

**Automation im Schienengüterverkehr:
Projekt «Erprobung der DAC4 in der Schweiz».**

Abschlussbericht HSLU / SBB Cargo,
gemäss Verfügung BAV vom 07. Juli 2022

Olten, 30.05.2024

SBB Cargo AG

Bahnhofstrasse 12, 4600 Olten, Schweiz
Aldo Smania, Marten Strotkötter
www.sbbcargo.com

Hochschule Luzern

Competence Center
Intelligent Sensors and Networks
Technikumstr. 21, 6048 Horw, Schweiz
Prof. Dr. Jürgen Wassner, Prof. Dr. Ulrich Dersch
www.hslu.ch/isn

Inhaltsverzeichnis

Referenzen	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis und Definitionen	7
1. Management Summary	8
2. Ausgangslage	10
2.1. Projektziele	10
2.2. Projektmanagement	11
2.2.1. Projektorganisation	11
2.2.2. Methodik	12
2.2.3. Einbindung in die EU-Projektlandschaft.....	12
2.2.4. Einbindung Betriebspersonal.....	13
3. Testziele / Test-Cases	14
4. Systemkonzept des DAC+ Testzuges	16
4.1. Zusammensetzung und Ausrüstung	16
4.2. Architektur des Waggon-Strom- und Kommunikations-Testsystems	17
4.3. Architektur des realisierten Waggon-Testsystems	18
4.4. Architektur des emulierten Strom- und Kommunikations-Testsystems der Lokomotive	19
4.5. Zusätzliche Test- und Messsysteme auf dem DAC+ Testzug	19
4.6. Installationen der Testsysteme auf dem DAC+ Testzug	20
4.6.1. Risikoanalyse	21
5. Testdurchführung	22
5.1. Testumgebung	22
5.2. Testplanung und Ressourceneinsatz	23
5.3. Stand- und Kupplungstests in Lupfig	23
5.4. Rangiertests	23
5.5. Testfahrten	24
5.6. Präsentationen Testzug	24
6. Testresultate	25
6.1. Vorgehen Testresultate	25
6.2. Performanz Tests	25
6.2.1. Stromsystem	25
6.2.2. Kommunikationssystem	25
6.3. Datenerfassung und -analyse	26

6.4. Resultate der Tests der Automationsfunktionen	27
6.4.1. Train Composition Detection	27
6.4.2. Automatische Bremsprobe	27
6.4.3. Monitoring der Zugintegrität.....	28
6.4.4. Automatische Entkupplung.....	28
6.5. Performanz Analyse	30
6.5.1. e-Coupler-Varianten.....	30
6.5.2. Stromversorgungssystem.....	30
6.5.3. Kommunikationssystem	32
6.5.4. Zusammenfassung Performanz Analyse	34
6.6. Zusätzlich Euroloop-Tests	35
7. Nutzen für Schienengüterverkehr	36
8. Austausch mit den europäischen Projekten	36
8.1. Allgemein	36
8.2. EDDP	36
8.3. ERJU FP5-TRANS4M-R	36
8.3.1. WP2 / künftige operative Prozesse.....	36
8.3.2. WP18 / Stand der Vergleichstest SPE vs. Powerline und Auswirkungen.....	36
8.3.3. WP18 / WP14 / Demozüge.....	37
8.4. DAC4EU	37
9. Kosten	37
10. Ausblick	37
10.1. PLC Technologie	38
10.2. Kupplungsfunktionalitäten	38
11. Anhänge	39
11.1. Technologieausrüstung und deren Schnittstellen.....	39
11.1.1. Details zur Technologieausrüstung des Wagen-Testsystems.....	39
11.1.2. Architektur des emulierten Strom- und Kommunikations-Testsystems der Lokomotive	43
11.1.3. Zusätzliche Test- und Messsysteme auf dem DAC+ Testzug.....	44
11.1.4. Installationen der Testsysteme auf dem DAC+ Testzug	46
11.2. Example of Test Report of a Test Drive	47
11.2.1. Test Drive Info.....	47
11.2.2. Test Drive Train Topology	48
11.2.3. Test Drive Features.....	48
11.2.4. GPS Data Profiles	49
11.2.5. PTB Train Composition Detection	50

11.2.6.	PTB Transmission Analysis.....	50
11.2.7.	Power System Analysis.....	53
11.2.8.	e-Coupler Photos	54
11.2.9.	CouplerSense Measurements.....	57
11.2.10.	Insulation Resistance Measurements.....	58
11.2.11.	Technical Log Book.....	59
11.2.12.	Summary.....	61

Referenzen

- [1] OWITA GmbH, Roland Hess, *Projektpräsentation "DAC4EU Data Communication Tests"*, https://www.dac4.eu/wp-content/uploads/09_DAC4EU-Data-Communication-Tests_R.-Hess-Owita.pdf, November 2022.
- [2] SBB, Regelwerk SBB, K 250-1, Umgang mit sicherheitsrelevanten Änderungen, Regelwerksversion 5-0, DMS ID 7748809, 20. Juli 2023.
- [3] SBB Cargo, Aldo Smania, *Testbericht Ablaufbergtests, "24.02.26_Bericht DAC+: Ablaufbergtests_V1.0"*, Februar 2024.
- [4] SBB Cargo, Aldo Smania, *Testbericht e-Coupler "Bericht DAC+: e-coupler Tests 05.12.2023 in Lupfig"*, Dezember 2023.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Organigramm.....	11
Abbildung 2: Projektpartner	11
Abbildung 3: GANTT-Chart Feldtests	12
Abbildung 4: Flussdiagramm Methodik.....	12
Abbildung 5: EU Projektlandschaft	12
Abbildung 6: FP5 TRANS4M-R Workpackage (WP) Übersicht.....	13
Abbildung 7: Übersicht DAC+ Testzug Komposition	16
Abbildung 8: IEC Train Communication Network Architecture	17
Abbildung 9: Architektur des auf PTB basierten Waggon-Strom- und Kommunikationssystems.....	17
Abbildung 10: Auf den Test-Wagen implementierte Waggon-Architektur.....	18
Abbildung 11: Architektur des H-Wagens als emulierte Lok	19
Abbildung 12: Lupfig Gleisplan	22
Abbildung 13: Satellitenbild Abstellgleis Lupfig.....	22
Abbildung 14: Streetview Abstellgleis Lupfig	22
Abbildung 15: Architektur des Datenerfassungs- und Auswertungssystems.....	26
Abbildung 16: Ausgabe des Protokolls zur Erkennung der Zugtopologie.....	27
Abbildung 17: Darstellung der ABP-Anwendung auf dem ABP-Tablet von SBB Cargo.....	28
Abbildung 18: Histogramm der Mikrounterbrechungen am alten Voith e-Coupler (statischer Kopf) während der Testfahrt am 7. Dezember 2023	31
Abbildung 19: Fotodokumentation des Knorr-Bremse e-Couplers 3B vom 8. September 2023.....	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die primären zu testenden FDFT-Automatikfunktionen basierend auf PTB.....	15
Tabelle 2: Weitere zu testende FDFT-Überwachungsfunktionen basierend auf PTB.....	15
Tabelle 3: Mess- und Prüfgeräte am DAC+ Testzug.....	20
Tabelle 4: Übersicht Rangiertesttage.....	23
Tabelle 5: Übersicht Testfahrten.....	24
Tabelle 6: Übersicht Präsentation des Testzuges.....	24
Tabelle 7: PTB-Token-Statistik für alle Testfahrten.....	33
Tabelle 8: Zusammenfassung der Testresultate des DAC+ Testzuges	34
Tabelle 9: Zusammenfassung der Testresultate der Automationsfunktionen	35

Abkürzungsverzeichnis und Definitionen

Abkürzung	Voller Begriff	Erklärung
ABP	Automatische Bremsprobe	Digitales System zur Durchführung des Bremsprobe- prozesses
CCU	Central-Control-Unit	Zentrale Kontroll- und Steuerungseinheit auf einem Fahrzeug
CIS	Cargo Informationssystem	SBB internes IT-System
CH-Erpro- bung-DCA4		Name dieses Projekts
	Consist	Ein Güterwagen oder eine Lok
DAC	Digital Automatic Coupler	Mittelpufferkupplung für Güterwagen und Loks wel- che zusätzlich mit einer Elektrokontaktkupplung zur Übertragung von Strom und Daten ausgerüstet ist. DAC welche beim Kuppeln der Fahrzeuge die me- chanische sowie die Verbindung der Hauptluftleitung automatisch herstellt. Das Entkuppeln erfolgt manuell über eine mechanische Einrichtung an der Wagen- seite (inkl. Ablaufbergtauglichkeit). Die DAC2 verfügt über KEINE Elektrokontakt- kupplung.
DAC2		DAC2 + Daten- und Stromübertragung via Elektro- kontaktkupplung, welche die Nutzung weiterer Sys- teme wie zB. ABP, Zugsintegrität usw. ermöglicht.
DAC4		DAC4 + Entkupplung mittels Druckknopf an der Wa- genseite (inkl. Ablaufbergtauglichkeit)
DCA4.5		DAC4.5 + System für Fern-Entkupplung mittels HMI/Tablet, über Steuerungssysteme der Rangier- bahnhöfe oder über das FDFT-Backend (inkl. Ablauf- bergtauglichkeit).
DAC5		Testzug für die Erprobung der DAC4.5 im Projekt CH-Erprobung-DAC4
DAC+ Testzug		
EDDP	European DAC Delivery Programm	
ERJU	Europe's Rail Joint Under- taking	
FDFT	Full Digital Freight Train	
HMI	Human Maschine Interface	Tablet oder ähnliches zur Anzeige von Daten und Steuerung von Befehlen.
HSLU	Hochschule Luzern	
LORA	LoRA Funk	Long Range Funkkommunikationstechnologie, wel- che bei der ABP zum Einsatz kommt.
PLC	Powerline Communication Technologie	
PLUS	Power Line data bUS	plc-tec's PLC Technologie, entwickelt zusammen mit der HSLU
	Prevent coupling	Verhindert das mechanische Kuppeln von zwei DAC bei Zusammentreffen der Fahrzeuge. Die Verhinde- rung wird in verschiedenen Rangierprozessen benötigt.
PTB	Powerline PLUS Train Backbone	plc-tec's Güterzug-Backbone, entwickelt zusammen mit der HSLU
	Wageneinheit ABP	System für die Automatische Bremsprobe von PJM

1. Management Summary

Rahmenbedingungen

Mit der Verfügung des Bundesamtes für Verkehr vom 07.07.202 wurde das Konsortium bestehend aus der Hochschule Luzern, SBB Cargo AG, den Firmen plc-tec, Voith und PJM mit der dem Auftrag „Automation im Schienengüterverkehr: Erprobung der digitalen automatischen Kupplung (DAC4) in der Schweiz“ betraut.

Ein Hauptziel des Forschungsprojekts war, aufgrund von Stand-, Rangier- und Fahrtests in realer Betriebsumgebung und unter realen Betriebsabläufen Resultate betreffend der Erfüllung und Robustheit der wichtigsten automatisierten Zugfunktionen auf der Basis des Powerline PLUS Train Backbones zu gewinnen.

Im Weiteren sollen die von den Projektpartnern gelieferten Komponenten und Systeme auf deren Betriebstauglichkeit geprüft werden und die aus den Tests hervorgehenden Resultate für die Weiterentwicklung dieser genutzt werden.

Zudem sollen Inputs für die künftigen Arbeitsprozesse, Sicherheitsanforderungen und Anforderungen an die Infrastrukturanlagen usw. gewonnen werden, welche auch den europäischen Gremien (EDDP, ERJU usw.) zur Verfügung gestellt bzw. in den verschiedenen europäischen Gremien zur Diskussion und Technologieentwicklung genutzt werden.

Testumgebung

Dafür wurde ein Test- und Versuchssystem aufgebaut, das einerseits auf den Vorarbeiten im DAC4EU-Testzug basiert, aber andererseits auch die, seit der Konzipierung des DAC4EU-Testzugs im Jahr 2020, getätigten Weiterentwicklungen aus EDDP sowie seit Juli 2022 laufenden ERJU FP5-TRANS4M-R beinhaltet. Dazu zählen:

- Systemarchitektur für die Strom- und Kommunikationssysteme um die automatisierten Zugfunktionen zu erfüllen, basierend auf den Vorgaben von EDDP:
 - o 2-Phasen 400 VAC Zugstromsystem
 - o Train-Communication-Network (TCN, IEC 61375) konforme Architektur für das Kommunikationssystem – mit Train Backbone Nodes in jedem Fahrzeug, Datenübertragung über den Backbone, Consist internes Kommunikationssystem (Ethernet, CAN), etc.
- Modularität der Systemimplementation in Central-Control-Unit (CCU), Junction Boxen, e-Couplern, Stromkabel, etc.

Betreffend der Zugfunktionen wurden folgende Weiterentwicklungen vorgenommen und getestet:

- Automatische Bremsprobe:
Das bereits zugelassene System von PJM wurde DAC-fähig gemacht, indem
 - o die Daten für dieses System nicht mehr über LORA, sondern EDDP-konform über den Backbone übertragen werden
 - o die Stromversorgung des Systems durch das Zugstromsystem erfolgt.
- Entkupplungseinrichtung:
Durch Voith und HSLU wurde ein Prototypsystem für die Entkupplung sowohl über Druckknöpfe von der Wagenseite (DAC4.5 Stufe) als auch remote (DAC5 Stufe) von einem Tablet aus realisiert und getestet.
Die Datenübertragung erfolgt dabei EDDP-konform über den Backbone sowie ein Consist internes Kommunikationssystem.

Bezüglich Ausrüstung von Strecken- und Rangierloks für den digitalen Güterzug bestehen noch keine konkreten Spezifikationen, welche für das DAC+ Projekt verwendet werden konnten. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, eine der bei SBB Cargo vorhandenen Re420 mit Hybridkupplung «Testzugtauglich» zu machen. Die «Lokfunktionalitäten» wurden daher in einem entsprechenden Güterwagen installiert, welcher fix in die Testkomposition integriert wurde. Für die Testfahrten und Rangiertests konnten somit «normale», nicht umgebaute Strecken- oder Rangierloks von SBB Cargo verwendet werden.

Testresultate

Um die Resultate der Tests und der Funktionalitäten nachzuweisen wurden verschiedene Mess- und Testsysteme auf dem Zug installiert.

Im Zeitraum von 13.02. bis 08.12.2023 wurden:

- 16 Tage für Installations- und Umbauarbeiten verwendet
- an 10 Tagen Stand- und Kupplungstests in Lupfig durchgeführt
- an 8 Tagen Rangiertests an Verschiedenen Standorten durchgeführt
- an 20 Fahrtagen insgesamt 4'211 Kilometer absolviert
- an 5 Events der Testzug vorgestellt.

Die Testergebnisse zeigen, dass die vier wesentlichen automatisierten Zugfunktionen

- Erkennen der Zugzusammenstellung (Wagenreihung und Wagenausrichtung),
- Automatische Bremsprobe,
- Zugvollständigkeitsprüfung / Train composition detection und
- Automatisches Entkuppeln (remote via Tablet oder von der Wagenseite mittels Druckknopf)

auf Basis des PTB-Kommunikationssystems mit Datenübertragung über die Zugstromleitung und deren Federdruck-Kontakte in den eingesetzten e-Couplern, einschließlich der neuen e-Coupler-Prototypen von Voith und Knorr Bremse, robust und zuverlässig funktionieren.

Einzig beim Überfahren von Euroloops kam es in wenigen Fällen zu Übertragungsfehlern der Daten. Entsprechende Analysen zu den Ursachen sind eingeleitet.

Das (elektrische) Entkuppeln mittels Druckknopf am Wagen funktionierte bei den Tests zuverlässig, jedoch erwies sich die installierte Full Digital Freight Train (FDFT)-Funktion „prevent coupling“ in den spezifischen Tests als nicht Ablaufbergtauglich, da die Rückstellung prevent coupling mittels Lichtsensor aufgrund äusserer Einflüsse / Reflektionen aus dem Gleisumfeld zu Fehlverhalten des Systems führte.

Fazit

Dies sind wesentliche Ergebnisse mit grossem Nutzen für die Weiterentwicklung der DAC und des FDFT, die in den weiteren Entwicklungen bei EDDP, im ERJU FP5-TRANS4M-R-Projekt sowie in der beginnenden CENELEC-Standardisierung voll zum Tragen kommen werden und als Grundlage für die technische Spezifikation des FDFT dienen. Im Weiteren wurden die Testresultate zur Entscheidungsfindung, welches Konzept des e-Couplers in Zukunft auf den FDFT in Europa eingesetzt wird verwendet.

Sämtliche Umbauarbeiten, Stand- Rangier- und Fahrtests konnten ohne Schäden „an Mensch und Maschine“ durchgeführt werden.

Die finanzielle Abrechnung des Projektes erfolgt in einem speziellen Bericht und ist nicht Teil dieses Berichtes.

Ausblick

Obwohl mit der 2023 durchgeführten Testkampagne viele Erkenntnisse zur Anwendbarkeit der „Power Line Communication“ im künftigen digitalen Güterzug gewonnen werden konnten und auch die verbauten mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten auf ihre betriebliche und technische Tauglichkeit im Schienengüterverkehr geprüft wurden, sind bis zu einer finalen und zulassungsfähigen Lösung noch viele weitere Entwicklungs- sowie Testschritte notwendig.

Für weitere Rangier- und Standtests, wie auch für Testfahrten, steht der Testzug auch im Jahr 2024 zur Verfügung.

2. Ausgangslage

Die Hochschule Luzern und SBB Cargo haben beim Bundesamt für Verkehr am 01.02.2022 den Förderantrag gemäss Gütertransportgesetz Art. 10 und Gütertransportverordnung Art. 19 ff. zur Unterstützung des Projektes „Automation im Schienengüterverkehr: Erprobung der DAC4 in der Schweiz“ gestellt, welchem das BAV mittels Verfügung am 07.07.2022 zugestimmt hat.

Das Projekt umfasst die Ausrüstung eines Testzuges mit den hauptsächlichen Automationsfunktionen des künftigen digitalen Güterzuges, die Ausrüstung des Testzuges mit Messsensorik, die Durchführung von realitätsnahen Tests im Rangierbetrieb und bei Zugfahrten sowie die Auswertung, Analyse und Dokumentation der Testergebnisse.

2.1. Projektziele

Gemäss Antrag HSLU / SBB Cargo vom 01.02.2022 sind folgende Ziele zu erreichen:

- Dokumentierte Spezifikationen der Systeme und Komponenten der DAC4 (Stand Ende 2023) verifiziert durch Tests in realen Produktionsabläufen und Umgebungen stehen für die Migration zur Verfügung bezüglich:
 - o die Planung der technischen Umrüstung,
 - o Beschaffungsstrategie,
 - o Vorgaben für die System- und Komponenten-Lieferanten, etc.Die Spezifikationen sind
 - o europäisch abgestimmt mit EDDP
 - o in den Prozess des Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) TC9X (Electrical and electronic application for railways) eingebracht.Spezifische Schweizer Anforderungen sind weitestmöglich berücksichtigt, insbesondere die Integration in das Schweizer Zugsicherungssystem.
- Dokumentierte Testresultate und Erfahrungen mit automatisierten Betriebsabläufen mit diesen Systemen und Komponenten stehen zur Verfügung für die neu zu definierenden betrieblichen Prozesse für die Migration.
- Gestärkte Zusammenarbeit mit den Lieferanten: Das iterative Vorgehen gewährt Stabilität und Kontinuität betreffend den Lieferanten. Die Zusammenarbeit und das entstandene Know-how werden mit diesem Projekt gestärkt und nicht durch einen mehrjährigen Unterbruch bis zum Start der Migration unterbrochen.
- In Richtung europäischer Partner ist das Projekt ein wichtiges Signal, das die Entschlossenheit des Schweizer SGV unterstreicht, die Umsetzung der Automation mittels der dafür erforderlichen DAC4 voranzutreiben.

Zur Zielerreichung hat das BAV die folgenden Aufgaben verfügt:

- Im Rahmen des Projekts werden an einem funktionalen Testzug technische und betriebliche Tests der DAC4 durchgeführt sowie die technischen Spezifikationen erstellt. Das Projekt umfasst die für die Migration geplanten Technologien, die durch die DAC4 ermöglicht werden. So werden im Projekt
 - o die automatische Bremsprobe,
 - o das Stromversorgungs- und das Kommunikationssystem,
 - o die Zugintegritätsinformation,
 - o die automatische Zugsvorbereitung (eng. Train Composition Detection)funktional dargestellt und getestet.
- Im Hinblick auf die Erweiterung auf die DAC4 (zusätzliche Strom- und Datenübertragung über die DAC) wird im Rahmen des Projekts die Erprobung
 - o der e-Coupler (fixed Head) von Voith
 - o der e-Coupler (movable Head) von Knorr Bremse und Voith (je ein Paar)
 - o der PTB-Technologie (Powerline PLUS Train Backbone)vorgenommen.

- Während es für manche Funktionalitäten bereits fortgeschrittene Spezifikationsvorschläge gibt, liegen für andere noch keine Lösungsvorschläge vor. Es geht also nicht nur um die Einführung von bereits serienreifen und zugelassenen Systemen, sondern es müssen die technische Machbarkeit und der Nutzen der Systeme respektive ihrer jeweiligen Umsetzungsvarianten erprobt werden.
- Die europäische Abstimmung erfolgt durch die Teilnahme der Projektpartner am European DAC Delivery Programme (EDDP) und am Projekt DAC4EU.
- Im Rahmen des Europe's Rail Joint Undertaking (ERJU) ist sicherzustellen, dass die Spezifikationen der DAC4 europäisch abgestimmt und durch Tests verifiziert sind.

Das Mengengerüst umfasst:

- einen Testzug, bestehend aus 6 Testwagen und einem Messwagen
- 10 jeweils einwöchige Messkampagnen mit Stand- und Rangiertests sowie Mess-/ Testfahrten innerhalb von 20 Monaten
- Für die Messkampagnen stellt SBB Cargo das Personal (Lokomotivführer, Begleitpersonal für Kupplungen, etc.) sowie die Rangier- und Streckenloks zur Verfügung

2.2. Projektmanagement

2.2.1. Projektorganisation

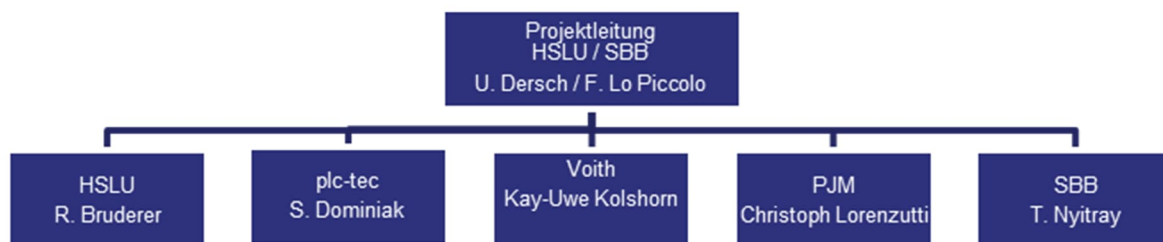


Abbildung 1: Organigramm



Abbildung 2: Projektpartner

Die Projektgruppe (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2) traf sich im Zeitraum des Projektes 2-wöchentlich im Rahmen des «Progress Meetings» zur Absprache der laufenden und anstehenden Arbeiten.

2.2.2. Methodik

Da die Systeme und Komponenten für die Anwendung im Schienengüterverkehr teilweise komplett neu gebaut oder den neuen Anforderungen angepasst werden mussten, wurde ein Testsetup gewählt, welches diesem Umstand Rechnung trug.

Die Systeme und Komponenten wurden durch die Projektpartner hergestellt oder angepasst und auf dem Testzug montiert. Anschliessend erfolgten die Tests. Aufgrund der Testergebnisse wurden die Systeme und Komponenten durch die verantwortlichen Projektpartner bei Bedarf angepasst / geändert und einer neuen Testreihe unterzogen. (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

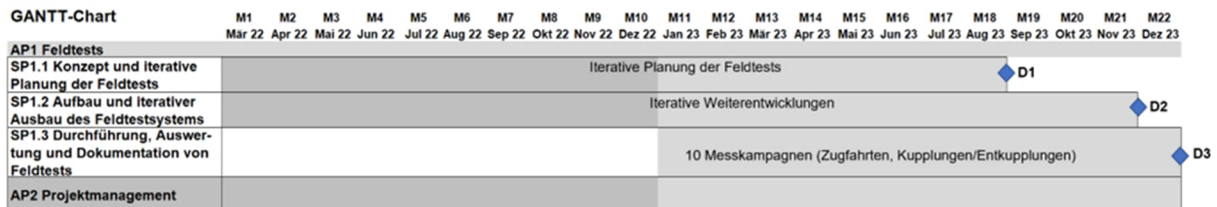


Abbildung 3: GANTT-Chart Feldtests

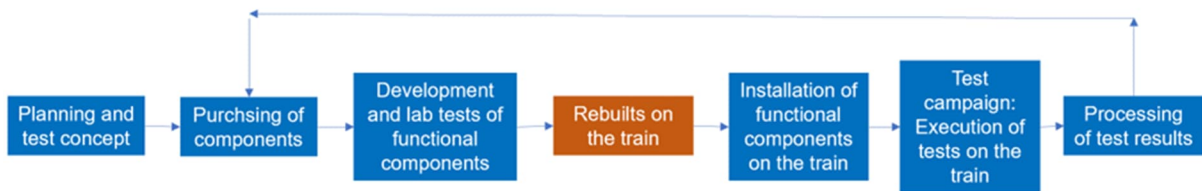


Abbildung 4: Flussdiagramm Methodik

2.2.3. Einbindung in die EU-Projektlandschaft

In der Schweiz wie auch in Europa gibt es zur DAC4 keine praktische Betriebserfahrung. Die auch für die Schweiz massgeblichen Spezifikationen für einen automatisierten und digitalisierten Schienengüterverkehr wurden und werden auf europäischer Ebene (Projekte «European DAC Delivery Programme (EDDP)» und «ERJU TRANS4M-R» sowie in «DAC4EU») evaluiert und festgelegt, wozu auch die Projektpartner dieses Projekts beitragen. Die Schweiz, nicht zuletzt wegen der vom BAV finanzierten Pilotprojekte, hat grossen Einfluss auf den Prozess und bringt neben den Resultaten aus dem vorliegenden Projekt auch die Erfahrungen von SBB Cargo aus dem operativen Betrieb mit einer Automatischen Kupplung (AKU, DAC2) im KV-Binnenverkehr mit ein.

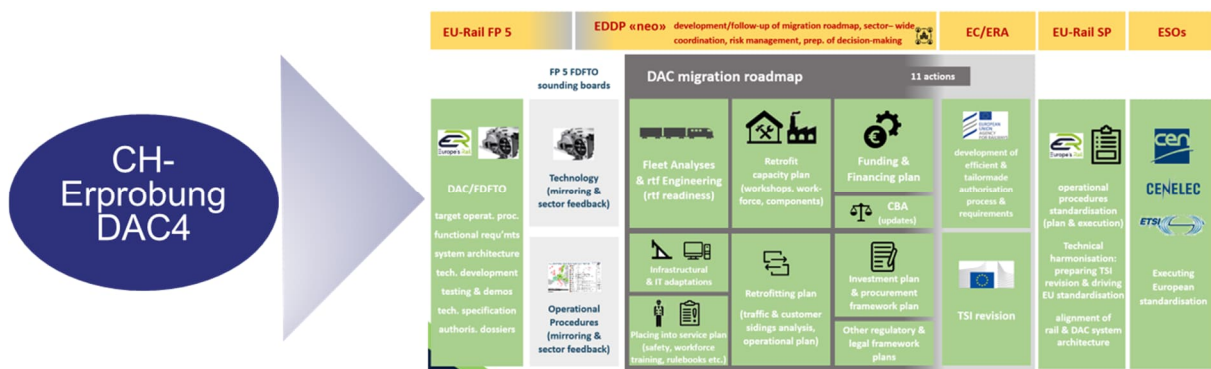


Abbildung 5: EU Projektlandschaft

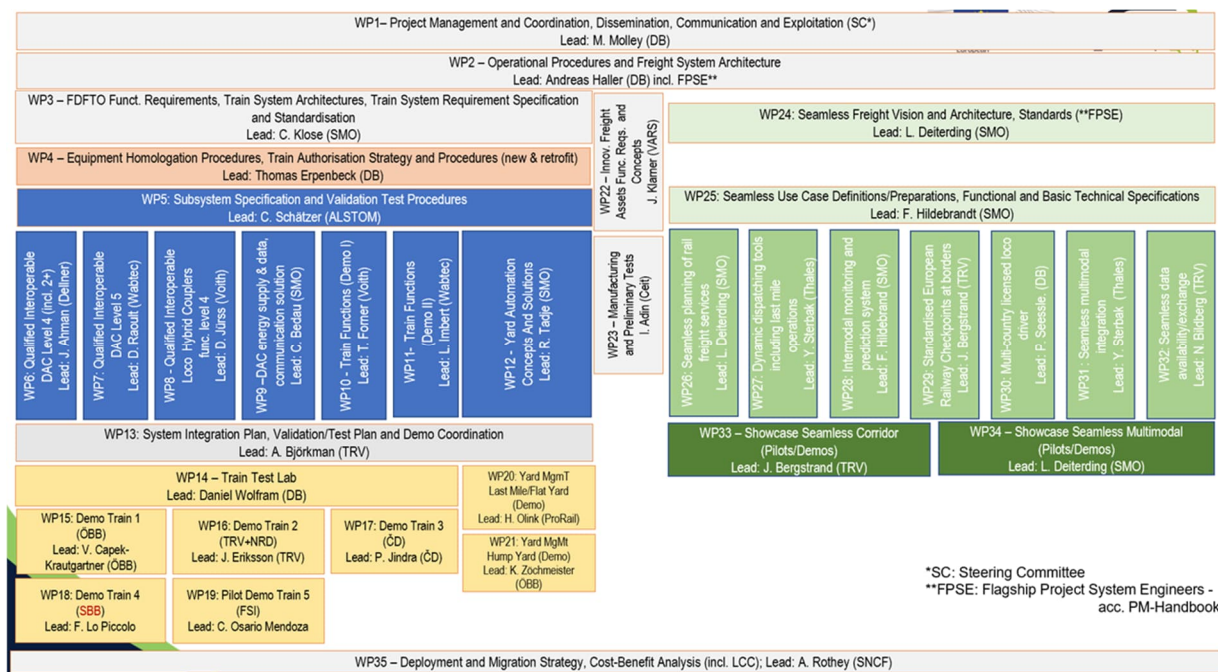


Abbildung 6: FP5 TRANS4M-R Workpackage (WP) Übersicht

Auf europäischer Ebene im Flagship Project 5 (FP5) TRANS4M-R spiegelt das «WP18 Demo Train» Teilprojekt das vorliegende Projekt «Erprobung der digitalen automatischen Kupplung (DAC4) in der Schweiz» wieder. Damit und mit dem Einsatz von Vertretern von SBB Cargo in weiteren WPs (u.a. WP2) ist der regelmässige Austausch auf europäischer Ebene gewährleistet.

2.2.4. Einbindung Betriebspersonal

Der Einbezug von Betriebspersonal erfolgte im Rahmen der durchgeführten Tests aus folgenden Gründen nur rudimentär, jeweils mit denen bei den Tests eingesetzten Mitarbeitenden (Rangierspezialisten, Lokführer).

- Die betrieblichen und aus Arbeitnehmersicht vorhandenen Anforderungen an die zu testenden Systeme wurden durch die in FP5 TRANS4M-R, WP2 beteiligten Mitarbeiter von SBB Cargo in das Projekt eingebracht.
- Zudem wurden auch die Test- und Betriebserfahrungen aus den bisherigen Arbeiten im AKU Projekt von SBB Cargo, den Testerfahrungen und Projektbeteiligung im DAC4EU Projekt aktiv in das DAC+ Projekt eingebracht.
- Im Rahmen der Tests wurde primär die Tauglichkeit des PTB Kommunikationssystems für den digitalen Güterzug getestet.
- Die verbauten e-coupler(fixed- und movable Head) haben keinen direkten Einfluss auf Handhabbarkeit im Betrieb, sondern müssen bezüglich Arbeitnehmerschutz (Zugriff auf Stromführende Elemente) sicher ausgeführt sein.
- Diese Anforderung wurde grundsätzlich bei den beiden Modellen movable Head erfüllt (das Modell mit fixed Head wird in der Umsetzung nicht mehr verwendet).
- Das auf dem DAC+ Zug vorhandene ABP System entspricht in der Anwendung grundsätzlich demjenigen des bei SBBC entwickelten System. Für den Anwender ergeben sich keine Änderungen in der Bedienung dem ABP-Prozess.
- Die auf dem DAC+ Zug verbaute elektrische Entkupplungseinrichtung, welche das Entkuppeln mittels Push-Button auf der Wagenseite oder mittels Tablett in Wagennähe ermöglichen befinden sich in einem Entwicklungsstand, welcher für Mitarbeiter bezogenen Tests noch nicht die notwendige Reife ausweisen. dasselbe gilt auch für die Funktionalität «Prevent Coupling» aktivieren/deaktivieren.

3. Testziele / Test-Cases

Beim EDDP wurde für die DAC ein „Basic Package“ definiert, welches neben der pneumatisch / mechanischen Verbindung auch die Strom- und Datenverbindung beinhaltet und damit die vier Haupt-Automationsfunktionen ermöglicht:

- Erkennen der Zugzusammenstellung (Wagenreihung und Wagenausrichtung)
- Automatische Bremsprobe
- Zugvollständigkeitsprüfung / Train composition detection
- Automatisches Entkuppeln (remote via Tablet oder von der Wagenseite mittels Druckknopf)

In diesem Projekt werden diese Zugfunktionen des Full Digital Freight Train (FDFT) mit einer Systemarchitektur auf Basis des Kommunikationssystems Powerline PLUS Train Backbone (PTB) und weiteren innovativen Systemkomponenten im technischen und betrieblichen Rangierbetrieb sowie bei Testfahrten in der ganzen Schweiz erprobt. PTB stellt ein zuverlässiges Backbone-Datennetzwerk für den FDFT zur transparenten Übertragung von Ethernet/IP-Datenpaketen zwischen der Lokomotive und allen Wagen im Zug über das 400-VAC-Zug-Stromkabel bereit. Das PTB-Kommunikationssystem folgt den Spezifikationen des Digital Automatic Coupler (DAC) Typ 4/5 und der Systemarchitektur für den FDFT, die parallel im FP5 TRANS4M-R-Projekt des European Rail Joint Undertaking (ERJU) entwickelt wird.

Ein besonderer Schwerpunkt der Erprobung liegt auf der Prüfung der Zuverlässigkeit der Automationsfunktionen in realen Betriebsabläufen. Die Zuverlässigkeit der Automationsfunktionen unter den rauen Betriebs- und Umgebungsbedingungen ist eine der grössten Herausforderungen für den Erfolg des FDFT. Die Leistungsfähigkeit des PTB-Kommunikationssystems selbst wurde bereits 2022 im DAC4EU-Zug erfolgreich getestet (siehe Projektpräsentation [1]).

Zusätzlich sollen die nachfolgenden Komponenten auf ihre Funktionalität und Tauglichkeit im Betriebsablauf getestet werden:

- Funktion Prevent Coupling
- Mechanische Funktion der e-Coupler
- Daten und Stromübertragung der verschiedenen e-Coupler Varianten

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die in diesem Projekt zu erprobenden Automationsfunktionen, einschliesslich der Zusatzfunktionen des PTB.

Betrieblicher Prozess	Automationsfunktion	Rolle des Kommunikationssystems	Add-on Features von Powerline PLUS
Zugzusammenstellung (Train Composition detection)	<i>Train Composition Detection:</i> - Bestimmung der Wagenreihenfolge und Richtung jedes Wagens - Erstellung eines logischen Adressierungsschemas	Kommunikationsverbindung über Zugbus aller Teilnehmer herstellen. Darauf aufbauend kann die Kommunikation elektronischer Systeme im FDFT realisiert und weitere system-übergreifende oder system-spezifische Initialisierungsfunktionen durchgeführt werden.	Detektion der korrekten Wagenreihenfolge und Wagenrichtung mit dem PLUS-Train-Topology-Detection Protocol
Bremsprobe	<i>Automatic Brake Test:</i> - Funktionstests des Bremssystems an einer neu zusammengestellten oder veränderten Zugkomposition mittels elektronischer Unterstützung	Übertragung der Signale des automatischen Bremstests jedes Wagens über den Zug-Backbone an die Lokomotive. Sicherstellung, dass die Steuergrößen für die Bremse an alle Wagen übermittelt werden und zu den notwendigen Maßnahmen führen.	
Zugfahrt: Überwachung der Zug- und Waggon-systeme	<i>Train Integrity Monitoring:</i> - Automatische Überwachung der Zugintegrität	Zyklische Übertragung von Signalen zwischen dem letzten Wagen und der Lokomotive über den Zug-Backbone.	Zugintegritäts-Überwachung mit dem PLUS TOKEN Protocol
Rangieren am Bedienpunkt oder im Rangierbahnhof	<i>Uncoupling und Aktivierung / Deaktivierung „Prevent Coupling“:</i> Entkupplung von Wagen oder Wagen-gruppen - mit Druckknöpfen an der Waggon-seite (DAC4.5)	Übertragung der Signale zwischen den DAC-Steuereinheiten und den Entkupplungsaktuatoren in den Kupplungsköpfen über den Zug-Backbone	

	und/oder - von der Ferne (Lokomotive, Tablet, Ablaufbergrechner im Rangierbahnhof)		
--	---------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

Tabelle 1: Übersicht über die primären zu testenden FDFT-Automatikfunktionen basierend auf PTB

Tabelle 2 zeigt weitere Überwachungsfunktionen, die für den Betrieb des FDFT relevant sind.

Betrieblicher Prozess	Überwachungsfunktion	Rolle des Kommunikationssystems	Add-on Features von Powerline PLUS
Zugfahrt	Überwachung und Steuerung der Stromversorgung 400 V, u.a. Isolationswiderstand, etc.	Übertragung der Daten der Überwachungssysteme zwischen Wagen und Lokomotiven	
	Kommunikationssystem (Backbone, Wagen, Lok)		
	In-Situ-Überwachung des Zug-Stromsystems für die Detektion von Schäden an den elektrischen Kontakten	Übertragung der Statusdaten von jedem Waggon über Mobilkommunikation in die Cloud /Unterhaltszentrale des EVUs	Detektion von sich entwickelnden Schäden aus Änderungen des Langzeitverhaltens des Powerline PLUS Signals

Tabelle 2: Weitere zu testende FDFT-Überwachungsfunktionen basierend auf PTB

Die Erprobung beinhaltete auch den Test eines neuen innovativen Verfahrens zur automatischen in-situ Überwachung des Verhaltens des Powerline PLUS Signales über längere Zeiträume für die

1. Detektion von sich entwickelnden Schäden an den elektrischen Kontakten in den e-Couplern, welche durch die mechanischen Druckbelastungen und die gegenseitigen Reibungsprozesse während des Rangierens und der Zugfahrt verursacht werden – als Basis für ein Condition Based / Predictive Maintenance System
2. Lokalisierung von Erdschlüssen.

Dieses Verfahren wurde von der HSLU in einem Parallelprojekt entwickelt und in die Tests integriert.

4. Systemkonzept des DAC+ Testzuges

Nachfolgend wird das grundsätzliche Konzept und Design des DAC+ Testzuges dargestellt. Die Details zu den einzelnen Themenbereichen sind im Anhang unter 11.1 und folgenden näher beschrieben.

4.1. Zusammensetzung und Ausrüstung

Basierend auf

- den in Kapitel 3 genannten Testzielen,
- abgestimmt mit der parallel im TRANS4M-R vorangetriebenen Architektur und Konzepten für das Strom- und Kommunikationssysteme (Backbone, Wagen),
- angelehnt an Vorarbeiten im DAC4EU-Testzug,
- den verfügbaren Komponenten eines Basissystems (Wagen von SBB Cargo, die z.T. bereits mit DAC2 Kupplungen von Voith sowie dem Waggon Tracker System und ABP System von PJM ausgestattet waren)

wurde eine Architektur für ein Testsystem – den DAC+ Testzug – entwickelt und während des Projektverlaufs iterativ weiterentwickelt.

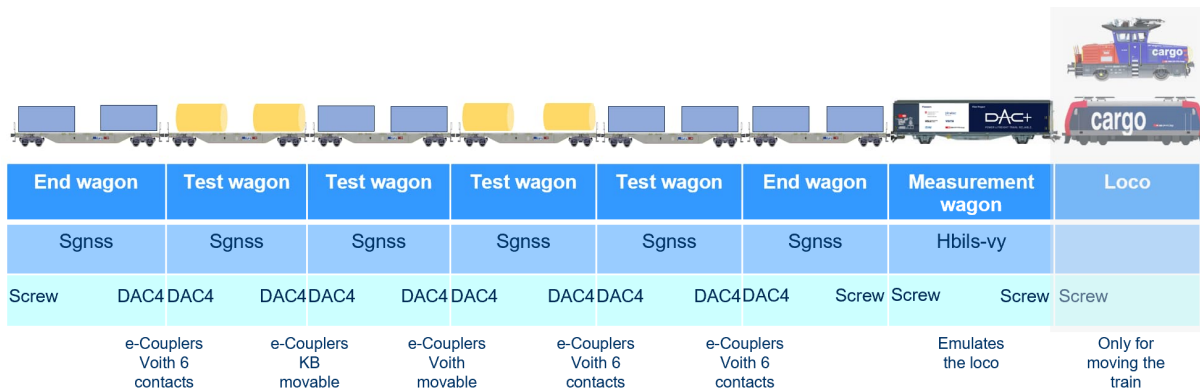


Abbildung 7: Übersicht DAC+ Testzug Komposition

Die finale Version des Testzuges ist in Abbildung 7 dargestellt und besteht in der letztlichen Realisierung aus:

- 4 Test-Wagen (Sgnss) mit jeweils
 - o bereits beidseits integrierten DAC2 Scharfenberg-Kupplungen von Voith
 - o Waggon Tracker System (Automatische Bremsprobe ABP) von PJM
- 2 Zwischen-/Adapter-Wagen (Sgnss) mit jeweils an einer Seite
 - o einem bereits integrierten DAC2 Scharfenberg-Kupplungs-Prototyp von Voith
 - o Schraubekupplung
 - o Waggon Tracker System (ABP) von PJM
 - o ABP System von PJM
- Mess-Wagen (H-Wagen Hbils-vy) der die Lok emuliert, d.h. die Lok-internen Komponenten des Strom- und Kommunikationssystems enthält.

Die eingesetzten Loks sind dabei nicht in das Testsystem integriert.

Auf dem Testzug ist ein 2-Phasen 400 VAC Stromsystem implementiert gemäss den EDDP Vorgaben zum Stromsystems. Das Zug-Stromkabel ist ein 2-phasiges Stromkabel (Studer Cables), das verdreht ist.

Auf dem Testzug wurde ein Kommunikationssystem basierend auf PTB konzipiert, dass kongruent mit dem IEC61375 Train Communication Standard TCN aus dem Personenzug ist, siehe Abbildung 8.

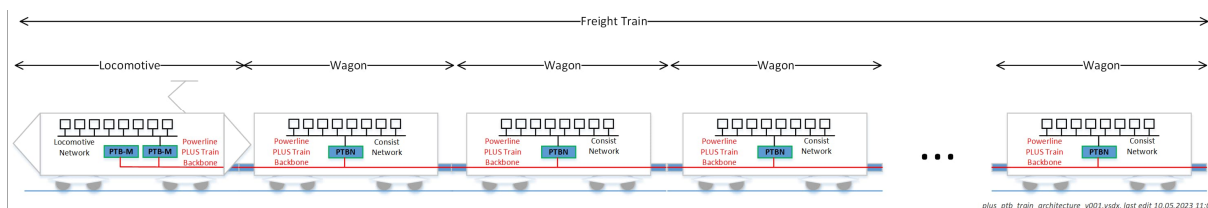


Abbildung 8: IEC Train Communication Network Architecture

Die Realisierung des Zug-Backbones geschieht mit PLC / Powerline PLUS über das Zug-Stromkabel und dessen elektronischen Kontakten in den DACs. In den Wagen und der Lok befinden sich Backbone-Nodes, d.h. PTB-Nodes als Verbindung zwischen dem Backbone und dem Waggon-Kommunikationsnetz.

4.2. Architektur des Waggon-Strom- und Kommunikations-Testsystems

Die High-Level-Architektur der Waggon-Systeme basiert auf den in Abbildung 9 dargestellten Modulen (entsprechen den Konzepten in EDDP/TRANS4M-R zum Zeitpunkt des Entwurfs des DAC+ Testzugs Ende 2022):

Waggon Architecture

Compliant with TRANS4M-R (prel.) specs

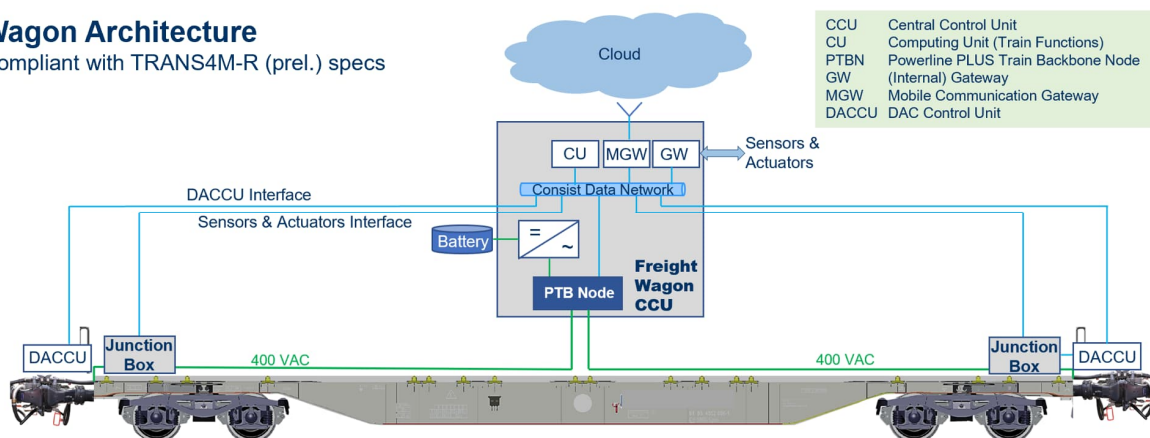


Abbildung 9: High-Level-Architektur des auf PTB basierten Waggon-Strom- und Kommunikationssystems (Stand EDDP/TRANS4M-R Ende 2022)

Basierend auf dem PTB-Kommunikationssystem enthält diese Architektur folgende Module:

- DAC4 Kupplungen mit e-Couplern und Entkupplungs-Aktuatoren
- Waggon-Central-Control-Unit (CCU, in manchem Kontext auch OnBoard-Unit OBU) als zentrale Steuer- und Überwachungseinheit auf dem Waggon mit Komponenten
 - o Waggon-Stromsystem mit AC-DC-Wandlern für das Waggon-Stromnetz, Waggon-Batterie, unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
 - o Waggon-Kommunikationssystem (Consist Data Network) mit Schnittstellen zu
 - PTB-Node (Verbindung zum Backbone)
 - Rechereinheit (CU)
 - Gateways (Mobilkommunikation 4G)
 - DACCU
 - Sensoren / Aktuatoren z.B. zur Überwachung und Steuerung der DAC in der Junction Box oder für die ABP
 - o Rechereinheit (CU) für die Applikationen / Automationsfunktionen

- Junction Box (jeweils an den Waggonenden) für die Verbindung der 400V Stromkabel aus den e-Couplern mit dem Stromkabel zur CCU. Zusätzlich enthält sie die Schnittstelle einerseits der Sensoren und Aktuatoren für die Überwachung der DAC und andererseits zur CCU.
- DAC-Steuergerät (DACCU) für die Steuerung der Kupplungsaktuatorik
- Datenleitungen des Waggon-Kommunikationsnetzes zwischen
 - o CCU und Junction Box
 - o CCU und DACCU
 - o CCU und weiteren auf dem Waggon befindlichen Sensoren / Aktuatoren wie z.B. für die ABP (nicht eingezeichnet).

4.3. Architektur des realisierten Waggon-Testsystems

Abbildung 10 zeigt die auf den Test- und Zwischen-Wagen des DAC+ Testzugs realisierte Waggon-Architektur (auf den Zwischen-Wagen zum Teil nur auf einer Seite).

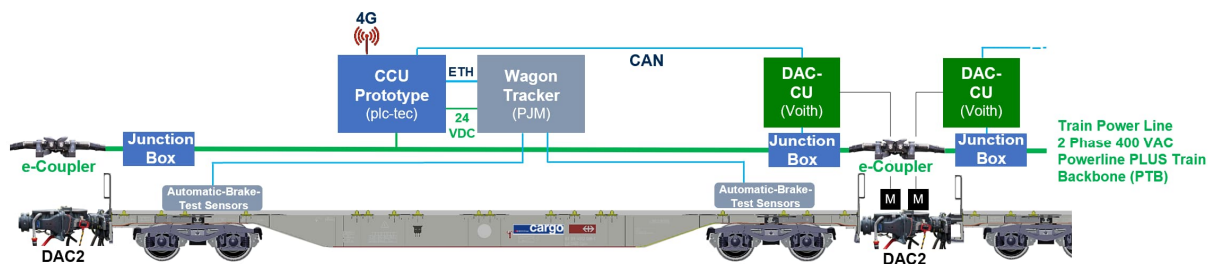


Abbildung 10: Auf den Test-Wagen implementierte Waggon-Architektur

Das realisierte Testsystem besteht aus den folgenden Hauptkomponenten (Details siehe Anhang 11.1):

- DAC2 (Voith) (waren bereits auf den Test- und Zwischenwagen von SBB Cargo implementiert)
- e-Coupler für die Kupplung der Zugstromleitung zwischen den Wagen (Voith und Knorr-Bremse)
- 400 VAC Stromkabel (Studer Cables)
- Waggon Tracker System für die automatische Bremsprobe «ABP» (PJM) (war bereits auf den Test- und Zwischenwagen von SBB Cargo implementiert, inkl. den für die ABP erforderlichen Sensoren und Kommunikations-/Stromverbindungen des Waggon Tracker Systems).
 - o Im DAC+ Testsystem sind Waggon-Tracker und die ABP-Datenleitungen separat.
 - o In einer finalen Realisierung wäre das ABP-System in die CCU integriert als eine der Automationsfunktionsapplikationen auf der Rechneinheit; die ABP-Datenleitungen wären in das Waggon-Kommunikationsnetz integriert.
 - o Das Waggon-Tracker-System bezieht den Strom aus dem im CCU-Prototyp implementierten Waggon-Stromsystem über eine 24 VDC-Schnittstelle, damit werden auch die im Waggon verteilten ABP-Sensoren versorgt.
 - o In einer finalen Realisierung wäre die Stromversorgung des ABP-Systems (d.h. der Controller, Modems, etc. in der CCU), Stromversorgung der Sensoren in das Waggonstromnetz integriert.
- Central-Control-Unit «CCU» Prototyp (HSLU/plc-tec) (ohne die abgesetzte ABP-Funktion)
- Junction Box Prototyp (HSLU)
- Kupplungs-Steuergerät «DAC Control Unit DACCU» Prototyp (Voith), über CAN-Datenleitungen mit der CCU verbunden. In einer finalen Realisierung wären diese Datenverbindungen ebenfalls Teil des Waggon-Kommunikationsnetzes.

4.4. Architektur des emulierten Strom- und Kommunikations-Testsystems der Lokomotive

Betreffend Einbindung der Lokomotive in das Gesamt-FDFT-Systems gibt es aktuell noch sehr viele offene Fragen. Dies betrifft u.a. auch die Schnittstellen für das Strom- und Kommunikationssystem.

Bisher gibt es bei SBB Cargo nur Loks mit Hybridkupplung (automatische Kupplung / Schraubenkuppelung) ohne elektrische Komponenten. Zusätzlich ist der Einsatz von Loks im Testbetrieb sehr aufwendig und kostenintensiv. Daher wurde das betriebliche Testkonzept von Beginn darauf ausgelegt, dass

- «Standard» SBB Cargo Loks nur für Streckenfahrten oder im Rangierbetrieb eingesetzt werden und nicht in das Testsystem eingebunden sind,
- die Funktionen der Lok nach dem Vorbild des DAC4EU-Testzugs in einem zusätzlichen Wagen emuliert werden.

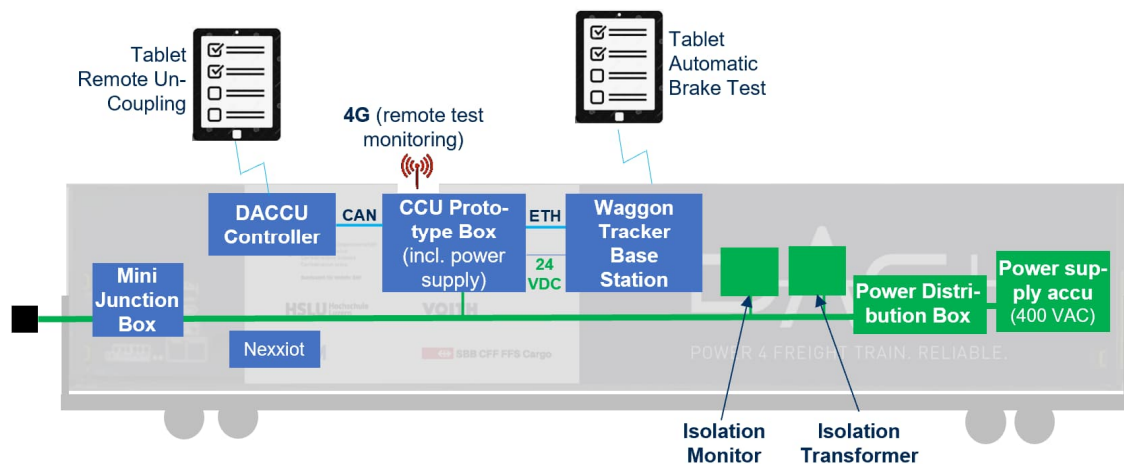


Abbildung 11: Architektur des H-Wagens als emulierte Lok

Der H-Wagen ist ein geschlossener und abschliessbarer Wagen, auf dem auch die Projektpartner-Logos sowie der Marketing-Slogan angebracht sind.

Abbildung 11 zeigt die Architektur des Testsystems, das im H-Wagen installiert ist mit folgenden Kernkomponenten (weitere Informationen finden sich im Anhang Kap. 11.1.2):

- Stromversorgung inkl. -monitoring des ganzen Zugs mit 400 VAC
- Installation für die Automatische Bremsprobe: Die von den Waggons über PTB zur H-Wagen-CCU-Prototyp-Box übertragenen ABP-Daten werden über eine Ethernet-Schnittstelle zur Waggon-Tracker Base Station übertragen und von dort über eine Luftschnittstelle auf das SBB Cargo Standard ABP Tablet.
- DACCU Controller für die Steuerung des Entkuppelns via Push Button am Wagen oder via Tablet: Für eine abgesetzte Entkupplung werden von einem weiteren Tablet mit entsprechendem GUI die Entkupplungsbefehle über eine Luftschnittstelle zum DACCU Controller, von dort über CAN zur H-Wagen-CCU-Prototyp-Box und von dort über PTB an die involvierten DAC-CUs in den Waggons übertragen.
- Isolations-Monitor und Isolations-Transformator.

4.5. Zusätzliche Test- und Messsysteme auf dem DAC+ Testzug

Für die Erreichung der Testziele in Bezug auf Zuverlässigkeit der Systeme wurden im DAC+- Testzug eine Vielzahl von Sensoren und Messgeräten integriert, um kontinuierlich zeitsynchronisierte Daten zu erfassen und Messungen mit Ereignissen während der Zugfahrten zu korrelieren (vgl. Tabelle 3). Die Daten werden teilweise in jedem Waggon im CCU Prototyp vorverarbeitet und dann über 4G von jedem Waggon in die Cloud und zur weiteren Auswertung an eine zentrale Datenbank übertragen. Dort besteht

jederzeit – auch in Standzeiten – ein digitales Abbild des Strom- und Kommunikationssystems des ganzen Zugs. Weiterführende Informationen sind in Anhang 11.1.3 dargestellt.

System / Gerät	Datenaufnahme	Für Analysen Aussagen
400 VAC Stromsystem	Pro Waggon jeweils zeitabhängig: Spannung V, Strom I, Wirkleistung P, Scheinleistung S, Blindleistung Q, CosPhi, Frequenz, reale Energie, Scheinenergie, gelieferte Energie, verbrauchte Energie, Max. und min. Spannung, sowie Zeit der max. / min. Spannung	Statistik des Stromsystems - Spannungs- / Stromstatistik - CosPhi Statistik - Widerstand
	Überwachung des Isolationswiderstands (über der Zeit) von der Lok / H-Wagen aus; Spannung L1-L2, L1-PE, L2-PE, Detektion von Fehlern, z.B. Erdschlüssen	Statistiken über das Auftreten von Erdschlüssen, Korrelation von Erdschlüssen mit Isolationsüberwachungsdaten zur Ermittlung der möglichen Ursache, Korrelation des Widerstands mit Wetter, ...
Kommunikationssystem (PTB)	Performanz Grössen wie Paket-Fehlerraten, Latenz, Netzwerk-Bandbreite, etc.	
GPS	Präzise UTC Zeit, GPS Ortsaufnahme, Geschwindigkeit gegen Grund	- Erstellung der Strecke in einer Karte für jeden Fahrttag - Korrelation des Orts und der Zug-Geschwindigkeit mit anderen Daten (fahrender vs. stehender Zug)
Videokamera am H-Wagen	Zeitsynchrone Aufnahme der Fahrt um Events nachverfolgen zu können (Zugbegegnung, Tunnel, Funken-schlag vom Pantograph, enge Kurven, Weichen, ...)	Korrelation anderer Mess-/Testdaten mit Ereignissen in der Zugfahrt (z. B. Überfahren von Weichen, Zugbegegnung, Kurven, ...)
Videokamera an einer DAC (Go-Pro)	Zeitsynchrone Überwachung von DAC-/e-Coupler-Bewegungen: - Beobachtung der Bewegung der Messskalen auf jedem DAC relativ zueinander. - Messung der relativen Bewegung jedes DAC relativ zueinander mithilfe von Videoinhaltsanalysetechniken.	
3D Beschleunigungs-sensoren	Auf beiden e-Couplern um 3 dim. Relativbeschleunigungen zu erfassen und z.B. mit Zugbegegnungen, engen Kurven, etc. zu korrelieren	
DC Widerstand der e-Coupler Kontakte	Während der Fahrt gemessener Gleichstromwiderstand über die beiden freien Stromkontakte im statischen-Coupler von Voith zwischen zwei gekoppelten Junction Boxen	- Statistische Analyse der DC-Widerstandsmessungen - GPS-/Probefahrtvideos werden verwendet, um Änderungen des Gleichstromwiderstands mit externen Ereignissen zu korrelieren
e-Coupler Mikro- unterbrechungen	Detektion und Anzahl von Mikrounterbrechungen innerhalb eines Zeitfensters	- Wahrscheinlichkeit von Mikrounterbrechungen, Verteilung vs. Zeit - Dauer der Mikrounterbrechungen - Korrelation von Mikrounterbrechungen zu externen Ereignissen (z. B. Überfahren des Schaltgetriebes)

Tabelle 3: Mess- und Prüfgeräte am DAC+ Testzug

4.6. Installationen der Testsysteme auf dem DAC+ Testzug

Da die eingesetzten Testwagen Sgnss bereits über die automatische Kupplung und die Ausrüstung für die automatische Bremsprobe verfügten, mussten im Verlaufe des Projektes noch die nachfolgenden Arbeiten ausgeführt werden:

- Im November 2022 durch Firma CT-X im Auftrag SBB Cargo:
Installation der verschiedenen Elektronikboxen, der Verkabelung und der Stromversorgung.
- Im Dezember 2022 / Januar 2023 durch HSLU:
Beschaffung aller Komponenten des Strom- und Kommunikationssystems sowie der Mess- und Testsysteme.
Entwicklung und Integration sowie Labortests (im HSLU Virtual-Train-Test-Lab) aller dieser Komponenten.
Installation der Komponenten in den Testwagen und dem Messwagen
- Ende Januar 2023 durch zertifizierten Prüfexperten der SBB:
Abnahme der Elektroinstallationen.

- Ab Februar 2023 bis Herbst 2023 durch HSLU:
Beschaffung, Labortests und Installation weiterer Systeme und Komponenten.
- Im Q2/2023 durch PJM:
Anpassungen der Komponenten des Waggon Tracker Systems und deren Tests im HSLU Virtual-Train-Test-Lab
- Ende Juli 2023 durch PJM:
Installation der angepassten Wagon Tracker Systeme auf den Testwagen.
- Ende Juni 2023 durch Voith:
Montage des DACCU-Systems auf den Testwagen
- Anfang August 2023 durch Knorr-Bremse
Montage eines e-Coupler (movable Head) Paares
- Mitte September 2023 durch Voith:
Montage eines e-Coupler (movable Head) Paares

4.6.1. Risikoanalyse

Vor dem Verbau der Systeme und Komponenten und der Erprobung der Testkomposition DAC+ wurde eine Risikobeurteilung gemäss K250.1¹ [2] durchgeführt.

Neben der technischen Betrachtung wurden auch die Aspekte des Arbeitnehmerschutzes, der Gefährdungen aufgrund hoher Stromspannung oder falscher und unberechtigter Anwendung von Komponenten und Systemen sowie die Einflüsse auf die Umgebung / Infrastruktur betrachtet. Auf Basis der Beurteilung wurden technische Anpassungen vorgenommen und betriebliche Vorgaben zum Betrieb des DAC+ Zuges festgelegt.

Die betrieblichen Vorgaben fanden in der Umsetzung der Stand- und Rangiertests sowie den Testfahrten insofern Berücksichtigung, dass diese im Ausbildungsdokument für die Testbeteiligten, in den Drehbüchern und in den Checklisten für die Inbetriebnahme und Ausserbetriebnahme der Testkomposition aufgenommen wurden.

Die Risikobeurteilung wurde bei weiteren Änderungen an den Systemen und Komponenten jeweils überprüft und bei Bedarf wurden noch technische Anpassungen vorgenommen oder die betrieblichen Vorgaben angepasst.

¹ Die interne SBB Richtlinie K 250.1 „Umgang mit sicherheitsrelevanten Änderungen“ legt die Mindestanforderungen für Nachweise bei sicherheitsrelevanten Änderungen fest. Die Regelung gilt für Mitarbeitende, welche Änderungen im Verantwortungsbereich der SBB vornehmen sowie für Mitarbeitende, welche solche Änderungen beurteilen. Die Regelung stützt sich auf das schweizerische Recht, insbesondere die Eisenbahnverordnung EBV und die darin festgelegte Umsetzung der Durchführungsverordnung (EG) Nr. 402/2013 in der Schweiz.

5. Testdurchführung

5.1. Testumgebung

Um die Zugänglichkeit auf die Testkomposition für Kontroll- und Umbauarbeiten sowie die Stromversorgung während der Abstellung sicher zu stellen und auch eine gewisse Sicherheit gegen Vandalismus zu ermöglichen, wurde durch SBB Cargo ein geeignetes Abstellgleis gesucht.

Im Anschlussgleis der Firma KIBA in Birr konnte ein entsprechende Gleis gefunden und für das Jahr 2023 angemietet werden (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14)

Der Anschluss des Gleises 840 erfolgt via Gleis 836 / 94 zum Bahnhof Lupfig (vgl. Abbildung 12)

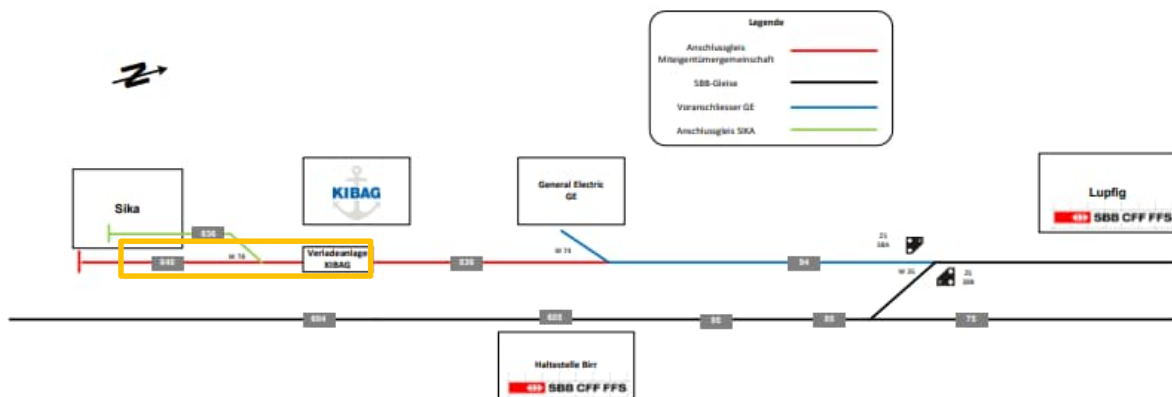


Abbildung 12: Lupfig Gleisplan



Abbildung 13: Satellitenbild Abstellgleis Lupfig



Abbildung 14: Streetview Abstellgleis Lupfig

Die Testkomposition wurde so platziert, dass der Messwagen in der Verladeanlage stand und dort an die externe 400 VAC Stromversorgung angeschlossen werden kann und die Testwagen von der Verladeanlage in Richtung Süden (Othmarsingen) standen.

Für Stand- und einfache Kupplungstests konnten auch die Gleise 836 und 94 genutzt werden.

Je nach Testbedarf wurde die Testkomposition für weitere Rangiertests an andere Standorte überführt. Diese Überführungsfahrten wurden jeweils als Testfahrten genutzt.

5.2. Testplanung und Ressourceneinsatz

Das grobe Testprogramm wurde innerhalb des Projektteams festgelegt und beinhaltete pro Monat 2 Rangiertesttage sowie 2 Testfahrttage.

Aufgrund von Lieferänderungen, Kommunikationsbedürfnissen usw. kam es im Grundprogramm zu Anpassungen, welche im Projektmeeting abgesprochen und entschieden wurden.

Die einzelnen Testtage wurden anschliessend durch SBB Cargo im Detail geplant, das heisst:

- in Absprache mit den Testpartnern wurde ein detailliertes Tagesprogramm erstellt
- daraufhin die benötigten Personal- und Traktionsressourcen, die Trassen und Gleisbedarfe gemäss Regelprozessen bestellt und reserviert
- und danach ein Drehbuch mit allen notwendigen Angaben zum Testtag erstellt und vor dem Ausführungstag an alle Beteiligten versandt

5.3. Stand- und Kupplungstests in Lupfig

Um die grundsätzlichen Funktionen von Hardware und Software zu prüfen, wurden Stand- und Kupplungstests durchgeführt.

Insgesamt waren dies 16 Tage für Installations- und Umbauarbeiten, 10 Tage für Stand- und Kupplungstests.

5.4. Rangiertests

Die in Tabelle 4 erwähnten Rangiertesttage fanden ausserhalb von Lupfig statt.

Wo	Anzahl Tage	Testfokus
Dottikon Umspannanlage	2	normales Rangieren
Wildegg	1	Kuppeln / Entkuppeln in engen Kurvenradien
Basel RB	1	normales Rangieren
Basel RB	4	Ablaufbergbetrieb Basel RB I und Basel RB II

Tabelle 4: Übersicht Rangiertesttage

5.5. Testfahrten

Insgesamt wurden 20 Testfahrttage als Teil von 10 jeweils einwöchigen Kampagnen durchgeführt, wobei 4'211 km zurückgelegt wurden (vgl. Tabelle 5, jeweils mit Rückfahrten)

Test Drive #	Date	Route	Distance / km
1	09.03.23	Lupfig – Brugg – Zürich Vorbahnhof – Ziegelbrücke – Linthal	236
2	10.03.23	Lupfig – Brugg – Zürich Vorbahnhof – Ziegelbrücke – Linthal	237
3	06.04.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	181
4	04.05.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	181
5	05.05.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	182
6	08.06.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Biasca	358
7	09.06.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Bodio	364
8	17.07.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Biasca	360
9	18.07.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Biasca	359
10	10.08.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	180
11	11.08.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	180
12	31.08.23	Lupfig – Luzern - Horw/HSLU	178
13	07.09.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB – Basel KH	134
14	08.09.23	Basel KH – Lupfig	65
15	05.10.23	Lupfig – Niederglatt	89
16	06.10.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	181
17	23.10.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB – Basel RB	123
18	10.11.23	Basel RB – Olten RB – Basel RB – Lupfig	123
19	07.12.23	Lupfig – Bern - Brig	410
20	08.12.23	Lupfig – Niederglatt	90
		Total Distance	4'211

Tabelle 5: Übersicht Testfahrten

5.6. Präsentationen Testzug

Tabelle 6 gibt eine Übersicht an welchen Orten, wann und welchem Publikum der Testzug vorgestellt wurde.

Wann	Wo	Publikum
12.06.2023	Lupfig	Expertengremium Güterverkehr BAV
31.08.2023	Horw	HSLU
08.09.2023	Basel Kleinhüningen Hafen	Generalversammlung VöV
04.10.2023	Lupfig	Nexxiot
02.11.2023	Basel RB	FP5 TRANS4M-R WP18

Tabelle 6: Übersicht Präsentation des Testzuges

6. Testresultate

6.1. Vorgehen Testresultate

In Abschnitt 6.2 wird zunächst über die Performanz Tests definiert was getestet wird, im Hinblick auf die Testziele. Anschliessend wird in Abschnitt 6.3 beschrieben, wie die Daten erfasst und analysiert werden. In Abschnitt 6.4 werden dann die Testresultate dargestellt und abschliessend in Abschnitt 6.5 analysiert.

6.2. Performanz Tests

6.2.1. Stromsystem

Der Schwerpunkt der Tests liegt auf den zwei Aspekten Zuverlässigkeit und Sicherheit des Stromsystems. Die Zuverlässigkeit wird vor allem durch die Zuverlässigkeit der Stromkontakte innerhalb der e-Coupler beeinflusst, während der Sicherheitsaspekt auf die Vermeidung von Erdschlüssen, also das Isolationsverhalten aller beteiligten Komponenten (e-Coupler, Stromkabel, Boxen, usw.), abzielt.

6.2.2. Kommunikationssystem

Es gibt mehrere Performanzmetriken, die im Kontext eines Kommunikationssystems relevant sind. Die wichtigsten Kennzahlen sind:

- **Message Error Rate**

Das zugrunde liegende Kommunikationsprotokoll in PTB verfügt über ein Token basiertes Medium-Access Schema. Ein Token-Verlust kann als End-to-End-Message-Loss angesehen werden. Daher entspricht die Token-Verlustrate der End-to-End-Message-Loss Rate.

- **Message Latency**

Die Zykluszeit bestimmt, in welchen Abständen Nachrichten versendet werden können. Die daraus resultierende Message Latency steht in direktem Zusammenhang mit der Zykluszeit. Das PLUS-Token Protokoll weist ein asymmetrisches Verkehrsmuster auf, d.h. der Verkehr vom Master zu den Slaves weist eine geringere Zykluszeit auf als der Verkehr vom Slave zum Master. Da das PLUS-Token Protokoll ein deterministisches Protokoll ist, kann die erwartete Zykluszeit im Voraus berechnet werden. Aufgrund von Token-Verlusten kann sich die Zykluszeit vereinzelt verlängern.

Diese Performanz Kennzahlen hängen von mehreren Parametern ab. Die wichtigsten sind:

- **Anzahl der Waggons**

Die Anzahl der Waggons bestimmt die Anzahl der Kommunikationsknoten, aber auch die Länge des Zuges. Da es nicht möglich ist, das Zugende mit PLC direkt zu erreichen, setzt das PTB-Protokoll auf eine Weiterleitung (Forwarding). Je länger der Zug ist, desto häufiger muss eine Nachricht weitergeleitet werden, oder kommunikationstechnisch desto mehr Hops gibt es. Dies hat sowohl Einfluss auf die Message Error Rate als auch auf die Latenz. Da jeder einzelne Hop mit einer Message Error Wahrscheinlichkeit und einer Latenz verbunden ist, erhöht eine höhere Anzahl von Hops die Message Error Rate Wahrscheinlichkeit und die Latenz für den ganzen Zug.

- **Forwarding Distance**

Die Forwarding Distance ist ein Parameter, der steuert, wie viele Knoten eine Nachricht überspringt, bevor sie weitergeleitet wird. Bei einer Forwarding Distance von vier werden beispielsweise vier Knoten übersprungen, bevor die Weiterleitung vom fünften Knoten erfolgt. Durch die Wahl einer höheren Forwarding Distance verringert sich die Anzahl der erforderlichen Hops, um das Ende des Zuges zu erreichen, was die Wahrscheinlichkeit eines End-to-End Message Errors und die Latenz verringert. Da die Kommunikationsreichweite physisch begrenzt ist, führt die Wahl einer zu großen Forwarding Distance aber zu einer zu hohen Wahrscheinlichkeit eines Message Loss pro Hop, um eine zuverlässige Kommunikation aufrechtzuerhalten. Daher ist die Wahl dieses Parameters ein Kompromiss zwischen Performanz und Zuverlässigkeit.

6.3. Datenerfassung und -analyse

Für die in Kapitel 6.2 beschriebenen Performanz Tests wurden viele Sensoren und Messgeräte im DAC+ Testzug installiert. Darüber hinaus wurden diagnostische Daten vom Strom- und Kommunikationssystem gesammelt. Dies führte zu einer riesigen Menge an gesammelten Daten. Diese Daten wurden von einem Industrie-PC im CCU-Prototyp erfasst und dort teilweise vorverarbeitet. Von dort wurden die Daten über ein Mobile Communication Gateway (MCG) mit 4G über das Internet in eine Datenbank im Backoffice hochgeladen (siehe Abbildung 15).

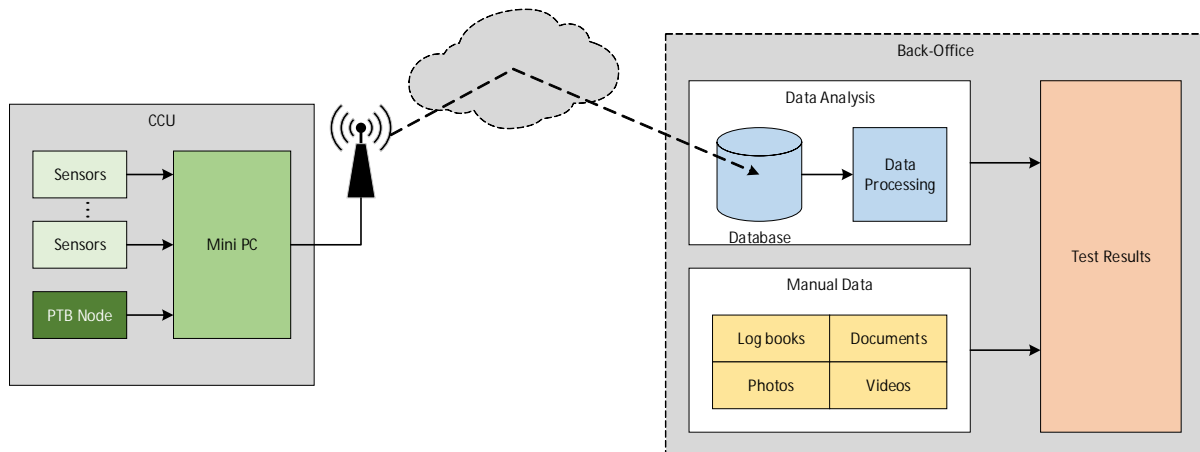


Abbildung 15: Architektur des Datenerfassungs- und Auswertungssystems

Darüber hinaus wurden während der Testphasen alle Tests anhand eines vordefinierten Reportingprozesses manuell mit Logbüchern, Berichten, Fotos, Videos usw. dokumentiert.

Um sich gegenseitig beeinflussende Effekte zu erkennen, z.B. dem Einfluss einer Zugbegegnung oder der Fahrt über eine harte Weiche oder durch einen Tunnel, und einem plötzlichen Anstieg der Paketfehlerrate, wurden die Daten zeitsynchron aufgezeichnet. Beispielsweise werden die GPS-Daten verwendet, um die geografische Position zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen, während Videoaufzeichnungen Hinweise auf die Umgebung geben könnten, z. B. auf Bahnhöfe, in der Nähe befindliche Züge oder darauf, ob der Zug über eine harte Weiche fährt. Bei der Auswertung konnten dann Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit des Kommunikationssystems zu einem bestimmten Zeitpunkt und Umwelteinflüssen identifiziert werden.

Zwei Beispiele:

- Bei der ersten Testfahrt wurde festgestellt, dass die Message Error Rate im Vergleich zu Labortests deutlich zu hoch war. Mithilfe der Sensoren im Zug konnte der Fehler dann an einer der CCU-Prototypboxen an einem Wagen und dort an einem bestimmten Stromanschluss lokalisiert werden. Dies wurde überprüft und der Fehler schnell gefunden (Isoliermaterial in einer Klemme).
- Bei einer Testfahrt wurden über einen Zeitraum von einigen Sekunden überdurchschnittlich viele Message Errors beobachtet. Aus den Daten ging hervor, dass der Zug zu diesem Zeitpunkt durch den Bahnhof Faido fuhr. Weitere Analysen ergaben, dass dort ein Euroloop-Sender installiert war. Deshalb wurden mit einem mobilen Euroloop-System zusätzliche Tests im Labor und am stehenden Zug durchgeführt, siehe Abschnitt 6.6.

6.4. Resultate der Tests der Automationsfunktionen

6.4.1. Train Composition Detection

Die Zugzusammensetzungserkennung basiert auf dem PTB Train Topology Detection (TTD)-Protokoll. Das Protokoll wurde im Rahmen von Rangiertests mit vielen wechselnden Topologien ausführlich getestet. Sowohl die Wagenreihenfolge als auch die jeweilige Ausrichtung der einzelnen Waggons wurden bei allen Tests korrekt erkannt.

Abbildung 16 zeigt ein Beispiel der TTD-Ausgabe mit den erkannten Wagen in ihrer Reihenfolge, ihrer Wagen-UIC-Nummer (Spalte „Wagen-ID“) und ihrer Ausrichtung (Spalte „Ori“). Diese Erkennung von 7 Waggons dauerte 390 ms.

```
##### PTB Status #####
TTD Status      : COMPLETE
TTD Sequence No.: 1
TTD Duration [ms]: 390

Topology Size   : 7
Displayed Entries: 7

Train Integrity Check Status : 1
Train Integrity Compromised  : 0
Train Integrity Counter      : 0

Transmitted Allocation : 259215

-----
Entry  Addr  Wagon ID      Ori  Master  MPD [ns]  Rcvd Alloc
-----
  0  0x001  21 85 237 0 487-0  A    1    0    0
  2  0x002  81 85 456 5 052-0  B    0   170 258969
  3  0x003  81 85 456 5 091-8  A    0   305 259018
  5  0x004  81 85 456 5 078-5  A    0   460 259009
  4  0x005  81 85 456 5 075-1  A    0   605 259039
  1  0x006  81 85 456 5 119-7  B    1   800 259027
  6  0x007  81 85 456 5 095-9  A    1   970 221772
-----
```

Abbildung 16: Ausgabe des Protokolls zur Erkennung der Zugtopologie

6.4.2. Automatische Bremsprobe

Die Montage der angepassten Waggon Tracker Boxen für die ABP inkl. die Bereitstellung des HMI und der korrekten Software erfolgte in KW30/2023.

Dabei handelt es sich um das ABP Seriensystem von PJM, welches zu diesem Zweck um ein Kommunikationsmodul erweitert wurde, damit die Bremsprobe über den Powerline Backbone (statt via FLORA Funk) durchgeführt werden kann und damit auch die Integration der Lösung auf Systemebene gezeigt werden kann.

Direkt nach erfolgter Montage konnte mittels HMI via «Leading Consist» die ABP mit der Datenübertragung über PTB an den sechs Testwagen (der Messwagen enthält keine Hard- und Software für die ABP) erfolgreich durchgeführt werden. Alle Testfälle wurden bestanden.

Auf weitere Tests wurde in der Folge verzichtet, da dies auf der einen Seite einen grösseren Aufwand zum Zugdatenimport bedeutet hätte und auf der anderen Seite die Datenschnittstelle CIS zu ABP aufgrund der Abschaltung CIS verloren ging und aktuell kein Ersatz vorhanden ist.

Abbildung 17 zeigt die ABP-Anwendung auf einem tragbaren Gerät. Das ABP System liest die Bremsdrucksensoren aller Waggons aus und prüft deren korrekten Zustand. Auf dem Bildschirm wird angezeigt, dass alle Sensoren korrekt ausgelesen werden konnten und sich die Bremsen der einzelnen Wagen in ihrem korrekten / erwarteten Zustand befinden.

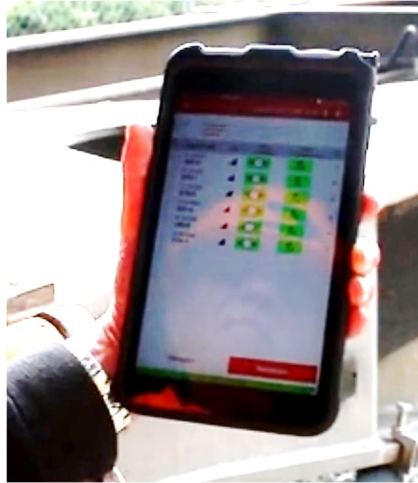


Abbildung 17: Darstellung der ABP-Anwendung auf dem ABP-Tablet von SBB Cargo.

6.4.3. Monitoring der Zugintegrität

Die Zugintegritätsüberwachung basiert auf der Erkennung von Kommunikationsverlusten im PTB-Kommunikationssystem. Es muss ein Kompromiss zwischen Reaktionszeit und Fehlalarmrate gefunden werden. Wird die Schwelle zu niedrig angesetzt, können sporadische, kurzzeitige Ausfälle fälschlicherweise einen Alarm auslösen. Wird die Schwelle zu hoch angesetzt, wird ein Verlust der Zugintegrität zu spät erkannt. Diese Wartezeit wird Zugintegritätsschwelle genannt. Die korrekte Auslösung von Zugintegritätsereignissen wurde bei Rangiertests (bei denen es um absichtliche Entkopplungs-Ereignisse geht) getestet. Die Robustheit bzw. das Fehlalarmverhalten wurde bei Testfahrten getestet, wobei der Zug während der gesamten Testfahrt nie abgekuppelt wird.

Die Zugintegritätsschwelle wurde für die Testfahrten auf 250 ms gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die endgültige Anforderung darin besteht, dass das Kommunikationssystem ein Zugintegritätsereignis innerhalb von 1'000 ms erkennt. Daher wird die Zugintegritätsschwelle von 250 ms als konservativer Ansatz gewählt, um eine robuste Lösung zur Erfüllung der Anforderung von 1'000 ms zu gewährleisten.

32 von 33 Testfahrten verliefen ohne einen einzigen Zugintegritäts-Fehlalarm. Bei der morgendlichen Testfahrt am 7. Dezember kam es zum ersten und einzigen Zugintegritäts-Fehlalarm. Es wird noch untersucht, wie und warum die Zugintegritätsüberwachung bei dieser Testfahrt ausgelöst wurde. Vermutlich liegt die Ursache dieser fälschlicherweise ausgelösten Ereignisse in den örtlichen Gegebenheiten, da Langzeittests am Abstellort des Zuges nicht ein einziges Mal einen Zugintegrität-Fehlalarm ausgelöst haben. Die ursprüngliche Hypothese, dass dieser Fehlalarm durch ein Euroloop-System verursacht wurde, konnte durch weitere Untersuchungen und Tests mit einem mobilen Euroloop-System nicht bestätigt werden, siehe Abschnitt 6.6. Die tatsächliche Ursache dieses einmaligen Fehlalarms konnte bisher nicht ermittelt werden und bleibt bis auf Weiteres unbekannt. Bei der Weiterentwicklung des PTB-Systems hin zu TRL 9 wird deshalb auf eine weitere Erhöhung der Zuverlässigkeit der Zugbus-Kommunikation besonderer Wert zu legen sein.

6.4.4. Automatische Entkopplung

Im Hinblick auf den Einsatz der DAC stellt sich die Frage der technischen Ablaufbergtauglichkeit wie auch der Einfluss auf die bisherigen Prozesse im Ablaufbergbetrieb.

Nach ersten Ablaufbergtests mit der bei SBB Cargo im betrieblichen Einsatz stehenden AKU im Jahre 2021 hat Voith die elektrische Entkopplungsmöglichkeit mittels dem DACCU Prototyp, der Datenübertragung über PTB, dem Aktuator im Kupplungskopf und einer Bedienung mittels Push Button oder mittels Tablet sowie der zwingend geforderten Funktion «Prevent Coupling» weiterentwickelt und auf dem DAC+ Testzug implementiert.

Im Rahmen der vom 31.10. – 03.11.2023 durchgeführten Ablaufbergtests im Basel Rangierbahnhof wurden die Entkupplungsfunktionen auf den beiden verschiedenen «Ablaufbergen» auf ihre Funktionalität und Tauglichkeit für einen Ablaufbetrieb ausführlich getestet.

Angesichts der hohen Komplexität des Systems mit seinen mechanischen Komponenten, Sensoren und Aktoren, Elektronik und Software verliefen die Tests dieses ersten Prototyps sehr erfolgreich.

Normale Entkupplungs- und Kupplungsvorgänge wurden ohne nennenswerte Probleme getestet. Die Ablaufberg-Tests umfassten eine ganze Testwoche mit Testfällen in einer realen Umgebung und unter betriebsrealistischen Bedingungen. Diese Tests wurden im Gefällebahnhof (Gravity Yard) Basel RB II und am Ablaufberg im Basel RB I (Hump Yard) durchgeführt.

Das Entkuppeln und die gleichzeitige Einstellung „Prevent Coupling“ mittels Push Button hat mit grosser Zuverlässigkeit funktioniert. Aufgrund der umfangreichen Tests wurden einige kleinere Optimierungspunkte hinsichtlich der Komponenten der automatischen Entkupplung, aber auch der Kommunikationsanforderungen für den Rangierbetrieb, identifiziert. Bisher konzentrierte sich die Kommunikation auf eine statische Zugkonfiguration (Zug auf freier Strecke) und weniger auf dynamische Konfigurationen, wie sie im Rangierbetrieb der Fall sind. Ausserdem hat sich gezeigt, dass die als «proof-of-concept» installierte Lösung zur Rückstellung der „prevent coupling“ Funktion mittels Lichtsensor am Wagen und Reflektorplatte im oder am Gleisfeld nicht zuverlässig arbeitet. Aufgrund reflektierenden Gegenstände auf der Gleisoberfläche oder an der Seite des Gleises (Schienenköpfe, Masten oder gar reflektierenden Sicherheitsbekleidung), wurden zu viele Fehlauflösungen getätigt, das heisst die Funktion «prevent coupling» wurde zu früh deaktiviert.

Des Weiteren hat sich als limitierend herausgestellt, dass derzeit die Entkupplung zentral durch ein sogenanntes «Leading Consist» gesteuert wird. Dies hat betriebliche Einschränkungen zur Folge, weshalb alternative Konzepte anzustreben sind. Dennoch wurden alle Probleme durch lokale Anpassungen behoben und die gesamten Testergebnisse haben die erforderliche Funktionalität erfüllt.

Für die DAC4.5 Tests besteht die Bedienungs-Schnittstelle hauptsächlich aus einem Druckknopf an den Wagen. Für die Remote-Entkupplung oder Fernentkupplung (DAC5) Tests interagiert ein Bediener mit einer Anwendung auf einem tragbaren Gerät, um die Waggons an einer bestimmten Kupplungsstelle zu entkuppeln. Beide Interaktionsvarianten wurden erfolgreich getestet.

Der Druckknopf ist derzeit die wichtigste Interaktionsschnittstelle, die hauptsächlich durch betriebliche Einschränkungen gegeben ist. Der Druckknopf zwingt den Bediener der automatischen Entkupplung dazu, in der Nähe zu sein, was bei unvorhergesehenen Ereignissen einen grösseren Sicherheitsspielraum bietet (der Bediener hat die Kupplung im Blickfeld und kann schneller eingreifen, als wenn er aus der Ferne bedienen würde).

Die Fernentkupplung könnte in die Lokomotive eingebaut werden, so dass ein Lokführer das Abkuppeln veranlassen konnte. Darüber hinaus könnte die Fernentkupplung auch von einem Kontrollzentrum aus ausgelöst werden, z.B. in einem vollautomatischen Rangierbahnhof. Da diese Anwendungsfälle mit manuellem Rangieren bisher nicht möglich sind, ergeben sich neue Herausforderungen an die Sicherheit, die bei der Festlegung der betrieblichen und technischen Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Fernentkupplung ein «proof-of-concept» war. Aus Sicherheitsgründen (Cybersecurity) wurde die Verbindung zwischen Tablet und zentraler Steuerung mittel WLAN hergestellt. Eine WLAN-Verbindung ist aufgrund seiner Reichweite nur bedingt für den Rangierbetrieb geeignet, da ein Zug in der Regel deutlich länger als die Reichweite ist.

Die Rangiertests am Ablaufberg haben einerseits gezeigt, dass die getesteten Systeme grundsätzlich technisch ausgereift sind und die funktionellen Erwartungen erfüllen. Es wurde aber ebenfalls festgestellt, dass gewisse betriebliche Abläufe andere oder neue Konzepte benötigen. Zuletzt gibt es auch noch diejenigen Szenarien, die bisher noch nicht existierten. Hier gilt es entsprechende Anforderungen zu definieren, um zielgerichtet neue Konzepte zu entwickeln, wie z.B. die Fernentkupplung.

Details zu den Versuchen sind dem Testbericht Ablaufbergtests [3] zu entnehmen.

6.5. Performanz Analyse

6.5.1. e-Coupler-Varianten

In der Gesamtbetrachtung der e-coupler ging es um die Daten- und Stromübertragung der drei auf dem Zug vorhandenen e-coupler Typen. Hier konnten Erfahrungen bezüglich Zuverlässigkeit der verwendeten Federdruck-Kontakte oder Stecker / Buchse Kontakte gesammelt werden.

Bezüglich mechanischer Funktionalität (Klappensteuerung, Steckverbindung, Robustheit usw.) lag der Fokus auf den beiden neuen e-Couplern 2ter Generation von Voith und Knorr Bremse mit dem beweglichen Kopfteil (movable head), da der ebenfalls auf dem DAC+ Testzug verbaute e-Coupler von Voith mit dem statischen Kopfteil nicht weiterentwickelt wird.

Funktional verhielt sich die Mechanik beider e-Coupler 2ter Generation grundsätzlich mit hoher Zuverlässigkeit. Auch hohe Belastungen führten zu keinen Störungen.

Bei dem Voith e-Coupler kam es im Rahmen der Rangier- und Ablaufbergtests in Basel RB zu einer Störung des Klappmechanismus, welche aber durch Anbringen von Schmierfett einfach behoben werden konnte.

Bei dem KB e-Coupler kam es bereits nach den ersten Tests zu verklemmten Kontakten und es lösten sich auch Schrauben der Steckplatte. Diese Probleme konnten mit einfachen Veränderungen behoben werden und die beiden KB e-Coupler funktionierten bei den weiteren Tests ohne weitere Störungen.

Neben den einfachen Rangiertests und Testfahrten wurde am 05.12.2023 ein e-Coupler-spezifischer Testtag in Lupfig durchgeführt. Dabei ging es vor allem um die mechanische Funktionalität bei horizontalem und vertikalem Versatz der Kupplungsköpfe beim Kuppelvorgang sowie um allenfalls auftretende Widerstände in der Strom- und Datenübertragung via e-Coupler. Es konnten keine mechanischen und elektrischen Fehlfunktionen der e-Coupler von Knorr Bremse und Voith festgestellt werden.

Details zu den Versuchen sind dem Testbericht e-Coupler [4] zu entnehmen.

6.5.2. Stromversorgungssystem

Stromunterbrüche

Langzeitmessungen wurden sowohl in der Parkposition als auch bei Testfahrten durchgeführt. Die Messungen der Scheinleistung sind in einem 10 Sekunden Intervall erfolgt und haben in keinem der Test-szenarien einen Ausfall ergeben.

Während der Testfahrten wurden einige Fehlfunktionen der batterieversorgten 400-VAC-Stromversorgung beobachtet. Auf die Wagenleistung hatten diese Stromausfälle jedoch keinen Einfluss, da jede Wageneinheit über eine eigene unterbrechungsfreie, batteriegepufferte Stromversorgung (USV) verfügt, die mehrstündige Stromausfälle kompensieren kann.

Bei dem von Knorr-Bremse bereitgestellten e-Coupler gab es einige Zwischenfälle mit steckengebliebenen Stromkontakten (diese sind als Federdruck-Kontakte ausgeführt, was zu Blockaden der Kontaktteile führen konnte, sodass kein galvanischer Kontakt erfolgte). Aufgrund der Kontaktredundanz wurde jedoch keine Stromunterbrechung gemessen. Bei den von Voith bereitgestellten e-Couplern trat dieses Problem nicht auf.

Mikrounterbrechungen

Unter Mikrounterbrechungen versteht man Unterbrechungen von sehr kurzer Dauer, also im Bereich von Nanosekunden bis Millisekunden. Mikrounterbrechungen wurden mit einer von der HSLU speziell entwickelten Messplattform, CouplerSense gemessen, welche Messschaltkreise und -elektronik sowie

einen Mikrocontroller zur Erfassung und Speicherung der Daten umfasst. CouplerSense ist in der Lage, Mikrounterbrechungen von nur wenigen hundert Nanosekunden zu messen.

Beim neuen Voith e-Coupler (beweglicher Kopf, engl. movable head, eingebaut im August 2023) wurden keine Mikrounterbrechungen gemessen. Bei den alten Voith e-Coupler (statischer Kopf, fixed head) wurden bei einer Testfahrt am 7. Dezember 2023 Mikrounterbrechungen gemessen, wobei 1 Unterbrechung mit einer Dauer von 1.6 ms und 8 Unterbrechungen mit weniger als 10 μ s gemessen wurden (siehe Abbildung 18). Darüber hinaus wurden im gesamten Testzeitraum keine Mikrounterbrechungen gemessen.

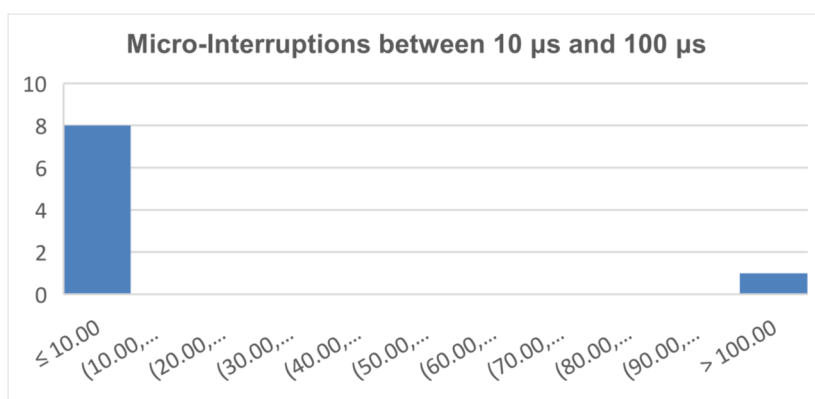


Abbildung 18: Histogramm der Mikrounterbrechungen am alten Voith e-Coupler (statischer Kopf) während der Testfahrt am 7. Dezember 2023

Beim Knorr-Bremse e-Coupler wurden bei den Testfahrten am 5. und 6. Oktober 2023 37 bzw. 99 Mikrounterbrechungen gemessen. Die Dauer der Unterbrechungen lag zwischen mehreren Mikrosekunden und mehreren Sekunden (die längste betrug 3.4 s). Allerdings ist zu beachten, dass bei Rangierversuchen im September der e-Coupler beschädigt wurde. Eine Sichtprüfung der Fotodokumentation ergab, dass die Kunststoffschrauben, mit denen die Kontakthalterungen am Gehäuse befestigt sind, gebrochen waren (siehe Abbildung 19, fehlender Schraubenkopf unten links). Nach dem durch Knorr-Bremse durchgeführten Austausch der Kunststoffschrauben auf Metallschrauben wurden an diesem e-Coupler keine Mikrounterbrechungen mehr gemessen.



Abbildung 19: Fotodokumentation des Knorr-Bremse e-Couplers 3B vom 8. September 2023.

Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand wird über den DAC+ Testzug kontinuierlich mit einem im H-Wagen installierten Messgerät (Bender Isowächter isoRW685W) überwacht. Der Isolationswiderstand wurde sowohl während Testfahrten, als auch während Langzeittests im stehenden Zustand auf dem Abstellgleis gemessen. Der Isolationswiderstand lag im Zeitraum von März bis August 2023 im Bereich von 6 M Ω . Ab August fiel der Wert mehrere Male ab, wobei der niedrigste gemessene Wert 360 k Ω betrug, was immer noch über den Angenommenen 300 k Ω liegt, um vor gefährlichen Erdschlüssen sicher zu sein. Es wird

davon ausgegangen, dass die Luftfeuchtigkeit einen Einfluss auf den Isolationswiderstand hat, jedoch haben nicht alle Regentage zu einer Verringerung des Isolationswiderstands geführt. Eine Hypothese ist, dass ab August viele Installationsarbeiten an den Kupplungen durchgeführt wurden und somit die Installationen häufiger der Aussenwelt ausgesetzt waren. So wurden sowohl der neue Knorr-Bremse e-Coupler installiert als auch der neue Voith e-Coupler mit beweglichem Kopf (movable head), sowie die automatische Entkupplung. Inwiefern sich diese Arbeiten auf den Isolationswiderstand auswirkte, und weshalb der Wert danach deutlich mehr schwankte, muss jedoch in weiteren Tests systematisch überprüft werden.

Es ist zu beachten, dass diese Messungen am gesamten Zug durchgeführt werden. Im Falle eines verringerten Isolationswiderstands ist immer noch unbekannt, wo genau die Leckage auftritt.

Um die e-Coupler hinsichtlich des Isolationswiderstandes gezielt zu belasten, wurden Salztests mit einem Messgerät für Isolationswiderstand (Fluke 1663) am Knorr-Bremse e-Coupler sowie und dem neuen Voith e-Coupler (mit beweglichem Kopf, movable head) durchgeführt. Hierzu wurden die e-Coupler vom 400 VAC-Stromnetz getrennt, um gezielt den Isolationswiderstand des e-Coupler zu messen. Jeder e-Coupler wurde dreimal mit einer Wasser-Salz-Lösung besprüht und jedes Mal der Isolationswiderstand gemessen.

Der Voith e-Coupler hatte zunächst einen Isolationswiderstand von mehr als 1'000 M Ω , der sukzessive auf 80 M Ω sank. Der Knorr-Bremse e-Coupler hatte zunächst einen Isolationswiderstand von 15 M Ω , der nach der dritten Salzwasser-Einwirkung auf 6 M Ω sank. Dieser Test hat gezeigt, dass bestimmte Umgebungsbedingungen den Isolationswiderstand verringern, während die endgültigen Messungen noch im sicheren Bereich lagen. Bei diesen Tests handelt es sich jedoch lediglich um Ersttests, die in einer grösseren und systematischeren Studie wiederholt werden sollten.

Bordnetzversorgung der Wagen

Die Bordnetzversorgung wurde je nach Testfall mehr oder weniger stark belastet. So reichte die installierte Batteriekapazität nicht immer aus und führte zum Abbruch einzelner Praxistests.

Da die Kapazität der Bordnetzversorgung direkt von den installierten Verbrauchern abhängt, können aus dem Testzug keine Rückschlüsse für die künftige Ausrüstung des digitalen Güterwagens abgeleitet werden.

6.5.3. Kommunikationssystem

Bei den hier gezeigten Ergebnissen handelt es sich um die über alle Testfahrten ausgewertete Message Error Rate und Latenz. Wie in Abschnitt 6.1.2. dargelegt hängen diese Performanzmetriken von mehreren Parametern ab. Die unten dargestellten Ergebnisse basieren auf einem Zug mit 7 Waggons und einer Forwarding Distance zwischen 2 und 4. Tabelle 7 zeigt die vollständige Statistik der PTB-Messages/Tokens während aller durchgeführten Testfahrten.

Date	Test Route	Test Drive Duration (hh:mm:ss)	Forward Distance	PTB TOKENs Sent	PTB TOKENs Lost	PTB TOKEN Loss Rate
04.05.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	02:14:34	2	4'460'814	31	6.949E-06
04.05.23	Olten RB – Basel RB – Lupfig	03:47:45	2	2'810'003	76	2.705E-05
05.05.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	02:00:29	4	3'403'300	39	1.146E-05
05.05.23	Olten RB – Basel RB – Lupfig	02:26:26	4	4'149'048	70	1.687E-05
08.06.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Biasca	03:24:16	4	5'541'624	73	1.317E-05
08.06.23	Biasca - Göschenen - Erstfeld - Rotkreuz - Lupfig	03:06:21	4	5'294'820	50	9.443E-06
09.06.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Bodio	02:58:01	4	5'026'992	64	1.273E-05
09.06.23	Bodio - Göschenen - Erstfeld - Rotkreuz - Lupfig	03:22:15	4	5'707'842	53	9.285E-06
17.07.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Bodio	03:44:11	4	6'323'358	42	6.642E-06
17.07.23	Bodio - Göschenen - Erstfeld - Rotkreuz - Lupfig	03:12:50	4	5'445'550	122	2.240E-05
18.07.23	Lupfig – Rotkreuz – Erstfeld – Göschenen - Bodio	05:01:53	4	8'513'982	51	5.990E-06
18.07.23	Bodio - Göschenen - Erstfeld - Rotkreuz - Lupfig	03:09:30	4	5'355'270	58	1.083E-05
10.08.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	02:34:48	4	4'376'477	81	1.851E-05
10.08.23	Olten RB – Basel RB – Lupfig	02:39:45	4	4'510'854	631	1.399E-04
11.08.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	02:38:38	2	3'217'554	104	3.232E-05
11.08.23	Olten RB – Basel RB – Lupfig	02:20:49	2	2'819'430	318	1.128E-04
31.08.23	Lupfig – Luzern – Horw	03:06:55	2	3'798'312	3	7.898E-07
31.08.23	Horw – Luzern – Lupfig	02:31:48	2	2'962'462	5	1.688E-06
07.09.23	Lupfig – Basel RB	03:04:15	3	5'200'698	257	4.942E-05
07.09.23	Basel RB – Olten RB – Basel KH	01:15:21	3	2'165'616	142	6.557E-05
08.09.23	Basel KH – Lupfig	01:41:07	3	2'862'270	878	3.067E-04
05.10.23	Lupfig – Niederglatt	01:44:45	3	2'496'306	1	4.006E-07
05.10.23	Niederglatt – Lupfig	01:30:25	3	2'563'458	14	5.461E-06
06.10.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	02:34:21	3	4'362'890	19	4.355E-06
06.10.23	Olten RB – Basel RB – Lupfig	03:31:55	3	5'978'184	120	2.007E-05
23.10.23	Lupfig – Basel RB – Olten RB	02:41:01	3	4'105'222	8	1.949E-06
23.10.23	Olten RB – Basel RB	02:20:22	3	1'465'632	1	6.823E-07
10.11.23	Basel RB – Olten RB	01:23:51	3	2'380'290	9	3.781E-06
10.11.23	Olten RB – Basel RB – Lupfig	03:01:28	3	5'129'070	22	4.289E-06
07.12.23	Lupfig – Bern – Brig	03:22:14	3	5'442'759	133774	2.458E-02
07.12.23	Brig – Bern – Lupfig	03:28:08	3	5'911'788	19	3.214E-06
08.12.23	Lupfig – Niederglatt	01:32:15	3	2'628'480	12	4.565E-06
08.12.23	Niederglatt – Lupfig	01:49:34	3	3'101'911	9	2.901E-06

Tabelle 7: PTB-Token-Statistik für alle Testfahrten.

Die rote Reihe kennzeichnet eine Testfahrt mit aussergewöhnlichen Ereignissen, die zu hohen Token-Verlustraten führte. Bei der Testfahrt am 7. Dezember gab es ein Einzelereignis, mit einer zeitlich isolierten, vereinzelt unterbrochenen Kommunikation. Die Ursache für diesen Vorfall konnte trotz intensiver Analyse und zusätzlicher Tests nicht bestimmt werden, siehe Abschnitt 6.6.

Zusammenfassend sind die Performanz-Resultate für das Kommunikationssystem:

- **Message Error Rate**

Berücksichtigt man die Testfahrten ohne aussergewöhnliche Ereignisse (grüne Reihen), ergibt sich eine durchschnittliche Token-Verlustrate im Bereich von $2.5 \cdot 10^{-5}$. Davon ausgenommen ist das aussergewöhnliche Ereignis, welches in der Tabelle 6 rot markiert ist. Über die gesamte Zeit dieser ausgenommenen Testfahrt betrug die durchschnittliche Token-Verlustrate 2.5 %.

- **Zykluszeit**

Da das PLUS-Token Protokoll deterministisch ist, lässt sich die Zykluszeit im Voraus berechnen. Die Master-Zykluszeit, dies entspricht der Zykluszeit, mit der Nachrichten von der Lokomotive an die Waggons gesendet werden kann, liegt zwischen 1.78 ms und 2.23 ms (für eine Forwarding Distance von 3 und 4). Diese Werte beschreiben jeweils den Best-Case und Worst-Case ohne Token Verlust. Die Ergebnisse von den Testfahrten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den erwarteten Werten:

- o der Medianwert beträgt 2.13 ms
- o das 90%-Perzentil beträgt 2.14 ms
- o das 99%-Perzentil liegt bei 2.27 ms

Eine gewisse Abweichung muss in Kauf genommen werden, da die Zeit nicht direkt gemessen wurde, sondern anhand der gesendeten Token innerhalb der Messintervalle von 10 s berechnet wurde.

6.5.4. Zusammenfassung Performanz Analyse

Die Performanz Analyse basiert hauptsächlich auf Daten, die während der Testfahrten gesammelt wurden, aber auch auf Daten aus Langzeit-Standtests in der Parkposition. Tabelle 8 fasst die wichtigsten Resultate des gesamten Testzeitraums im DAC+ Testzug-Projekt zusammen. Da weder die Werte für die Message Error noch die Zugintegritäts-Fehlalarme aktuell spezifiziert sind, wurden hierfür Annahmen getroffen.

	Tests	Ziel
Anzahl Rangiertage	18	18
Anzahl Kupplungszyklen	1'342	1'200
Anzahl Testfahrten	33	30
Gesamte Teststrecke	4'211 km	4'000
Gesamtzahl versendeter PTB Messages während Testfahrten	144×10^6	100×10^6
PTB Message Loss Rate (während Testfahrten, exkl. Testfahrt vom 7.12.23)	2.5×10^{-5}	$< 10^{-4}$ (angenommen)
PTB Zugintegritäts-Falschalarme (pro 250 ms Reaktions-Intervall)	7×10^{-7}	$< 10^{-6}$ (angenommen)
Isolationswiderstand	~ 6 MOhm	300 kOhm (angenommen)

Tabelle 8: Zusammenfassung der Testresultate des DAC+ Testzuges

Automationsfunktion	Powerline PLUS Train Backbone Funktionen	PTB Tests verschiedenen e-Coupler Prototypen		
		Voith statischer Kopfteil	Knorr Bremse beweglicher Kopfteil	Voith beweglicher Kopfteil
Zugzusammenstellung (Train Composition Detection)	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmen der Wagenreihenfolge und -richtung aller Waggons mit dem PTB Train Topology Detection (TTD)-Protokoll - Datenübertragung zwischen der CCU in jedem Wagen und dem Master-Tablet in der (emulierten) Lokomotive über PTB 	OK	OK	OK
Automatische Bremsprobe	<ul style="list-style-type: none"> - Datenübertragung zwischen der Waggon Tracker-Box von PJM und dem Master-Tablet in der (emulierten) Lokomotive über PTB 	OK	OK	OK
Entkupplung	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung von Steuer- und Überwachungsdaten zwischen der Coupling Control Unit (DACCU) von Voith und dem Master-Tablet von Voith über PTB 	OK	OK	OK
Zugintegritätsüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung der Überwachungsdaten zwischen dem letzten Wagen und dem Master-Tablet in der (emulierten) Lokomotive über PTB 	OK	OK	OK

Tabelle 9: Zusammenfassung der Testresultate der Automationsfunktionen

Die Testergebnisse belegen, dass die vier wesentlichen automatisierten Zugfunktionen auf Basis des PTB-Kommunikationssystems mit Datenübertragung über die Zugstromleitung und deren Federdruckkontakte in den aktuell eingesetzten einschliesslich der neuen e-Coupler-Prototypen von Voith und Knorr Bremse erfolgreich und zuverlässig funktionieren (vgl. Tabelle 9).

6.6. Zusätzlich Euroloop-Tests

Das Euroloop-System verwendet ein Spread-Spectrum moduliertes Signal für die Uplink-Kommunikation (Gleis zu Lokomotive). Dieses Signal wird bei Aktivierung des Systems über ein Strahlkabel, welches entlang eines der Gleise verlegt ist und bis zu mehreren 100 m lang sein kann, gesendet. Dieses Signal besitzt im Frequenzbereich zwischen 11 bis 16 MHz die höchste spektrale Leistung und überlappt damit mit dem von PTB auf dem DAC+ Zug verwendeten Frequenzbereich von 3 bis 30 MHz.

Da Euroloop-Systeme bekanntermassen andere Kommunikationseinrichtungen beeinträchtigen (z.B. Amateurfunk), wurde nach dem aussergewöhnlichen Ereignis während der Testfahrt am 7.12.2023, siehe Abschnitt 6.4.3, ein mobiles Euroloop-Testsystem von SBB-Infrastruktur ausgeliehen. Mit diesem System, das ein 40 m Strahlkabel beinhaltet, wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um den praktischen Einfluss von Euroloop-Systemen auf die PTB-Kommunikation zu bewerten. So wurde im Virtual Train Lab der HSLU u.a. der Worstcase einer Parallelführung von Strahlkabel und Zugbus-Kabel ohne jeglichen Zwischenraum getestet. Am stehenden DAC+ Zug wurden die realen Verhältnisse mit Verlegung des Strahlkabels entlang der Gleise untersucht.

Die Ergebnisse dieser Tests können wie folgt zusammengefasst werden: Aktive Euroloop-Strahlkabel in der Nähe des Zugbus-Kabels (verlegt am darunterliegenden Gleis oder bis ca. 3 m Abstand davon) beeinflussen die PTB-Kommunikation, führen aber nicht zu deren Abbruch: Die in dieser Konstellation beobachteten Paketfehlerraten lagen im Bereich von 10^{-4} , und damit über der durchschnittlichen Fehlerrate während der Testfahrten (vgl. Tabelle 8), aber weiterhin in einem Bereich, der innerhalb der noch zu definierenden Spezifikationen liegen wird. Es konnte gezeigt werden, dass die auf das Zugbus-Kabel eingekoppelte Störsignalleistung auch bei minimalem Abstand und perfekter Parallelführung nicht gross genug ist, um den PTB-Empfänger zu übersättigen. Somit kann im Empfänger das von PTB verwendete Mehrträger-Verfahren mit Fehlerkorrektur wirksam werden, wodurch die meisten Pakete auch unter dem Einfluss des Euroloop-Systems fehlerfrei empfangen werden können.

Details dieser Untersuchungen werden in einem separaten Bericht zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht.

7. Nutzen für Schienengüterverkehr

Ein wesentliches Ziel des Projekts waren Erkenntnisse betreffend der Robustheit und Zuverlässigkeit der in Tabelle 9 genannten Systeme in realistischen betrieblichen Abläufen des Schienengüterverkehrs, bei unterschiedlichsten Umweltbedingungen (Temperaturen, Kälte, Hitze, Regen, Schnee und Eis, elektromagnetische Einstrahlungen, mit Beladung, u.a. mit schwappenden Wassertanks, etc.) zu erlangen. Dazu wurden verschiedene Mess- und Testsysteme auf dem Zug installiert.

Fokus der Mess- und Testsysteme waren u.a. die neuen beweglichen e-Coupler-Varianten von Voith und Knorr Bremse (movable head), die seit Mitte 2023 in die Tests integriert wurden.

Während des gesamten Projektverlaufs fand ein Austausch von Erfahrungen, Ergebnissen etc. mit dem DAC4EU-Projekt statt, insbesondere gegen Projektende hin betreffend dem Isolationswiderstand.

Die Testergebnisse belegen, dass die vier wesentlichen automatisierten Zugfunktionen auf Basis des PTB-Kommunikationssystems mit Datenübertragung über die Zugstromleitung und deren Federdruck-Kontakte in den aktuell eingesetzten e-Couplern, einschließlich der neuen e-Coupler-Prototypen, von Voith und Knorr Bremse robust und zuverlässig funktionieren.

Dies sind wesentliche Ergebnisse mit grossem Nutzen für die Weiterentwicklung der DAC und des FDFT, die in den weiteren Entwicklungen bei EDDP, im ERJU FP5-TRANS4M-R-Projekt sowie in der beginnenden CENELEC-Standardisierung voll zum Tragen kommen werden.

8. Austausch mit den europäischen Projekten

8.1. Allgemein

Die Zusammenarbeit mit der europäischen Ebene geschah primär durch den Austausch der Projektbeteiligten in den Gremien DAC4EU und ERJU FP5-TRANS4M-R.

8.2. EDDP

Für das Systemkonzept des DAC+ Testzuges wurden die jeweils vorliegenden, vorläufigen Spezifikationen aus EDDP WG1 SG2/3 (Strom- und Kommunikationssystem) übernommen.

8.3. ERJU FP5-TRANS4M-R

8.3.1. WP2 / künftige operative Prozesse

Durch die direkte Teilnahme eines Vertreters SBB Cargo im Core Team WP2 konnten insbesondere die Testfälle Rangiertests im Projekt auf die künftigen Zielprozesse (mit DAC und weiteren Automationskomponenten) ausgerichtet werden. Umgekehrt wurden die Testergebnisse direkt in das WP2 Core Team zurückgespielt, um auf der einen Seite allfällige Prozessänderungen anzuregen und andererseits die betrieblichen Anforderungen an die technische Umsetzung der künftigen Systeme zu schärfen.

8.3.2. WP18 / Stand der Vergleichstest SPE vs. Powerline und Auswirkungen

Die im Projekt TRANS4M-R geplanten Vergleichstests zwischen den beiden Systemen Single Pair Ethernet (SPE) und Powerline PLUS (PTB) können gemäss aktuellem Projektplan frühestens ab Q4/2025 erfolgen. Ein SPE-basiertes Kommunikationssystem wird erst zu diesem späteren Zeitpunkt zur Verfügung stehen, während im vorliegenden Projekt bereits seit Februar 2023 die Automationsfunktionen auf der Basis des verfügbaren Powerline PLUS Kommunikationssystems im Feld erfolgreich getestet wurden.

Wesentlicher Grund für die Verzögerung bei SPE ist die verzögerte Entwicklung von SPE-Switches im TRANS4M-R WP9. Es bestehen weiter grundsätzliche Fragen betreffend der Einsetzbarkeit dieser SPE-Komponenten, da SPE ursprünglich nicht für eine solche Applikation entwickelt wurde. Insbesondere ist das Verhalten der SPE-Signale über die Stift-Buchse-Kontakte in den neuen e-Coupler technologisches Neuland. Dazu kommt, dass SPE ein komplettes zusätzliches Netzwerk mit vielen zusätzlichen Kabeln, Steckern, Boxen, etc. mit sich bringt – on top des Stromsystems, über das bei PTB die Daten laufen. Dies erhöht die Komplexität, die Kosten und letztlich auch die Störanfälligkeit massiv.

8.3.3. WP18 / WP14 / Demozüge

Plc-tec wird ihre Produkte in weiteren, europäischen Demo- und Pilotsystemen / -zügen einsetzen, u.a. im Train Test Lab in WP14.

8.4. DAC4EU

SBB Cargo ist als Konsortialmitglied von DAC4EU an den Planungen der technischen Umsetzung und Testfahrten aktiv beteiligt. SBB Cargo beteiligt sich zudem finanziell an DAC4EU.

Der Austausch mit diesem Projekt geschah:

1. durch die Teilnahme von SBB Cargo und HSLU in den wöchentlichen sogenannten Sync-Meetings, in denen mit den Kollegen der Deutschen Bahn (DB), der DB Systemtechnik, dem Technologie-dienstleister OWITA (zuständig für die Strom- und Datenkommunikationstests) sowie dem externen Experten Prof. Dr. Gangolf Hirtz die jeweiligen Tests besprochen werden.
2. Durch die Teilnahme von SBB Cargo in den wöchentlichen Planungsmeetings DAC4EU, in denen die Einsätze des DAC4EU Testzuges abgesprochen wurde und ein intensiver Austausch über die Testabläufe und Testresultate der beiden Testzüge (DAC4EU/DAC+) erfolgte.
3. Durch die Teilnahme von SBB Cargo am monatlichen DAC4EU Jour Fix, bei dem vor allem der Projektstand DAC4EU und das weitere Vorgehen DAC4EU besprochen wurde.

Insgesamt konnten dank dieser Zusammenarbeitsform Testanforderungen definiert und Testergebnisse ausgetauscht werden, um laufende oder künftige Tests zu optimieren und diesbezügliche Doppelspurigkeiten zu verhindern.

Der Testzug von DAC4EU besteht seit Mitte 2023 aus 22 Wagen und ist auf das 400 V Stromsystem umgerüstet. Seit August 2023 werden auch die neuen e-Coupler von Voith und Knorr Bremse getestet. Ein Schwerpunkt Ende 2023 waren Isolationswiderstandsmessungen. In der regennassen Zeit im Dezember fiel der Isolationswiderstand für den ganzen Zug auf Werte von bis unter 20 kOhm, was deutlich unter den Werten beim DAC+ Zug liegt (> 300 kOhm). Dieser Befund wird aktuell von beiden Seiten noch untersucht.

9. Kosten

Die finanzielle Abrechnung des Projektes erfolgt in einem speziellen Bericht und ist nicht Teil dieses Berichtes.

10. Ausblick

Obwohl mit der 2023 durchgeführten Testkampagne viele Erkenntnisse zur Anwendbarkeit des Power Line PLUS Backbone im künftigen digitalen Güterzug gewonnen werden konnten und auch die verbauten mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten auf ihre betriebliche und technische Tauglichkeit im Schienengüterverkehr geprüft wurden, sind bis zu finalen und zulassungsfähigen Lösungen noch viele weitere Tests und Schritte notwendig.

Beim DAC+ Zug handelt es sich grundsätzlich um einen Forschungs- und Versuchsträger, auf dem für die u.a. in TRANS4M-R definierten, betrieblichen Anforderungen Lösungskonzepte und -architekturen installiert und auf ihre Machbarkeit unter möglichst realen Feldbedingungen getestet wurden. Viele der Anforderungen waren noch im Fluss und daraus resultierende Systemspezifikationen sind es zum Teil immer noch.

So wurden von den Zugfunktionen die vier wesentlichen aus dem TRANS4M-R 'Basic Package' erfolgreich getestet (Train Composition Detection, Automatic Brake Test, Train Integrity Monitoring, Uncoupling) aber es gibt zwischenzeitlich weitere Zugfunktionen wie Passive Consist Detection, Wake Up, etc. die noch getestet werden müssen. Zu beachten: Gemäss TRANS4M-R Terminplan liegen erst Ende Juli 2024 die Spezifikationen sowohl der Zugfunktionen als auch der sie unterstützenden Strom- und Kommunikationssysteme vor, die dann noch von externen Experten geprüft werden müssen.

Daher war es bisher nicht sinnvoll, die verwendeten Systeme und Komponenten einer Systementwicklung nach CENELEC EN-50126 / V- Model zu unterziehen. Somit fehlt der wichtigste Schritt zu einer direkten Zulassung. Es ist auch zu berücksichtigen, dass auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine technische Weiterentwicklung erfolgen muss, welche wiederum bei der Systementwicklung berücksichtigt werden muss.

Dazu steht der Testzug auch im Jahr 2024 für Rangier und Standtests wie auch für Testfahrten zur Verfügung.

10.1. PLC Technologie

Wie beschrieben werden die neuen Zugfunktionen auf dem DAC+ Testzug implementiert und getestet.

Powerline PLUS hat bereits Vorserienreife (Formfaktor der PTB Node Hardware, Bill-of-Material, etc.) erlangt und wird in Kleinserien (einige Hunderte Exemplare) produziert. plc-tec ist dabei Partnerschaften zu bilden die weitere Komponenten der Wagenelektronik für das Strom- und Kommunikationssystem einbringen würden.

Gleichzeitig arbeitet plc-tec mit Voith zusammen und ist auch mit den anderen Kupplungsherstellern im Kontakt, die solche Produkte integrieren würden.

Da für das neue Güterzug-Kommunikationssystem in jedem Fall bestehende Standards (u.a. IEC61375) angepasst, wenn nicht neu spezifiziert werden müssen, ist plc-tec auch bei der CENELEC-Standardisierung aktiv.

10.2. Kupplungsfunktionalitäten

Unabhängig von den SBB Cargo internen Schritten in Richtung Automation sind durch die Lieferindustrie die bei den DAC+ Tests erkannten Mängel an den verschiedenen Kupplungskomponenten zu beheben bzw. es sind neue Lösungen zu entwickeln, um die betriebliche Tauglichkeit her- bzw. sicherzustellen.

Dabei sind auch die Anforderungen aus dem DAC4EU Projekt und den TRAMS4M-R FP5 Work packagees zu berücksichtigen.

Dies gilt insbesondere für:

- Manuelle und Ablaufbergtaugliche Entkupplungseinrichtung
- Zuverlässigkeit des e-coupler Konzeptes
- Bedienanforderungen Push-Button und Tablett
- Rückstellung der elektrischen prevent coupling Funktion

11. Anhänge

11.1. Technologieausrüstung und deren Schnittstellen

11.1.1. Details zur Technologieausrüstung des Wagen-Testsystems

Abb.11.1 zeigt die auf den Test- und Zwischen-Wagen implementierte Wagenausrüstung (auf den Zwischen-Wagen zum Teil nur auf einer Seite).

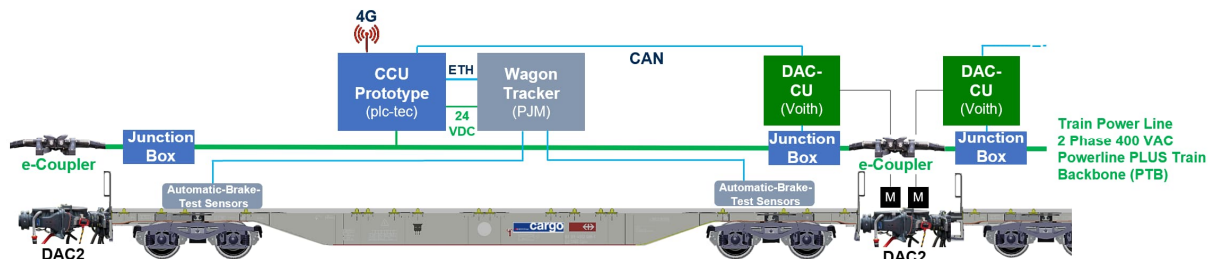


Abb. 11.1 Auf den Test-Wagen implementierte Wagen-Ausrüstung

Die Technologieausrüstung besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

a. DAC2 (Voith)

Scharfenberg-Kupplungen von Voith waren bereits auf den zugelieferten Sgnss Wagen implementiert.

b. e-Coupler für die Kupplung der Zugstromleitung zwischen den Wagen (Voith und Knorr-Bremse)

Für die ersten Tests wurden e-Coupler mit statischem Kopfteil der 2. Generation von Voith mit 6 Federdruck-Kontakten (Abb. 11.2) implementiert. Grund dafür war, dass zum Zeitpunkt der Konzepterstellung des Testsystems bei EDDP ein 3-Phasen 400 VAC System erwogen wurde, was unter Einbezug der Wendesymmetrie eines Wagen zu 6 Kontakten im e-Coupler geführt hätte. Später wurde dann bei EDDP für ein 2-Phasen 400 VAC System entschieden. In den Tests wurden dann nur 4 der 6 Kontakte an die Stromleitungen angeschlossen, die beiden nicht verwendeten Kontakte wurden für spezifische Messungen eingesetzt.



Abb. 11.2 Kontaktträger und Kontakte der statischen e-Coupler von Voith.

Im Rahmen der Erprobung der neuen e-Coupler mit beweglichem Kopfteil wurden im Projektverlauf implementiert (Abb. 11.3)

- Anfang August 2023 der e-Coupler von Knorr Bremse
- Ende August 2023 der e-Coupler von Voith

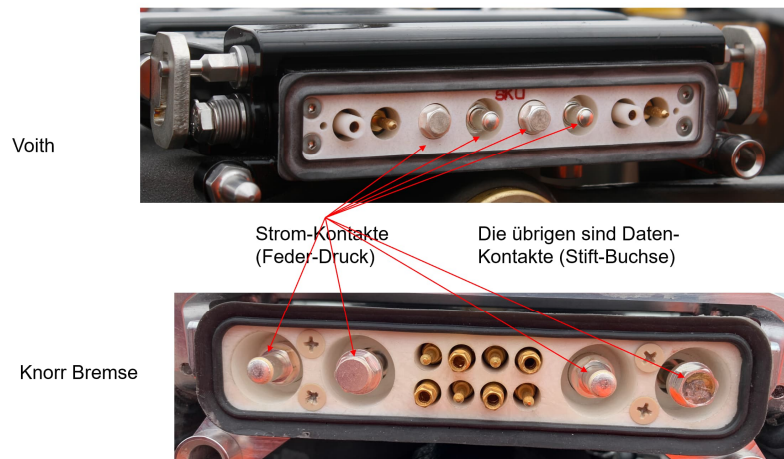


Abb. 11.3 Kontaktträger und Kontakte der e-Coupler mit beweglichem Kopf von Voith und Knorr Bremse

Es wurden jeweils 2 neue e-Coupler installiert, so dass danach noch 6 der alten Voith e-Coupler auf dem Zug verbleiben.

Die neuen e-Coupler von

- Voith haben 8 Kontakte wovon 4 für die Stromleitung (Federdruck) und 4 (Stift / Buchse) für die Datenleitungen
- Knorr Bremse haben ebenfalls 4 Kontakte (Federdruck) für die Stromleitung und 8 (Stift / Buchse) für die Datenleitungen.

Die Übertragung der PTB Daten erfolgte jeweils nur über die Stromkontakte.

c. 400 VAC Stromkabel (Studer Cables)

Ein Kabel-Prototyp (verdrillt, 2 x 10 mm²) von Studer Cables wird eingesetzt, da dies auch dem DAC4EU-Projekt zur Verfügung gestellt wurde.

d. Waggon Tracker System für die automatische Bremsprobe (ABP) (PJM)

Dieses System ist bei der SBB Cargo bereits im operativen Einsatz. Bis anhin

- wurden die ABP-Daten von der Waggon-Tracker-Box über ein LORA-Funksystem vom Wagen auf das Tablet übertragen
- erfolgte die Stromversorgung des Systems über einen Radnabengenerator.

Für die Realisierung der ABP-Automationsfunktion im DAC+ Testsystem mit PTB

- werden die ABP-Daten
 - o von der Waggon Tracker Box
 - o über eine (von PJM neu implementierte) Ethernet-Schnittstelle in den CCU-Prototyp und von dort
 - o über PTB
 - o in die Waggon Tracker Base Station im H-Wagen und von dort
 - o über eine Luftschnittstelle
 - o auf ein Standard ABP Tablet von SBB Cargo übertragen.
- erfolgt die Stromversorgung der Waggon Tracker Box und der jeweiligen im Waggon verteilten Sensoren über eine (von PJM neu implementierte) 24VDC Schnittstelle aus dem Wagen-Stromsystem im CCU-Prototyp.

In einer weiter optimierten Wagenausrüstung würde die Waggon Tracker Steuerung voraussichtlich in die CCU Rechereinheit integriert.

e. Central-Control-Unit (CCU) Prototyp (HSLU/plc-tec)

Abb. 11.4 zeigt die Komponenten des CCU-Prototyps:

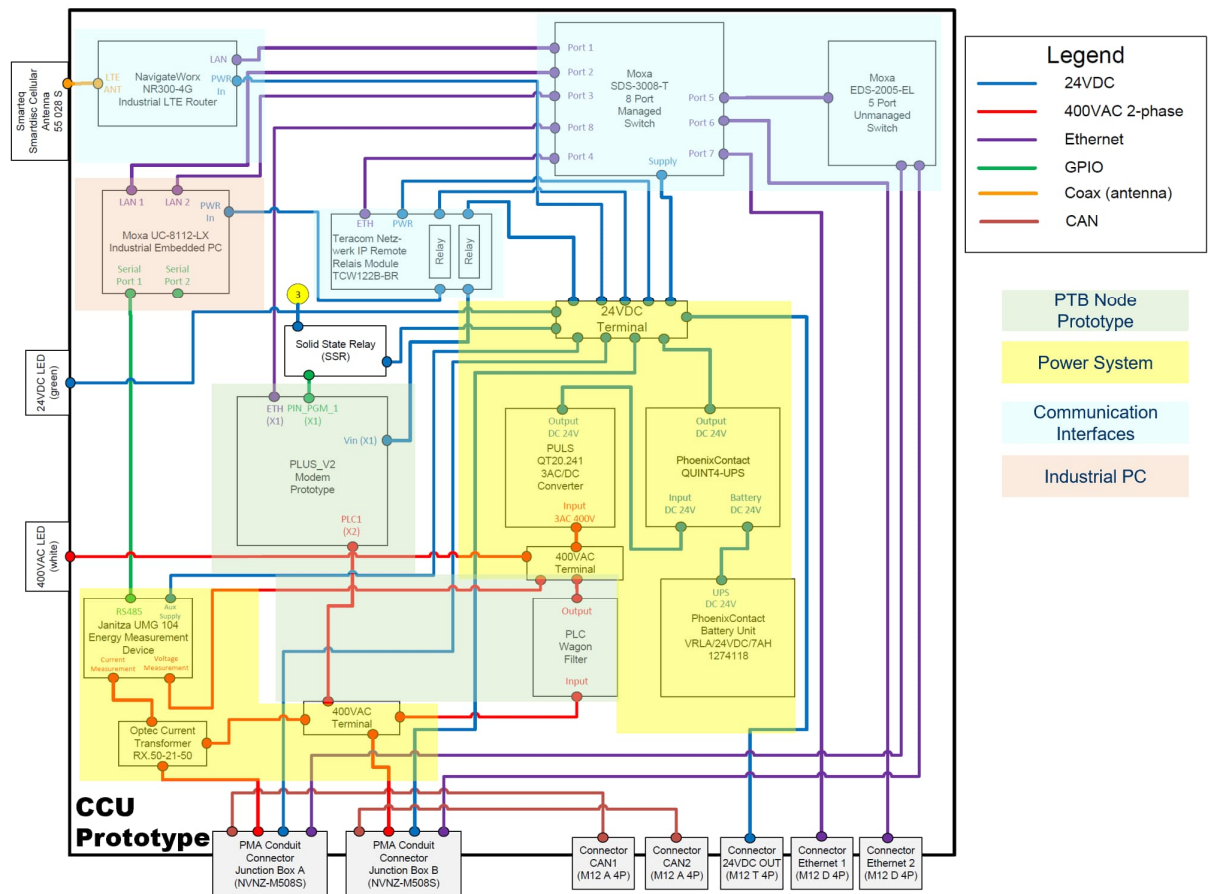


Abb. 11.4 CCU-Prototyp

- PTB Node Prototyp
- Wagen-Stromsystem
 - o AC-DC-Wandler (400 VAC → 24 VDC2)
 - o Wagen-Batterie um eine gewisse Autonomie des Wagen, wenn keine 400 VAC Zugspannung zur Verfügung steht zu gewährleisten z.B. während des Rangierens
 - o USV/UPS
 - o Testgeräte
- Rechereinheit (Industrie-PC) für
 - o Applikationen / Automationsfunktionen: In einer finalen Architektur würde hier u.a. die Überwachung und Steuerung der Automatischen Bremsprobe platziert, was in unserem Testsystem separat in der Waggon Tracker Box erfolgt.
 - o Verarbeitung Mess- und Testdaten
- Switches (Ethernet) und Gateways (LTE/4G)
- Antenne (LTE/4G) für die Übertragung der Mess- und Testdaten von jedem Wagen in die Cloud und zur weiteren Back-Office-Verarbeitung der Daten

Abb. 11.5 zeigt ein Foto des Inhalts der CCU Prototyp Box inkl. dem PTB Node.

² In der Zwischenzeit wurde von TRANS4M-R die Waggon-Spannung auf 48VDC festgelegt. Entsprechende Entwicklungen zur Anpassung laufen z.Zt. bei der HSLU.

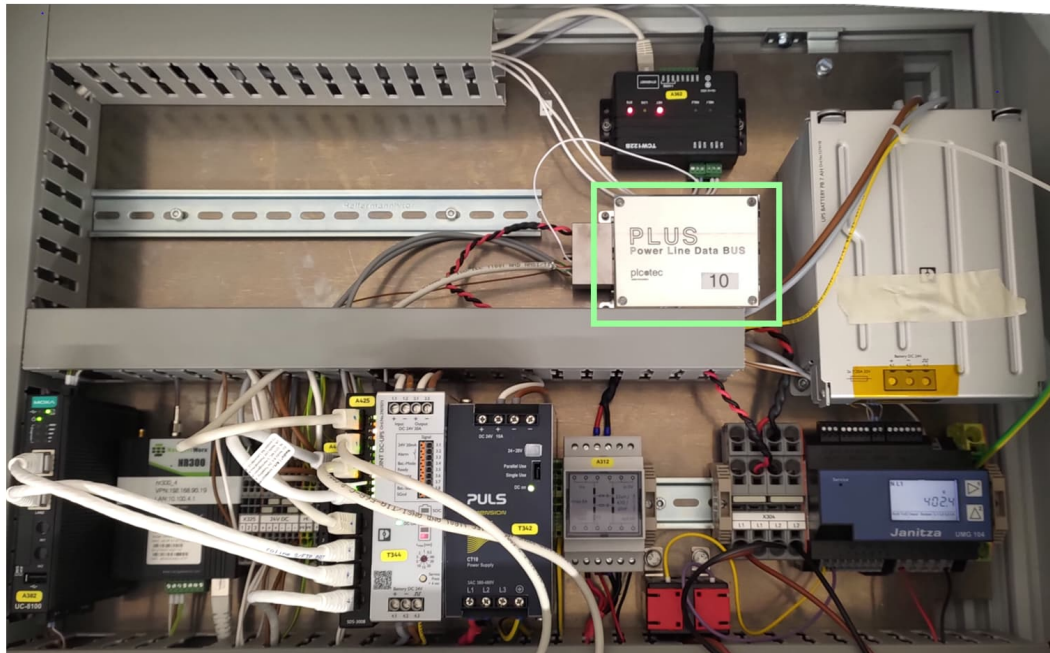


Abb. 11.5 CCU-Prototyp mit dem PTB Node der plc-tec

f. Junction Box Prototyp (HSLU)

In der Junction Box werden die Stromkabel aus den e-Couplern mit dem Stromkabel auf dem Wagen verbunden. An den schraubenkupplungsseitigen Enden der beiden Zwischenwagen übernehmen vereinfachte sog. Mini-Junction-Boxes jeweils die Verbindung der Wagen-/Zugstromleitung mit einem Überbrückungskabel in den H-Wagen.

g. Kupplungs-Steuergerät (DAC Control Unit DACCU) Prototyp (Voith)

Von Voith wurden im Projektverlauf Aktuatoren für die Entkupplung von Wagen oder Wagengruppen sowie Prototypen für Steuergeräte dafür entwickelt und in Zusammenarbeit mit der HSLU in die Architektur des Testsystems integriert. Diese sieht je eine DACCU auf beiden Seiten einer DAC vor. Dabei wurden 2 Entkupplungsmöglichkeiten vorgesehen:

- Entkupplung per Hand mit einem Druckknopf auf der Seite
- Entkupplung abgesetzt, prinzipiell
 - o von der Lok aus oder vom Bahnsteig / nahe dem Zug, z.B. mit einem Tablet
 - o von der Zentraleinheit eines Yard-Managementsystems aus

Die bestehende Architektur sieht vor, dass die DACCUs jeweils

- mit einer Steuerleitung mit den Aktuatoren verbunden sind,
- über eine CAN-Schnittstelle mit der CCU verbunden werden, um die Daten zwischen den DACCUs und einer Steuereinheit über den PTB zu übertragen und
- betreffend Stromversorgung mit den Junction Boxen verbunden sind.

Diese Architektur wurde auf den Test- und Zwischenwagen implementiert. Die Architektur für das Entkupplungssystem ist aktuell ein grosses Diskussionsthema bei TRANS4M-R mit zwei prinzipiell unterschiedlichen Ansätzen:

- Steuerung der Entkupplung über den Backbone (über CAN oder Ethernet) (Voith-Variante)
- Steuerung lokal über separate diskrete Leitungen an der DAC.

Für die Tests wurde ein Prevent-Coupling-Mechanismus implementiert: Eine Herausforderung besteht nämlich darin, dass bereits entkuppelte Wagen /- gruppen schon vor dem Ablaufberg wieder kuppeln. Dies wurde verhindert, indem nach dem Entkuppeln das Wiederkuppeln zunächst mechanisch unterbunden wird und an einem bestimmten Ort vor dem Ablaufberg mit einem optischen Reflektor System

(Sensor am Wagen nahe der DAC, Reflektor im Gleisbett) dieser Mechanismus wieder aufgehoben wird.

11.1.2. Architektur des emulierten Strom- und Kommunikations-Testsystems der Lokomotive

Annahmen / Vorgaben aus EDDP / TRANS4M-R

Betr. Einbindung der Lokomotive in das Gesamt-FDFT-Systems gibt es aktuell noch sehr viele offene Fragen. Dies betrifft u.a. auch die Schnittstellen für das Strom- und Kommunikationssystem. Für dieses Projekt wurde angenommen aus den aktuell gültigen Vor-Spezifikationen aus EDDP:

- Die Lok muss eine Stromversorgung von 2-Phasen 400 VAC zur Verfügung stellen.
- Die Gesamtleistung für den Zug ist 3 kW, was für einen 50-Waggon-Zug ca. 60 W pro Waggon bedeutet.
- Der Isolationswiderstand des gesamten Zugs wird von der Lok aus überwacht mit speziellen Geräten. Er sollte im Bereich oberhalb von einigen 100 kOhm liegen.
- Die Daten der Automationsfunktionen werden in die Lok übertragen und dort geeignet dargestellt. Dies betrifft:
 - o Zugliste aus der Train Composition Detection
 - o Darstellung für die ABP
 - o Darstellung der Zugintegritätsüberwachung / -alarme
 - o Darstellung für die Entkopplung ab der Lok

Architektur für die Einbindung einer emulierten Lok in das Testsystem

Bezüglich Ausrüstung von Strecken- und Rangierloks für den digitalen Güterzug bestehen keine konkreten Spezifikationen zu den Strom- und Datenschnittstellen, welche für das DAC+ Projekt verwendet werden konnten. Zudem wäre eine Bereitstellung einer entsprechenden Testlok sehr aufwendig und kostenintensiv.

Daher wurde das Testkonzept von Beginn darauf ausgelegt, dass

- Standardloks von SBB Cargo für Streckenfahrten oder im Rangierbetrieb eingesetzt werden können, mit der ausschliesslichen Aufgabe den Zug mechanisch zu bewegen und ansonsten nicht in das Testsystem eingebunden sind
- die Funktionen gem. 3.2.3.1. der Lok nach dem Vorbild des DAC4EU-Testzugs in einem zusätzlichen Wagen emuliert werden (die Bezeichnung Messwagen basiert darauf, dass neben diesen Funktionen auch etliche Messgeräte für die Tests in diesem Wagen platziert sind, im Folgenden wird H-Wagen verwendet – basierend auf dem Waggon-Typ).

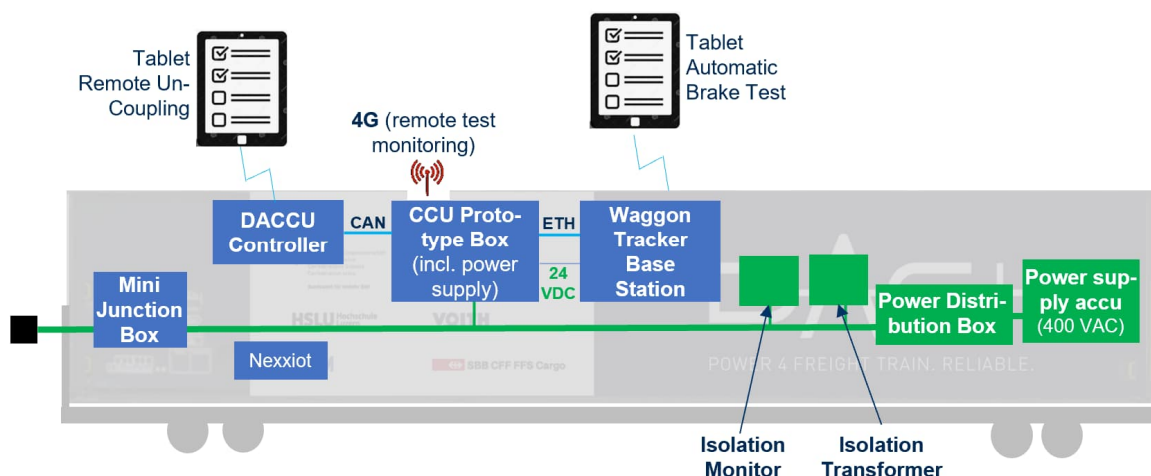


Abb. 11.6 Technologieausrüstung des H-Wagens als emulierte Lok

Der H-Wagen ist ein geschlossener und abschliessbarer Waggon, auf dem auch die Projekt-Logos dargestellt sind. Abb. 11.6 zeigt die Testausrüstung, welche im H-Wagen installiert ist, mit folgenden hauptsächlichen Komponenten

a) Stromversorgung inkl. -monitoring des ganzen Zugs mit 400 VAC

- Für Standtests am Standort des Zugs in Lupfig (s.u.) des Zugs wurde eine externe 400 VAC Zuleitung in den H-Wagen gelegt.
- Für die Streckenfahrten und den Rangierbetrieb wurden im H-Wagen zwei (wg. Redundanz) EcoTrolley Akkus³ von Ecocoach installiert, siehe Abb. 11.7, mit einer Autonomie von ca. 1 Tag.



Abb. 11.7 EcoTrolley Akku

- In der Power Distribution Box wird die Stromversorgung aus dem Akku an das Zugstromkabel und dann über eine Mini-Junction Box (s.o.) sowie ein Überbrückungskabel an die Mini-Junction-Box im Zwischen-Waggon verbunden.

b) Darstellung der Daten der Automationsfunktionen

- Automatische Bremsprobe ABP: Im H-Wagen befindet sich die 'Basisstation' des Wagon-Tracker Systems, d.h. die ABP-Daten werden über PTB von den Wagen dorthin übertragen und über Bluetooth auf das bereits verfügbare Standard-ABP-Tablet übertragen und dort angezeigt.
- Abgesetzte Entkupplung: Für die Entkupplung besteht eine Verbindung über PTB zwischen den DACCUs in den Wagen und dem DACCU Controller im H-Wagen und über WLAN mit einem von Voith entwickeltem Tablet übertragen, von dem aus im oder nahe dem H-Wagen die Entkupplung an den korrekten Kupplungsstellen ausgelöst wird.

11.1.3. Zusätzliche Test- und Messsysteme auf dem DAC+ Testzug

Für die Erreichung der Testziele in Bezug auf Zuverlässigkeit der Systeme wurden im DAC+-Testzug eine Vielzahl von Sensoren und Messgeräten integriert (Tabelle 11.1), um kontinuierlich zeitsynchronisierte Daten zu erfassen und Messungen mit Ereignissen während der Zugfahrten zu korrelieren. Die Daten werden teilweise in jedem Wagen im CCU Prototyp vorverarbeitet und dann über 4G von jedem Wagen in die Cloud und zur weiteren Auswertung an eine zentrale Datenbank übertragen. Dort besteht ein jederzeit – auch in Standzeiten - digitales Abbild des Strom- und Kommunikationssystems des ganzen Zugs („Digital Twin“-Konzept⁴), so dass z.B. bei entsprechenden Wetterverhältnissen das aufgezeichnete Verhalten des Isolationswiderstands abgerufen werden kann. Neben dem Einsatz für das Testsystem in diesem Projekt stellt dies auch schon sehr viele Erkenntnisse zur Verfügung, wie ein – selbst bei optimal robusten Systemen – infolge der harten betrieblichen Bedingungen am Ende

³ <https://eco-volta.com/ecopowertrolley/>

⁴ Im DAC+ Testzug ist ein sog. *Digitalmodel* als eine Zwischenstufe für einen voll-funktionalen *Digital Twin* realisiert.

vermutlich immer noch relativ störanfälliges FDFTs System – aus dem Backoffice überwacht und vorausschauend gewartet werden kann.

System / Gerät	Datenaufnahme	Für Analysen Aussagen
400 VAC Stromsystem	Pro Waggon jeweils zeitabhängig: Spannung V, Strom I, Wirkleistung P, Scheinleistung S, Blindleistung Q, CosPhi, Frequenz, reale Energie, Scheinenergie, gelieferte Energie, verbrauchte Energie, Max. und min. Spannung, sowie Zeit der max. / min. Spannung	Statistik des Stromsystems - Spannungs- / Stromstatistik - CosPhi Statistik - Widerstand
	Überwachung des Isolationswiderstands (über der Zeit) von der Lok / H-Wagen aus; Spannung L1-L2, L1-PE, L2-PE, Detektion von Fehlern, z.B. Erdschlüssen	Statistiken über das Auftreten von Erdschlüssen, Korrelation von Erdschlüssen mit Isolationsüberwachungsdaten zur Ermittlung der möglichen Ursache, Korrelation des Widerstands mit Wetter, ...
Kommunikationssystem (PTB)	Performanz Grössen wie Paket-Fehlerraten, Latenz, Netzwerk-Bandbreite, etc.	
GPS	Präzise UTC Zeit, GPS Ortsaufnahme, Geschwindigkeit gegen Grund	- Erstellung der Strecke in einer Karte für jeden Fahrttag - Korrelation des Orts und der Zuggeschwindigkeit mit anderen Daten (fahren-der vs. stehender Zug)
Videokamera am H-Wagen	Zeitsynchrone Aufnahme der Fahrt um Events nachverfolgen zu können (Zugbegegnung, Tunnel, Funken-schlag vom Pantograph, enge Kurven, Weichen, ...)	Korrelation anderer Mess-/Testdaten mit Ereignissen in der Zugfahrt (z. B. Überfahren von Weichen, Zugbegegnung, Kurven, ...)
Videokamera an einer DAC (Go-Pro)	Zeitsynchrone Überwachung von DAC-/e-Coupler-Bewegungen: - Beobachtung der Bewegung der Messskalen auf jedem DAC relativ zueinander. - Messung der relativen Bewegung jedes DAC relativ zueinander mithilfe von Videoinhaltsanalysetechniken.	
3D Beschleunigungssensoren	Auf beiden e-Couplern um 3 dim. Relativbeschleunigungen zu erfassen und z.B. mit Zugbegegnungen, engen Kurven, etc. zu korrelieren	
DC Widerstand der e-Coupler Kontakte	Während der Fahrt gemessener Gleichstromwiderstand über die beiden freien Stromkontakte im statischen-Coupler von Voith zwischen zwei gekoppelten Junction Boxen	- Statistische Analyse der DC-Widerstandsmessungen - GPS-/Probefahrtvideos werden verwendet, um Änderungen des Gleichstromwiderstands mit externen Ereignissen zu korrelieren
e-Coupler Mikro- unterbrechungen	Detektion und Anzahl von Mikrounterbrechungen innerhalb eines Zeitfensters	- Wahrscheinlichkeit von Mikrounterbrechungen, Verteilung vs. Zeit - Dauer der Mikrounterbrechungen - Korrelation von Mikrounterbrechungen zu externen Ereignissen (z. B. Überfahren des Schaltgetriebes)

Tabelle 11.1 Mess- und Prüfgeräte am DAC+-Testzug

Für die Messungen an den elektrischen Kontakten in den e-Couplern hat die HSLU ein neues Sensorsystem (*CouplerSense*) entwickelt.

11.1.4. Installationen der Testsysteme auf dem DAC+ Testzug

Abb. 11.8 zeigt im Detail die oben genannten Installationen der Strom-, Kommunikations- und Mess-/Testsystem auf den Wagen mit allen Details wie Boxen, Verkabelung, etc. (aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die bereits initial in den angelieferten Waggons verlegten Komponenten des Waggon Tracker-Systems inkl. Sensoren und deren Daten- und Stromverbindungen nicht dargestellt):

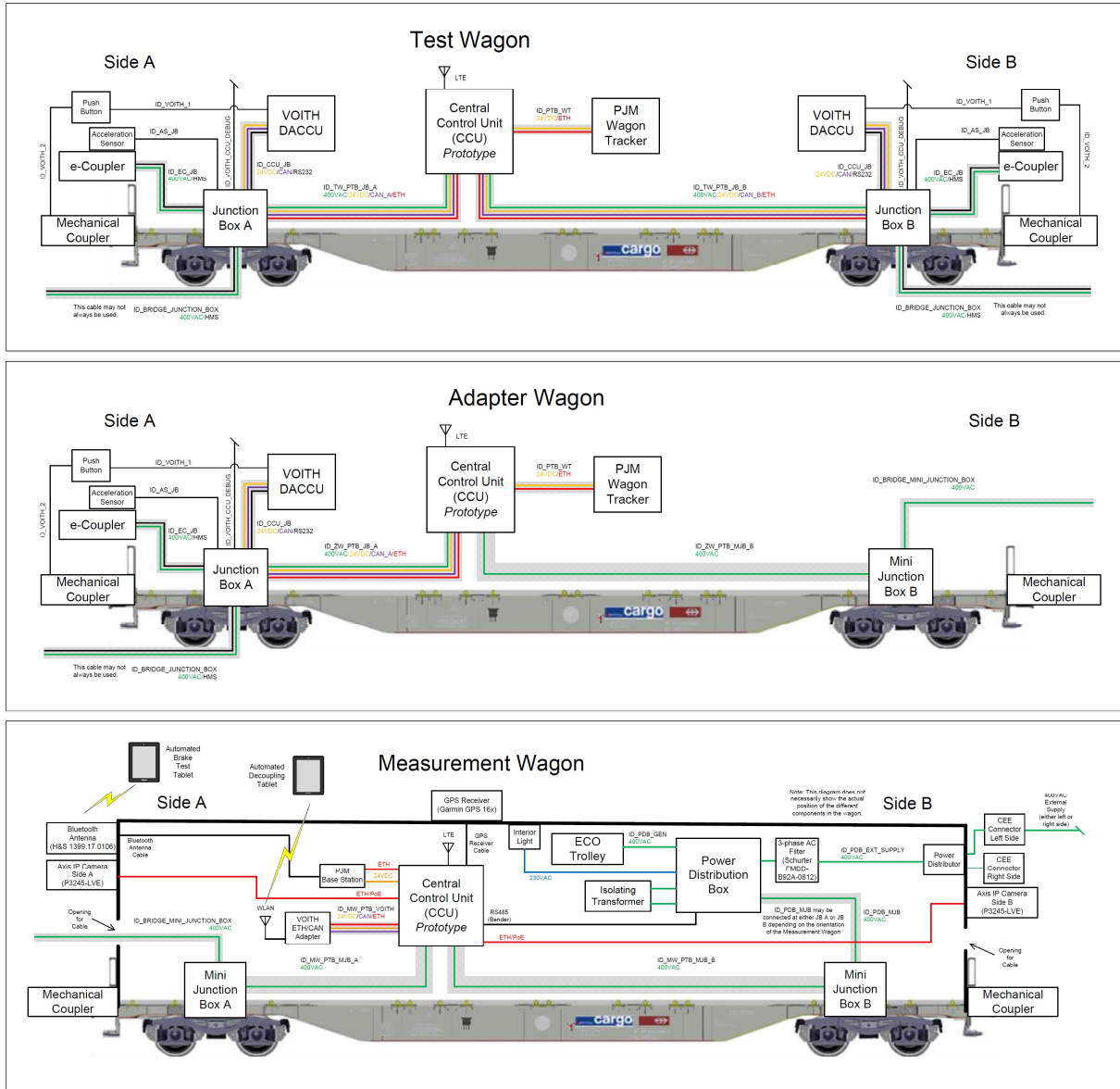


Abb. 11.8 Detaillierte Darstellung der auf den Wagen installierten System und Komponenten

11.2. Example of Test Report of a Test Drive

11.2.1. Test Drive Info

All times referred in this document are in “Europe/Zurich” time zone otherwise specified.

Basic Info

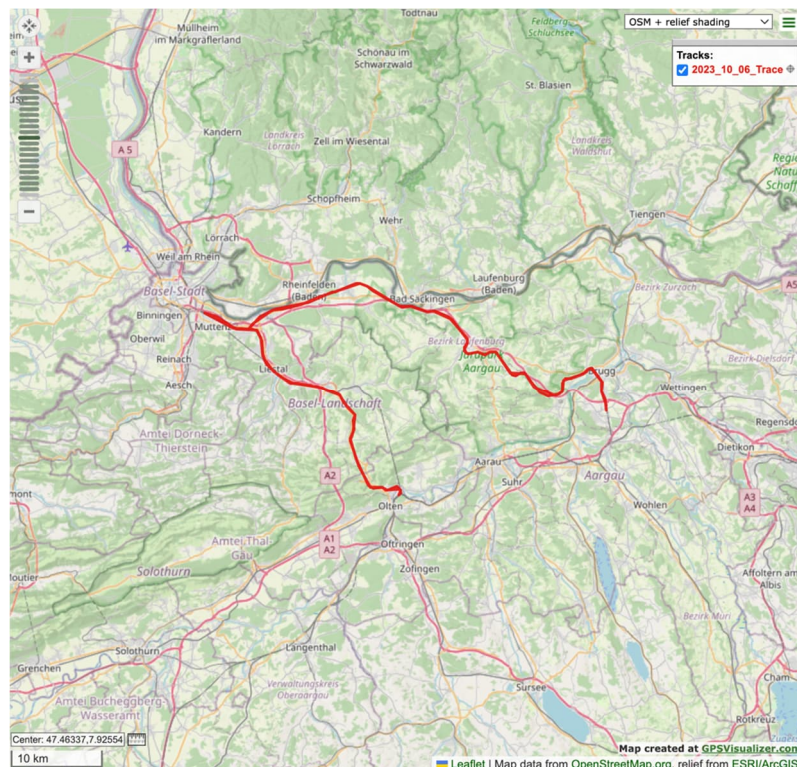
Date: 06.10.2023
 Route: Lupfig – Basel RB – Olten RB – Basel RB – Lupfig
 Duration: 06h 14m
 Total Distance: 181.09 km

AM Session

Start Time, Place: 06:36:28, Lupfig
 End Time, Place: 09:14:59, Olten RB

PM Session

Start Time, Place: 10:48:15, Olten RB
 End Time, Place: 14:23:20, Lupfig



Testdrehbuch

231002_Messfahrten LUPF - BSRB - OLRB - BSRB - LUPF_06.10.2023_V1.0.pdf

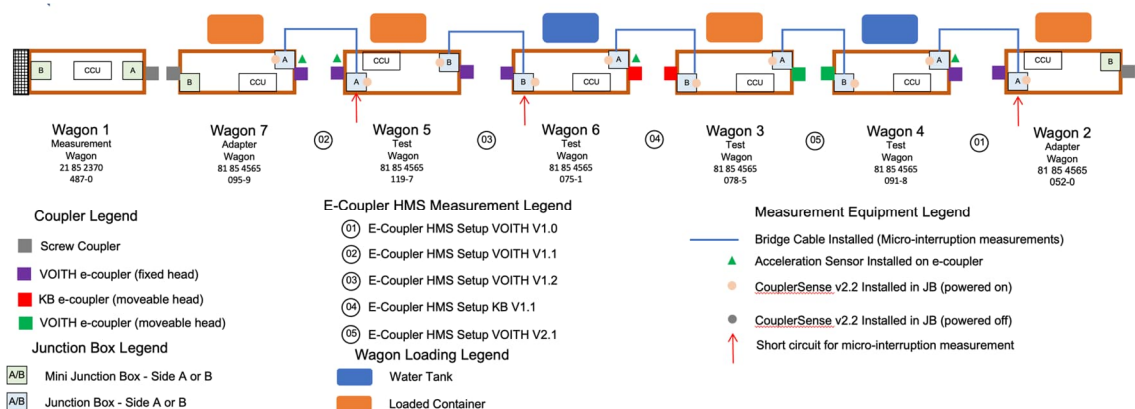
Participants

Rolle	Name
Operational test manager SBB Cargo	Aldo Smania
Train Driver	Pirmin Schafer
Technical experiment manager HSLU	Leyna Sadamori
TKC Lupfig	Gem. Travor
RCP Lupfig	Gem. Travor

Special Notes

- 400VAC power (and PTB) was routed over the bridge cable for both the KB and VOITH moveable head couplers so that CouplerSense measurements could be performed over all contacts of those couplers.
- For the KB moveable head e-coupler, the screw heads of the contact carrier were broken – according to KB we should not decouple/couple these DAC.

11.2.2. Test Drive Train Topology



11.2.3. Test Drive Features

Train Functions

- Train Composition Detection using PTB (wagon order/orientation)
- OTI monitoring with PTB
- Reliable train backbone communication with PTB
- Automated Brake Testing
- 2-phase 400VAC power system
- Ground fault detection / insulation monitoring – locomotive

Additional Monitoring Functions

- GPS (position/speed)
- Video camera (track)
- Video camera (DAC monitoring)
- E-coupler measurements (micro-interruptions/DC resistance/acceleration)
- Acceleration sensor (acceleration)
- PTB Gateway temperature

e-Couplers

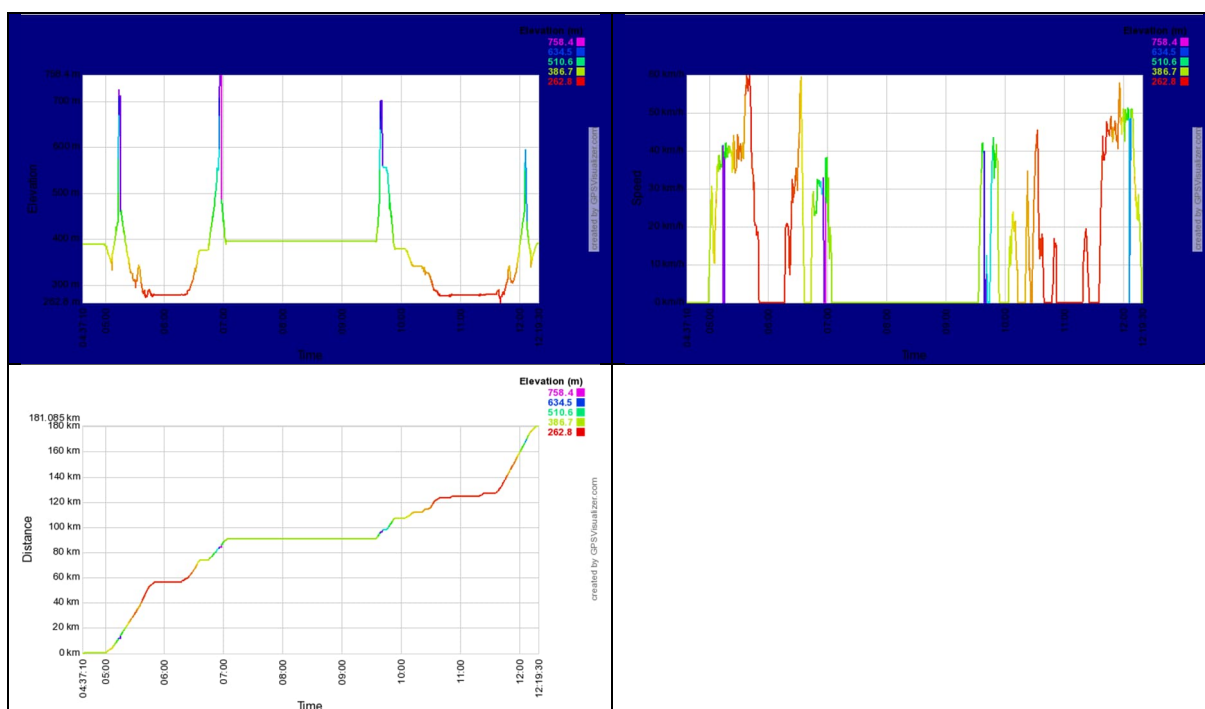
- VOITH Fixed Head 6-power contact e-coupler
- VOITH Moveable Head 4-power contact / 4-data contact e-coupler
- KB Moveable Head 4-power contact / 8-data contact e-coupler

Train Composition

- Wagons 4 and 6 loaded with water tanks (77 tonnes per wagon)
- Wagons 2, 3, 5 and 7 loaded with weighted containers (80 tonnes per wagon)

11.2.4. GPS Data Profiles

Note that the times shown on the x-axis of the figures below are in UTC-time.



11.2.5. PTB Train Composition Detection

The train composition was successfully detected.

```
##### PTB Status #####
TTD status           : COMPLETE
Topology size        : 7
Displayed entries     : 7
Train Integrity Check Status : 1
Train Integrity Compromised : 0
Train Integrity Counter : 0
Transmitted Allocation : 626

-----
Entry  Addr   Wagon ID   Ori Master  MPD [ns]  Rcvd Alloc
-----
0  0x001  0x051680b637  B  1  0      0
2  0x002  0x130ee98ae7  B  0  185    626
5  0x003  0x130ee98aff  A  0  320    626
1  0x004  0x130ee98ad3  B  0  503    626
4  0x005  0x130ee98ad6  B  0  638    626
3  0x006  0x130ee98ae3  B  0  785    626
6  0x007  0x130ee98abc  A  1  935    626
-----
```

11.2.6. PTB Transmission Analysis

Relevant PTB Configuration Parameters

TX_POW_SCL 38, FWD_DIST 3

PTB Statistics

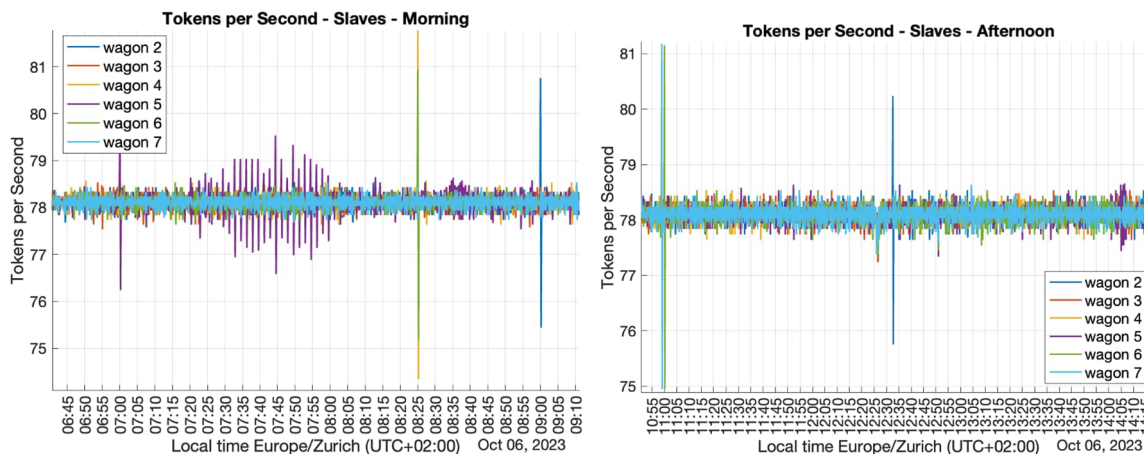
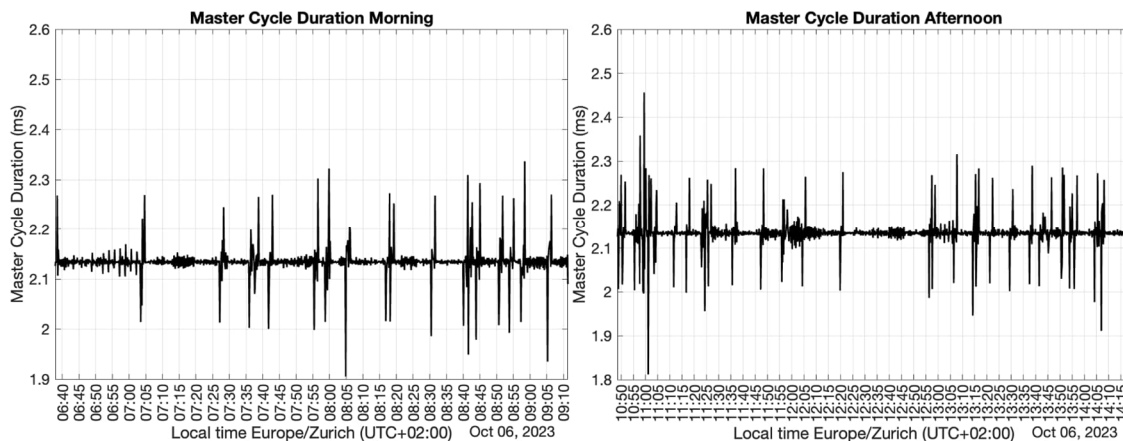
	Test Route	PTB To- kens Sent	PTB TOKENs Lost	PTB TOKEN Loss Rate	Train Inte- grity Events	Train Inte- grity Threshold [sec]
AM Drive	Lupfig – Basel RB – Olten RB	4362890	19	4.355e-6	0	250e-3
PM Drive	Olten RB – Basel RB – Lupfig	5978184	120	20.073e-6	0	250e-3
Total		10341074	139	1.344e-5	0	250e-3

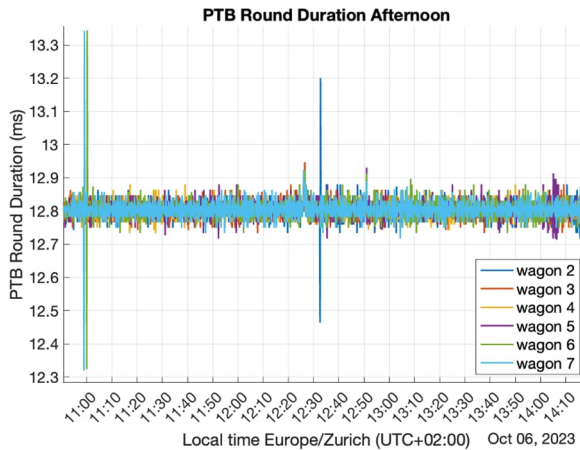
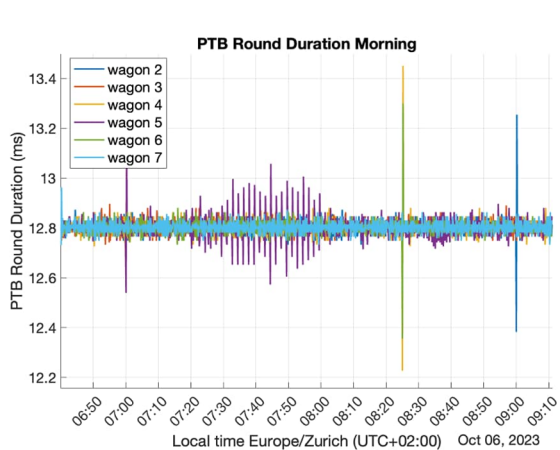
TOKEN Loss vs. Network Hop

Most of the Token losses occurred between wagon 6 and 2, which was in the second hop for ping messages (transmissions from wagon 6 to wagon 2), and in the first hop for pong messages (transmissions from wagon 2 to wagon 6).

Analysis	Total	% Total	Analysis	Total	% Total
Lost TOKEN Ping Total	14	73.68%	Lost TOKEN Ping Total	108	90.00%
Lost TOKEN Ping - 1st hop	4	28.57%	Lost TOKEN Ping - 1st hop	11	10.19%
Lost TOKEN Ping - 2nd hop	10	71.43%	Lost TOKEN Ping - 2nd hop	97	89.81%
Lost TOKEN Ping - 3rd hop	N/A	N/A	Lost TOKEN Ping - 3rd hop	N/A	N/A
Lost TOKEN Pong - Total	5	26.32%	Lost TOKEN Pong - Total	12	10.00%
Lost TOKEN Pong - 1st hop	5	100.00%	Lost TOKEN Pong - 1st hop	11	91.67%
Lost TOKEN Pong - 2nd hop	0	0.00%	Lost TOKEN Pong - 2nd hop	1	8.33%
Lost TOKEN Pong - 3rd hop	N/A	N/A	Lost TOKEN Pong - 3rd hop	N/A	N/A

TOKEN Cycle Duration





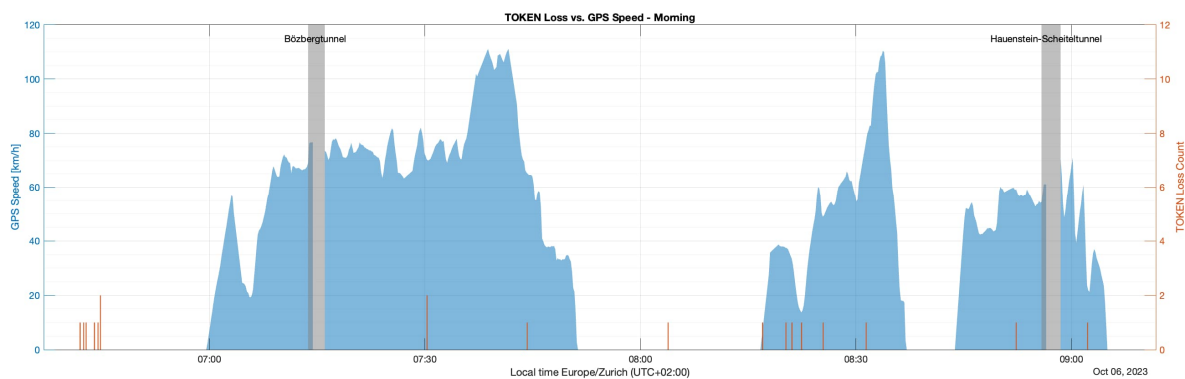
TOKEN Loss Standing vs. Moving

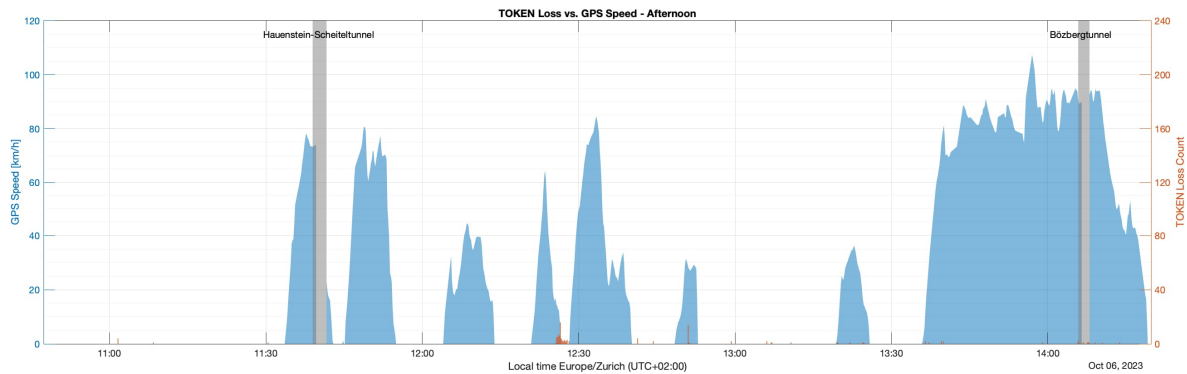
Higher Token losses when the train is moving.

# Statistics			# Statistics		
variable	Standing	Moving	variable	Standing	Moving
time duration	01:00:18	01:32:43	time duration	01:48:50	01:39:51
TOKEN timeout	8	11	TOKEN timeout	35	82
TOKEN LOSS HIST. 0	6	11	TOKEN LOSS HIST. 0	31	75
TOKEN LOSS HIST. 1	1	0	TOKEN LOSS HIST. 1	2	0
TOKEN LOSS HIST. 2	0	0	TOKEN LOSS HIST. 2	0	0
TOKEN LOSS HIST. 3	0	0	TOKEN LOSS HIST. 3	0	1
TOKEN LOSS HIST. 4	0	0	TOKEN LOSS HIST. 4	0	0

TOKEN Loss vs GPS Speed

No appreciable correlation between token losses and train speed (measured via GPS).





TOKEN Loss Event Analysis

Event: 7 TOKENs lost in a row at 10:26:28

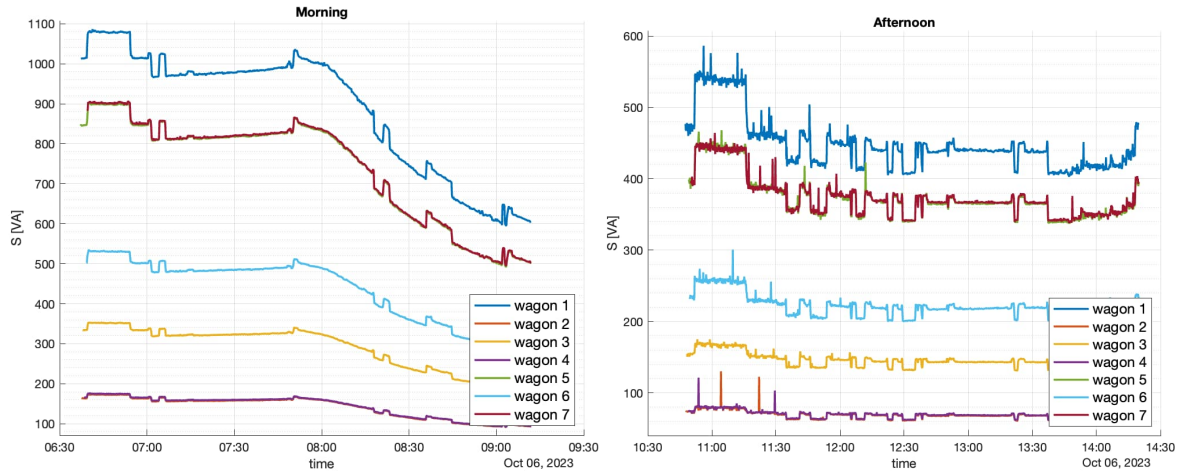
Analysis: High token losses event starting at (10:25:28) and lasting until (10:28:08). Axis camera observation shows the train braking at Liestal BHF. Then the train was standing still for about a minute while a passenger train passed next to. When the event ended the train was still accelerating to leave Liestal BHF. Euroloop at Liestal Nord (aprox. at 950m of the train standing position on a different track). (No GoPro video is available for this event)

11.2.7. Power System Analysis

The power monitoring unit is on side A in each wagon.

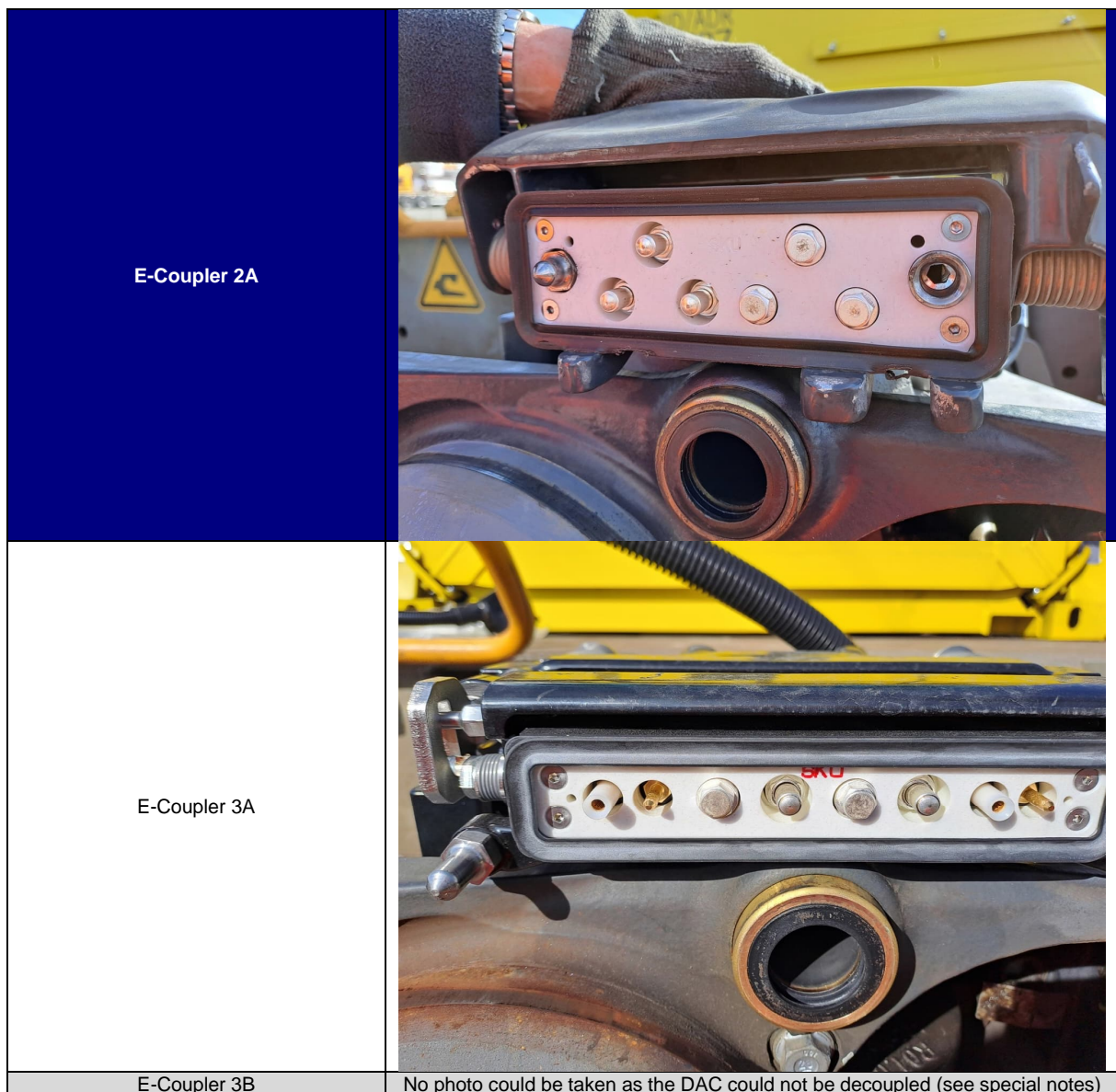
Day	AM/PM	Stat.	Apparent power (S) measured at each wagon						
			1	2	3	4	5	6	7
06.10.23	AM	mean	889,00	141,17	289,20	142,44	740,39	435,21	740,95
		var.	23969,72	714,06	2796,82	738,49	17041,55	6208,67	17234,68
		max.	1086,11	173,52	353,31	176,00	903,88	535,73	906,70
		min.	595,28	91,26	191,64	92,64	492,03	290,31	495,88
06.10.23	PM	mean	448,80	68,63	145,34	69,53	373,48	221,16	374,50
		var.	1393,79	29,69	102,96	28,22	855,83	252,12	807,40
		max.	586,41	130,29	196,10	121,51	468,00	300,82	464,17
		min.	403,10	60,24	130,51	61,64	337,69	199,44	338,50



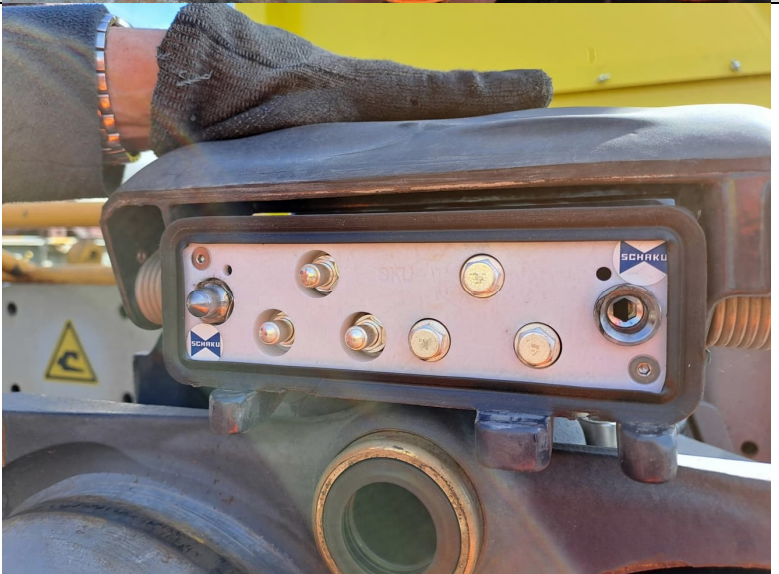
Day	AM/PM	Apparent power (S) drawn per wagon							
		1	2	3	4	5&6	5	6	7
06.10.23	AM		142,44	146,01	146,76	305,73	152,87	152,87	148,05
06.10.23	PM		69,53	75,82	75,81	153,34	76,67	76,67	74,29


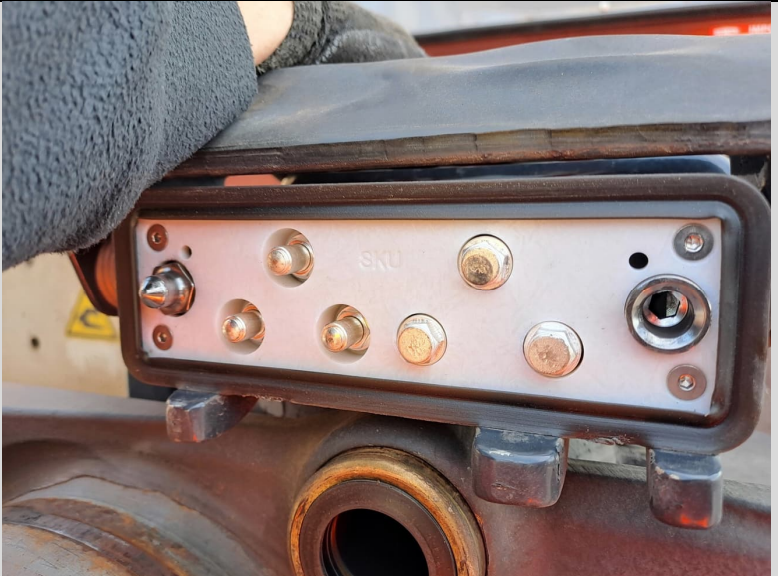



11.2.8. e-Coupler Photos

All photos have been made at the conclusion of the test drive.



<p>E-Coupler 4A</p>	 A close-up photograph of an E-Coupler 4A. The device is a rectangular metal plate with a grey plastic housing. It features several electrical connectors: two circular Schuko-style outlets on the left, a central multi-pin connector, and a circular Schuko-style outlet on the right. The brand name 'SCHAKU' is visible on the right side. The coupler is mounted on a metal structure, and a person's gloved hand is visible at the top.
<p>E-Coupler 4B</p>	 A close-up photograph of an E-Coupler 4B. The device is a rectangular metal plate with a grey plastic housing. It features several electrical connectors: two circular Schuko-style outlets on the left, a central multi-pin connector, and a circular Schuko-style outlet on the right. The brand name 'SCHAKU' is visible in red on the right side. The coupler is mounted on a metal structure, and a yellow hose is visible in the background.
<p>E-Coupler 5A</p>	 A close-up photograph of an E-Coupler 5A. The device is a rectangular metal plate with a grey plastic housing. It features several electrical connectors: two circular Schuko-style outlets on the left, a central multi-pin connector, and a circular Schuko-style outlet on the right. The brand name 'SCHAKU' is visible on the right side. The coupler is mounted on a metal structure, and a person's gloved hand is visible at the top.

<p>E-Coupler 5B</p>	
<p>E-Coupler 6A</p>	<p>No photo could be taken as the DAC could not be decoupled (see special notes)</p>
<p>E-Coupler 6B</p>	
<p>E-Coupler 7A</p>	

11.2.9. CouplerSense Measurements

Impedance Measurements

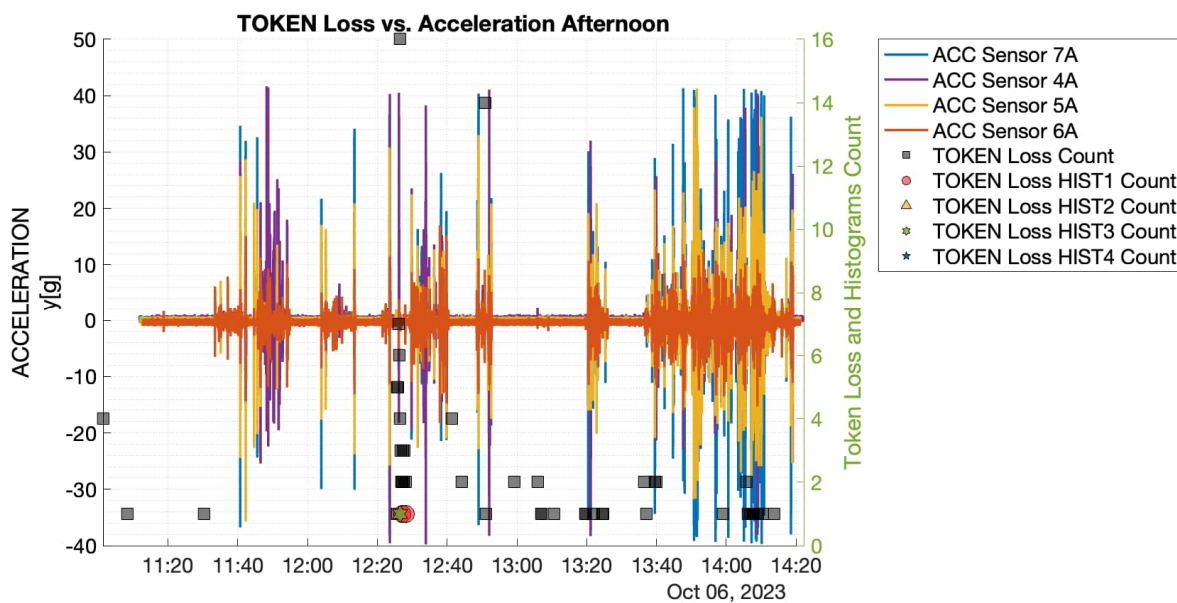
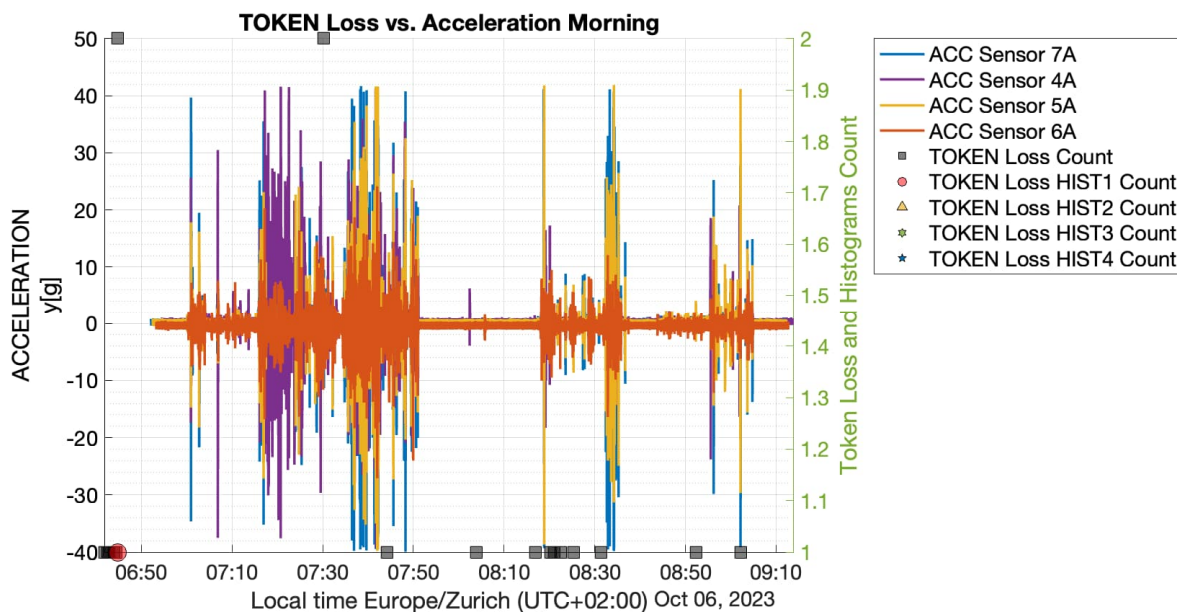
IMPEDANCE [Ohm]		10/6/23			10/6/23		
		AM			PM		
Measurement point	Type of contact	mean	var	max.	mean	var	max.
'imp_wag3_sideA'	data contact VOITH V2.0'	1.63	1.86E-05	1.67	1.66	5.25E-05	1.70
'imp_wag3_sideB'	power contact (10/11) KB V1.1'	1.43	8.55E-02	2.09	1.55	1.49E-01	8.35
'imp_wag4_sideA'	power contact (002/102) VOITH V1.0'	1.13	1.39E-05	1.17	1.13	1.86E-05	1.16
'imp_wag4_sideB'	power contact (003/103) VOITH V2.0'	1.12	3.11E-05	1.16	1.12	1.33E-05	1.16
'imp_wag5_sideB'	power contact (001/101) VOITH V1.2'	1.12	1.69E-05	1.16	1.13	1.58E-05	1.16
'imp_wag6_sideA'	data contact KB V1.1'	1.91	2.06E-05	1.95	1.96	1.03E-04	2.00
'imp_wag7_sideA'	power contact (003/103) VOITH V1.1'	1.12	3.17E-05	1.16	1.13	1.28E-05	1.16

Micro-Interruption Measurements

Micro-interruptions have only been detected on the e-couplers 3B/6A (KB e-couplers) on power pins 10&11. A total of 99 separate micro-interruptions have been measured.

Coupler KB V1.1, Power Contacts 10/11			
No. of interruptions with duration (in ms) between t0 and t1			
	t0 (ms)	t1 (ms)	Count
	0,00	0,10	27
	0,30	0,60	5
	0,70	1,00	3
	1,00	2,29	10
	2,29	3,57	10
	3,57	4,86	5
	4,86	6,14	9
	6,14	7,43	4
	7,43	8,71	2
	8,71	10,00	2
	10,00	85,52	20
	85,52	161,05	2
total	0,00	161,05	99

Acceleration Sensors

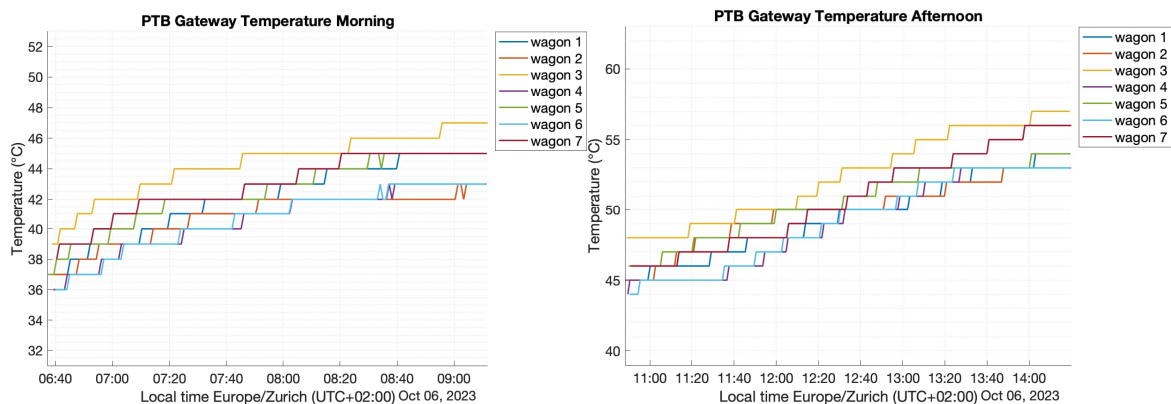


11.2.10. Insulation Resistance Measurements

Insulation Resistance Measurement

IMPEDANCE [MOhm]		
Day	6.10.2023	
Session	AM	PM
avg. insulation [MOhm]	6,31	6,30
std. insulation [MOhm]	0,02	0,02
avg. quality	100,00	100,00
insulation error	none	none
coupling system	ok	ok
coupling earth	ok	ok

PTB Gateway Temperature



11.2.11. Technical Log Book

Uhrzeit	Ereignis	Kommentar
0615-0630	Vorbereitungen: 400VAC ein, Ping	
0631	TTD	http://192.168.60.10:8080/view/Comm-Tech/view/01_DAC_PLUS/job/DAC_PLUS_Test-29-TTD_Orientation/153/
0636	Measurement start	http://192.168.60.10:8080/view/Comm-Tech/view/01_DAC_PLUS/job/DAC_PLUS_Test-25-Measurement_Selected_Start/182/
0641	GoPro start	
0644	Lok start	
0650	AXIS Kamera start	
0652-0654	Teensy start	manually
0650-0655	ABP	Nicht alle Wagon Tracker verbunden
0659	Abfahrt Lupfig	
0748	Einfahrt Basel	
0752	AXIS Kamera stop	
0752-0804	Zug umfahren	
0813	AXIS Kamera start	
0816	Abfahrt Gleis A9	
0904	Einfahrt Olten	
0907	Zug umfahren	
0910	AXIS Kamera stop	
0911	Measurement stop	http://192.168.60.10:8080/view/Comm-Tech/view/01_DAC_PLUS/job/DAC_PLUS_Test-26-Measurement_Selected_Stop/189/
0912	Teensy stop	
0916	Pause	
1045	Ende Pause	EcoTrolley auf 54%
1046	Measurement start	http://192.168.60.10:8080/view/Comm-Tech/view/01_DAC_PLUS/job/DAC_PLUS_Test-25-Measurement_Selected_Start/183/
1047	ABP	Nicht alle Wagon Tracker verbunden
1111	Teensy start	manually
1120	GoPro start	
1123	AXIS Kamera start	
1133	Abfahrt Olten	
1235	Einfahrt Basel	
1253	AXIS Kamera stop	
1254	Zug umfahren	

1312	GoPro start	
1313	AXIS Kamera start	
1320	Abfahrt Basel	
1417	Einfahrt Lupfig	
1419	Measurement stop	http://192.168.60.10:8080/view/Comm-Tech/view/01_DAC_PLUS/job/DAC_PLUS_Test-26-Measurement_Selected_Stop/190/
1419	AXIS Kamera stop	
1420-1426	Teensy stop	

11.2.12. Summary

- Micro-Interruptions:
 - There were no micro-interruptions in any of the couplers.
- PTB Train Topology Detection
 - The wagon order and direction were successfully detected for all wagons using PTB-TTD.
- PTB Message Loss Rate:
 - Very high TOKEN loss rate ($3.07e-4$) with all tokens lost between wagon 6 and 2. The sudden increase in token losses may be attributed to a malfunctioning of the KB coupler after the screw heads broke at some point during the test drive. Photos of the e-coupler 3B depict this issue.
 - No correlation is found between token losses and the train speed. However, all the losses except 1 token, occurred while the train was in motion.
- PTB TOKEN Cycle Durations
 - The TOKEN cycle duration for the master node is approximately 2.1ms, whereas for the slave nodes, it is about 12.8ms. An average of 78 tokens per second is allocated at slave nodes. The consistent timing indicates a high level of determinism in the PTB TOKEN protocol.
- PTB Onboard Train Integrity (OTI):
 - No train integrity events were detected by PTB.
- Other Measurements:
 - The apparent power shows a large variance, making it difficult to draw conclusions about the average power consumed.
 - The measured impedance from Junction Box to Junction Box over the VOITH power contacts is 1.13 Ohm.
 - Average isolation resistance of 6.20 MOhm with a std. of 0.02 MOhm.
 - PTB Gateway temperatures range from 59°C to 70°C.