migration eines Digitalen Automatischen Kupplungssystems für den Schienenengüterverkehr,“ 2020.
- [2] DIN e.V., DIN IEC 62541, 2020.
- [3] DIN e.V., DIN IEC 61375-2-5, 2014.
- [4] S. Witte und R. Hess, „Erprobung: Digitale Automatische Kupplung - Prüfbericht Datenkommunikation,“ 2021.
- [5] IEEE, IEEE 802.3-2019, 2019.
- [6] S. El Mossouess, E. Carvou, R. El Abdi, N. Benjemâa, H. Obame, L. Doublet und T. Rodari, „Analysis of temporal and spatial contact voltage fluctuation during fretting in automotive connectors,“ 27th International Conference on Electrical Contacts, 2014.