Abschlussbericht

Teil 2 Eingehende Darstellung

für den Berichtszeitraum

01.07.2021 - 30.09.2024

zum Vorhaben

PANAMERA

(Verbundprojekt: PANAMERA - Entwicklung eines Predictive Maintenance Baukastens für Automotive Applikationen mittels Fahrzeug-Flottendatenanalyse; Teilvorhaben: Erweiterung und Öffnung des BDEMS zur gemeinsamen effektiven, mobilen Datenaufbereitung, Speicherung und Verteilung)

Zuwendungsempfänger: ExxpertSystems GmbH
Förderkennzeichen: **19|21016C**

Laufzeit des Vorhabens: **01.07.2021 - 30.09.2024**

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Erstellungsdatum: 13.03.2025

Ersteller Bericht: Daniel Jansen

Inhaltsverzeichnis

1 Übersicht 5

1.1 Aktueller Balkenplan 7

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 8

3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 8

3.1 Technischer Bericht 8

3.1.1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse 8

3.1.1.1 Zusammenfassung 8

3.1.2 Einleitung 9

3.1.3 Plattformentwicklung und Proof-of-Concept (AP 3.1) 10

3.1.3.1 Plattformentwicklung und Konfiguration 10

3.1.3.2 Proof-of-Concept-Implementierung 11

3.1.4 Erkenntnisse und Lessons Learned 14

3.1.4.1 Fazit 15

3.1.5 Optimierte Datenverarbeitung und Protokollerweiterungen 15

3.1.5.1 Verbesserte Datenverarbeitungspipelines 15

3.1.5.2 FlexRay – Optimierungen für Hochgeschwindigkeits-Datenverarbeitung 16

3.1.6 Fortschritte im CAN-Protokoll 18

3.1.6.1 Erkenntnisse und Lessons Learned 22

3.1.6.2 Fazit 22

3.1.7 Erweiterte Datenaggregation und Visualisierung 23

3.1.7.1 Datenaggregation und Visualisierung 23

3.1.7.2 Aggregation von Daten aus verschiedenen Protokollen (Page Aggregator) 25

3.1.7.3 Erweiterte Visualisierungstools 27

3.1.7.4 Erkenntnisse und Lessons Learned 29

3.1.7.5 Fazit 30

3.1.8 Systemvalidierung und Test (AP 3.2) 30

3.1.8.1 Live-Fahrzeugtests 30

3.1.8.2 Labortests und Evaluierungen 33
3.1.9 Erkenntnisse und Lessons Learned 37
3.1.9.1 Fazit 37
3.1.10 Cloud-Integration und Datenexport 38
3.1.10.1 Fazit 41
3.1.11 Globale Projekt-Herausforderungen, Lösungen & Lessons Learned 41
3.1.11.1 Herausforderungen und Lösungen 41
3.1.11.2 Globale Erkenntnisse und Lessons Learned 42
3.1.11.3 Projektfazit 43
3.1.12 Zusammenfassung und Ausblick 43
4 Der voraussichtliche Nutzen 46
4.1 Verwertbarkeit des Ergebnisses 46
4.2 Planungen für die nähere Zukunft: 46
5 Fortschritt der anderen Stellen 47
6 Veröffentlichungen 47
6.1 Geplante Veröffentlichungen 47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Übersicht des Projektaufbaus 5

Abbildung 2 – Projektziele & Projektscope 6

Abbildung 3 – Balkenplan 7

Abbildung 4 – Breakdown Pipeline im Auto 8

Abbildung 5 – Datenvisualisierung und Analyse 12

Abbildung 6 – Datenverarbeitungspipeline-System (Laufzeitumgebung) 13

Abbildung 7 – Nachrichtenzuweisung zu Zyklen / Slots 16

Abbildung 8 – FlexRay Deterministische Zeitsteuerung 17

Abbildung 9 – FlexRay „Superframes“ & Effiziente Redundanz-Erkennung 18

Abbildung 10 – CAN-Bus Nicht-Deterministisches Timing & Auswirkungen – Ansicht 1 19

Abbildung 11 – CAN-Bus Nicht-Deterministisches Timing & Auswirkungen – Ansicht 2 20

Abbildung 12 – CAN-Nachrichtengruppen & Änderungsanalyse 23

Abbildung 13 – Ergebnis der Prozessor-Pipeline (Page Aggregator Beispiel) 25

Abbildung 14 – Ergebnis der Prozessor-Pipeline (Beispiel Change Extractor) 27

Abbildung 15 – Signalerfassungssystem im Fahrzeug 32

Abbildung 16 – Atomic Bug 35

1 Übersicht

Nachfolgend wird der detaillierte Abschlussbericht der ExxpertSystems GmbH für das „PANAMERA“-Vorhaben präsentiert, das im Zeitraum 01.07.2021 bis 30.09.2024 durchgeführt wurde.

Der vorliegende Abschlussbericht umfasst eine umfassende Darstellung der durchgeführten Arbeiten, die während des gesamten Projektzeitraums realisiert wurden, sowie eine detaillierte Analyse der erzielten Ergebnisse.

In Kapitel 2 wird der abschließende Balkenplan beschrieben, der eine Übersicht über den gesamten Projektverlauf und Bearbeitungszeitraum gibt.

Kapitel 3 dokumentiert detailliert die Ereignisse und Entwicklungen innerhalb der relevanten Arbeitspakete, die im Verlauf des Projekts im Fokus standen. In diesen und den nachfolgenden Kapiteln werden sowohl der Arbeitsverlauf als auch die technischen Ergebnisse und Erfolgsaussichten des Vorhabens zusammenfassend dargestellt.

Die folgende Abbildung zeigt die Gesamtstruktur des Projekts, einschließlich der Beteiligung der ExxpertSystems GmbH sowie der Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern.

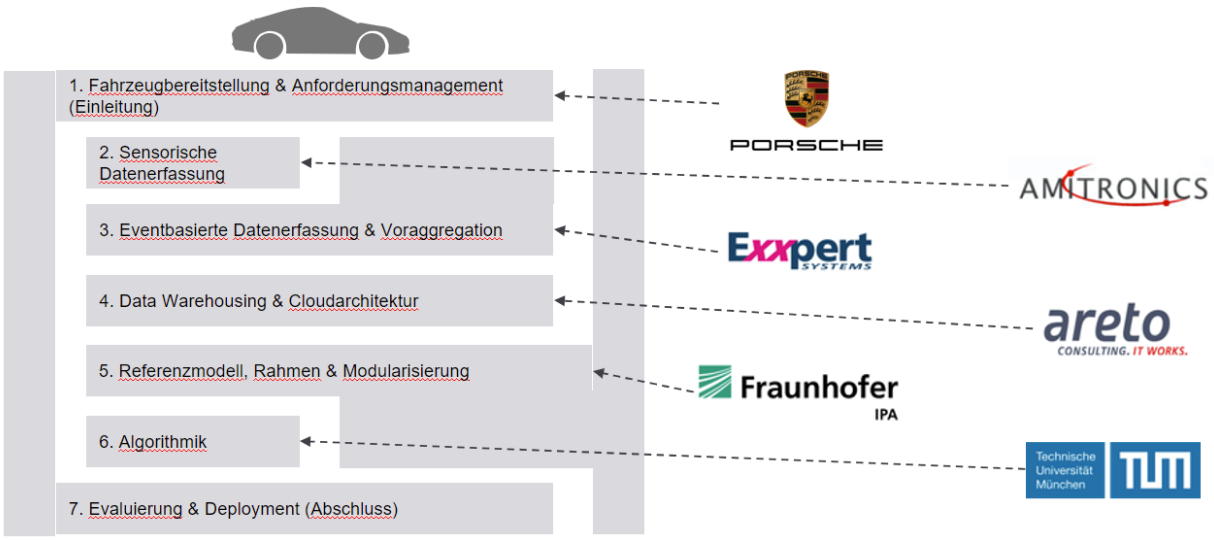

Abbildung 1 – Übersicht des Projektaufbaus

Die übergeordneten Projektziele & Projektscope im Verbund sind:

- Baukastensystem zur schnelleren und effizienteren Entwicklung von Prädiktionsmodellen über Komponentenverschleiß und –ausfälle
- Industrialisierung & Standardisierung der PdM-Modellentwicklung im Kontext KI

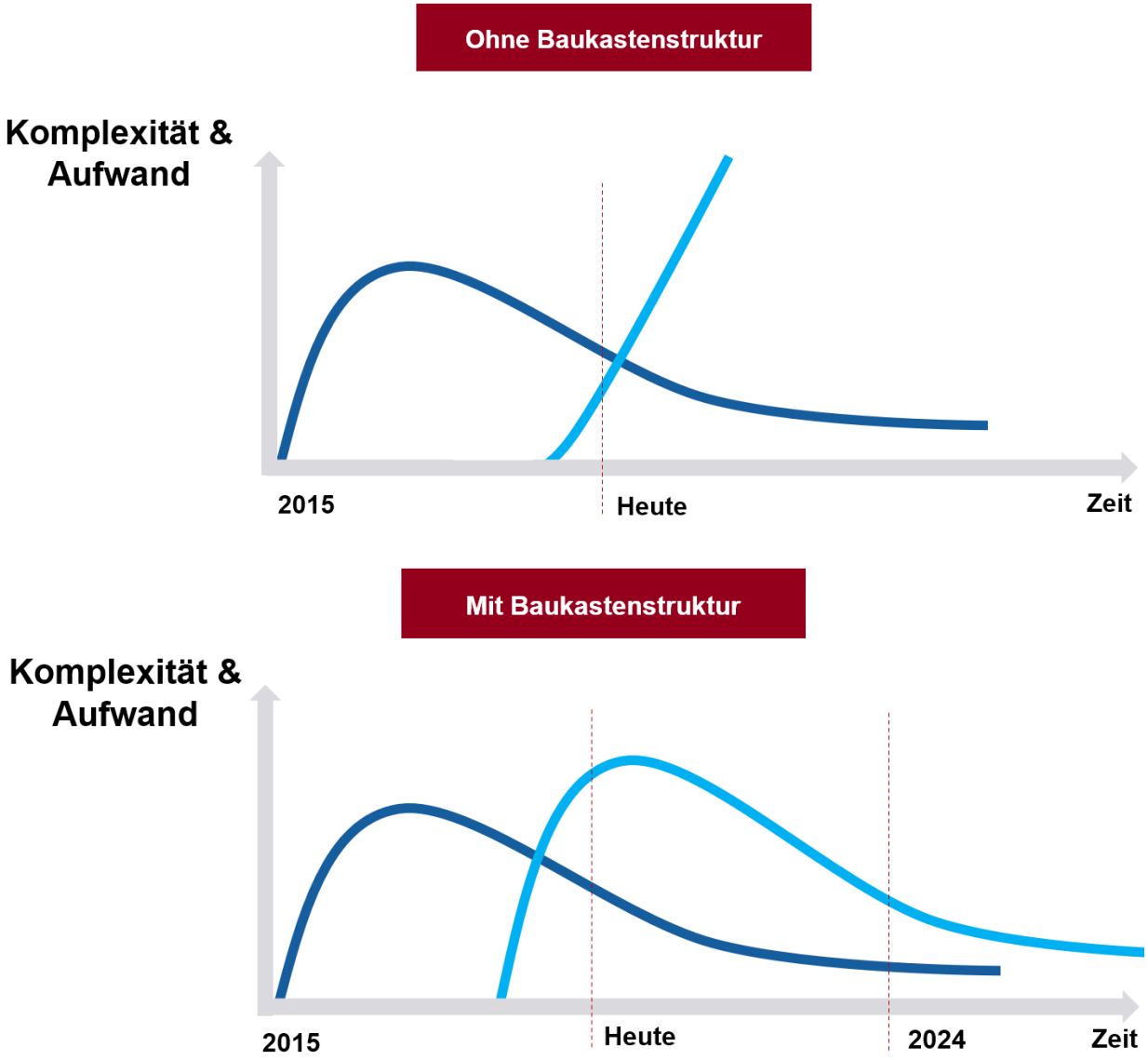

Abbildung 2 – Projektziele & Projektscope

1.1 Aktueller Balkenplan

Die folgende Abbildung veranschaulicht den Balkenplan des Projekts und bietet eine umfassende Übersicht über den Projektzeitplan sowie den aktuellen Status. ExxpertSystems spielte eine zentrale Rolle im Arbeitspaket AP3 „Datenerfassung und -vorverarbeitung“, mit besonderem Fokus auf AP3.1 „API/Funktionserweiterungen“ und AP3.3 „Test und Evaluierung“.

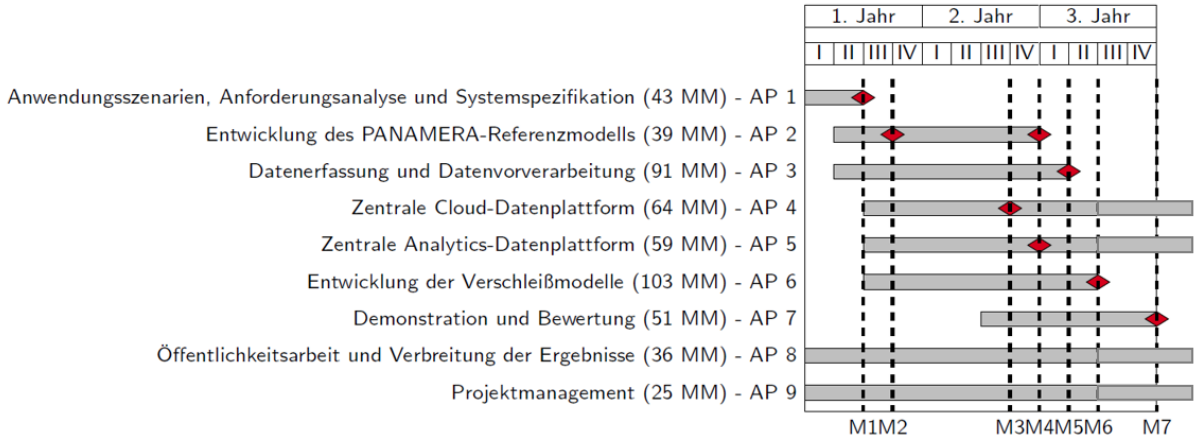

Abbildung 3 – Balkenplan

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Zuwendungsbescheid für ExxpertSystems enthält Personalkosten. Die Personalmittel stellen die wichtigste Position für das Vorhaben dar. Die Mittel wurden vollständig abgerufen.

3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die folgenden Kapitel beschreiben die wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens. Die Kapitel sind mit Überschriften strukturiert, um die Nachvollziehbarkeit zu erleichtern.

3.1 Technischer Bericht

Dieser technische Bericht bietet eine detaillierte Darstellung der Projektziele von ExxpertSystems, der angewandten Methodologien zur Zielerreichung sowie der Herausforderungen, die während des gesamten Prozesses aufgetreten sind. Darüber hinaus werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und die zukünftigen Chancen und strategischen Ausrichtungen aufgezeigt, die sich aus dem erfolgreichen Abschluss des Projekts ergeben haben.

3.1.1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

3.1.1.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts hatte AP3 das Ziel, eine einheitliche Plattform für die Erfassung, Speicherung und Vorverarbeitung relevanter Fahrzeugdaten zu entwickeln. Zudem wurden Maßnahmen ergriffen, um eine Vor-Ort-Visualisierung und eine erste Analyse dieser Daten zu ermöglichen, sodass erste Bewertungen und Überprüfungen von Testszenarien durchgeführt werden konnten.

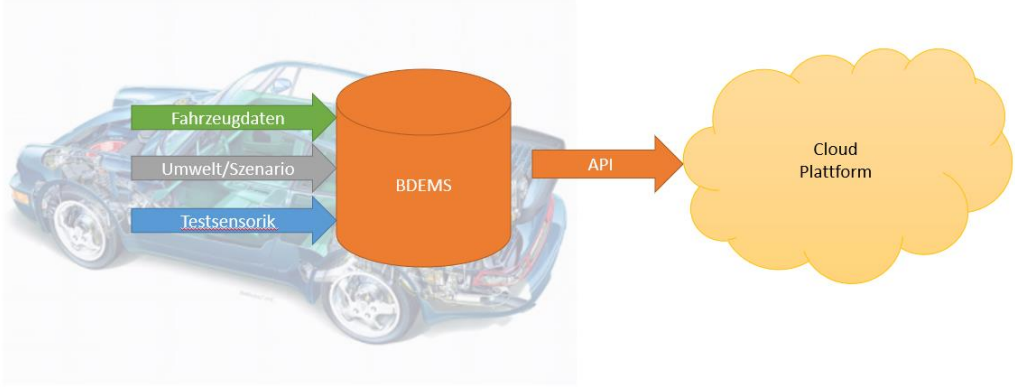

Abbildung 4 – Breakdown Pipeline im Auto

3.1.2 Einleitung

Dieses Projekt stellt einen bedeutenden Fortschritt in der Entwicklung von Predictive-Maintenance-Lösungen (PM) für die Automobilindustrie dar. Es adressiert die wachsende Komplexität moderner Fahrzeugsysteme sowie den steigenden Bedarf an effizienten, datengetriebenen Wartungsstrategien. Predictive Maintenance verändert den bisherigen Ansatz fester Wartungsintervalle hin zu einer zustandsbasierten Instandhaltung, indem es Daten und Machine-Learning-Technologien (ML) nutzt, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen und Kosten zu senken.

Das übergeordnete Ziel des Projektkonsortiums bestand darin, die Kosten und den Zeitaufwand für die Entwicklung von Predictive-Maintenance-Lösungen für Fahrzeugkomponenten zu reduzieren, ohne dabei Abstriche bei der Qualität zu machen. Durch den Einsatz modernster Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) sowie die gezielte Bewältigung spezifischer Herausforderungen im Bereich der Fahrzeugdaten – wie heterogene Subsysteme, Flottenvariabilität und Einschränkungen in der Datenübertragung – sollte das Projekt grundlegende Technologien schaffen, die Innovationen im Bereich Predictive Maintenance beschleunigen.

In diesem größeren Kontext konzentrierte sich das Projekt auf die Entwicklung eines umfassenden Ökosystems für die Erfassung, Verarbeitung, Speicherung und Analyse von Fahrzeugdaten. Im Rahmen dieser Bemühungen entwickelte ExxpertSystems das BDEMS (Big Data Erfassung & Managementsystem), eine In-Car-Erfassungsplattform zur Sammlung, Vorverarbeitung und Übertragung hochqualitativer Fahrzeugdaten. Das BDEMS wurde so konzipiert, dass es sich nahtlos in bestehende Fahrzeugbussysteme (z. B. CAN, FlexRay) sowie in spezialisierte Testsensoren integriert, um eine zuverlässige Datenerfassung unter realen Fahrbedingungen zu gewährleisten. Während das Gesamtprojekt verschiedene Datenverarbeitungs- und Analyseplattformen umfasste, spielte das BDEMS eine entscheidende Rolle, indem es hochpräzise, synchronisierte Eingabedaten für nachgelagerte Predictive-Maintenance-Lösungen bereitstellte.

ExxpertSystems übernahm eine zentrale Rolle bei der Umsetzung dieser Ziele, insbesondere durch die Fokussierung auf die Erfassung und Vorverarbeitung von Fahrzeugdaten. Die Beiträge umfassten die Analyse von Fahrzeugschnittstellen, die Implementierung fortschrittlicher Vorverarbeitungspipelines und die Entwicklung robuster Kompressionsverfahren zur Optimierung der Datenspeicherung und -übertragung. Darüber hinaus definierte ExxpertSystems APIs, um eine nahtlose Integration zwischen dem BDEMS und einer cloudbasierten Datenverarbeitungs- und Analyseplattform zu ermöglichen, wodurch sowohl traditionelle Fahrzeugdaten als auch neu erfasste Sensordaten effizient genutzt werden konnten.

Die Erfolge dieses Projekts haben eine solide Grundlage für die effektive Nutzung von Predictive-Maintenance-Technologien in der Automobilindustrie geschaffen. Dieser Bericht gibt einen detaillierten Überblick über die von ExxpertSystems durchgeführten Aktivitäten und hebt die angewandten Methoden, erzielten Innovationen sowie die bewältigten Herausforderungen hervor, die zur Entwicklung eines leistungsstarken, skalierbaren Systems beigetragen haben, das den dringendsten Anforderungen an das Fahrzeugdatenmanagement gerecht wird.

3.1.3 Plattformentwicklung und Proof-of-Concept (AP 3.1)

3.1.3.1 Plattformentwicklung und Konfiguration

Die Phase der Plattformentwicklung und Konfiguration bildete die Grundlage dieses Projekts und spielte eine entscheidende Rolle bei der Etablierung eines einheitlichen Systems zur Erfassung, Vorverarbeitung und Visualisierung von Fahrzeugdaten. Der Beginn der Spezifikationsphase (AP 3.1) markierte den Startpunkt für die Definition robuster architektonischer Anforderungen, um die komplexe Landschaft der automobilen Datenströme effektiv zu bewältigen.

Diese Phase umfasste eine detaillierte Planung und enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern, darunter ExxpertSystems, AMITRONICS und Porsche, mit dem Ziel, eine Plattform zu entwickeln, die vielfältige Datenquellen und Szenarien mit hoher Präzision und Skalierbarkeit verarbeiten kann.

Spezifikationsphase

Während der Spezifikationsphase identifizierte das Team die vielfältigen Anforderungen an Datenerfassung, Vorverarbeitung und Schnittstellenkompatibilität. Ziel war es, die Anpassungsfähigkeit der Plattform sowohl an konventionelle als auch an spezialisierte Fahrzeug-Datenströme sicherzustellen.

Die Architektur wurde so konzipiert, dass sie sich nahtlos in etablierte Fahrzeugbussysteme wie CAN und FlexRay integriert, während sie gleichzeitig neue Technologien und testspezifische Sensoren unterstützt. Diese Phase legte das fundamentale Fundament für die nachfolgenden Entwicklungs- und Testphasen, um sicherzustellen, dass die Plattform die übergeordneten Projektziele effizient erfüllt.

Bewältigung der Komplexität von Fahrzeugdaten

Die Erfassung von Fahrzeugdaten umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Datenströme, die aus verschiedenen Quellen stammen, darunter:

- **Traditionelle Fahrzeugbussysteme:**
    1. **CAN (Controller Area Network):** Weit verbreitetes Bussystem für robuste, echtzeitfähige Kommunikation zwischen Electronic Control Units (ECUs).
    2. **FlexRay:** Hochgeschwindigkeitsbussystem für sicherheitskritische Anwendungen, insbesondere in der Fahrdynamik
- **Spezialisierte Testsensoren:**

Akustiksensoren, die gezielt von AMITRONICS ausgewählt und installiert wurden, dienten zur Erfassung spezifischer Messdaten für Szenarien wie Bremsgeräuschanalysen und Motorvibrationsdiagnosen. Aufgrund ihrer individuellen Datenformate und spezifischen Anforderungen stellten diese Sensoren zusätzliche Komplexität in der Datenverarbeitung dar.

Die Integration dieser heterogenen Datenquellen erforderte fortschrittliche Vorverarbeitungspipelines, die in der Lage waren, verschiedene Datenformate zu harmonisieren, Zeitstempel zu synchronisieren und die Kompatibilität über alle Systeme hinweg zu gewährleisten.

3.1.3.2 Proof-of-Concept-Implementierung

Nach der Spezifikationsphase begann das Team mit der Umsetzung eines Proof-of-Concept (PoC), um die initialen Designs und Annahmen zu validieren. Diese Phase stellte einen entscheidenden Meilenstein dar, da sie die Praxistauglichkeit der Plattform unter realen Bedingungen demonstrierte.

Wichtige Aktivitäten in der PoC-Phase

Die PoC-Phase bestätigte die Machbarkeit des BDEMS und seine Integration in das umfassendere Predictive-Maintenance-Ökosystem. Dazu wurden Testfahrzeuge mit ExxpertSystems- und AMITRONICS -Systemen ausgestattet, um eine Vielzahl von Datenströmen zu erfassen. Zusätzlich wurden spezialisierte Akustikmodule von AMITRONICS integriert, um detaillierte Diagnosen, beispielsweise zur Analyse von Bremsgeräuschen und Motorvibrationen, zu ermöglichen. Diese Systemkonfiguration stellte sicher, dass die Datenerfassung den Anforderungen der Predictive Maintenance entsprach.

Um die Integration von FlexRay- und CAN-Kanälen zu bewerten, wurden Testfahrten durchgeführt, wobei die Daten-Synchronisation und Kompatibilität zwischen verschiedenen Quellen überprüft wurde. Das System konnte Daten sowohl aus konventionellen Sensoren als auch aus spezialisierten Testmodulen erfolgreich aufzeichnen, speichern und visualisieren. Die

Echtzeit-Auswertung der Daten war durch Onboard-Visualisierungstools möglich, die eine sofortige Analyse von Testfahrtszenarien erlaubten.

Funktionale Anforderungen und Designprinzipien

Die Entwicklung der Plattform wurde von zentralen funktionalen Anforderungen geleitet, um Effizienz, Skalierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit sicherzustellen.

- ***Verlustfreie und adaptive Kompression:***

Fortschrittliche Kompressionstechniken minimierten den Speicherbedarf, während die Datenintegrität erhalten blieb. Das System passte die Kompressionsalgorithmen dynamisch an die jeweiligen Datencharakteristika an, um eine optimale Leistung zu gewährleisten.

- ***Erkennung redundanter Daten:***

Zur Effizienzsteigerung wurden Mechanismen zur Redundanz-Erkennung implementiert, die duplizierte Datenpakete identifizierten und entfernten. Dadurch wurde der Speicherbedarf reduziert und die Datenverarbeitung optimiert.

- ***Erweiterte Visualisierungstools:***

Die Integration von Heatmaps und synchronisierten Ansichten ermöglichte eine intuitive Erkundung von Signaldaten, indem komplexe Zusammenhänge visuell dargestellt wurden. Darüber hinaus erlaubten zeitdomänenbasierte Darstellungen eine präzise Analyse transienter Phänomene, wodurch diagnostische Fähigkeiten erheblich verbessert wurden.

Abbildung 5 – Datenvisualisierung und Analyse

- ***Erweiterte Visualisierungstools:***

Die Integration von Heatmaps und synchronisierten Ansichten ermöglichte eine intuitive Erkundung von Signaldaten. Zudem erlaubten darstellbare Zeitverläufe eine präzise Analyse transienter Phänomene, was die diagnostischen Fähigkeiten des Systems erheblich verbesserte.

Abbildung 6 – Datenverarbeitungspipeline-System (Laufzeitumgebung)

Sicherstellung von Kompatibilität und Skalierbarkeit

Das modulare Design der Plattform ermöglichte eine nahtlose Integration in bestehende Fahrzeuginfrastrukturen, während gleichzeitig ausreichend Flexibilität für zukünftige Weiterentwicklungen gewährleistet wurde. Wichtige architektonische Merkmale der Plattform umfassten:

- **Interoperabilität mit Industriestandards:** Die Plattform wurde so konzipiert, dass sie mit etablierten Protokollen und Datenformaten kompatibel ist, um eine reibungslose Integration mit Partner- und Bestandssystemen zu ermöglichen.
- **Dynamische Konfiguration:** Die Verarbeitungspipelines konnten sich in Echtzeit an veränderte Datenanforderungen anpassen, wodurch eine flexible und effiziente Datenverarbeitung sichergestellt wurde.
- **Skalierbarkeit:** Die Plattform basiert auf einem robusten Framework, das eine wachsende Anzahl von Sensoren, Fahrzeugen und Testszenarien unterstützt und sich flexibel an neue Anforderungen anpassen lässt.

Zusammenarbeit und Beiträge der Projektpartner

Der Erfolg der Spezifikations- und Implementierungsphasen basierte auf der engen Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern:

- **Porsche:** Zuständig für die Fahrzeuginstrumentierung und die Integration cloudbasierter Analytiklösungen.
- **AMITRONICS:** Bereitstellung spezialisierter Sensoren und Fachwissen im Bereich der akustischen Datenverarbeitung.
- **ExxpertSystems:** Verantwortlich für die Entwicklung der BDEMS-Komponenten, insbesondere für Datenarchivierung, Visualisierung und Kommunikation.

- **areto**: Data Warehousing & Cloudarchitektur
- **IPA**: Referenzmodell, Rahmen & Modularisierung
- **TUM**: Entwicklung von Algorithmen und KI-Modellen.

Jeder Partner brachte spezifisches Know-how und Ressourcen ein, wodurch sichergestellt wurde, dass die Plattform mit einem ganzheitlichen Verständnis der Herausforderungen im Bereich der Fahrzeugdatenerfassung und -verarbeitung entwickelt wurde.

3.1.4 Erkenntnisse und Lessons Learned

Die Plattformentwicklung und Konfiguration bot wertvolle Einblicke in die Komplexität der Fahrzeugdatenverwaltung und hob zentrale Herausforderungen sowie bewährte Methoden hervor, die die Systementwicklung maßgeblich geprägt haben.

- **Heterogenität der Datenquellen:**

Eine der größten Herausforderungen bestand in der Vielfalt der Datenquellen, da das System Daten aus verschiedenen Fahrzeugprotokollen und Sensorformaten verarbeiten und integrieren musste. Dies unterstrich die Bedeutung robuster Vorverarbeitungspipelines, die eine Harmonisierung unterschiedlicher Datenformate und Protokolle ermöglichten und so eine nahtlose Kompatibilität zwischen verschiedenen Datenströmen sicherstellten. Die Fähigkeit, verschiedene Eingangsquellen zu standardisieren und zu synchronisieren, war entscheidend für die Wahrung der Datenintegrität und Systemzuverlässigkeit.

- **Bedeutung von Tests unter realen Bedingungen:**

Laborsimulationen allein reichten nicht aus, um die Leistungsfähigkeit des Systems vollständig zu validieren. Testfahrten und Live-Datenerfassung erwiesen sich als unverzichtbar, um praktische Herausforderungen zu identifizieren und zu lösen, die in einer kontrollierten Umgebung nicht nachgestellt werden konnten. Diese realen Tests deckten Integrationsprobleme, Leistungsengpässe und unerwartete Variablen auf, wodurch das Team das System unter tatsächlichen Betriebsbedingungen weiter optimieren konnte.

- **Zusammenarbeit als zentraler Erfolgsfaktor:**

Die Komplexität des Projekts zeigte deutlich, wie wichtig eine enge Zusammenarbeit zwischen Partnern mit unterschiedlicher Expertise war. Effektive Kommunikation und Teamarbeit erwiesen sich als essenziell, um sowohl technische als auch logistische Herausforderungen zu bewältigen und sicherzustellen, dass alle Systemkomponenten mit den Projektzielen abgestimmt waren. Der Wissensaustausch zwischen den Beteiligten führte zu einer schnelleren Problemlösung und ermöglichte es, die Plattform effizient an neue Erkenntnisse und Testergebnisse anzupassen.

3.1.4.1 Fazit

Die Phase der Plattformentwicklung und Konfiguration legte ein solides Fundament für das Projekt, indem sie ein skalierbares und anpassungsfähiges Framework für die Erfassung und Verarbeitung von Fahrzeugdaten schuf. Die erfolgreiche Umsetzung dieser Phase stellte sicher, dass die Plattform in den folgenden Projektstufen flexibel auf unterschiedliche Anforderungen reagieren konnte und das Projekt seinem Ziel, eine industriegerechte Lösung bereitzustellen, einen entscheidenden Schritt näherbrachte.

3.1.5 Optimierte Datenverarbeitung und Protokollerweiterungen

3.1.5.1 Verbesserte Datenverarbeitungspipelines

Die Implementierung fortschrittlicher Datenverarbeitungspipelines war ein zentraler Bestandteil dieses Projekts und diente dazu, die Herausforderungen der effizienten Verarbeitung vielfältiger und großer Fahrzeugdatenströme zu bewältigen. Dieser Abschnitt beschreibt die innovativen Ansätze, Optimierungen und technologischen Fortschritte, die es dem BDEMS ermöglichten, Daten mit außergewöhnlicher Geschwindigkeit und Genauigkeit zu verarbeiten.

Asynchrone Laufzeitumgebung

Eine der bedeutendsten technologischen Weiterentwicklungen in der Architektur des BDEMS war die Integration einer asynchronen Laufzeitumgebung. Diese hochmoderne Lösung wurde durch moderne Netzwerktechnologien inspiriert, wie sie etwa in Webservern eingesetzt werden, um Tausende von Anfragen gleichzeitig zu verarbeiten. Durch die Implementierung eines asynchronen Verarbeitungsmodells konnte das System seine Skalierbarkeit, Reaktionsfähigkeit und Ressourcennutzung erheblich verbessern, insbesondere für hochfrequente Fahrzeugdatenströme.

- **Parallele Datenverarbeitung:**

Die asynchrone Laufzeitumgebung ermöglichte die gleichzeitige Verarbeitung eingehender Datenströme, wodurch Ressourcen effizient genutzt und Latenzen minimiert wurden. Diese Funktion war besonders wichtig für hochfrequente Datenquellen wie FlexRay und CAN, bei denen Datenpakete in schneller Abfolge eintreffen. Durch die parallele Verarbeitung konnte das System sicherstellen, dass kritische Informationen in Echtzeit verarbeitet wurden, wodurch Verzögerungen reduziert und der Datenfluss insgesamt optimiert wurde.

- **Dynamische Pipeline-Konfiguration:**

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der asynchronen Laufzeit war die Möglichkeit zur dynamischen Konfiguration der Verarbeitungspipelines. Dies erlaubte es, die Verarbeitung in Echtzeit an wechselnde Datenlasten anzupassen. Ingenieure konnten die Pipelines während des

Betriebs neu konfigurieren, um die Leistung für spezifische Anwendungsfälle zu optimieren, beispielsweise für niedrig-latenz Signalüberwachung oder hochvolumige Batch-Analysen. Diese Flexibilität gewährleistete, dass das System effizient und reaktionsfähig blieb, selbst wenn sich die Datenanforderungen änderten.

Durch die Entkopplung der Datenaufnahme von den Verarbeitungsvorgängen konnte das asynchrone Design Engpässe beseitigen, die typischerweise in sequenziellen Datenverarbeitungsarchitekturen auftreten. Diese Optimierung ermöglichte es dem BDEMS, wachsende Datenmengen mit höherer Effizienz zu bewältigen, wodurch seine Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit für Predictive Maintenance und Echtzeitanalysen weiter gestärkt wurden.

3.1.5.2 FlexRay – Optimierungen für Hochgeschwindigkeits-Datenverarbeitung

FlexRay ist ein Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsprotokoll, das eine entscheidende Rolle in der Fahrdynamiksteuerung spielt. Aufgrund seines strukturierten Nachrichtenformats und seiner zyklischen Natur stellte die Verarbeitung von FlexRay-Daten besondere Herausforderungen dar. Das Projektteam entwickelte daher eine Reihe maßgeschneiderter Optimierungsmaßnahmen, um eine effiziente Verarbeitung und Speicherung dieser Daten sicherzustellen.

Die resultierenden Optimierungstechniken umfassten:

- Redundanz-Erkennungsalgorithmen zur Identifizierung und Eliminierung redundanter Datenpakete.
- Adaptive Kompressionstechniken, die den Speicherbedarf minimieren, ohne die Datenintegrität zu beeinträchtigen.
- FlexRay Superframes, die zusammenhängende Nachrichtenzyklen in logische Einheiten gruppieren, um die Datenorganisation und Analyse zu vereinfachen.

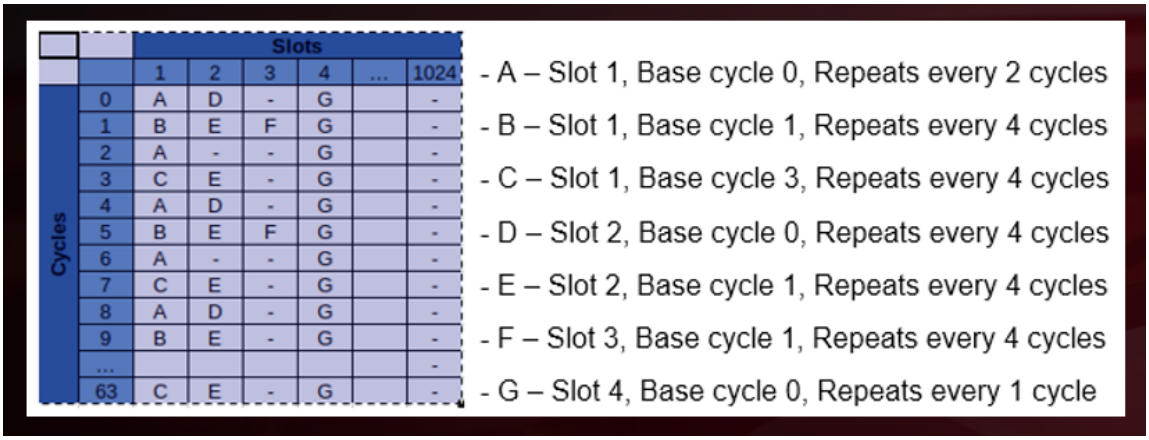

Abbildung 7 – Nachrichtenzuweisung zu Zyklen / Slots

Abbildung 8 – FlexRay Deterministische Zeitsteuerung

Redundanz-Erkennungsalgorithmen

FlexRay-Nachrichten enthalten häufig wiederholte Datenelemente, was zu unnötiger Redundanz sowohl in der Speicherung als auch in der Verarbeitung führen kann. Um die Systemeffizienz zu optimieren, implementierte das Team fortschrittliche Algorithmen zur Redundanz-Erkennung, die in der Lage waren, duplizierte Pakete innerhalb der zyklischen Nachrichtenstruktur zu identifizieren. Diese Algorithmen eliminierten redundante Daten, während sie gleichzeitig sicherstellten, dass die Integrität des Analyseprozesses gewahrt blieb. Durch die Reduzierung des Speicherbedarfs für doppelte Daten konnten die Systemressourcen für kritische Verarbeitungsaufgaben genutzt werden, was zu einer verbesserten Leistung und Skalierbarkeit führte.

Adaptive Kompressionstechniken

Aufgrund der vorhersehbaren Struktur von FlexRay-Nachrichten entwickelte das Team adaptive Kompressionstechniken, um die Datenverarbeitung zu optimieren. Diese Methode beinhaltete die Segmentierung der Nachrichten in statische und dynamische Komponenten, um eine gezieltere Kompression zu ermöglichen. Statische Segmente, die sich über mehrere Zyklen hinweg nicht veränderten, wurden effizient gemeinsam komprimiert, während für dynamische Segmente kontextbezogene Kompressionsalgorithmen angewendet wurden, um die

analytische Genauigkeit beizubehalten und gleichzeitig den Speicherbedarf zu minimieren. Durch die Nutzung der zyklischen Natur von FlexRay gewährleistete diese Technik, dass diagnostische Daten hochpräzise und leicht zugänglich blieben, ohne Speicher- oder Rechenressourcen zu überlasten.

FlexRay Superframes

Um die Gruppierung und Navigation von Daten zu optimieren, wurde das Konzept der FlexRay Superframes eingeführt. Diese Superframes fassten zusammenhängende Nachrichtenzyklen in logische Einheiten zusammen, wodurch das Management und die Analyse großer Datensätze erheblich erleichtert wurden. Dadurch wurde der Zugriff auf relevante Daten beschleunigt, was die Verarbeitungszeit während der Analyse signifikant reduzierte.

Zusätzlich vereinfachten Superframes die Navigation durch umfangreiche Datensätze, wodurch die kognitive Belastung für Ingenieure gesenkt und der gesamte Arbeitsablauf effizienter gestaltet wurde.

Die Einführung von Superframes ermöglichte zudem erweiterte Visualisierungstechniken, darunter Heatmaps und Change Detection Overlays, die die diagnostischen Fähigkeiten der Plattform weiter verbesserten. Durch die Organisation der Daten in strukturierte, leicht zugängliche Einheiten spielten Superframes eine entscheidende Rolle bei der Optimierung der Datenanalyse und der Unterstützung von Echtzeit-Entscheidungen.

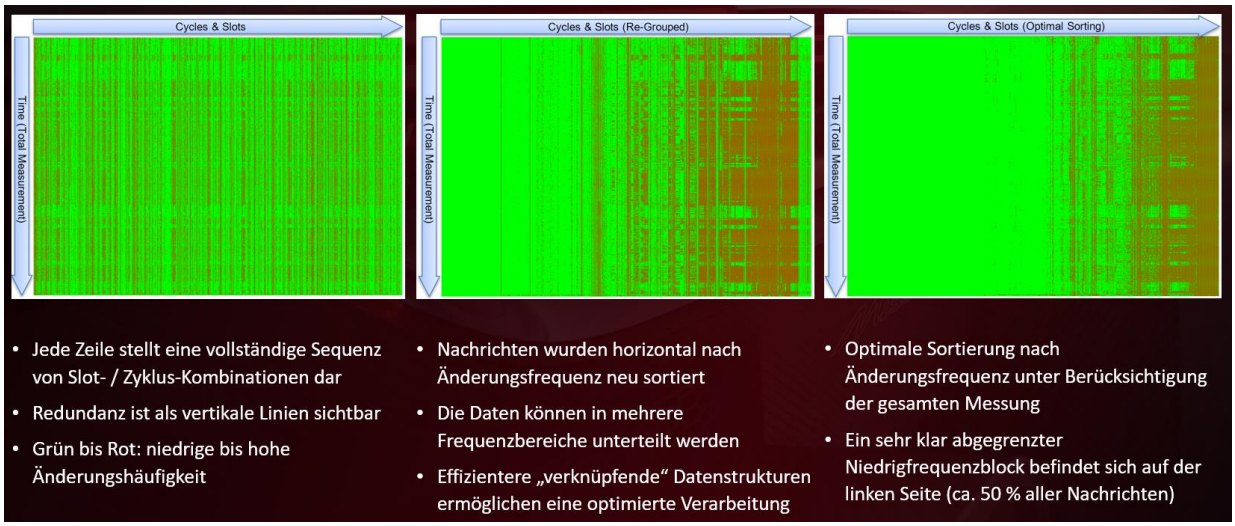

Abbildung 9 – FlexRay „Superframes“ & Effiziente Redundanz-Erkennung

3.1.6 Fortschritte im CAN-Protokoll

Das CAN (Controller Area Network) -Protokoll, das weit verbreitet für die Fahrzeugkommunikation eingesetzt wird, stellte aufgrund seiner nicht-deterministischen Natur

und der ereignisgesteuerten Nachrichtenübermittlung besondere Herausforderungen dar. Das Projektteam begegnete diesen Herausforderungen mit einer Reihe innovativer Lösungen:

Die aufgetretenen Herausforderungen umfassten:

- Die Busarbitration im CAN-Bus beeinflusst direkt das Timing und die Reihenfolge der Nachrichten auf dem Bus.
- Regelmäßig gesendete Trigger-Nachrichten können durch andere Nachrichten gestört werden.
- In einem Many-to-Many-Kommunikationsprotokoll kann sich die Reihenfolge der Antwortnachrichten ändern.
- Mehrere Nachrichtengruppen mit unterschiedlichem Timing-Verhalten können sich gegenseitig beeinflussen und stören.

Die resultierenden Optimierungstechniken umfassten:

- Effiziente Verarbeitung von Multiplex-Nachrichten zur besseren Organisation und Interpretation von CAN-Daten.
- Einführung von „Change Observers“, um Änderungen in Echtzeit zu überwachen und Anomalien frühzeitig zu erkennen.
- Lösung von Timing-Inkonsistenzen durch verbesserte Algorithmen zur Synchronisation von CAN-Nachrichten.
- Integration erweiterter Datenpipelines, um die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu steigern und die Systemreaktionsfähigkeit zu optimieren.

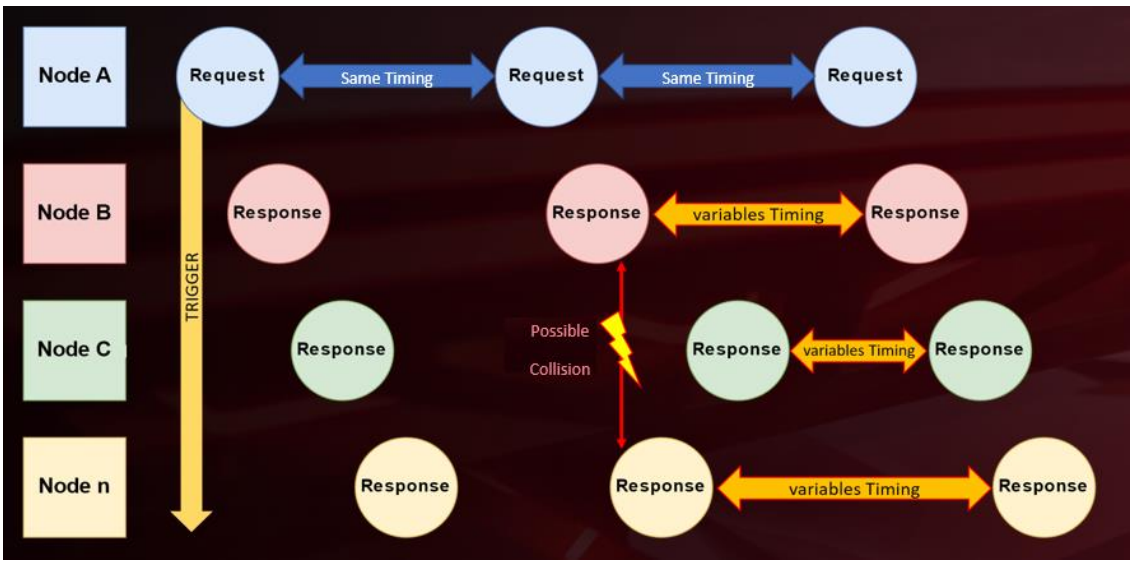

Abbildung 10 – CAN-Bus Nicht-Deterministisches Timing & Auswirkungen – Ansicht 1

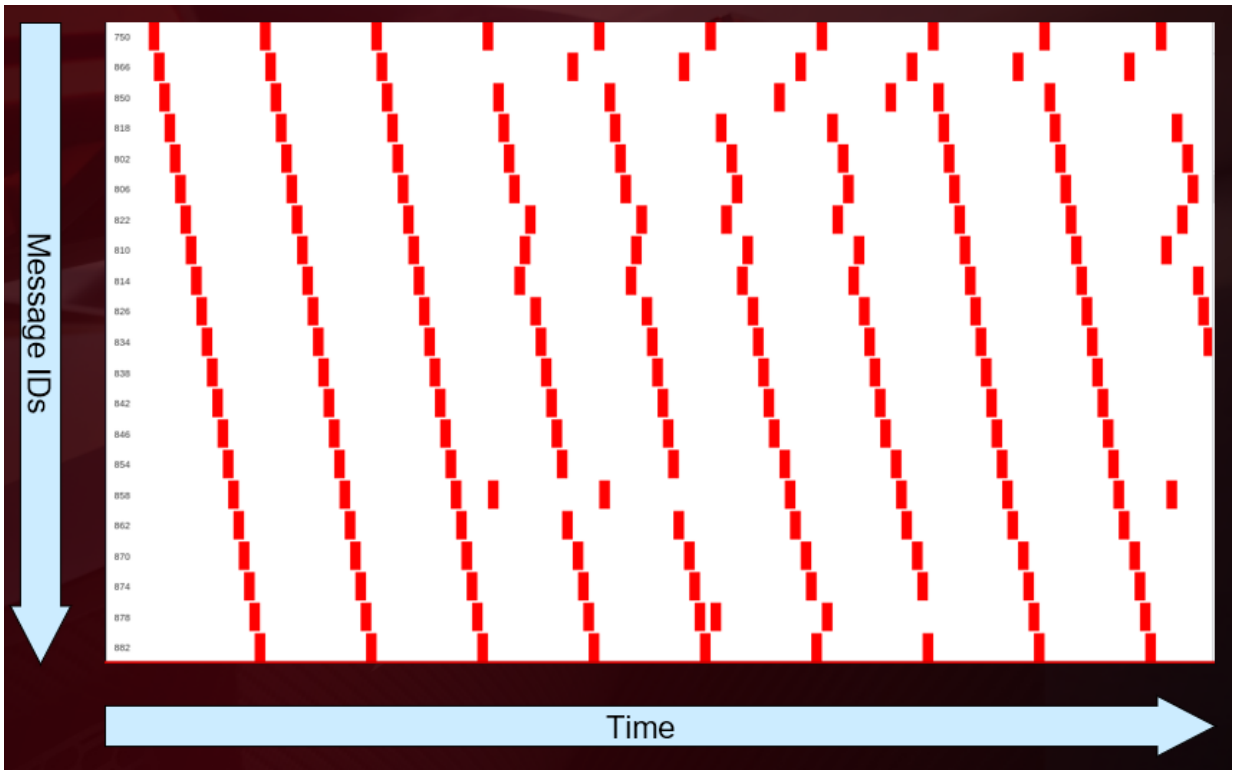

Abbildung 11 – CAN-Bus Nicht-Deterministisches Timing & Auswirkungen – Ansicht 2

Verarbeitung von Multiplex-Nachrichten

CAN-Nachrichten enthalten häufig Multiplex-Signale, bei denen ein einzelner Datenrahmen je nach kontextbezogenen Metadaten mehrere Werte repräsentieren kann. Um diese Komplexität zu bewältigen, entwickelte das Team folgende Lösungen:

- **Dynamische Nutzlastinterpretation:** Algorithmen, die Multiplex-Signale in Echtzeit dekodieren können.
- **Metadaten-Extraktion:** Werkzeuge zur Erfassung und Verknüpfung kontextbezogener Informationen mit jeder Nachricht, um eine präzise Interpretation zu ermöglichen.

Einführung von „Change Observern“

Zur Verbesserung der Anomalieerkennung und Trendanalyse wurden Change Observers als zentrales Feature in das System integriert. Diese Werkzeuge überwachten kontinuierlich Änderungen in den Nutzlastdaten in Echtzeit, sodass das System Abweichungen von erwarteten Mustern sofort erkennen konnte.

Durch die feingranulare Nachverfolgung von Änderungen legen die Change Observers die Grundlage für Frühwarnsysteme, die eine proaktive Erkennung potenzieller Systemausfälle oder anomaler Verhaltensweisen ermöglichen, noch bevor diese zu kritischen Problemen eskalieren.

Diese Funktion ist besonders wertvoll für die Diagnose intermittierender Probleme, die in herkömmlichen Datenanalysen oft unbemerkt bleiben. Durch die kontinuierliche Analyse von Sensordaten und Fahrzeugbus-Kommunikation liefern Change Observers tiefere Einblicke in den Systemzustand und die Leistung, wodurch effektivere Predictive-Maintenance-Strategien unterstützt werden können.

Behebung von Timing-Inkonsistenzen

Timing-Inkonsistenzen wie Jitter und Nachrichtenverzögerungen sind in ereignisgesteuerten Protokollen wie CAN ein bekanntes Problem. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, entwickelte das Team folgende Lösungen:

- **Timing-Korrektur-Algorithmen:** Techniken zur Ausrichtung bzw. Gruppierung von Nachrichten basierend auf Zeitstempeln und kontextabhängigen Abhängigkeiten.
- **Sequenzvalidierungswerkzeuge:** Methoden zur Überprüfung der logischen Reihenfolge von Nachrichten innerhalb eines Datenstroms.

Diese Verbesserungen stellten die zeitliche Integrität der CAN-Daten sicher und ermöglichten eine zuverlässige Analyse und Entscheidungsfindung.

Integration fortschrittlicher Datenpipelines

Der Erfolg des Projekts beruhte auf der nahtlosen Integration fortschrittlicher Datenpipelines, die für die effiziente Verarbeitung mehrerer Protokolle und Datenformate entwickelt wurden. Diese Pipelines spielten eine entscheidende Rolle bei der reibungslosen Datenübertragung von der Erfassung bis zur Analyse und bildeten die robuste Grundlage für Predictive Maintenance und Echtzeit-Diagnosen.

- **Modulare Architektur:**

Um Flexibilität und Skalierbarkeit zu maximieren, wurden die Datenpipelines mit einer modularen Architektur entwickelt, bei der jedes Modul für eine spezifische Verarbeitungsaufgabe verantwortlich war. Diese Struktur ermöglichte eine schnelle Entwicklung, Prüfung und Implementierung neuer Funktionen, ohne bestehende Workflows zu stören. Durch die Aufteilung der Verarbeitung in kleinere, austauschbare Komponenten konnte das System problemlos an neue Protokolle, Sensor-Eingaben und Analysewerkzeuge angepasst werden, sobald sich Anforderungen änderten.

- **Einheitliches Datenframework:**

Ein gemeinsames Datenframework wurde implementiert, um eine nahtlose Harmonisierung der Eingaben aus verschiedenen Fahrzeugkommunikationsprotokollen, wie FlexRay und CAN, zu gewährleisten. Diese Standardisierung sorgte dafür, dass alle eingehenden Daten – unabhängig von ihrer Quelle – einheitlich strukturiert wurden. Vom Datenerfassungsprozess bis

zur Visualisierung verhinderte dieses Framework Kompatibilitätsprobleme und ermöglichte eine reibungslose Integration mit externen Plattformen und nachgelagerten Analysesystemen.

- **Echtzeit-Feedback:**

Zur Leistungsoptimierung der Datenpipelines wurden Echtzeit-Feedback-Mechanismen integriert, die es Ingenieuren ermöglichten, die Verarbeitungseffizienz aktiv zu überwachen und Engpässe frühzeitig zu identifizieren. Durch die kontinuierliche Überprüfung der Pipeline-Performance konnten Ineffizienzen oder Fehler schnell diagnostiziert und behoben werden. Zusätzlich unterstützte dieses Echtzeit-Monitoring die iterative Verfeinerung der Verarbeitungsalgorithmen, wodurch eine kontinuierliche Optimierung und Verbesserung der Datenverarbeitung sichergestellt wurde.

3.1.6.1 Erkenntnisse und Lessons Learned

Die Entwicklung optimierter Datenverarbeitungspipelines lieferte wertvolle Erkenntnisse über die Komplexität des Managements von Fahrzeugdaten:

1. **Skalierbarkeit ist entscheidend:**
    - Die Implementierung einer asynchronen Laufzeitumgebung zeigte, wie wichtig eine skalierbare Architektur ist, um hochfrequente Datenströme effizient zu verarbeiten.
2. **Protokollspezifische Optimierungen sind unerlässlich:**
    - Maßgeschneiderte Lösungen für FlexRay und CAN erwiesen sich als entscheidend, um die Effizienz und Genauigkeit des Systems zu maximieren.
3. **Zusammenarbeit fördert Innovation:**
    - Die enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern stellte sicher, dass die entwickelten Lösungen auf einer breiten Expertise und unterschiedlichen Perspektiven basierten.

3.1.6.2 Fazit

Die Phase der erweiterten Datenverarbeitungspipelines war ein zentraler Bestandteil des Projekts, da sie es dem BDEMS ermöglichte, komplexe und hochvolumige Datenströme effizient zu verarbeiten. Durch die Kombination von asynchroner Verarbeitung, protokollspezifischen Optimierungen und einem modularen Pipeline-Design erreichte die Plattform eine überragende Leistung und Zuverlässigkeit. Diese Fortschritte legten die Grundlage für die nachfolgenden Projektphasen und sicherten den Gesamterfolg des Projekts.

3.1.7 Erweiterte Datenaggregation und Visualisierung

3.1.7.1 Datenaggregation und Visualisierung

Die effiziente Aggregation und Visualisierung von Daten waren entscheidende Bestandteile des Projekts, da sie es ermöglichten, aussagekräftige Erkenntnisse aus komplexen und umfangreichen Datensätzen zu gewinnen. Durch die gezielte Entwicklung und Implementierung fortschrittlicher Aggregationsmechanismen und Visualisierungstools konnte das Projektteam die Analysefähigkeiten des BDEMS erheblich verbessern.

Die Bedeutung der Datenaggregation und Visualisierung

Die Vielfalt der Datenströme in modernen Fahrzeugsystemen erfordert leistungsstarke Methoden zur Organisation, Verarbeitung und Interpretation von Informationen. Die Datenaggregation und -visualisierung bildeten die Grundlage für:

1. Die Zusammenführung heterogener Daten in eine einheitliche Struktur.
2. Die Identifikation von Mustern, Anomalien und Trends, die für Diagnosen und Optimierungsmaßnahmen entscheidend sind.
3. Die Unterstützung sowohl von Echtzeit- als auch nachträglichen Analysen des Fahrzeugverhaltens in verschiedenen Szenarien.

Durch diese Funktionen sollte das Projekt Rohdaten in wertvolle Erkenntnisse für Ingenieure und weitere Stakeholder umwandeln.

Implementierung des Page Aggregators

Ein zentrales Element der Datenaggregationsstrategie war die Entwicklung des "Page Aggregators", eines innovativen Werkzeugs zur systematischen Organisation von CAN-Bus-Daten. Dieses Tool spielte eine entscheidende Rolle bei der Strukturierung von Daten für eine effiziente Analyse und den schnellen Zugriff.

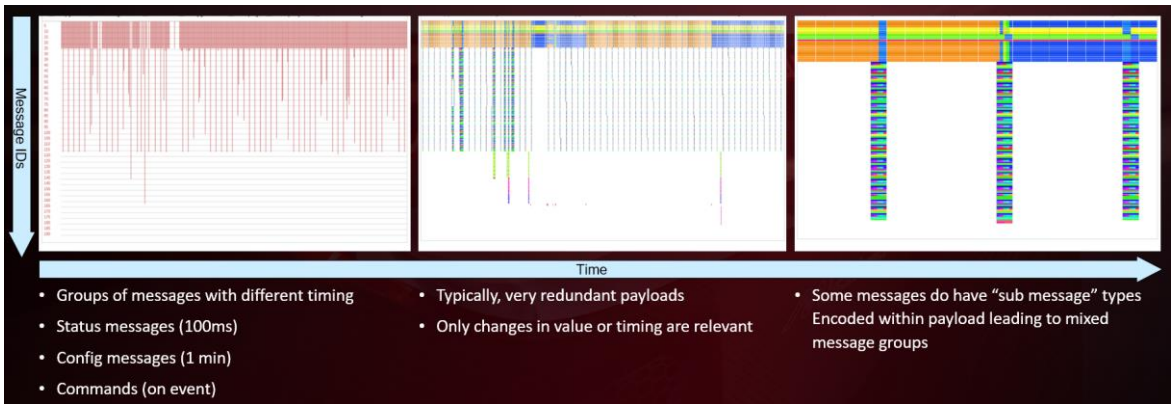

Abbildung 12 – CAN-Nachrichtengruppen & Änderungsanalyse

Hauptmerkmale des Page Aggregators

Der Page Aggregator wurde entwickelt, um Bus-Daten effizient zu organisieren und zu verarbeiten, sodass eine intuitive Datenanalyse und nahtlose Skalierbarkeit gewährleistet ist.

1. **Logische Gruppierung der Daten:**
    - Zur besseren Organisation und Zugänglichkeit wurden Bus-Daten in logische Gruppen unterteilt, darunter Header, Payloads und Metadaten.
    - Diese Gruppen wurden in hierarchischen Baumstrukturen gespeichert, was Ingenieuren eine intuitive Navigation ermöglichte, und die Analyse komplexer Datensätze erleichterte.
2. **Hierarchische Indexierung:**
    - Die Implementierung einer hierarchischen Indexierung ermöglichte eine schnelle Navigation innerhalb großer Datensätze und verbesserte die Effizienz der Datenabfrage erheblich.
    - Jeder Knoten innerhalb der Baumstruktur enthielt Verweise auf übergeordnete und untergeordnete Knoten, wodurch eine strukturierte Datenexploration und ein nahtloser Zugriff ermöglicht wurden.
3. **Skalierbarkeit:**
    - Der Page Aggregator wurde optimiert, um große Datenmengen effizient zu verwalten, ohne dabei an Leistung einzubüßen.
    - Durch seine modulare Architektur war er mit anderen Protokollen wie FlexRay und CAN kompatibel, was zukünftige Erweiterungen ohne umfangreiche Systemänderungen ermöglichte.

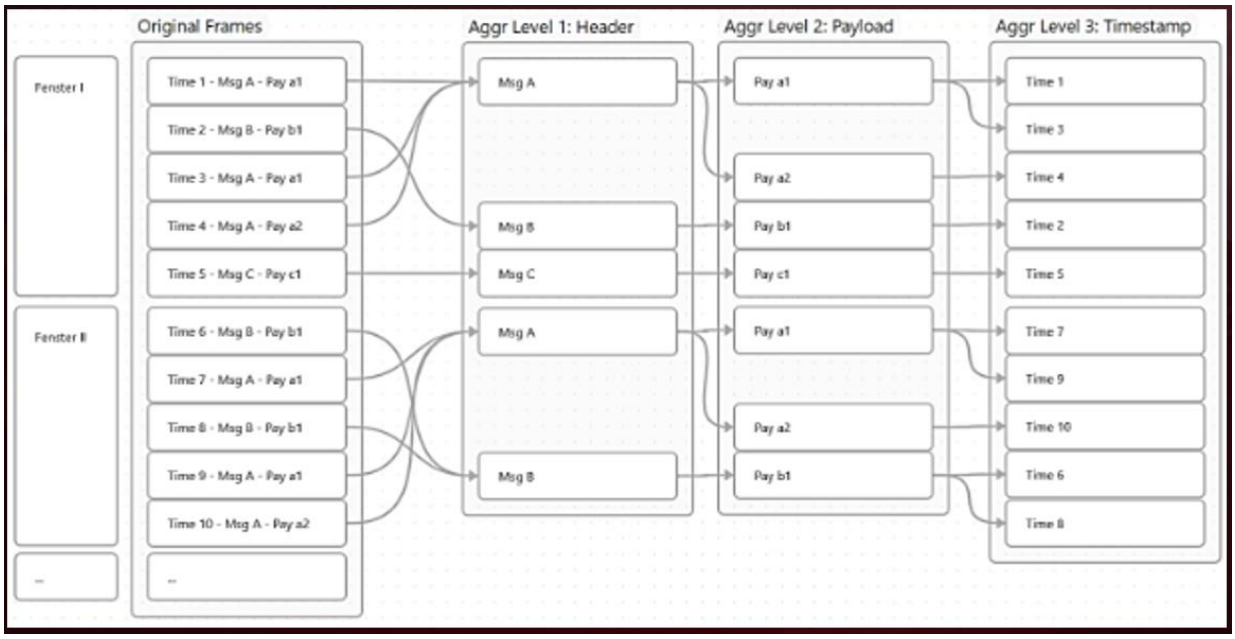

Abbildung 13 – Ergebnis der Prozessor-Pipeline (Page Aggregator Beispiel)

3.1.7.2 Aggregation von Daten aus verschiedenen Protokollen (Page Aggregator)

Der Page Aggregator wurde ursprünglich zur Verarbeitung von CAN-Bus-Daten entwickelt. Im Laufe des Projekts wurde er jedoch erweitert, um FlexRay und andere Fahrzeugbussysteme zu unterstützen. Diese Erweiterung erforderte protokollspezifische Anpassungen, um Unterschiede in Nachrichtenstrukturen, Zeitsteuerungsmechanismen und Datenübertragungsformaten zu berücksichtigen. Da jedes Protokoll eigene Besonderheiten aufweist, waren gezielte Modifikationen erforderlich, um eine korrekte Dateninterpretation und eine nahtlose Integration in das Aggregations-Framework zu gewährleisten.

Zur Standardisierung der Daten aus unterschiedlichen Quellen wurde der Page Aggregator mit Vorverarbeitungspipelines integriert, die Datenformate vor der Aggregation harmonisierten. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass Informationen aus verschiedenen Fahrzeugbussystemen unabhängig von ihrer Herkunft einheitlich ausgerichtet und verarbeitet wurden.

Durch diese Erweiterung entwickelte sich der Page Aggregator zu einem einheitlichen Datenaggregations-Framework, das mehrere automobile Kommunikationsprotokolle effizient verarbeiten konnte. Diese Verbesserung steigerte die Flexibilität und Skalierbarkeit des Systems erheblich und ermöglichte eine reibungslose Erfassung, Verarbeitung und Analyse von Daten über eine Vielzahl von Fahrzeugarchitekturen und Sensorkonfigurationen hinweg.

Change Extractor – Weiterentwicklung über den Page Aggregator hinaus

Aufbauend auf den Funktionalitäten des Page Aggregators wurde der Change Extractor als nächster Entwicklungsschritt entwickelt, um die Verfolgung und Interpretation von Datenänderungen zu verbessern. Während der Page Aggregator eine effiziente Gruppierung und Ausrichtung diverser Fahrzeugdaten ermöglichte, führte der Change Extractor einen fortschrittlicheren Mechanismus zur Überwachung und Analyse von Datenvariationen über die Zeit hinweg ein.

Der Change Extractor optimierte die Datenverarbeitung, indem er Nachrichten basierend auf ihrer Bedeutung gruppierte, unter Verwendung einer Kombination aus Nachrichten-IDs und potenziellen Sub-IDs. Er verfolgte Änderungen sowohl der Datenraten als auch der Nutzlasten innerhalb jeder Gruppe, um sicherzustellen, dass Modifikationen in den Daten präzise erfasst und analysiert wurden. Diese Änderungsdaten wurden in dedizierte Datenströme geschrieben, was eine strukturierte und effiziente Überwachung des Systemverhaltens ermöglichte.

Zur Sicherstellung der Betriebskontinuität, selbst nach einem Systemneustart, speicherte der Change Extractor den aktuellen Zustand des Prozessors ab, sodass Operationen nach einem Power-Cycle nahtlos fortgesetzt werden konnten. Darüber hinaus wurde eine Sequenz von Tracker-IDs pro Zeiteinheit gespeichert, wodurch eine vollständige Datenrekonstruktion und detaillierte Zeitreihenanalyse ermöglicht wurde. Diese Fähigkeit bot tiefere Einblicke in Datenflüsse, Ereignisabläufe und Systemperformance und erwies sich als essenziell für Diagnosen, Predictive Maintenance und Anomalieerkennung.

Durch die Erweiterung der Grundfunktionalitäten des Page Aggregators verbesserte der Change Extractor maßgeblich die Präzision der Datenverfolgung, die Systemstabilität und die analytische Tiefe. Damit etablierte er sich als eine entscheidende Weiterentwicklung in der automobilen Datenverarbeitung und -analyse.

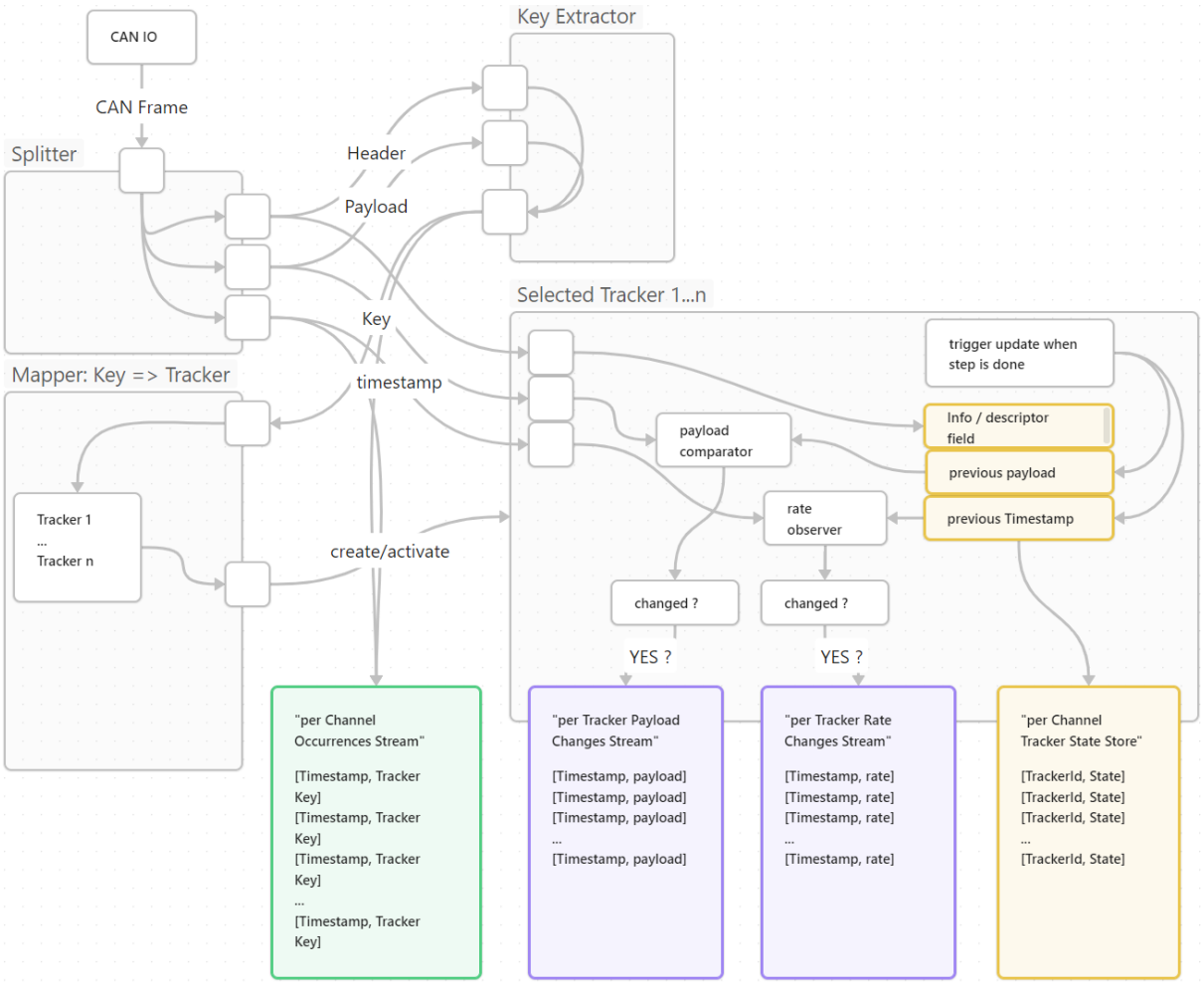

Abbildung 14 – Ergebnis der Prozessor-Pipeline (Beispiel Change Extractor)

3.1.7.3 Erweiterte Visualisierungstools

Die Visualisierungstools wurden entwickelt, um die Datenaggregationsmechanismen zu ergänzen und Ingenieuren intuitive und interaktive Schnittstellen für die Datenanalyse bereitzustellen. Diese Tools wandelten komplexe Datensätze in leicht zugängliche visuelle Darstellungen um und verbesserten damit die Diagnose- und Entscheidungsprozesse erheblich.

GUI-basierte Darstellungen

Die grafische Benutzeroberfläche (GUI) des BDEMS wurde erheblich erweitert, um die Datenexploration und -analyse zu verbessern.

- **Aggregierte Datenansichten:**

Ingenieure erhielten visuelle Darstellungen hierarchischer Datenstrukturen, die durch den Change Extractor generiert wurden. Diese Darstellungen erleichterten die Navigation und

Analyse komplexer Datensätze, indem sie eine strukturierte und intuitive Übersicht über die erfassten Fahrzeugdaten boten.

Um eine noch tiefere Dateninspektion zu ermöglichen, wurden interaktive Elemente in die Benutzeroberfläche integriert. Diese Funktionen erlaubten es, Header, Nutzlasten und Metadaten gezielt zu erkunden, wodurch eine präzisere Fehlersuche und Analyse der Daten möglich wurde. Die intuitive Interaktion mit den Daten führte zu einer effizienteren Identifizierung von Auffälligkeiten und möglichen Anomalien im Fahrzeugkommunikationssystem.

Signalgraphen und Heatmaps

1. **Signalgraphen:** Signalgraphen bieten eine zeitbasierte Darstellung von Signalwerten, die es Ingenieuren ermöglicht, Trends und Anomalien über einen definierten Zeitraum hinweg zu identifizieren. Diese Visualisierungsmethode erleichtert die Analyse von Fahrzeugdaten, indem sie Änderungen im Systemverhalten deutlich sichtbar macht. Darüber hinaus können mehrere Signale überlagert werden, um Vergleiche anzustellen und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Parametern zu erkennen. Dies trägt maßgeblich zur Fehlersuche und Optimierung von Systemprozessen bei.
2. **Heatmaps:** Heatmaps bieten eine übersichtliche Darstellung der Aktivitätsmuster über verschiedene Datenströme hinweg. Bereiche mit hoher Aktivität werden farblich hervorgehoben, sodass Ingenieure gezielt Auffälligkeiten identifizieren und detaillierte Analysen durchführen können. Durch die Visualisierung von Datenintensitäten lassen sich Problemzonen schneller erkennen, was die Effizienz bei der Systemdiagnose und -optimierung erheblich steigert

Synchronisierte Ansichten

Die Implementierung von synchronisierten Ansichten war eine entscheidende Innovation, die die gleichzeitige Analyse mehrerer Datenströme ermöglichte. Dies war insbesondere wertvoll für die Korrelation von FlexRay- und CAN-Daten, um Interdependenzen zwischen verschiedenen Fahrzeugsystemen zu identifizieren. Zudem wurde durch diese Funktion sichergestellt, dass Sensordaten mit Fahrzeugbus-Nachrichten abgeglichen wurden, um Konsistenz und Genauigkeit in der Datenanalyse zu gewährleisten.

Integration diagnostischer Erkenntnisse

Die Visualisierungstools wurden gezielt erweitert, um diagnostische Erkenntnisse aus der Datenaggregation und -verarbeitung direkt in die Analyse einzubinden. Dadurch konnten Ingenieure nicht nur Daten visualisieren, sondern auch gezielt Auffälligkeiten und potenzielle Fehlerquellen identifizieren.

- **Change Hotspots:** Ein wesentliches Feature waren Change Hotspots, die Bereiche mit hoher Aktivität oder Anomalien hervorhoben. Plötzliche Sprünge oder Verschiebungen in Signalwerten wurden durch farbliche Markierungen sichtbar gemacht, wodurch auffällige Muster schneller erkannt und analysiert werden konnten.
- **Static vs. Dynamic Signal Comparisons:** Zusätzlich ermöglichten Vergleiche zwischen statischen und dynamischen Signalen eine präzisere Fehlererkennung. Ingenieure konnten so zwischen stabilen, unveränderlichen Signalen und variierenden Datenströmen differenzieren. Dies führte zu einer genaueren Identifikation von Abweichungen, wodurch die Treffsicherheit bei der Fehlerdiagnose erheblich verbessert wurde.

3.1.7.4 Erkenntnisse und Lessons Learned

Die Entwicklung und Implementierung fortschrittlicher Datenaggregations- und Visualisierungstools lieferte entscheidende Erkenntnisse über die Komplexität der Fahrzeugdatenanalyse:

- **Datenkomplexität erfordert modulare Lösungen:**

Der modulare Aufbau des Change Extractors spielte eine zentrale Rolle bei der effizienten Verwaltung unterschiedlicher Datenströme. Durch die Möglichkeit, sich an neue Protokolle anzupassen, zeigte das Projekt den Wert flexibler Architekturen auf und stellte sicher, dass die Plattform skalierbar und zukunftssicher bleibt.

- **Visualisierung überbrückt die Lücke zwischen Daten und Erkenntnissen:**

Die Integration interaktiver Visualisierungstools ermöglichten Ingenieuren eine intuitive Erkundung von Datensätzen, wodurch die Analysezeit erheblich verkürzt wurde. Zudem verbesserten Echtzeitvisualisierungen das Situationsbewusstsein während Testfahrten und Simulationen, sodass sofortige Erkenntnisse und fundierte Entscheidungen getroffen werden konnten.

- **Zusammenarbeit fördert Innovation:**

Die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern war entscheidend, um sicherzustellen, dass die Visualisierungstools auf praxisnahe Herausforderungen zugeschnitten waren. Durch kontinuierliche Feedbackschleifen zwischen Entwicklern und Endnutzern konnten die Tools laufend verbessert und an praktische Anforderungen und Nutzererfahrungen angepasst werden.

3.1.7.5 Fazit

Die Phase der Datenaggregation und Visualisierung war ein entscheidender Erfolgsfaktor für das Projekt. Durch die Entwicklung innovativer Werkzeuge wie des Change Extractors und fortschrittlicher Visualisierungsschnittstellen konnte das Team komplexe Fahrzeugdatensätze in verwertbare Erkenntnisse umwandeln. Diese Fortschritte verbesserten nicht nur die Analysefähigkeiten des BDEMS, sondern setzten auch neue Maßstäbe in der Fahrzeugdatenanalyse und ebneten den Weg für zukünftige Innovationen in diesem Bereich.

3.1.8 Systemvalidierung und Test (AP 3.2)

Die Validierung und Testphase des BDEMS war eine entscheidende Projektetappe, um die Funktionalität, Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems zu gewährleisten. In diesem Abschnitt werden die umfassenden Strategien zur Systemvalidierung erläutert, darunter Live-Fahrzeugtests, kontrollierte Laborexperimente und iterative Verfeinerungen, die auf den Testergebnissen basieren.

Bedeutung der Systemvalidierung

In einem Projekt dieser Größenordnung war eine rigorose Teststrategie unerlässlich, um folgende Ziele zu erreichen:

- Überprüfung der Korrektheit der Datenverarbeitungspipelines, um sicherzustellen, dass alle Datenströme korrekt erfasst, verarbeitet und gespeichert werden.
- Identifikation und Behebung von Fehlern und Leistungsengpässen, um eine stabile und effiziente Systemleistung zu gewährleisten.
- Sicherstellung der nahtlosen Integration verschiedener Datenquellen, einschließlich Fahrzeugbus-Systeme (CAN, FlexRay) und spezialisierte Sensoren.
- Validierung der Systemresilienz unter realen und simulierten Bedingungen, um die Belastbarkeit und Ausfallsicherheit der Plattform zu testen.

Die Validierungsmaßnahmen umfassten eine Vielzahl von Testumgebungen und Szenarien, die auf der komplementären Expertise der Projektpartner und den technischen Fähigkeiten der BDEMS-Architektur basierten.

3.1.8.1 Live-Fahrzeugtests

Die Live-Fahrzeugtests boten die direkteste Möglichkeit, die Leistung des BDEMS unter realen Bedingungen zu validieren. Diese Tests wurden in München und Bremen durchgeführt und hatten das Ziel, die Integration des Systems mit realen Fahrzeugkomponenten und Sensoren zu

bewerten. Dabei wurde sichergestellt, dass das System funktionsfähig und zuverlässig in betrieblichen Umgebungen arbeitet.

Ziele der Live-Tests

- **Validierung von FlexRay- und CAN-Bus-Daten:**

Ein zentrales Ziel der Tests war die Validierung der FlexRay- und CAN-Bus-Daten. Das Team überprüfte die Genauigkeit und Synchronisation der erfassten Daten, um sicherzustellen, dass Nachrichten korrekt dekodiert, mit Zeitstempeln versehen und über verschiedene Kanäle hinweg ausgerichtet wurden. Diese Validierung war essenziell, um die Datenintegrität zu gewährleisten und eine reibungslos funktionierende nachgelagerte Analyse zu ermöglichen.

- **Sensorintegration:**

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Live-Tests war die Integration spezialisierter Sensoren, insbesondere der von AMITRONICS bereitgestellten akustischen Sensoren. Diese Sensoren wurden eingesetzt, um Audiodaten in spezifischen Szenarien, wie der Analyse von Bremsgeräuschen, zu erfassen. Dies erforderte eine exakte Synchronisation mit den Fahrzeugbus-Daten, da nur eine präzise zeitliche Abstimmung zwischen den akustischen Signalen und anderen Sensoreingaben eine sinnvolle und genaue Analyse ermöglichen konnte.

Testaufbau und Methodik

Die Testfahrzeuge wurden mit einer Vielzahl von Mess- und Verarbeitungssystemen ausgestattet, um eine umfassende Datenaufzeichnung und -analyse zu ermöglichen:

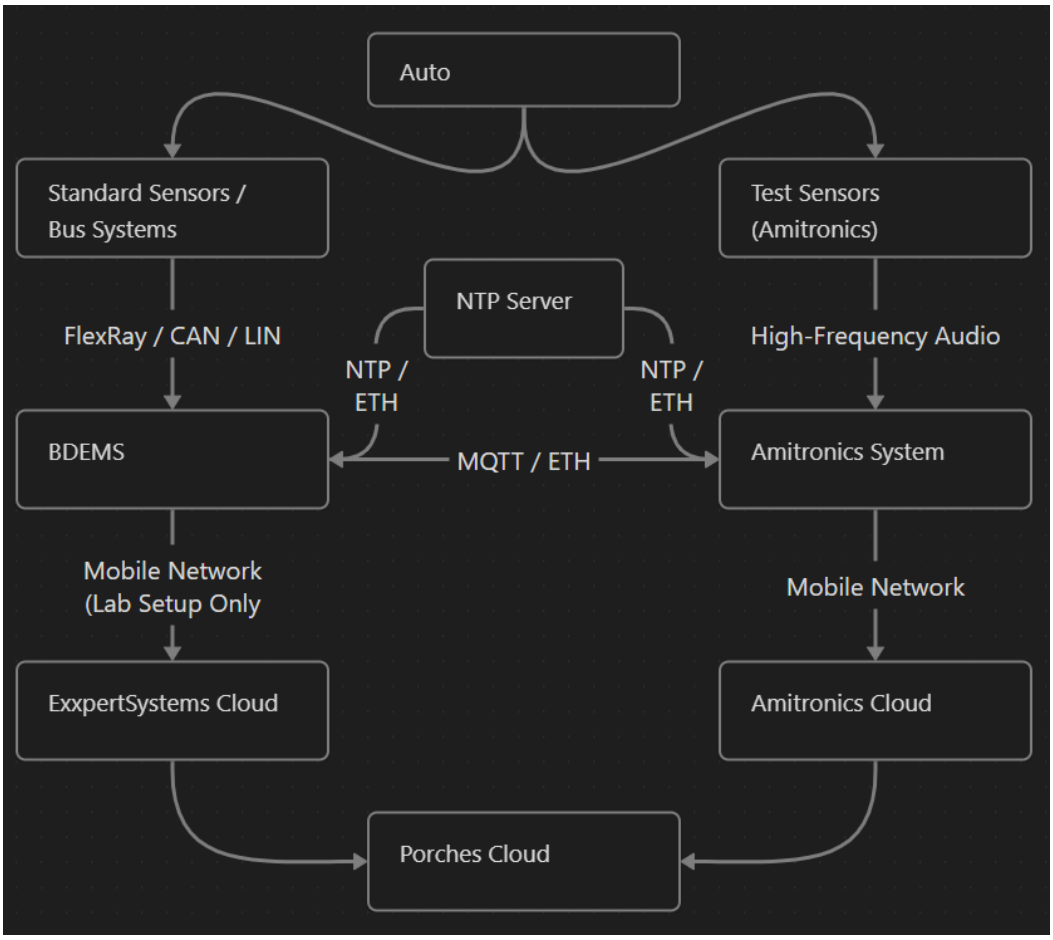

Abbildung 15 – Signalerfassungssystem im Fahrzeug

Ausstattung der Testfahrzeuge:

- **BDEMS-Komponenten**: Enthielten die Basiseinheit zur Datenerfassung und -verarbeitung, die als zentrale Schnittstelle für die Integration verschiedener Datenquellen diente.
- **Sensoren und Messsonden**: Umfassten FlexRay-Sonden, CAN-Bus-Sonden und akustische Sensoren, die für die detaillierte Erfassung und Analyse spezifischer Fahrzeugdaten eingesetzt wurden.
- **Datenaufzeichnungs- und Übertragungssysteme**: Gewährleisteten eine sichere Speicherung aller gesammelten Daten sowie deren Verfügbarkeit für weiterführende Analysen

Testfahrten und vordefinierte Szenarien:

Um die Leistungsfähigkeit des Systems unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten, wurden die Fahrzeuge durch eine Reihe vordefinierter Fahrszenarien gefahren:

- **Städtischer und Autobahnverkehr**: Diente zur Bewertung der Systemleistung unter variierenden Datenlasten und realen Verkehrsbedingungen.
- **Stop-and-Go-Verkehr**: Testete die Synchronisation der erfassten Daten sowie den Umgang mit flüchtigen Ereignissen und schnell wechselnden Datenströmen.
- **Kontrollierte Geräuschszenarien**: Wurden genutzt, um die Genauigkeit der Synchronisation mit der Akustischen Datenerfassung zu überprüfen, insbesondere in Bezug auf Bremsgeräusche und andere relevante akustische Phänomene.

Diese umfassende Testmethodik ermöglichte eine fundierte Bewertung der Zuverlässigkeit, Synchronisation und Datenqualität des BDEMS in verschiedenen realistischen Fahrsituationen.

Wichtigste Ergebnisse der Live-Tests

- **Validierung der Datenverarbeitungspipelines:**

Die Live-Fahrzeugtests spielten eine entscheidende Rolle bei der Überprüfung der Systemfunktionalität und der Identifikation möglicher Optimierungspotenziale. Ein zentrales Ergebnis war die erfolgreiche Validierung der Datenverarbeitungspipelines, die bestätigte, dass sowohl die FlexRay- als auch die CAN-Pipelines die Daten korrekt verarbeiteten, ohne Integritätsverluste oder Synchronisationsprobleme. Diese Validierung demonstrierte die Fähigkeit des Systems, komplexe Fahrzeugdatenströme effizient zu erfassen und zu verarbeiten.

- **Identifikation frühzeitiger Herausforderungen:**

Darüber hinaus ermöglichten die Tests die Früherkennung potenzieller Herausforderungen. Es stellte sich heraus, dass hardwarebedingte Einschränkungen, insbesondere unzureichende Leistung der Testgeräte, die Aufzeichnungsdauer begrenzten und damit die langfristige Datenerfassung beeinträchtigten. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Stromversorgung optimiert und die Systemkonfiguration angepasst, was zu stabileren und längeren Aufzeichnungssitzungen führte. Diese Verbesserungen erhöhten die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Systems erheblich und bereiteten es auf eine breitere Implementierung vor.

3.1.8.2 Labortests und Evaluierungen

Die kontrollierten Experimente im ExxpertSystems-Testlabor spielten eine entscheidende Rolle bei der Validierung des Systems. Sie ermöglichten es dem Team, spezifische Bedingungen gezielt zu reproduzieren und systematisch Fehler zu analysieren. Diese Labortests ergänzten die Live-Fahrzeugtests, indem sie gezielte Untersuchungen zur Systemleistung, Stabilität und Zuverlässigkeit ermöglichten.

Ziele der Labortests

- **Fehleridentifikation und -behebung:**

Ein zentrales Ziel der Labortests war die Identifikation und Behebung kritischer Fehler, die die Systemzuverlässigkeit beeinträchtigen könnten. Das Team konzentrierte sich auf die Erkennung und Analyse von Anomalien oder Ausfällen, die während der Live-Tests beobachtet wurden. Durch detaillierte Root-Cause-Analysen im Labor konnten zugrundeliegende Probleme systematisch untersucht und nachhaltig behoben werden.

- **Systemoptimierung:**

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Optimierung der Systemleistung. Es wurden neue Funktionen wie die asynchrone Laufzeitumgebung und die Datenaggregationsmechanismen auf ihre Effektivität unter verschiedenen Betriebsbedingungen getestet. Zudem wurden Systemkomponenten weiter optimiert, um höhere Datenlasten effizient zu verarbeiten und Latenzen zu minimieren. Diese gezielten Anpassungen verbesserten die Gesamtleistung und Reaktionsfähigkeit des Systems, wodurch es robuster und zuverlässiger für den Einsatz in realen Szenarien wurde.

Behebung des „Atomic Bug“

Einer der kritischsten Fehler, der während der Labortests identifiziert wurde, war der „Atomic Bug“. Dieser führte zu Datenkorruption in der asynchronen Prozessor-Pipeline, da die Speicherzugriffe nicht korrekt synchronisiert wurden.

Um dieses Problem zu lösen, implementierte das Team Spinlocks, die den exklusiven Zugriff auf gemeinsam genutzte Ressourcen sicherstellten. Dadurch wurden Konflikte während paralleler Verarbeitungsprozesse vermieden. Zusätzlich wurden umfangreiche Tests unter verschiedenen Lastbedingungen durchgeführt, um die Wirksamkeit der Lösung zu validieren und die Systemstabilität sowie Datenintegrität langfristig zu gewährleisten.

Abbildung 16 – Atomic Bug

Behebung von FlexRay- und CAN-Problemen

Während der Labortests wurden verschiedene Probleme im Zusammenhang mit FlexRay- und CAN-Datenverarbeitung identifiziert und analysiert. Die Hauptprobleme betrafen Synchronisation, Datenstrukturierung und Speicherverwaltung, die für eine fehlerfreie Kommunikation zwischen Fahrzeugbus-Systemen entscheidend sind.

1. **FlexRay-Payload-Inkonsistenzen:**
    - Es wurden Unstimmigkeiten zwischen der angegebenen und der tatsächlich erfassten Nutzlastgröße in FlexRay-Nachrichten festgestellt. Dies führte zu fehlerhaften Dateninterpretationen und erschwerte die Verarbeitung großer Datenmengen. Zur Behebung dieser Problematik wurden Parsing-Algorithmen verfeinert, um eine präzisere Erkennung und Verwaltung von FlexRay-Payload-Daten zu ermöglichen.

2. **CAN-Erweiterte Identifikatoren:**
    - Bei der Verarbeitung von CAN-Nachrichten mit erweiterten Identifikatoren gab es Kompatibilitätsprobleme, da sich diese Nachrichtenstruktur von Standard-CAN-Frames unterschied. Das System wurde optimiert, um erweiterte Identifikatoren korrekt zu dekodieren und zu verarbeiten, sodass die vollständige Dateninterpretation und Analyse der CAN-Nachrichten sichergestellt wurde.

Durch diese gezielten Anpassungen konnte die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Datenverarbeitung für FlexRay- und CAN-Datenströme erheblich verbessert werden.

Stresstests

Um die Belastbarkeit und Widerstandsfähigkeit des Systems zu validieren, führte das Team umfassende Stresstests unter anspruchsvollen Bedingungen durch. Dabei wurden hochfrequente Datenströme genutzt, um die Durchsatzkapazität und Verarbeitungseffizienz zu bewerten. Ziel war es, sicherzustellen, dass das System große Datenmengen ohne Leistungseinbußen verarbeiten kann.

Zusätzlich wurden simulierte Fehler- und Ausfallszenarien getestet, darunter Netzwerkunterbrechungen, um die Effektivität der Wiederherstellungsmechanismen zu bewerten und die Datenintegrität zu überprüfen. Diese Tests lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Stabilität und Zuverlässigkeit des Systems unter realen Betriebsbedingungen.

Iterativer Verbesserungsprozess

Die Erkenntnisse aus den Live-Fahrzeugtests und Laborevaluierungen flossen in einen iterativen Verbesserungsprozess ein. Durch diesen kontinuierlichen Zyklus konnten Optimierungen systematisch umgesetzt werden, um die Systemleistung und Funktionalität schrittweise zu verbessern und die Anforderungen des Projekts optimal zu erfüllen.

Zusammenarbeit und Feedbackschleifen

Regelmäßige Feedbackschleifen zwischen Testingenieuren, Entwicklern und Projektpartnern spielten eine entscheidende Rolle für den Projekterfolg. Dieser dynamische Austausch ermöglichte die schnelle Identifikation und Behebung technischer Herausforderungen, wodurch das System gezielt weiterentwickelt wurde.

Darüber hinaus sorgte die kontinuierliche Zusammenarbeit mit den Endanwendern dafür, dass deren Erfahrungen und Anforderungen direkt in die Weiterentwicklung der Plattform einflossen. Dies führte zu einer iterativen Verbesserung der Systemarchitektur und stellte sicher, dass die Lösung praxisnah und anwendungsorientiert entwickelt wurde.

Automatisierung von Tests

Zur Optimierung des Validierungsprozesses wurden automatisierte Testfälle entwickelt, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Systems kontinuierlich zu überprüfen. Diese Tests waren darauf ausgelegt, nach jeder Aktualisierung die Korrektheit der Datenverarbeitungspipelines zu verifizieren, um sicherzustellen, dass neue Änderungen keine Fehler oder Inkonsistenzen einführen.

Zusätzlich wurde das automatisierte Testframework zur Überwachung zentraler Leistungskennzahlen eingesetzt, darunter Latenzzeiten, Durchsatzraten und Fehlerraten. Dieser proaktive Ansatz ermöglichte eine kontinuierliche Leistungsbewertung, wodurch potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden konnten.

3.1.9 Erkenntnisse und Lessons Learned

Die Systemvalidierung und Testphase lieferten entscheidende Erkenntnisse, die zukünftige Entwicklungen und Optimierungen maßgeblich beeinflussen werden.

1. **Real-World-Tests sind unverzichtbar**

   Während Laborexperimente essenziell für kontrollierte Untersuchungen sind, haben die Live-Fahrzeugtests ihre unschätzbare Bedeutung bei der Aufdeckung praxisnaher Herausforderungen bewiesen. Viele Probleme, die in der Laborsimulation nicht reproduziert werden konnten, traten erst unter realen Betriebsbedingungen auf. Diese Tests ermöglichten kritische Einblicke in die Systemleistung unter verschiedensten Einsatzszenarien.

2. **Zusammenarbeit ist der Schlüssel zum Erfolg**

   Der Erfolg der Validierungsprozesse wurde maßgeblich durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern bestimmt. Jede Partei brachte ihr spezialisiertes Fachwissen ein, wodurch technische Herausforderungen effektiv bewältigt und eine reibungslose Integration der verschiedenen Systemkomponenten sichergestellt wurde.

3. **Iterative Verfeinerung erhöht die Systemstabilität**

   Eine kontinuierliche Feedbackschleife zwischen Test- und Entwicklungsphase spielte eine entscheidende Rolle bei der Fehlerbehebung und Systemoptimierung. Durch die iterative Verfeinerung konnten Anpassungen und Optimierungen schnell umgesetzt werden, wodurch die Zuverlässigkeit und Robustheit der finalen Plattform sichergestellt wurden.

3.1.9.1 Fazit

Die Systemvalidierungs- und Testphase war ein entscheidender Schritt, um die Zuverlässigkeit und Robustheit des BDEMS zu gewährleisten. Durch die Kombination von Live-Fahrzeugtests und Laborexperimenten konnte das Team kritische Herausforderungen identifizieren und lösen, zentrale Funktionen validieren und die Systemleistung optimieren. Diese umfangreichen

Tests legten das Fundament für eine erfolgreiche Implementierung der Plattform in realen Anwendungen und bestätigten ihre Einsatzbereitschaft für den industriellen Einsatz.

3.1.10 Cloud-Integration und Datenexport

Die Cloud-Integration und der Datenexport waren zentrale Bestandteile des Projekts, um eine nahtlose Speicherung, Weitergabe und nachgelagerte Analyse von Fahrzeugdaten zu ermöglichen. Diese Funktionalitäten stellten nicht nur eine effiziente Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen sicher, sondern bildeten auch die Grundlage für fortschrittliche Analysen und eine skalierbare Infrastruktur. In diesem Abschnitt werden die Herausforderungen, Strategien und Ergebnisse der Cloud-Integration und des Datenexports innerhalb des BDEMS beschrieben.

Die Rolle der Cloud-Integration im Automobilsektor

Moderne Fahrzeugsysteme generieren enorme Datenmengen, die von Fahrzeugbus-Nachrichten bis hin zu spezialisierten Sensorausgaben reichen. Um wertvolle Erkenntnisse zu gewinnen, muss diese Datenflut effizient erfasst, verarbeitet und über verteilte Systeme hinweg zugänglich gemacht werden. Die Cloud-Integration ermöglicht dabei drei wesentliche Vorteile:

1. **Zentrale Datenspeicherung:**

   Die Cloud-Integration erlaubt die Konsolidierung von Daten aus mehreren Fahrzeugen und Testfahrten in einem zentralen Speicher. Dadurch können Daten konsistent erfasst, analysiert und für verschiedene Anwendungen bereitgestellt werden.

2. **Echtzeit-Analysen:**

   Die Nutzung cloudbasierter Rechenkapazitäten ermöglicht die unmittelbare Analyse von Fahrzeugdaten während des Betriebs. Diese Echtzeitanalysen unterstützen dynamische Entscheidungsprozesse, wie beispielsweise die Identifikation von Anomalien oder Predictive Maintenance-Analysen.

3. **Skalierbare Lösungen:**

   Die Cloud-Infrastruktur wurde so konzipiert, dass sie wachsende Datenvolumen und steigende Nutzeranforderungen problemlos bewältigen kann. Dies stellt sicher, dass die Plattform auch für zukünftige Anwendungen, größere Fahrzeugflotten und erweiterte Analysetools flexibel nutzbar bleibt.

Entwicklung einer proprietären Cloud-Infrastruktur

Aufgrund der Komplexität und der hohen Sicherheitsanforderungen bei der Verarbeitung automobiler Daten wurde im Rahmen des Projekts eine proprietäre Cloud-Infrastruktur

entwickelt. Diese diente als kontrollierte Testumgebung und als Prototyp für zukünftige Cloud-Integrationen. Die Lösung wurde gezielt darauf ausgelegt, eine sichere, zuverlässige und effiziente Datenverwaltung während des gesamten Projekts zu gewährleisten.

1. **Sicherer Datentransfer**

   Um sensible Fahrzeugdaten zu schützen, implementierte das System Sicherheitsprotokolle wie VPN- und SSL-Verschlüsselung. Dadurch wurde sichergestellt, dass alle übertragenen Daten vor unbefugtem Zugriff und möglichen Sicherheitsverletzungen geschützt blieben.

2. **Caching und Synchronisation**

   Zur Vermeidung von Datenverlusten bei Netzwerkunterbrechungen wurden automatisierte Mechanismen implementiert. Während Ausfällen wurden die erfassten Daten lokal zwischengespeichert und nach Wiederherstellung der Netzwerkverbindung automatisch mit der Cloud synchronisiert. Diese Maßnahme gewährleistete eine durchgängige Verfügbarkeit und Konsistenz der Daten.

3. **Resilienztests**

   Die Cloud-Infrastruktur wurde entwickelt, um instabile Netzwerkbedingungen zu simulieren, sodass das Team das Systemverhalten unter realen Konnektivitätsherausforderungen testen konnte. Diese Tests ermöglichten eine gezielte Optimierung der Plattform, um Unterbrechungen effizient zu bewältigen und einen unterbrechungsfreien Datenfluss in verschiedenen Einsatzszenarien zu gewährleisten.

Durch die Entwicklung dieser proprietären Cloud-Infrastruktur konnte eine verlässliche Basis für die sichere und skalierbare Verwaltung von Fahrzeugdaten geschaffen werden, die auch zukünftige Cloud-Integrationen und großflächige Implementierungen unterstützt.

Architektur und Implementierung

Die proprietäre Cloud-Infrastruktur wurde innerhalb des ExxpertSystems-Intranets implementiert und nutzte interne Server, um eine maximale Kontrolle und Sicherheit zu gewährleisten. Die Architektur integrierte mehrere Schlüsselelemente, um eine sichere, effiziente und skalierbare Verwaltung von Fahrzeugdaten zu ermöglichen.

Zum Schutz sensibler Fahrzeugdaten wurden sichere Kommunikationsschichten implementiert. Dabei wurden alle Datenübertragungen verschlüsselt und durch robuste Authentifizierungsmechanismen gesichert.

Um eine realitätsnahe Netzwerkumgebung zu simulieren, wurde LTE/5G-Konnektivität über LTE/5G-Dongles integriert. Dadurch konnte das System Netzwerkbedingungen nachbilden, wie sie im realen Fahrzeugbetrieb auftreten, und die Zuverlässigkeit der Datenübertragung unter variierenden Konnektivitätsbedingungen umfassend testen.

Ein dynamisches Caching-System wurde entwickelt, um Datenverluste bei temporären Netzwerkunterbrechungen zu vermeiden. Falls die Verbindung ausfiel, speicherte das System die erfassten Daten lokal zwischen und synchronisierte sie automatisch mit der Cloud, sobald die Konnektivität wiederhergestellt war.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Architektur war ihre Skalierbarkeit. Die Infrastruktur wurde so konzipiert, dass sie schrittweise erweitert werden konnte, indem zusätzliche Fahrzeuge oder Datenquellen integriert wurden, ohne dass eine umfangreiche Neukonfiguration erforderlich war.

Diese modulare und widerstandsfähige Architektur stellte sicher, dass die Cloud-Infrastruktur sowohl für aktuelle Anforderungen als auch für zukünftige Erweiterungen optimiert war.

Datenformat-Standardisierung und Optimierung der Datenexportformate

Um eine effiziente Nutzung der erfassten Daten durch verschiedene Projektbeteiligte und externe Analysesysteme zu gewährleisten, wurde ein besonderer Fokus auf die Optimierung der Datenexport-Funktionalitäten gelegt. Als primäres Exportformat wurde das CSV-Format (Comma-Separated Values) gewählt, da es eine breite Kompatibilität mit verschiedenen Analyse- und Visualisierungstools bietet und sich durch seine einfache Handhabung auszeichnet.

Das System verarbeitete und exportierte interpretierte Signaldaten, indem es Rohsignale in menschenlesbare Formate umwandelte und mit zusätzlichen Metadaten sowie kontextbezogenen Informationen anreicherte. Dies ermöglichte eine bessere Nachvollziehbarkeit der erfassten Fahrzeugdaten. Nutzer hatten zudem die Möglichkeit, individuelle Datensätze zu generieren, indem sie spezifische Signale oder Zeitintervalle auswählten, um gezielte Analysen durchzuführen.

Darüber hinaus wurde der Exportprozess optimiert, um eine effiziente Verarbeitung auch großer Datenmengen sicherzustellen. Dies stellte sicher, dass das System auch bei umfangreichen Datensätzen stabil blieb und keine Leistungseinbußen auftrat. Durch diese Maßnahmen wurde ein leistungsfähiger und flexibler Datenexport realisiert, der die Datenanalyse erleichtert und die Weiterverarbeitung der Daten für verschiedene Anwendungsfälle unterstützt.

Interoperabilitätstests und Optimierung

Um einen nahtlosen Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen zu gewährleisten, wurden umfassende Interoperabilitätstests durchgeführt. Diese Tests überprüften, ob die BDEMS-Ausgaben reibungslos in externe Plattformen integriert werden konnten und ob alle standardisierten Formate korrekt interpretiert wurden.

Zusätzlich wurden Optimierungstechniken zur Reduzierung von Latenzzeiten und Bandbreitenverbrauch implementiert. Diese Maßnahmen minimierten Verzögerungen bei der Datenübertragung und -verarbeitung, sodass der Datenfluss auch unter hoher Last effizient und zuverlässig blieb.

Die automatische Anbindung an die PORSCHE-Cloud war aufgrund administrativer Zugriffsprobleme nicht möglich. Stattdessen erfolgte der Datenaustausch über einen Export aus dem BDEMS und einen anschließenden manuellen Import durch Porsche. Trotz dieser Einschränkung konnte durch den von ExxpertSystems und AMITRONICS gewählten Ansatz einer eigenen Cloud-Infrastruktur als Ersatzlösung sowie durch die Zwischenspeicherung der Daten im Fahrzeug eine vollständige Implementierung und Validierung der geplanten Cloud-Anbindungsfunktionen erfolgen.

Unsere Tests haben gezeigt, dass die nahtlose Anbindung an eine Cloud-Umgebung technisch realisierbar ist, sobald die administrativen Hürden für den Zugriff auf die PORSCHE-Cloud beseitigt sind. Somit wurde erfolgreich nachgewiesen, dass das BDEMS grundsätzlich in der Lage ist, sich automatisch mit externen Cloud-Plattformen zu verbinden und Daten effizient zu übertragen.

3.1.10.1 Fazit

Die Cloud-Integration und der Datenexport waren entscheidend dafür, dass das BDEMS seine Ziele in Bezug auf Skalierbarkeit, Interoperabilität und erweiterte Analysen erreichen konnte. Durch die Entwicklung einer proprietären Cloud-Infrastruktur und die Optimierung der Exportformate wurde sichergestellt, dass automobile Daten effizient über verschiedene Plattformen hinweg geteilt und analysiert werden können. Diese Fortschritte trugen nicht nur zur Erfüllung der unmittelbaren Projektziele bei, sondern schufen auch eine stabile Grundlage für zukünftige Innovationen im Bereich des automobilen Datenmanagements.

3.1.11 Globale Projekt-Herausforderungen, Lösungen & Lessons Learned

3.1.11.1 Herausforderungen und Lösungen

Während des Projekts traten mehrere technische und operative Herausforderungen auf, die gezielte Lösungen erforderten, um die Stabilität und Effizienz der BDEMS-Plattform sicherzustellen.

Netzwerkunterbrechungen und Probleme bei der Datensynchronisation

Instabile Netzwerkverbindungen stellten insbesondere während der ersten Testphasen eine erhebliche Herausforderung dar und beeinträchtigten die Echtzeit-Datenübertragung. Zur Minimierung von Datenverlusten wurde ein robuster Caching-Mechanismus implementiert, der erfasste Daten während Netzwerkausfällen lokal speicherte. Sobald die Verbindung

wiederhergestellt war, sorgten erweiterte Synchronisationsprotokolle für eine nahtlose Wiederherstellung und Integration der gespeicherten Daten.

Zusätzlich führten Synchronisationsprobleme zwischen FlexRay- und CAN-Datenströmen zu Fehlanpassungen in den aufgezeichneten Datensätzen. Dies wurde durch die Einführung verbesserter Synchronisationsprotokolle behoben, die eine präzise zeitliche Korrelation zwischen mehreren Datenquellen gewährleisteten.

Energieversorgungseinschränkungen

Frühe Tests zeigten, dass das Stromversorgungssystem der Testausrüstung die Dauer der Datenerfassung auf etwa zwei Stunden begrenzte. Diese Einschränkung wurde durch ein Upgrade der Strominfrastruktur behoben, wodurch längere Betriebszeiten ermöglicht wurden. Dies war entscheidend für langandauernde Testfahrten, bei denen eine unterbrechungsfreie Datenerfassung erforderlich war.

Systembedingte Fehler und Verarbeitungsprobleme

Ein kritisches Problem, das als "Atomic Bug" bezeichnet wurde, trat in der Prozessorpipeline auf und führte aufgrund einer unsachgemäßen Speicher-Synchronisation zu Datenkorruption. Dieses Problem wurde durch die Implementierung von Synchronisationsprimitiven wie Spinlocks gelöst. Diese wurden umfassend getestet, um Race Conditions zu verhindern und eine stabile Systemfunktionalität sicherzustellen.

Cloud-Integration und Formatkompatibilität

Verzögerungen bei der Integration mit der PORSCHE-Cloud behinderten den direkten Datenaustausch, da administrative Zugriffsprobleme bestanden. Als Alternative wurde eine proprietäre Cloud-Infrastruktur entwickelt, die eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Testung ermöglichte.

Dieser Ansatz erlaubte eine vollständige Validierung der geplanten Cloud-Anbindungsfunktionen und bewies, dass eine vollständige Integration mit externen Cloud-Umgebungen technisch realisierbar ist, sobald die administrativen Hürden beseitigt sind.

Darüber hinaus erforderte die Standardisierung der Datenformate über mehrere Stakeholder hinweg erheblichen Aufwand. Um Kompatibilitätslücken zwischen den BDEMS-Ausgaben und den Anforderungen der Porsche-Cloud zu überbrücken, wurden maßgeschneiderte Parser und Konverter entwickelt, die eine reibungslose Interoperabilität sicherstellten.

3.1.11.2 Globale Erkenntnisse und Lessons Learned

Eine der wichtigsten Erkenntnisse dieses Projekts war die Flexibilität, die durch die Entwicklung einer proprietären Cloud-Infrastruktur ermöglicht wurde. Diese Lösung erlaubte eine

kontrollierte Testumgebung, in der Cloud-bezogene Funktionen optimiert werden konnten, ohne von externen Plattformen abhängig zu sein.

Zudem zeigte das Projekt die Bedeutung robuster Synchronisationsmechanismen und einer skalierbaren Strominfrastruktur auf. Diese Aspekte stellten sicher, dass zukünftige Implementierungen des BDEMS-Systems effizient in verschiedenen Umgebungen betrieben werden können.

3.1.11.3 Projektfazit

Die erfolgreiche Bewältigung dieser Herausforderungen war entscheidend dafür, dass das BDEMS-System seine Ziele hinsichtlich Skalierbarkeit, Interoperabilität und erweiterter Analysen erreichen konnte.

Durch die Lösung von Problemen wie Netzwerkinstabilität, Synchronisationsfehlern, Cloud-Integrationsbeschränkungen und Hardware-Limitierungen wurde eine stabile Grundlage für zukünftige Innovationen im Bereich des automobilen Datenmanagements geschaffen.

3.1.12 Zusammenfassung und Ausblick

Empfehlungen und strategische nächste Schritte

Der erfolgreiche Abschluss dieses Projekts hat eine solide Grundlage für zukünftige Fortschritte im Bereich des automobilen Datenmanagements geschaffen. Aufbauend auf diesen Erfolgen werden in den folgenden strategischen Schritten Möglichkeiten für weiterführende Initiativen und Geschäftsentwicklung aufgezeigt. Diese Empfehlungen heben das erhebliche Potenzial der im Projekt erzielten Ergebnisse hervor und definieren Wege, um diese für weitreichendere Anwendungen und Innovationen zu nutzen.

1. Erweiterung der Cloud-Integrationsfähigkeiten

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollten genutzt werden, um die Integration mit umfassenden Cloud-Plattformen, wie der Porsche-Cloud, weiterzuentwickeln. Durch die Schaffung fortschrittlicher Datenübertragungsmöglichkeiten wird eine Echtzeit-Analyse ermöglicht, die dynamische Entscheidungsfindung und vorausschauende Wartung unterstützt.

2. Weiterentwicklung der Datenexportmechanismen

Aufbauend auf der erfolgreichen Implementierung des CSV-Formats sollten weitere branchenübliche Exportformate integriert werden, um die Kompatibilität mit sich entwickelnden Analysesystemen zu gewährleisten. Zudem sollten Optimierungen im Exportprozess untersucht werden, um spezielle Anwendungsfälle, wie hochauflösende Datenanalysen oder KI-gestützte Modellierungen, besser zu unterstützen.

Ein weiteres Ziel zukünftiger Projekte sollte die Erweiterung der Cloud-Integration sein, sodass externe Cloud-Systeme in der Lage sind, direkte Abfragen an das BDEMS durchzuführen. Das BDEMS unterstützt diese Funktionalität bereits out-of-the-box, indem es eine dynamische Datennutzung und gezielte Abfragen ermöglicht. Allerdings konnte die Cloud-Infrastruktur im Projekt diese Funktionalität nicht nutzen, da sie ausschließlich für den Import statischer Exportdateien ausgelegt war.

Zukünftige Entwicklungen sollten darauf abzielen, die Cloud-Systeme entsprechend zu erweitern, sodass Cloud-Plattformen gezielt auf relevante Fahrzeugdaten zugreifen können, anstatt ausschließlich auf vordefinierte Exportdateien angewiesen zu sein. Dies würde eine flexiblere Nutzung der Fahrzeugdaten in Echtzeit realisieren und die Effizienz der Datenanalyse erheblich steigern, indem relevante Informationen bei Bedarf direkt aus dem BDEMS abgerufen werden können.

3. Erweiterung der Datenaggregation und Visualisierung

Die Optimierung der Change Extractor-Methoden wird dazu beitragen, komplexe Sonderfälle besser zu bewältigen und tiefere Erkenntnisse aus irregulären Datenmustern zu gewinnen. Gleichzeitig sollten Visualisierungstools erweitert werden, um anpassbare, benutzerdefinierte Ansichten und fortschrittliche Analysefunktionen bereitzustellen, die eine effizientere Entscheidungsfindung für die Stakeholder ermöglichen.

4. Ausweitung von realen Testszenarien und Validierungen

Das während des Projekts entwickelte robuste Testframework sollte genutzt werden, um umfangreiche Testfahrten unter verschiedenen geografischen und klimatischen Bedingungen durchzuführen. Zudem sollten neue Testszenarien mit Fokus auf neue Fahrzeugsysteme und Sensorintegrationen eingeführt werden, um sicherzustellen, dass die Plattform langfristig zukunftssicher bleibt.

5. Erforschung neuer Anwendungsbereiche

Die Fähigkeiten des BDEMS-Systems sollten auf neue Anwendungsfelder wie autonome Fahrzeugsysteme, Flottenmanagementlösungen und fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme ausgeweitet werden. Dank der modularen und skalierbaren Architektur kann das System flexibel auf neue Marktanforderungen und Partnerbedürfnisse zugeschnitten werden.

6. Förderung der branchenübergreifenden Zusammenarbeit

Die Partnerschaften mit führenden Unternehmen, akademischen Einrichtungen und Technologieinnovatoren sollten weiter ausgebaut werden, um die Akzeptanz und Weiterentwicklung der entwickelten Lösungen zu beschleunigen. Zukünftige Kooperationsprojekte sollten sich auf neue Herausforderungen konzentrieren, darunter Nachhaltigkeit und Smart City-Integrationen.

7. Investitionen in Schulungen und Wissensverbreitung

Die im Projekt entwickelte Expertise und Methodik sollten mit internen Teams und externen Stakeholdern geteilt werden. Die Organisation von Schulungen, Webinaren und Workshops wird dazu beitragen, die praktische Anwendung der Plattform zu demonstrieren und deren breitere Akzeptanz und Nutzung zu fördern.

8. Förderung von Innovationen durch kontinuierliche Verbesserungen

Ein kontinuierlicher Feedbackprozess sollte etabliert werden, um Erfahrungen aus Tests, Benutzerfeedback und neue Technologien in die Weiterentwicklung der Plattform zu integrieren. Zudem sollten KI-gestützte Datenverarbeitung und Mustererkennung weiter erforscht werden, um die Analyse- und Vorhersagefähigkeiten der Plattform zu verbessern.

9. Fokus auf Kommerzialisierungsmöglichkeiten

Geschäftsmodelle sollten entwickelt werden, um das Potenzial der Plattform weiter auszuschöpfen, einschließlich Lizenzierungsoptionen, Software-as-a-Service (SaaS)-Angeboten und Kooperationen mit OEMs und Tier-1-Zulieferern. Die Präsentation der Plattform auf Branchenveranstaltungen sowie gezielte Marketingkampagnen werden dazu beitragen, neue Geschäftspartner und Kunden zu gewinnen.

10. Erweiterung des Nachhaltigkeitsfokus

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten untersuchen, wie die Plattform zur Energieeffizienz und Emissionsreduzierung in der Automobilbranche beitragen kann. Umweltbezogene Aspekte sollten in die nächsten Entwicklungsphasen integriert werden, um das System an globale Nachhaltigkeitsziele anzupassen.

Die in diesem Projekt erzielten Erfolge haben das Team und alle Beteiligten in eine starke Position für weiteres Wachstum und Innovationen gebracht. Diese strategischen nächsten Schritte dienen als Fahrplan, um die Ergebnisse des Projekts weiter zu nutzen und bedeutende Fortschritte in der Automobil- und Technologiebranche voranzutreiben.

Fazit

Das Projekt hat erfolgreich eine einheitliche Plattform für die Erfassung und Analyse von Fahrzeugdaten entwickelt und dabei kritische Herausforderungen gemeistert. Durch umfangreiche Tests konnte die Leistungsfähigkeit der Plattform unter realen Bedingungen nachgewiesen werden.

Die Fortschritte in den Bereichen FlexRay- und CAN-Datenverarbeitung, Visualisierungstools und Cloud-Integration haben eine robuste und skalierbare Grundlage für eine industriegerechte Lösung geschaffen.

Zukünftige Arbeiten werden sich auf die finale Cloud-Integration, die Optimierung der Datenexportformate und die Erweiterung der Testfälle konzentrieren, um die Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit der Plattform weiter zu gewährleisten.

4 Der voraussichtliche Nutzen

Für ExxpertSystems werden die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten als sehr positiv eingeschätzt.

4.1 Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Verlauf des Projekts konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen und wesentliche Fortschritte erzielt werden, die auf ein erhebliches Potenzial für die Erweiterung des bestehenden Produktportfolios um eine weitere innovative Lösung hinweisen. Diese Entwicklungen schaffen eine fundierte Grundlage für eine strategische Weiterentwicklung, nicht nur im Bereich der Automobilindustrie, sondern auch in angrenzenden Industriezweigen. Insbesondere bestehen vielversprechende Perspektiven in den Sektoren Luft- und Raumfahrt, maritimer Industrie und Energie, in denen auch ein zunehmender Bedarf an fortschrittlichen Lösungen für die Produkt- und Systementwicklung sowie deren Erprobung erkennbar ist. Die Markteinführung des neuen Produkts ist im Verlauf der nächsten zwölf Monate vorgesehen.

4.2 Planungen für die nähere Zukunft:

Basierend auf dem im Projekt erworbenen Wissen planen wir, unser Produktportfolio in naher Zukunft gezielt weiterzuentwickeln. Im Fokus stehen dabei zunächst die Weiterentwicklung der Datenexportmechanismen sowie die Optimierung der Datenaggregation und -visualisierung. Durch die Integration zusätzlicher Exportformate und die Anpassung der Exportprozesse sollen insbesondere komplexe Anwendungsfälle, wie etwa KI-gestützte Analysen, besser unterstützt werden. Parallel dazu sollen die Visualisierungstools erweitert werden, um differenzierte, nutzerspezifische Einblicke in umfangreiche Datensätze zu ermöglichen und die Entscheidungsfindung im Entwicklungs- und Testkontext zu verbessern.

Darauf aufbauend ist geplant, die Cloud-Integrationsfähigkeit unserer Systeme weiter auszubauen. Ziel ist es, künftig eine effizientere und flexibel skalierbare Nutzung von Fahrzeugdaten in Echtzeit zu realisieren und so die Grundlage für fortschrittliche datengetriebene Anwendungen im Bereich des vernetzten Testens zu schaffen. Als Konsequenz haben wir diese Ergebnisse aus dem Projekt als Antrieb genutzt, um die erworbenen Fähigkeiten und das erweiterte Produktportfolio in der Automobilindustrie sowie in anderen Sektoren und Industriezweigen, einschließlich der Luft- und Raumfahrt, anzubieten bzw. einzusetzen.

5 Fortschritt der anderen Stellen

Im Verlauf des Projekts konnten seitens ExxpertSystems keine wesentlichen Fortschritte anderer Akteure im relevanten Themenbereich festgestellt werden. Zur Beobachtung möglicher externer Entwicklungen wurden regelmäßig Markt- und Literaturanalysen durchgeführt, ergänzt durch einen kontinuierlichen Austausch mit bestehenden und potenziellen Kunden sowie Partnerunternehmen.

6 Veröffentlichungen

ExxpertSystems war auf der ILA 2024. Wir haben diese Gelegenheit genutzt, um unser Produktportfolio den Kunden der Luft- und Raumfahrt näher zu bringen.

6.1 Geplante Veröffentlichungen

Auf unserer Website möchten wir als kostenloses Angebot dort Demonstrationen sowie Informationsveranstaltungen erlebbar machen.

Die im Projekt entwickelte Expertise und Methodik sollten mit internen Teams und externen Stakeholdern geteilt werden. Die Organisation von Schulungen, Webinaren und Workshops wird dazu beitragen, die praktische Anwendung der Plattform zu demonstrieren und deren breitere Akzeptanz und Nutzung zu fördern.