



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Verkehr BAV**

Förderprogramm für Innovationen im regionalen Personenverkehr (RPV)

# Argus

Digital-Twin Test- und Diagnoseplattform für ein Train Control and Monitoring System (TCMS)

## Schlussbericht

**Silvia Mastellone, FHNW-HT**

Klosterzelgstrasse 2 CH - 5210 Windisch, CH  
silvia.mastellone@fhnw.ch, [FHNW-IEE](#)

**Pascal Gysin, SBB Personenverkehr / SBB**

Vulkanplatz 11, 8048 Zürich  
pascal.gysin@sbb.ch, [SBB](#)

**Christian Weiss / SBB Personenverkehr / SBB**

Vulkanplatz 11, 8048 Zürich  
christian.weiss2@sbb.ch, [SBB](#)

## **Impressum**

Herausgeberin:  
Bundesamt für Verkehr BAV  
Förderprogramm für Innovationen im regionalen Personenverkehr (RPV)  
CH-3003 Bern

Programmleiter  
Christophe Le Borgne, BAV

Projektnummer: 3001  
Bezugsquelle  
Kostenlos zu beziehen über das Internet  
[www.bav.admin.ch/innovation-rpv](http://www.bav.admin.ch/innovation-rpv)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –  
innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den [12.08.2024]

## Inhaltverzeichnis

Digital-Twin Test- und Diagnoseplattform für ein Train Control and Monitoring System (TCMS) ...	1
Executive Summary in Deutsch.....	2
Executive Summary in einer zweiten Landessprache.....	2
Executive Summary in Englisch.....	2
Zusammenfassung in Deutsch.....	3
Zusammenfassung in einer zweiten Landessprache.....	4
1.    Ausgangslage.....	5
2.    Ziel der Arbeit.....	5
3.    Forschungsansatz und aktueller Wissensstand.....	6
4.    Ergebnisse.....	8
5.    Diskussion.....	9
Literaturverzeichnis.....	9
Anhang.....	9

## **Executive Summary in Deutsch**

Das Fahrzeugleitsystem (TCMS) ist ein Funktionsnetz, das die Teilsysteme des Zuges steuert, regelt und überwacht. Die wichtigsten Funktionen sind: Fahren, Bremsen, Beleuchtung, Türsteuerung, Stromversorgung und Klimatisierung. Außerdem überwacht und diagnostiziert es alle diese Teilsysteme. Als Teil der Projektergebnisse soll die Effizienz der TCMS-Wartungsprozesse erheblich verbessert werden. Zu diesem Zweck wurden eine Hardware-Tester-Plattform und ein Simulator entwickelt, um Hardware- und Software-Funktionstests von Selectron TCMS-Komponenten durchzuführen. Die Lösung ist hochgradig modular und rekonfigurierbar, um sie an verschiedene Selectron-Leittechnik-Familien anzupassen. Der Simulator wurde der SBB zur Nutzung und Weiterentwicklung übergeben. Der Tester wurde bei mehreren regionalen Bahnbetreibern vorgeführt. Derzeit wird eine zweite Generation für die Produktivsetzung entwickelt. Sie wird ein Jahr lang bei der SBB eingesetzt, Daten werden gesammelt und auf Wunsch der Betreiber werden neue Geräte gebaut. Die finanziellen Auswirkungen dieser Innovationen sind sowohl für die SBB als auch für die Schweizer Regionalbahnen erheblich.

## **Executive Summary in einer zweiten Landessprache**

Il sistema di controllo del veicolo (TCMS) è una rete funzionale che controlla, regola e monitora i sottosistemi del treno. Le funzioni principali sono: guida, frenatura, illuminazione, controllo delle porte, alimentazione e climatizzazione. Inoltre, monitora e diagnostica tutti questi sottosistemi. Nell'ambito dei risultati di questo progetto, l'efficienza dei processi di manutenzione del TCMS sarà notevolmente migliorata. A tal fine, sono stati sviluppati una piattaforma hardware tester e un simulatore per eseguire test funzionali hardware e software dei componenti del TCMS Selectron. La soluzione è altamente modulare e riconfigurabile per adattarsi alle diverse famiglie TCMS Selectron. Il simulatore è stato trasferito a SBB per essere utilizzato e sviluppato ulteriormente. Il tester è stato dimostrato a diversi operatori ferroviari regionali. Attualmente è in fase di sviluppo una seconda generazione per la produzione. Verrà utilizzato presso le FFS per un anno, verranno raccolti dati e, su richiesta degli operatori, verranno costruiti nuovi dispositivi. L'impatto finanziario di queste innovazioni è significativo sia per le FFS che per le ferrovie regionali svizzere.

## **Executive Summary in Englisch**

The vehicle control system (TCMS) is a functional network that controls, regulates and monitors the train's subsystems. The main functions are: driving, braking, lighting, door control, power supply and air conditioning. It also monitors and diagnoses all of these subsystems. As part of this project results, the efficiency of the TCMS maintenance processes will be greatly improved. To this end, an hardware tester platform and a simulator have been developed to perform Hardware and Software functional testing of Selectron TCMS components. The solution is highly modular and reconfigurable to adapt to different Selectron TCMS families. The Simulator has been transferred to SBB for use and further development. The tester has been demonstrated to several regional railways operator. Currently a second generation is being developed for productization. It will be used at SBB for one year, data will be gathered and by request of the operators new devices will be built. The financial impact of these innovations is significant for both SBB and the Swiss regional railways.

## Zusammenfassung in Deutsch

### Argus Simulator

Der Hauptteil der Aktivitäten war dem Ziel gewidmet, eine zuverlässige und stabile CAN-Kommunikation zwischen dem als Hardware verfügbaren Fahrzeugsteuergerät (VCU) und der auf einem Computer laufenden LabView-SW herzustellen, um das Verhalten verschiedener CAN-Teilnehmer zu simulieren. Eine CAN-Karte für den Computer dient als Bindeglied zwischen VCU und LabView-SW.

Die folgenden Teilziele wurden bearbeitet:

- Definition der für diese Anwendung erforderlichen LabView-Software-Struktur und der Parametrierungsanforderungen für verschiedene Fahrzeugtypen und Umsetzung als Softwareprojekt im sogenannten Actor-Framework
- Implementierung einer Testumgebung, um die CAN-Funktionalität des Simulators unabhängig von der Hardware verifizieren zu können.
- Konkrete Parametrierung der LabView SW für dieses Projekt mit dem SBB-Fahrzeugtyp Flirt mit einer VCU von Selectron, Typ 831-TG
- Einrichten eines Backups und Rückverfolgbarkeit im Softwareentwicklungsprozess durch Aktualisierung der Software in Git.

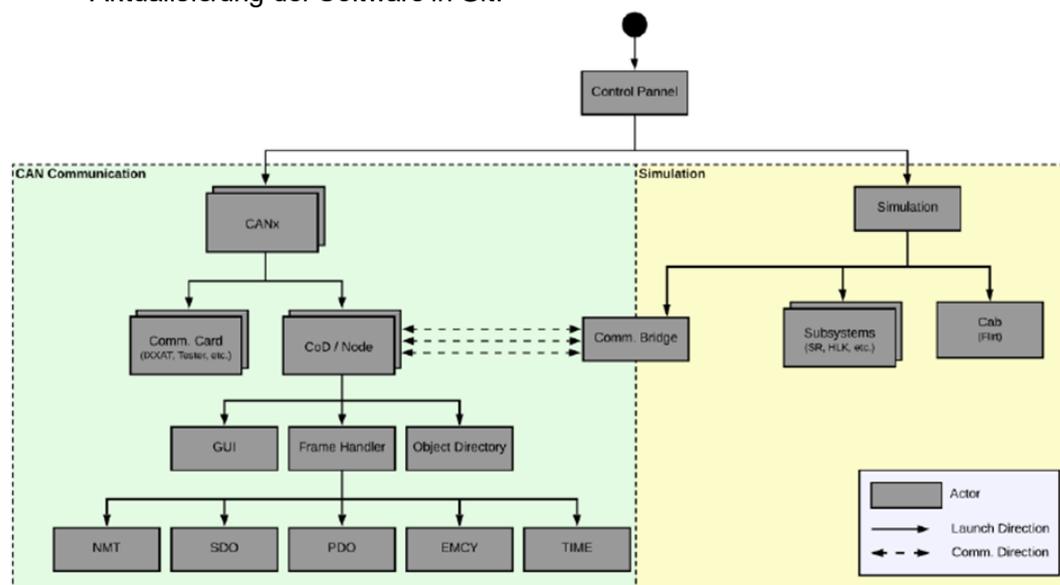


Abbildung 1: Übersicht über die Struktur des LabView SW-Projekts «Argus Simulator»

### Argus Hardware Tester

Das Hauptaugenmerk lag auf der Konstruktion, dem Zusammenbau, der Programmierung und dem Testen des Prüfgeräts. Um die E/A-Module des Fahrzeugsteuerungssystems von Selectron zu testen, war es notwendig, einen "Prüfling" (DUT) zu erwerben. Darüber hinaus mussten verschiedene elektrische und mechanische Komponenten ausgewählt und gekauft werden, um die Verbindungsfunktion zwischen dem Prüfling und dem DUT zu erfüllen.

Folgende Unterziele wurden dabei angegangen:

- Spezifische Auswahl der zu prüfenden I/O-Module, welche von dem Testgerät überprüft werden sollen
- Auswahl und Beschaffung des Controllers für das Testgerät, inkl. der darin verbauten Karten, welche für die Testfunktionen benötigt werden
- Erstellung des Schaltplans für das gesamte Testrack
- Beschaffung der restlichen elektrischen und mechanischen Komponenten, die für den Aufbau des Testracks notwendig sind
- Entwicklung und Prüfung eines Testablaufs in Labview, welches die In- und Outputs der Steuerungsmodule automatisch und sicher testet, sowie ein Testprotokoll erstellt

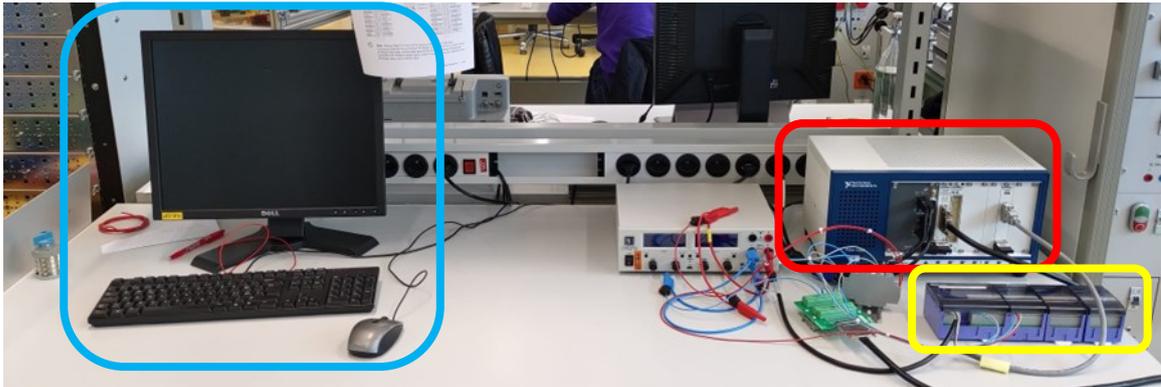


Abbildung 2: Erstes Setup der Verbindung DUT (gelb), PXI (rot) und HMI (blau)

## Zusammenfassung in einer zweiten Landessprache

### Argus Simulator

La parte principale delle attività è stata dedicata all'obiettivo di stabilire una comunicazione CAN affidabile e stabile tra l'unità di controllo del veicolo (VCU) disponibile come hardware e LabView-SW in esecuzione su un computer per simulare il comportamento di vari partecipanti CAN (i cosiddetti "nodi", ad esempio i convertitori di frequenza). Una scheda CAN per il computer funge da collegamento tra la VCU e LabView-SW.

Sono stati affrontati i seguenti sotto-obiettivi:

- Definizione della struttura software LabView necessaria per questa applicazione e dei requisiti di parametrizzabilità per diversi tipi di veicoli e implementazione come progetto software nel cosiddetto framework actor
- Implementazione di un ambiente di test per poter verificare la funzionalità CAN del simulatore indipendentemente dall'hardware.
- Parametrizzazione concreta del SW LabView per questo progetto con il veicolo FBB tipo Flirt con una VCU di Selectron, tipo 831-TG
- Impostazione di un backup e di una tracciabilità nel processo di sviluppo del software aggiornando il software in Git.

### Argus Hardware tester

L'obiettivo principale è stato la progettazione, l'assemblamento, la programmazione nonché il collaudo del tester. Per poter testare i moduli I/O del sistema di controllo del veicolo del modello di treno FLIRT, è stato necessario acquistare un "dispositivo in prova" (DUT). Inoltre, è stato necessario selezionare e acquistare vari componenti elettrici e meccanici per svolgere la funzione di collegamento tra il DUT e il DUT.

Sono stati affrontati i seguenti sotto-obiettivi:

- Selezione specifica dei moduli di I/O da testare con il dispositivo di prova.
- Selezione e acquisto del controllore per il dispositivo di test, comprese le schede installate in esso, necessarie per le funzioni di test.
- Creazione dello schema elettrico per l'intero rack di test
- Acquisto dei restanti componenti elettrici e meccanici necessari per l'allestimento del rack di test
- Sviluppo e collaudo di una sequenza di test che testa in modo automatico e sicuro gli ingressi e le uscite dei moduli di controllo e che crea un protocollo di test.

## 1. Ausgangslage

Das Schweizer Bahnsystem mit seinem dichten und leistungsfähigen Netz, das das ganze Land miteinander verbindet, ist eines der modernsten weltweit. Die SBB als Hauptbetreiberin des Schweizer Schienennetzes sorgt für die zuverlässige Mobilität von 1,25 Mio. Fahrgästen pro Tag und für den Transport von Gütern.

Im Personenzug ist das Zugsteuerungs- und -überwachungssystem das Herzstück jedes Fahrzeugs. Es steuert die Beleuchtung, die Türen, die Stromversorgung und die Klimatisierung und gewährleistet so den Komfort der Fahrgäste. Außerdem übernimmt es die Diagnose der Teilsysteme. In den letzten Jahrzehnten haben die Intensivierung des Verkehrs und die zunehmende Komplexität der Eisenbahnen die Wartung, Aufrüstung und Diagnose der TCMS-Geräte zu einer Herausforderung gemacht. Im Falle von Störungen ist die Identifizierung der Grundursache eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe, die schnell und zuverlässig durchgeführt werden muss, damit der Zug wieder in Betrieb genommen werden kann. Derzeit kann kein verfügbares System die spezifischen Funktionen mit der erforderlichen Leistung ausführen, und es sind innovative Lösungen erforderlich, um die wachsende Komplexität zu bewältigen.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts schlagen wir eine Lösung zur Revolutionierung der TCMS-Wartungs- und Aufrüstungsprozesse vor, einschließlich der Prüfung und Diagnose von Hardware- und Softwareversionen. Wir haben einen Hardwaretester und eine digitale Simulationsplattform mit den folgenden Funktionalitäten entwickelt:

- I. HW-Tests und -Diagnose: Identifizierung und Lokalisierung von HW-Fehlern mit minimalem Zeitaufwand und maximaler Genauigkeit.
- II. SW-Funktionstests: Ferntests neuer SW-Versionen durch Emulation des Systems im Betrieb unter verschiedenen Bedingungen

Diese Fernfunktionalitäten ermöglichen es, Software zu testen und Diagnosen aus der Ferne durchzuführen. Dadurch können mehr Fahrzeuge in Betrieb gehalten werden, was zu erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen führt und vor allem die mit Vor-Ort-Tests verbundenen Risiken verringert. Die Projektergebnisse werden auf Selectron TCMS Systeme angewendet, die von regionalen Flotten der SBB und von kleinen privaten Betreibern wie BLS, SOB oder Mitgliedern der RAILplus eingesetzt werden. Diese Kunden werden am meisten von den bereits gemachten Entwicklungen, Kenntnissen und Erfahrungen profitieren.

Die finanziellen Auswirkungen sind beträchtlich und können durch die Ausweitung der Lösung auf Regional- und Fernverkehrsflotten noch gesteigert werden. Langfristig ist geplant, ein Unternehmen zu gründen, das die Technologie weiterentwickelt und ausbaut sowie Wartungsdienstleistungen für Schweizer Bundes- und Privatbahnen anbietet.

## 2. Ziel der Arbeit

Ziel des Projekts ist es, ein Konzept für den Test und die Diagnose der Selectron TCMSs zu definieren, zu entwerfen und als Prototyp zu bauen. Dies umfasst eine getestete Hardware und einen fortschrittlichen Simulator. Die Plattformen müssen modular und skalierbar sein, um zukünftige Erweiterungen der Selectron-Leittechnik-Familie und den Einsatz in anderen Flotten zu ermöglichen.

Der Funktionstester-Prototyp wurde in einem Standard-Rack der Grösse 1m x 1m x 2m implementiert und umfasst die folgenden Hardware-Komponenten: E/A-Module, Datenerfassung und -übertragung, Schnittstelle zwischen SPS und Simulator, Echtzeit-Prozessor. Die Plattform wurde vollständig in den Laboreinrichtungen der FHNW aufgebaut und programmiert.

Die Funktionalität des ersten Prototyps wurde gemäss dem Pflichtenheft des Industriepartners SBB getestet.

Die Software wurde anhand eines V-Modells entwickelt und verifiziert, siehe Abbildung 3.

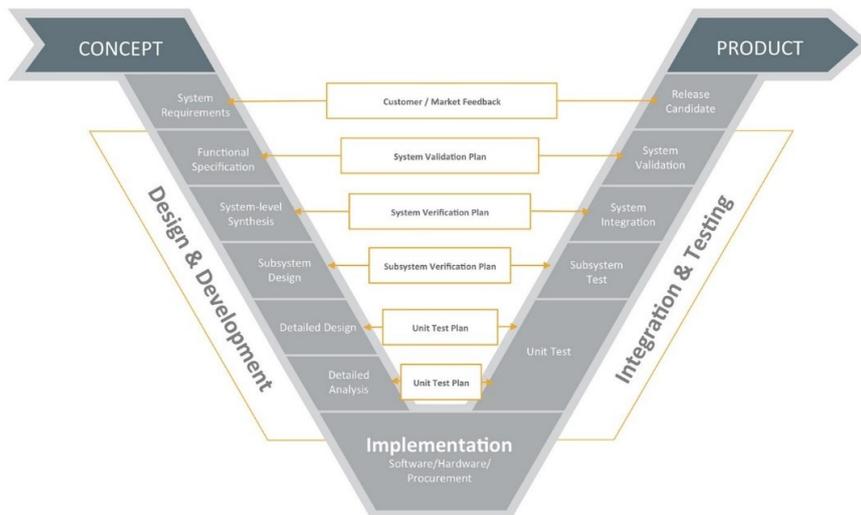


Abbildung 3: Systementwurfsprozess: V-Diagramm. Überprüfung des Entwurfs gegenüber den Anforderungen in jeder Phase.

### 3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Die Hauptaufgabe des TCMS (Train Control and Monitoring System) ist die Steuerung und Überwachung der Zugfunktionen für die folgenden Teilsysteme: Stromversorgung, Diagnose, Türen, Licht und Klima (Abb.4). Das TCMS ist dezentral über mehrere Rechner oder SPS-Module implementiert, die für die Fahrzeugsteuerung und den Komfort der Fahrgäste verantwortlich sind. Die miteinander verbundenen Module bilden ein Netzwerk, dessen Komplexität in den letzten Jahrzehnten exponentiell zugenommen hat, so dass die Wartung und Aufrüstung solcher Module derzeit zeit- und ressourcenintensive Prozesse sind. Darüber hinaus ist der Diagnoseprozess äußerst komplex und führt oft zu Unentschlossenheit. Derzeit weisen die meisten TCMS in Fahrzeugen die folgenden spezifischen technischen und kostenmäßigen Einschränkungen auf:

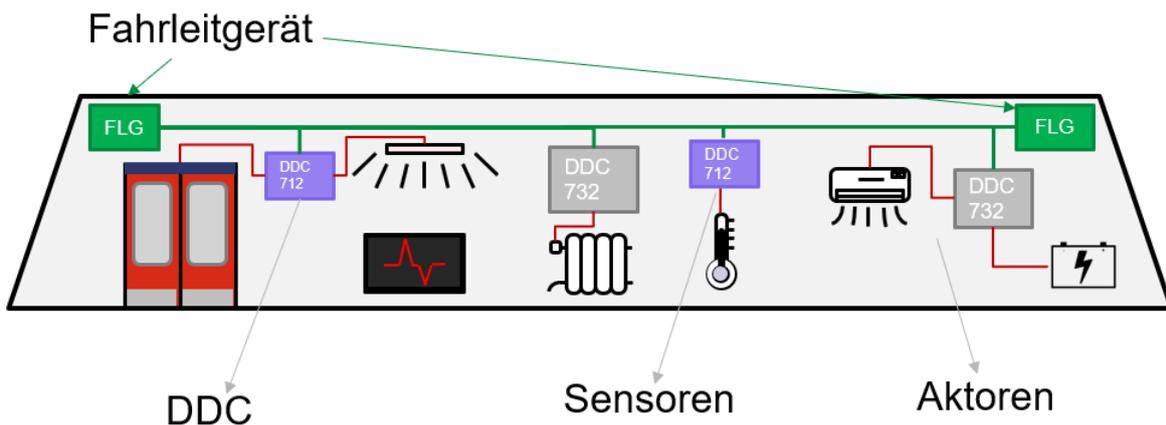


Abbildung 4: Train Control and Monitoring Systems Leittechnik, Komfort (Stromversorgung, Diagnose, Türen, Licht und Klima)

1. Überwachung und Diagnose: Das Diagnosesystem liefert einen Fehlerbericht (Diagnose-Datensatz DDS), der aufgrund der erhöhten Systemkomplexität nicht immer eindeutig die Art und Quelle des Fehlers identifiziert
2. Prüfung der Funktionsfähigkeit der TCMS-Hardwaremodule: Die Erkennung von beschädigten TCMS-E/A-Modulen erfordert eine langwierige und teure Untersuchung. TCMS-Hardwarekomponenten werden daher oft ohne eine tieferegehende Funktionsanalyse ausgetauscht, siehe typische Vorgehensweise in Abbildung 5. Bis zu 50 % der ausgetauschten Module waren voll funktionsfähig, was zu einem NFF-Bericht (no failure found) führte.

3. Testen der Softwarefreigabe: Änderungen an der Software erfordern eine mehrwöchige Prüfung vor Ort am Fahrzeug. Dies führt zu einer langwierigen und kostspieligen Inbetriebnahme und zu einem reduzierten Fahrzeugbetrieb.

4. Schulung des Wartungspersonals: Die Schulung des Wartungspersonals ist derzeit ein teurer und langwieriger Prozess, der eine mehrstündige Mobilisierung des Zuges für jede Schulung erfordert und Sicherheitsrisiken für die Servicemitarbeiter birgt.

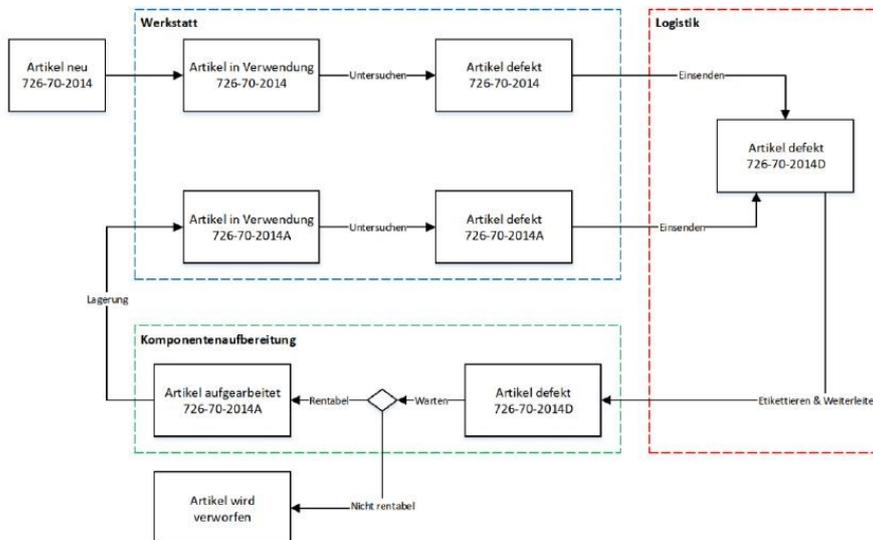


Abbildung 5: Typisches Prüfverfahren für das TCMS-Modul nach der Fehlererkennung. Führt oft zu einer NFF

Hardware-in-the-Loop-Simulatoren sind heutzutage ein äußerst wertvolles Werkzeug in verschiedenen technischen Bereichen, um die Komplexität der heutigen technischen Systeme zu bewältigen. Sie kompensieren die Unzulänglichkeiten von Offline-Simulationen und Vor-Ort-Tests durch das leistungsstarke Konzept der Online-Emulation. HiL-Simulatoren ermöglichen es, die Steuerungssoftware, die auf der tatsächlichen Steuerungshardwareplattform (z. B. DSPs, FPGAs) läuft, mit Softwaremodellen (Digital-Twin) zu verbinden, die die elektronischen und mechanischen Teile emulieren. HiL reproduziert die Komplexität des realen Systems innerhalb seiner Umgebung, wobei die Vorteile einer Simulation erhalten bleiben: Flexibilität, schnelle Implementierung und breite Testabdeckung. Der Emulator ist ein Digital-Twin, d.h. eine genaue und realistische Simulation des realen Systems, die zum Testen der Steuergeräte, der Software und zur Durchführung von Diagnosen verwendet werden kann.

Heutzutage werden HiLs in gewissem Umfang in der Verkehrsbranche eingesetzt [1-3], vor allem zum Testen von Steuerungssoftware für den Energieumwandlungsteil der Traktion. Im TCMS-Teil werden nur sehr wenige HiLs eingesetzt. Es werden nur grundlegende Modelle für das Klima im automatischen Türsystem und die Stromversorgung implementiert, und das auch nur für grundlegende Funktionen, die keine erweiterten Tests und Diagnosen beinhalten. Darüber hinaus bewegt sich der Eisenbahnsektor rasch auf die Einführung von Digital-Twin für die Wartung und Diagnose der Infrastruktur und der Fahrzeuge zu [4-6]. Es ist zu erwarten, dass in den kommenden zehn Jahren erhebliche Forschungsanstrengungen auf den Einsatz von HiLs und digitalen Zwillingen im Eisenbahnsektor gerichtet sein werden.

## 4. Ergebnisse

Um die Ziele zu erreichen, wurden die folgenden Aktivitäten durchgeführt:

### Simulator

- Es wurde ein LabView-SW-Projekt erstellt, in dem die Teile "Implementierung der CAN-Kommunikation" und "Simulation der physikalisch vorhandenen CAN-Knoten und deren entsprechendes Schnittstellenverhalten im Fahrzeugkontext" strukturell getrennt sind. Die Schnittstelle zwischen den beiden Teilen ist eine Mapping-Tabelle in Excel von der CAN-Adresse zum Fahrzeug-Subsystem. Abbildung 1 zeigt die Struktur des SW-Designs.
- Der Teil "CAN-Kommunikation" ist bereits vollständig programmiert. Die spezifische Struktur des CAN-Bus-Projekts (Anzahl der Knoten mit Typ und Message-Identifizier) ist nicht fest programmiert, sondern kann über eine Excel-Datei vorgegeben werden und wird erst beim Start des LabView-Programms gelesen und erzeugt.
- Während des CAN-Bus-Startvorgangs wird - ähnlich dem Verhalten auf einem physikalischen CAN-Bus - ein von der Software generierter Datensatz über sogenannte SDO-Datenframes an die CAN-Knoten gesendet, der die Betriebsart auf dem Bus bestimmt. Diese SDO (System Data Object) Telegramme werden in LabView auf Bitebene programmiert.
- Die anderen erforderlichen Telegrammtypen wurden ebenfalls auf Bitebene implementiert (PDO (Process Data Object): Prozessinformationen; NMT: Netzwerkmanagement; Heartbeat: Echtzeit-Zeichenüberwachung von Knoten; usw.).
- Die Startsequenz des LabView-Programms ist so gestaltet, dass der CAN-Bus und die VCU einen korrekten Startvorgang durchführen und einen stabilen Ausgangszustand erreichen ("Power on" im Fahrzeug).
- Als Hilfsmittel für die Entwicklung der CAN-Kommunikationsfunktionalität und die anschließende Code-Entwicklung wurde in LabView ein sogenannter "Sim-Tester" entwickelt, der die Verarbeitung und Visualisierung des Datenverkehrs ermöglicht, der von den simulierten CAN-Knoten anstelle der HW-basierten CAN-Karte erzeugt wird.

### Hardware Tester

- Als DUT wurden verschiedene Selectron Steuerungen der unterschiedlichen FLIRT Generationen aufgelistet und analysiert. In einer ersten Phase soll jedoch nur das Testen vom DOT 701-TH (Digitaler Output) und vom DIT 701-TH (Digitaler Input) fokussiert werden. Dennoch soll das Testrack hardwaretechnisch so ausgelegt werden, so dass es bereits für das Testen anderer Selectron Module ausgerüstet ist
- Als Steuerung des Argus Hardware-Testers wurde ein PXI System von National Instrument ausgewählt. Dies wegen der SBB internen LabView Kompatibilität, sowie wegen der Nutzung von Synergien aus gesammelten Erfahrungen von Vorprojekten der SBB und FHNW
- Für das PXI System wurde eine LabView und Windows Lizenz beschafft und umgesetzt. Somit wird kein zusätzlicher Computer für die Ausführung und Überwachung des Prüfprogramms benötigt.
- Erstellung der Skizze des Elektroschemas und der Liste der zusätzlichen Komponenten für das Testrack, so dass es simpel und modular aufgebaut werden kann
- Ein LabView Testprogramm aus einem Vorprojekt wurde auf Aspekte untersucht, welche für den Argus Tester übernommen werden könnten
- Aufbau, Programmierung und Testung der Ansteuerung der DUT I/O-Module über eine CAN-Schnittstelle von PXI, um erste Erfahrungen zu erhalten (Aufbau in der Abbildung)

## 5. Diskussion

Der Simulator wird nun für die Regionalzüge FLIRT bei SBB fertig entwickelt (Lead SBB). Zyklischer Austausch mit der RhB findet statt. Simulation des Führerstandes mit dem Pc (LabView und Python). DUT (Device under Test) ist das Selectron FLG und die HMIs, welche sich im 19"-Rack befinden. Entwicklung offen für andere Regionalbahnen. Interesse aufgrund von Engineering Kapazitäten (Teamstärke) bei Privatbahnen nur bei der RhB vorhanden (Simulation) und Klimaregelung Albula (Engadin).

Der Prototyp des Tester ist fertig und wird von der SBB in Olten 1 Jahr lang genutzt, um Daten zu sammeln, Funktionen zu testen und zu verbessern. Die Produktivitätsphase hat begonnen, wobei die SBB die Entwicklung einer Gen2 (Hardware-Plattform) unterstützt. (Weitere Familie, Tigra, Smart I/O, günstiger HW Lösung, zusätzliche Testabdeckung).

## Literaturverzeichnis

[1] *Need for speed: Real-time simulation for power electronics in railway applications and beyond*. ABB Review January 2014.

<https://pdfs.semanticscholar.org/2190/9c131aa36e1c7dbea956709a8781df396e98.pdf>

[2] *Hardware-in-the-loop simulations for railway research*

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2013.777495>

[3] *Real-Time Hardware-in-the-Loop in Railway*

<https://www.semanticscholar.org/paper/Real-Time-Hardware-in-the-Loop-in-Railway%3A-for-of-Baccari-Cammeo/1d9c7400c6d471b2d992a6418ec922f3de9650d9>

[4] *Digital twin take the train*. IEEE FUTURE DIRECTION. <https://cmte.ieee.org/futuredirections/2018/10/20/digital-twins-take-the-train/>

[5] *Digital-twin of rail network for train fleet maintenance decision support*. ALSTOM

<https://www.anylogic.com/digital-twin-of-rail-network-for-train-fleet-maintenance-decision-support/>

[6] *Realizing the potential of digital-twins in Rail*

<https://www.railwayage.com/analytics/realizing-the-potential-for-digital-twins-in-rail/>

## Anhang

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit des Berichts und zur leichteren Lesbarkeit sind Messprotokolle, längere mathematische Herleitungen usw. im Anhang aufzuführen.