



Sachbericht KI-MUSIK 4.0

Teil I - Kurzbericht

Vorhabenbezeichnung: KI-MUSIK4.0: Mikroelektronik-basierte universelle Sensor-Schnittstelle mit Künstlicher Intelligenz für Industrie 4.0	
Zuwendungsempfänger: Schaeffler Technologies AG & Co KG	Förderkennzeichen 16ME0066K
Projektleiter René Grünke	Berichtszeitraum 01.04.2020 - 31.12.2023

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ME0066K gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Realisierung autonomer, hochintegrierter Multisensor-Systeme mit verteilter, dezentraler, echtzeitfähiger Daten- und Informationsverarbeitung basierend auf Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) und des Maschinellen Lernens (ML). Das Vorhaben hat einen signifikanten Beitrag zur Umsetzung von Industrie 4.0 geleistet, etwa hinsichtlich der Steigerung der Effizienz, Flexibilität und Autonomie von Produktionsanlagen, der durchgängigen Digitalisierung sowie der Zustandsüberwachung und prädiktiven Wartung. Weitere Garantien für eine erfolgreiche Verwertung der Projektergebnisse waren die Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette durch das Konsortium, vom Sensor bis hin zur Integration in unterschiedliche Produktionsprozesse, die Skalierbarkeit der Ergebnisse und die Orientierung am Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0).

2. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben und die Arbeiten von Schaeffler gliedern sich in neun Arbeitspakete (AP). Diese waren über einen Zeitraum von 36 Monaten geplant. Aufgrund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Beeinträchtigungen musste die Projektdauer des Gesamtprojekts kostenneutral auf 45 Monate erweitert werden. Im AP 0 „Projektmanagement“ war die Projektadministration und Koordination verankert. Im AP 1 „Anwendungsanalyse und Funktionsspezifikation“ wurden mehrere Anwendungen hinsichtlich ihrer Anforderungen und Spezifikationen untersucht sowie relevante Prozesse, Messgrößen und Sensortypen definiert. Im AP 2 „Technische Detailkonzeption & Spezifikation“ wurden auf Basis der Anwendungsspezifikationen technische Detailspezifikationen für die einzelnen Forschungsaspekte erstellt. Im AP 3 „KI-Methoden, -Modelle, -Algorithmen“ wurde ein KI-Methodenpool für maschinelles Lernen erforscht

mit dem Ziel, die Erzeugung und Nutzung von ML-Modellen breit anwendbar zu machen. Im AP 4 „KI Hardware-Konzepte, Schaltungen und Systeme“ erforschte Schaeffler erforscht die notwendigen KI-Hardware-Konzepte und Komponenten im Produktionsumfeld, um die optimale Passgenauigkeit bei der späteren Integration zu erzielen. Im AP 5 „Definition des KI-Systems und KI basierte Datenverarbeitung und Echtzeit-Prozesssteuerung“ wurden konkrete Algorithmen und Software-Komponenten erforscht und evaluiert, die als ein verteiltes KI-System in den verschiedenen Use-Cases eingesetzt wurden. Im AP 6 „KI-Sensorkonzepte und -Sensordatenfusion“ hat Schaeffler mit den anderen Partnern verschiedene Sensorarten hinsichtlich Wirksamkeit, Einfluss, Rückkopplung bis hin zum virtuellen Sensor untersucht. Zusätzlich wurden druckempfindlichen Sensorschichten auf Eignung für reale Prozesse erforscht. Im AP 7 „Systemintegration und Funktionsverifikation“ wurden die Ergebnisse aus AP3 bis 6 vereint und die erreichten Ergebnisse der Funktionsverifikation zur Validierung der in AP2 erstellten Spezifikation hergenommen. Im letzten AP 8 „Demonstration und Auswertung“ wurden die Ergebnisse in den Anwendungen demonstriert und entsprechende Daten zur Bewertung aufgenommen. Final wurden die Ergebnisse aus der Demonstration gegenüber der Anwendungsanalyse validiert.

3. Wesentliche Ergebnisse

Die Schwerpunkte des Projektvorhabens waren die Detailspezifikationen der Anwendungsfälle, die Gesamtarchitektur, die Erforschung des Maschinellen Lernens zur Zustands- und Schadenserkennung in den Anwendungen, der Hardware-Entwurf für die „KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform“ sowie die Untersuchung der Sensor-Funktions-schicht. Die Projektergebnisse wurden auf vielen öffentlichen Veranstaltungen vorgestellt, z.B. Halbzeittreffen vor dem Mikrosystemtechnik-Kongress 2021, HMI 2022, Festo.io 2023, DAGA 2022, 2023 und 2024. Mehrere Dissertationen und studentische Arbeiten konnten von den Projekteinhalten / -ergebnissen profitieren und wurden somit in Wissenschaft und Lehre präsent. Die erreichten Ergebnisse wurden mit den entsprechenden Demonstratoren während des Abschlusstreffens von den Partnern erfolgreich vorgestellt.

Herzogenaurach

14.05.2025

i.V.

Ort

Datum

Unterschrift

i.V.

Unterschrift

BMBF-Verbundprojekt: KI-MUSIK4.0

Teilvorhaben:

KI im Kontext eines I4.0-fähigen Gesamtsystems

zum Gesamtvorhaben:

KI-MUSIK4.0: Mikroelektronik-basierte universelle Sensor-Schnittstelle mit Künstlicher Intelligenz für Industrie 4.0

Zuwendungsempfänger: Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Industriestraße 1-3
91074 Herzogenaurach

Förderkennzeichen: 16ME0066K
Projektlaufzeit: 1. April 2020 – 31. Dezember 2023 (verlängert)
Berichtszeitraum: 1. April 2020 – 31. Dezember 2023

Ansprechpartner:

Projektleitung:

René Grünke

Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Industriestraße 1–3
91074 Herzogenaurach (Germany)

Tel. +49 9132 82-6210

[E-Mail: rene.gruenke@schaeffler.com](mailto:rene.gruenke@schaeffler.com)

Administrative Betreuung:

Selma Wechler

Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Industriestraße 1–3
91074 Herzogenaurach (Germany)

Tel. +49 9132 82-86859

[E-Mail: selma.wechler@schaeffler.com](mailto:selma.wechler@schaeffler.com)

Inhalt

1.	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse	3
1.1	Arbeitsergebnisse	3
1.2	Ergebnistransfer/Kooperation	36
2.	Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung	37
3.	Änderung der Aussichten zur Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Kostenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag	38
4.	Bekannt gewordene FE-Ergebnisse Dritter, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind	38
5.	Notwendige Änderung der Zielsetzung	38
6.	Fortschreibung des Verwertungsplans	38
6.1	Gemachte Erfindungen, vorgenommene Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte	38
6.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	38
6.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	39
6.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	39

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

1.1 Arbeitsergebnisse

Im Schatten der Corona-Zeit und den angeordneten teilweise extremen Maßnahmen konnte das Projekt KI-MUSIK4.0 nur durch eine 9-monatige kostenneutrale Projektverlängerung am 31. Dezember 2023 erfolgreich beendet werden. Produktionsstopps, Lieferverzögerungen, die Zerstörung von Unternehmen und Arbeitsplätzen, das Aussprechen von Arbeitsverboten, die Ausgrenzung von Menschengruppen, um nur einige Beispiele zu nennen, führten zu Abweichungen im Projektplan. Diesen besonderen Umständen geschuldet kam es zeitweise zur Häufung von Herausforderungen in Bezug auf die Zusammensetzung der Projektteams innerhalb des Konsortiums (Fluktuation, Finanzierung, Priorisierung, Verlagerung, Neuorganisation, Betriebschließung, etc.).

Trotz dieser widrigen Rahmenbedingungen stellten 9 von 12 Partner des Verbundprojektes die Projektergebnisse im Januar 2024 während des Abschlusstreffens in Herzogenaurach erfolgreich vor. Die anderen drei Partner haben das Projekt bereits vorher aus unterschiedlichen Gründen erfolgreich beendet bzw. waren kurzfristig verhindert.

Während der Projektlaufzeit arbeiteten alle Projektpartner sehr gut zusammen, ergänzten sich und organisierten gemeinsam den Projektfortschritt. Als Konsortialführer koordinierte Schaeffler mit den Partnern den möglichst reibungslosen Ablauf der Forschungsarbeiten. Schaeffler übernahm im Projekt eine Art Ausgleichs- bzw. Klammerfunktion. Während der eine oder andere Partner zeitweise durch oben genannte Maßnahmen intern wie extern Herausforderungen zu bewältigen hatte, sprang Schaeffler soweit möglich ein, um diesen „Verlust“ zu kompensieren. Auch dieser Klammerfunktion ist es zu verdanken, dass das Konsortium während der Zeit des „politischen und wirtschaftlichen Ausnahmezustandes“ sehr gut zusammenhielt. Das wurde von vielen Projektpartnern wiederholt angemerkt bzw. bestätigt.

Die enge Zusammenarbeit und Vernetzung mit den Partnern, die Kompetenzen über die gesamten Wertschöpfungsketten sowie die exzellenten Erfahrungen in der Projektarbeit, zeigten sich als wesentliche Grundlage für die erzielten äußerst positiven Arbeitsergebnisse trotz der Corona-Zeit.

Zu jedem aktiven Arbeitspaket wurde bedarfsweise im 2-wöchigen Turnus der Fortschritt berichtet und weitere Arbeitsschritte diskutiert bzw. festgelegt. Das waren wöchentlich 2 und mehr Regeltermine je nach Beteiligung an den einzelnen Arbeitspaketen. Hinzu kamen bilaterale Online-Meetings und zusätzliche virtuelle Arbeitsgruppen. Somit war der Abgleich der Arbeitsstände zum größten Teil gewährleistet. Fehlende wertvolle persönliche Treffen, direkte Diskussionen und Absprachen konnten mit diesem zeitlichen Mehraufwand teilweise ausgeglichen werden.

Abschlussbericht



Lediglich das Halbzeittreffen im November 2021 in Ludwigsburg wurde als Präsenzveranstaltung mit entsprechenden Beschränkungen organisiert. Ein Teil des Konsortiums hatte so die Möglichkeit andere Projektpartner das erste Mal persönlich zu treffen und kennen zu lernen. Das 2. Jahrestreffen beim Projektpartner Hahn-Schickard im Mai 2022 in Villingen-Schwenningen wurde als Hybridtreffen mit entsprechenden Einschränkungen (3G) organisiert, ebenso das Treffen bei Fraunhofer IMS in Duisburg. Glücklicherweise konnte das Abschlusstreffen in Herzogenaurach ohne Einschränkungen im Hause Schaeffler im Januar 2024 ausgetragen werden. Dort standen sich viele Teilnehmer nach fast 4 Jahren Projektlaufzeit das erste Mal persönlich gegenüber. Somit war das Abschlusstreffen gleichzeitig das Kickoff-Event des direkten persönlichen Austausches.



Abschlussbericht

Zu Arbeitspaket 1:

Das erste Arbeitspaket wurde mit einer Corona-bedingten Verzögerung von 6 Monaten abgeschlossen, das heißt Ende März 2021. Das bedeutet, dass die Anwendungsfälle inkl. der Randbedingungen wie z.B. Systemgrenzen, Schnittstellen, Echtzeitanforderungen, Bandbreiten, Datenmengen, Datenfluss bis hin zu Anforderungen an die Systemarchitektur gemeinsam mit den Partnern erarbeitet und soweit möglich festgelegt wurden. Diese wurden in den nachfolgenden Arbeitspaketen bei Bedarf nachjustiert bzw. adaptiert.

Während der Anwendungsanalyse und Spezifikationsphase wurden intensive Gespräche, Recherchen und Online-Workshops mit den Projektpartnern sowie Schaeffler-intern durchgeführt. Ziel war es, geeignete Anwendungsfälle zu beschreiben, welche die Demonstrationen der zu erforschenden Mikroelektronik-basierten universellen Sensorschnittstellen mit künstlicher Intelligenz für Industrie 4.0 mit der erforderlichen Funktions- und Detailtiefe hinreichend zulassen und zukunftsfähig Nutzen stiften.

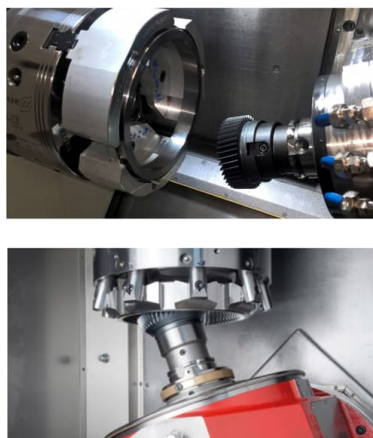
Um ein gemeinsames Verständnis für die Aufgabenstellungen zu schaffen, hatte Schaeffler, neben den Vorschlägen anderer Partner, sechs Anwendungsfälle vorgestellt, Details beschrieben und mit den Projektpartnern untersucht, welche Möglichkeiten bestehen, den anspruchsvollen Anforderungen gerecht zu werden. Bei der Auswahl dieser Anwendungsfälle wurde darauf geachtet, dass die Anwendungen selbst miteinander vernetzt sind. So werden z.B. die Werkstücke aus dem Wälzschälprozess in Getriebe von elektrischen Antrieben montiert. Angetriebene Werkzeuge sind wiederum Bestandteil der zerspanenden Produktionsprozesse. Mit Hilfe der Anwendung „Partikel im Wälzlager“ wurde der Bereich rotierende Systeme untersucht (z.B. angetriebene Werkzeuge, zerspanende Produktionsprozesse, elektrische Antriebe / Aktuatoren, Windenergieanlagen).

Eine Übersicht der seitens Schaeffler vorgeschlagen sechs Hauptanwendungsfälle ist in Abbildung 1 dargestellt:

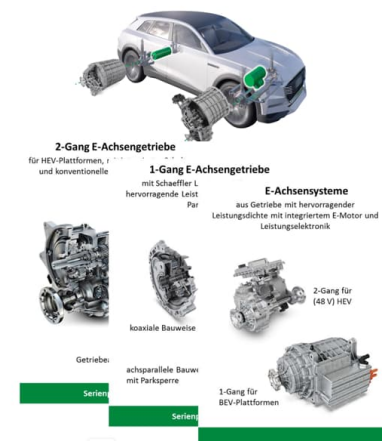
Angetriebene Werkzeuge



Zerspanen, Wälzschälen, ...



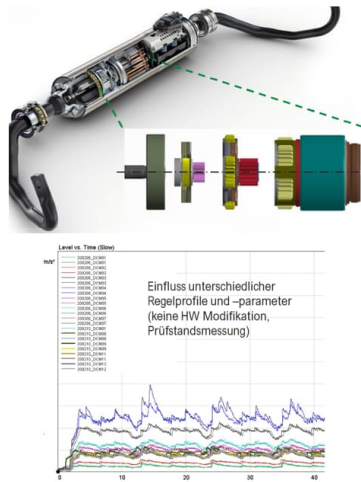
Elektrische Antriebe / Achsen



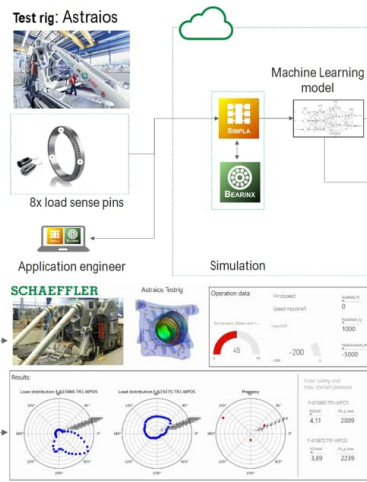
Abschlussbericht



Elektromechanischer Aktor



Windkraft



Wälzlager (Partikel, Verschmutzung)

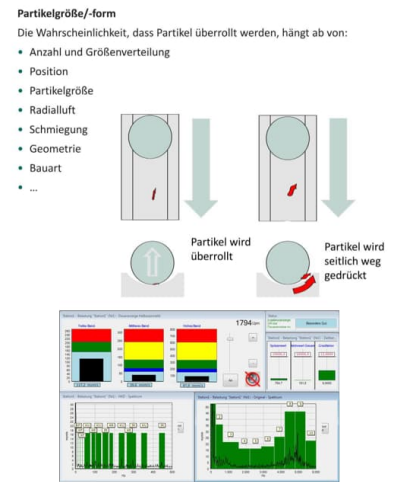


Abbildung 1: Sechs Hauptanwendungsfälle seitens Schaeffler

So war es möglich, Untersuchungsergebnisse aus den einzelnen Anwendungen miteinander zu harmonisieren und über den Tellerrand der jeweils unterschiedlichen Anwendungen hinaus, die Gesamtzusammenhänge von zum Beispiel dem Produkt Wälzlager über das Werkstück Hohlrund bis hin zum komplexen elektrischen Antrieb zu betrachten sowie Einflussgrößen im Gesamtkontext zu erkennen und zu berücksichtigen.

Zusammen mit den Anwendungsfällen der Partner Festo und IMS-Gear wurden Anforderungen erarbeitet und in einem gemeinsamen Anforderungskatalog überführt. Die Komplexität und Vielfalt dieser Anforderungen wurde schnell sichtbar. Dem gegenüber stand die ressourcen- und energieeffiziente Umsetzung möglicher Hard- und Softwarelösungen.

Abbildung 2 zeigt einen Auszug aus dem gemeinsamen Anforderungskatalog, hier beispielhaft für die Schaeffler-Anwendungen.

Use-Case/Komponenten	Inputs												Output		
	Luftschall	Ultraschall	Körperschall		Kraft / Drehmoment	Druck, Abstand	Strom	Temperatur	Takt / Drehzahl impulse	CAN / Flexray / ODB	Variablem Ausgang für verschiedene Signalformen/-typen	Ausgang (Drehzahl)	Trigger Ausgang (Spannung)		
Kanaltyp Qualitativ (Dynamik / Zeit)	Middle Resolution	High Resolution	Middle Resolution	Middle Resolution	Middle Resolution	Low Resolution	Middle Resolution	Low Resolution	Binary / Very High	Low Resolution	Middle Resolution	Binary / Very High	Low Resolution		
Sensortyp / Messprinzip	Mic bzw. analoge Spannung	Luftultraschall, Doppler (Materialtest, Durchfluss, AE)	MEMS (auch Luftschall, Gyro)	Piezo	resistiv, DMS	analoge Spannung (Hall, Laser)	Abgriff über Shunt / Referenzspannung (auf der Sensor-Platine)	PT100, Typ-K	Gate	Serial (Rohdaten, Realtime DBC Dekodierung)	HC-analog Ausgang (Übertragungsfunktion)	Gate (PWM)	analoge Spannung		
Schnittstelle	0 - 10 V	0 - 10 V	I ² C, SPI	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V	0 - 10 V		
Optionale Versorgung/Peripherie	48 V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Vorspannung (ICP/IEPE)	ICP/IEPE	-	-	ICP/IEPE	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Wandler (ADC)	24 Bit / Sigma Delta	24 Bit / Sigma Delta	24 Bit / Sigma Delta	24 Bit / Sigma Delta	24 Bit / Sigma Delta	16 Bit	24 Bit / Sigma Delta	16 Bit	8 Bit	16 Bit	24 Bit / Sigma Delta	8 Bit	16 Bit		
Total harmonic Distortion (THD)	<0.01%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	<1%	<0.01%	<1%	<5%	<1%	<0.01%	<5%	<1%		
mind. Rauschabstand dB ₀ FS (SNR)	120 dB	120 dB	120 dB	120 dB	120 dB	90 dB	90 dB	90 dB	42 dB	90 dB	120 dB	42 dB	90 dB		
Variable Entzerrung bzw. Kalibrierkennlinie (FIR) / Sensitivity	x	x	x	x	x	x	Selbstkalibrierung	x	-	-	x	-	-		
DC-AC Kopplung: (Schaltbares Hochpass FIR) / Anti-alias (TP)	x/x	x/x	x/x	x/x	x/x	x/x	x/x	x/x	x/x	-	x/x	x/x	x/x		
Nennimpedanz / Übersprechen / Phase Distortion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Abtastrate	192 kHz	>=400 kHz	192 kHz	192 kHz	192 kHz	5 kHz	192 kHz	5 kHz	5 MHz	5 kHz	192 kHz	5 MHz	5 kHz		
üblicherweise genutzter Freq.-Bereich	<20 kHz	>20 kHz	<6 kHz	<20 kHz	<20 kHz	<1 kHz	<20 kHz	<1 kHz	<20 kHz	<1 kHz	2 MHz	2 MHz	<1 kHz		
Anzahl Sensorsignale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Anzahl Hardware-Kanäle / Gesamtbandbreite	4	2	12	12 (4 x Triax)	12 (4 x Triax)	4	2	2	4	2	1	1	1		
Schaeffler	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Angetriebene Werkzeuge	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Wälzschalen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Elektrische Antriebe / Achsen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Elektromechanischer Aktuator	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Windenergieanlage	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Wälzlager	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		

Abbildung 2: Auszug aus dem gemeinsamen Anforderungskatalog



Abschlussbericht

Die Vielfalt der Messgrößen, die Schnittstellen, die geforderte Auflösung, der minimale Rauschabstand oder die Abtastraten waren Herausforderungen, die uns im Projekt begleitet haben. Mit Hilfe eines modularen Hardwarekonzeptes wurden generische Lösungsansätze erforscht, die passend für alle definierten Anwendungen der Projektpartner konfigurierbar sein sollten. Ziel war es, die Lösungsansätze in Hard- und Software möglichst zu einer gemeinsamen modularen Entwicklungsplattform zusammenzuführen. Dieser Zielkonflikt konnte im Verlauf des Projektes zu einem großen Teil gelöst werden.

Für eine effiziente Zusammenarbeit der Partner im Projekt wurde sich auf Austauschformate wie z.B. ASAM MDF4 oder ONNX verständigt. Vorschläge für den Austausch von Audiosignalen (z.B. AES67) oder OPC UA als ein möglichen Datenaustauschstandard für die industrielle Kommunikation wurden betrachtet und zum Teil berücksichtigt. Zeitaufwändige und fehleranfällige Konvertierungen bzw. Parallelarbeiten in unterschiedlichen Systemen konnten so weitestgehend vermieden werden.

Abschließend wurden im AP1 Funktionsspezifikationen für die jeweiligen Anwendungsfälle erarbeitet. Grundlage waren die Vorarbeiten im AP1 sowie die in AP2 entwickelten Blockdiagramme als Teil der Gesamtarchitektur, vgl. Abbildung 3.

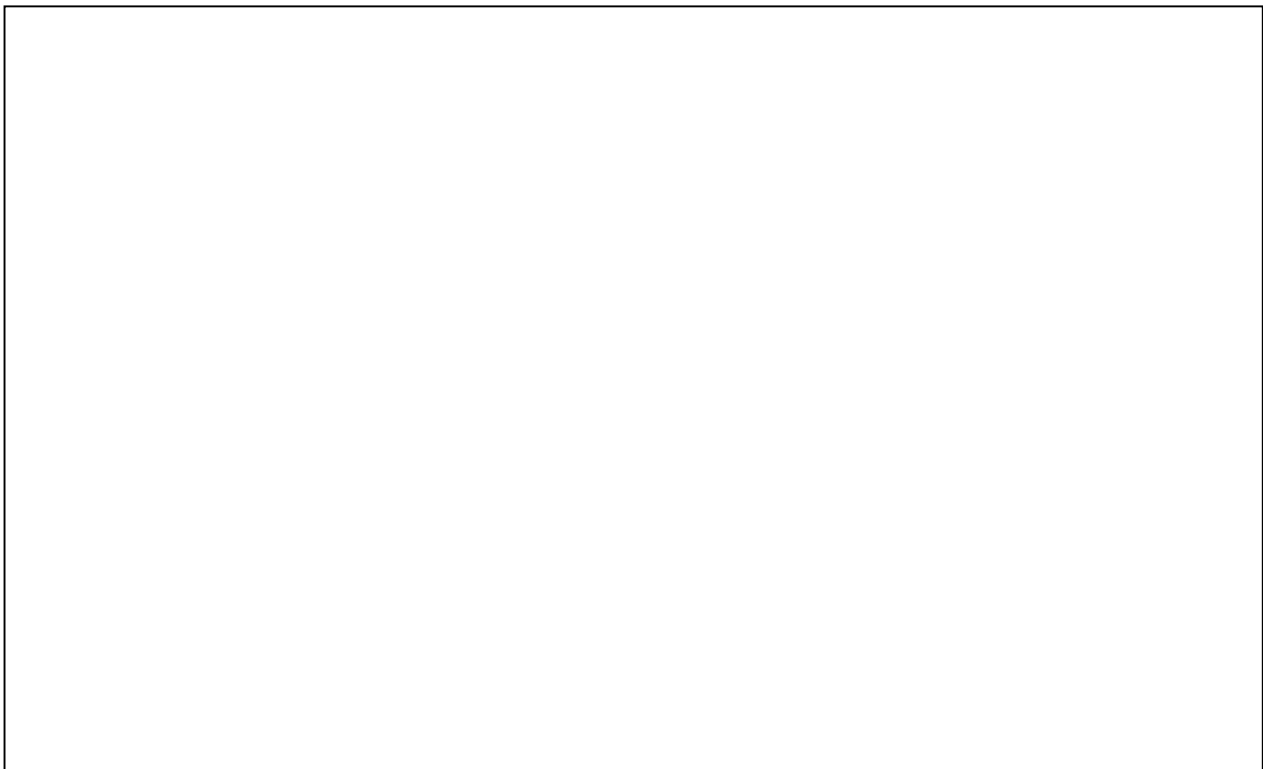


Abbildung 3: Blockdiagramm als Beispiel für die Anwendung Elektrische Antriebe, End of Line (EoL)

Im Blockdiagramm ist das technische Kontextsystem, die Cloud Computing Plattform sowie mögliche Schnittstellen zum User des KI-MUSIK4.0 Sensorsystems beschrieben. Diese statische Beschreibung wurde mit Hilfe von Petri-Netzen um eine dynamische Beschreibung erweitert. Somit konnte das Systemverhalten der Komponenten im Blockdiagramm visualisiert werden.



Abschlussbericht

Für alle Anwendungen wurden die erforderlichen Funktionen untersucht und spezifiziert. Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis für die Anwendung Elektrische Antriebe, End of Line (EoL).



Abbildung 4: Funktionsdiagramm für die Anwendung Elektrische Antriebe (EoL)

Somit war es möglich die Funktionen der verschiedenen Anwendungen im Projekt effektiv zu vergleichen und gemeinsame Schnittmengen darzustellen, vgl. Abbildung 5. Die gute Übereinstimmung der Funktionsanforderungen über alle Anwendungen hinweg ist im Diagramm sehr gut zu erkennen.



Abbildung 5: Funktionsanalyse

Für die Systemschnittstellen wurden die Schnittmengen ebenfalls untersucht und ausgewertet. Hier zeigte sich eine größere Variabilität zwischen den verschiedenen Anwendungen, vgl. Abbildung 6.



Abbildung 6: Schnittstellenanalyse

Diese Arbeiten waren wesentliche Grundlage für die Folgearbeiten. Besonderer Fokus wurde auf das gemeinsame Verständnis der Aufgabenstellung gelegt, um eine enge, effektive und effiziente Zusammenarbeit im Projekt zu gewährleisten.

Des Weiteren konnten sich die Projektpartner, ausgehend von den bereits bei einzelnen Partnern vorhandenen Entwicklungssystemen, auf eine geeignete modulare Systemplattform einigen, welche für die geplanten Untersuchungen der mikroelektronik-basierten universellen Sensor-Schnittstelle notwendig war. Diese Systemplattform mit der Bezeichnung „KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform“ wurde, basierend auf ein FPGA-Trägerboard der Firma Trenz, in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Partnern konzipiert und soweit möglich und notwendig teilweise weiter entwickelt und aufgebaut, damit die gestellten Forschungsziele möglichst effizient untersucht werden konnten, vgl. Arbeitspaket 4. Auf Grund der hohen Anzahl der untersuchten Anwendungen sowie deren Anforderungsvariationen war eine hohe Modularität der Hard- und Softwarekomponenten notwendig. Mit dieser hohen Modularität wurde gleichzeitig die Verwendung der erarbeiteten Ergebnisse in zukünftigen Forschungsarbeiten sowie aktuellen Entwicklungen ermöglicht.

Ursprünglich geplante drahtlose Sensorkonzepte wurden anhand der ausgewählten Anwendungsfälle und den Priorisierungen innerhalb des Konsortiums sowie mit Fokus auf die wesentlichen Aufgabenstellungen im Projekt nicht weiter verfolgt. Mit den Partnern Fraunhofer IMS, Balluff und Stackforce, aber auch im Gesamtkonsortium wurde nach Detaillierung der Anforderungen entsprechend vereinbart, dass die Themen wie BLE, IO-Link wireless oder LPWAN zwar generell berücksichtigt wurden, jedoch nicht zwingend im Demonstrator der Anwendungspartner umzusetzen sind. Hier gab es Lösungsansätze aus anderen Forschungsarbeiten (z.B. FreiForm), die bei Bedarf übernommen und weiter untersucht werden konnten. Hohe Bandbreiten von über 100kHz erfordern Speziallösungen im Bereich der drahtlosen Sensorkonzepte. Allein diese Bandbreitenanforderung hätte zu einem ungerechtfertigten Aufwand im Projekt geführt und nicht wesentlich zum Projektziel beigetragen. Lösungsmöglichkeiten wie z.B. eine induktive Kopplung wurden konzeptionell angedacht, jedoch aus oben genannten zeitlichen und finanziellen Gründen nicht weiter betrachtet.



Abschlussbericht

Zu Arbeitspaket 2:

Der Meilenstein für dieses Arbeitspaket musste angepasst werden. Auch diese Verzögerungen waren größtenteils den angeordneten Maßnahmen im Zusammenhang mit Corona geschuldet. So konnte dieses Arbeitspaket im März 2022 abgeschlossen werden, wohl wissend, dass die Architektur bis zum Projektende immer wieder überarbeitet und entsprechend optimiert werden musste. Bei einigen Partnern, wie zum Beispiel Infineon, waren die finalen Anpassungen erst nach Fertigstellung der Muster möglich.

Die Gesamtsystemarchitektur ist in Abbildung 7 zu sehen. Ziel war es, alle Partner zu verorten, Verantwortlichkeiten deutlich zu machen und die Zusammenarbeit zu optimieren.

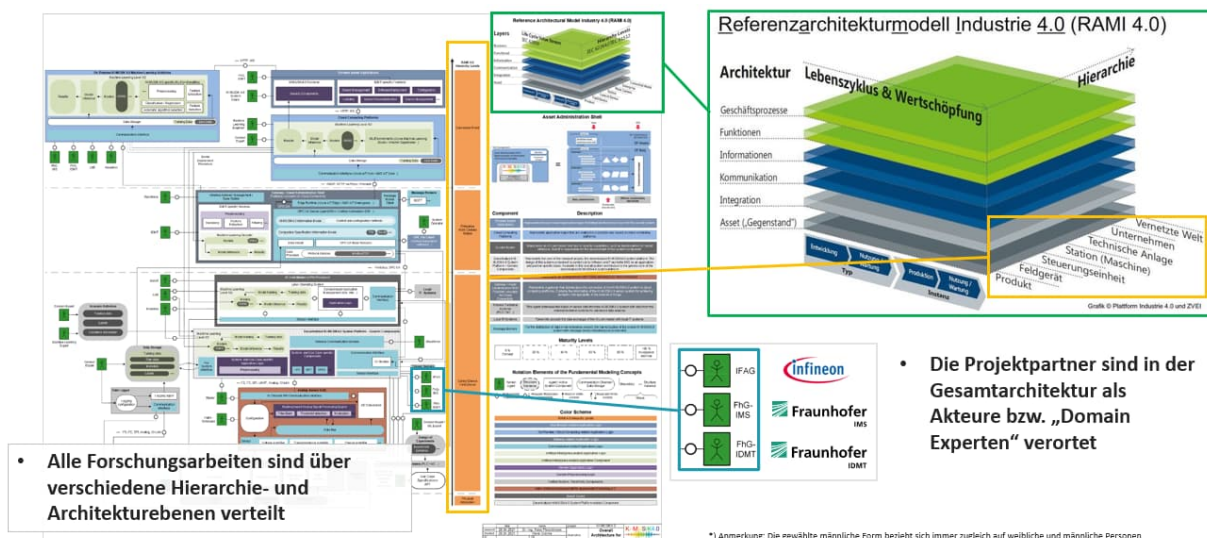


Abbildung 7: Gesamtsystemarchitektur in Anlehnung an das Referenz Architektur Modell Industrie 4.0

Hauptfokus seitens Schaeffler mit Bezug auf den Forschungsinhalt im Arbeitspaket 2 war die konzeptionelle Untersuchung der Gesamtsystemarchitektur bzw. der Systemstruktur. Die Architektur beschreibt dabei Komponenten, deren Schnittstellen und welche Komponente Daten oder Informationen mit einer anderen Komponente austauscht. Mit der Darstellung der Systemzerlegung wird ersichtlich, welche Komponente Teil einer weiteren Komponente ist.

Ziel war es, einen für alle Partner generischen Lösungsraum zu entwickeln und zu untersuchen, wie die Orchestrierung effektiv und effizient gestaltet werden kann. Ausgehend von Entwürfen in PDF und PowerPoint konnten sich die Partner nach ersten Anlaufschwierigkeiten auf den Vorschlag von Schaeffler einigen, die Methode Fundamental Modeling Concept (FMC) nach Prof. Siegfried Wendt zu verwenden.

In sehr enger und größten Teils vorbildlicher Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern wurde die Gesamtsystemarchitektur in Anlehnung an das Referenz Architektur



Abschlussbericht

Modell für Industrie 4.0 (RAMI4.0) untersucht und mittels Fundamental Modelling Concept weitestgehend erarbeitet. So war es möglich, alle Anwendungsfälle entsprechend der im Arbeitspaket 1 ermittelten Randbedingungen und Anforderungen zu integrieren.

Die Hierarchy Levels wurden direkt beschrieben sowie die jeweiligen Layer farblich codiert. Die Konzeption einer semantischen Verwaltungsschale entlang des Information- und Communication Layers wurde berücksichtigt und war zum Teil Inhalt der Forschungsarbeiten. Wesentlich waren die 3 Detaillierungsstufen (**Kompositions-Diagramm**, Beschreibung des dynamischen Verhaltens angelehnt an **Petri-Netze** und **Entity-Relationship-Diagramme** zur Beschreibung sowie Definition von Datenstrukturen). Ausgehend von den Funktionsblöcken / Agenten wurde das Verhalten und der Datenfluss modelliert.

Diese Untersuchungen waren Grundlage für die Erarbeitung eines gemeinsamen Konzeptes für das effiziente Zusammenarbeiten aller Projektpartner und zur Vermeidung von Redundanzen sowie das Controlling relevanter Projektfortschritte.

Anhand des Kompositions-Diagramms wird die Verortung der Projektpartner verdeutlicht, vgl. Abbildung 8.

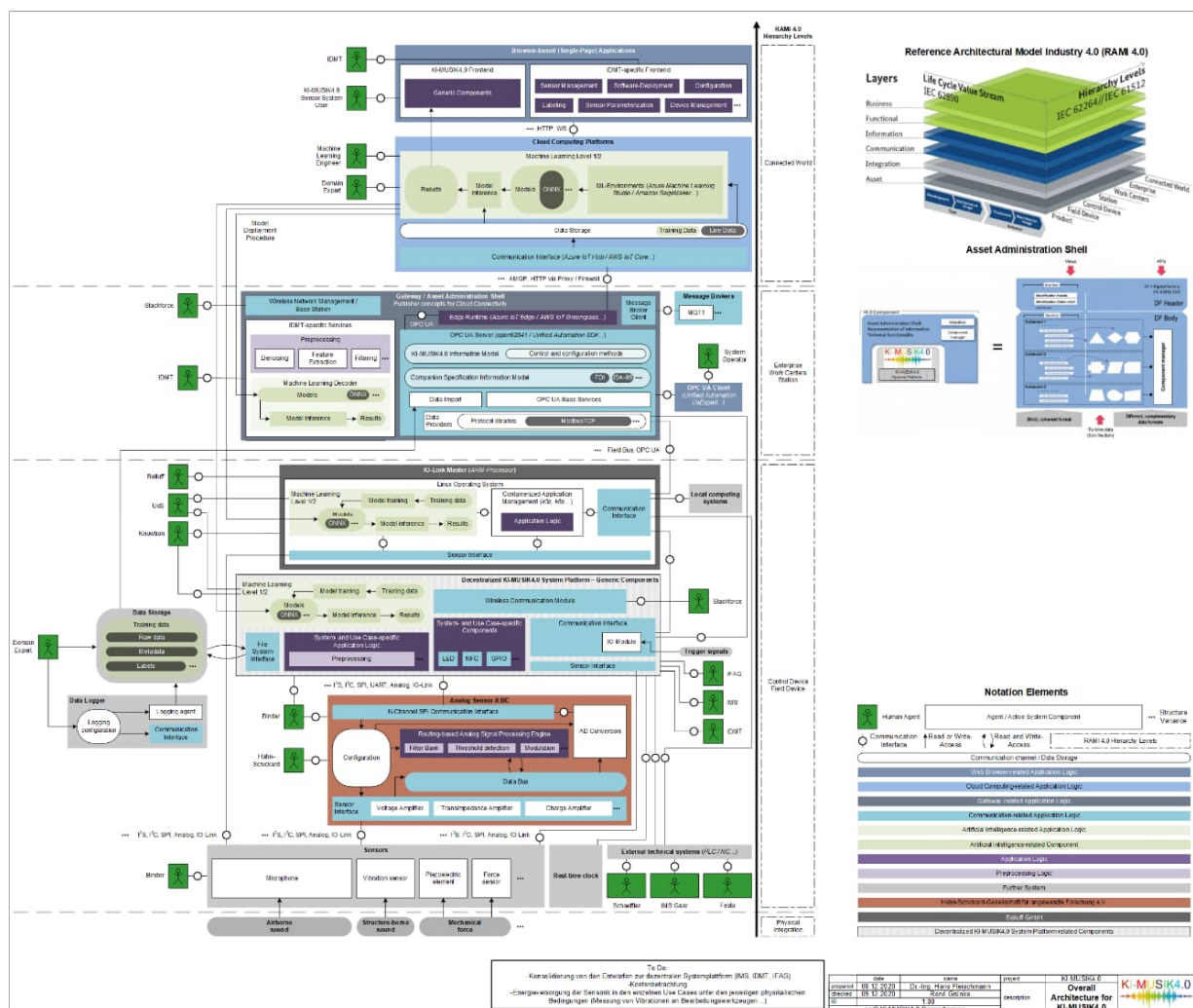


Abbildung 8: Gesamtarchitektur KI-MUSIK4.0 | Kompositions-Diagramm



Abschlussbericht

Zur Beschreibung des Verhaltens einzelner Komponenten innerhalb der Gesamtsystemarchitektur kamen entsprechend dem FMC-Standard Petri-Netze zum Einsatz. Am Beispiel des Anwendungsfalls „Elektrische Antriebe / End of Line (EoL)“ wurden u.a. die nachfolgenden Konzepte erarbeitet, vgl. Abbildung 10. Ausgehend von der mittels Petri-Netz beschriebenen proprietären Prüfstandlösung im Hause Schaeffler (Stufe 1), wurde das entsprechende Petri-Netz für eine Cloud-Service-Lösung erarbeitet (Stufe 2), und erste Lösungsschritte in der Cloud betrachtet. Mit Stufe 3 wurde das Ziel verfolgt, das Komponentenverhalten auf der „KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform“ zu untersuchen.

Stufe 1 (1/2):

Stufe 1 (2/2):

Stufe 2:



Abschlussbericht

Stufe 3:

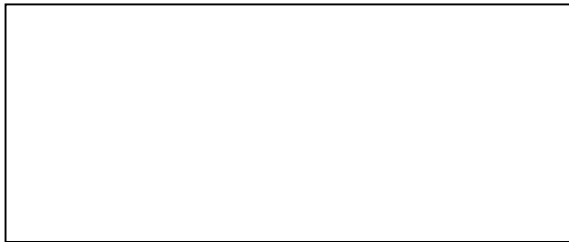


Abbildung 10: Detaillierungskonzepte Desktop-Lösung (Stufe 1), Cloud-Services (Stufe 2), „KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform“ (Stufe 3)

Somit wurde es möglich, den Vergleich verschiedener Lösungsansätze zur verteilten KI direkt auf der „KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform“ zu analysieren und bewerten zu können, welche Teilanalysen besser im / am Sensor vor Ort, im EDGE oder FOG bzw. in einer Cloud-Architektur umgesetzt werden. Abhängig von den Randbedingungen der jeweiligen Anwendungen wurden die Vor- bzw. Nachteile schnell transparent.

Im November 2021 wurde zum Halbzeittreffen in Ludwigsburg der Stand der Arbeiten präsentiert. Zum Anwendungsfall des „Elektrischen Antriebes / EoL“ wurden beispielhaft Ergebnisse aus Stufe 2 vorgestellt, wie z.B. die konzeptionelle Umsetzung von implementierten Cloud-Services für diese Anwendung. Eine Herausforderung war und ist dabei die direkte Verarbeitung großer Datenmengen vom Sensor bis hin zur Cloud, vgl. Abbildung 11.

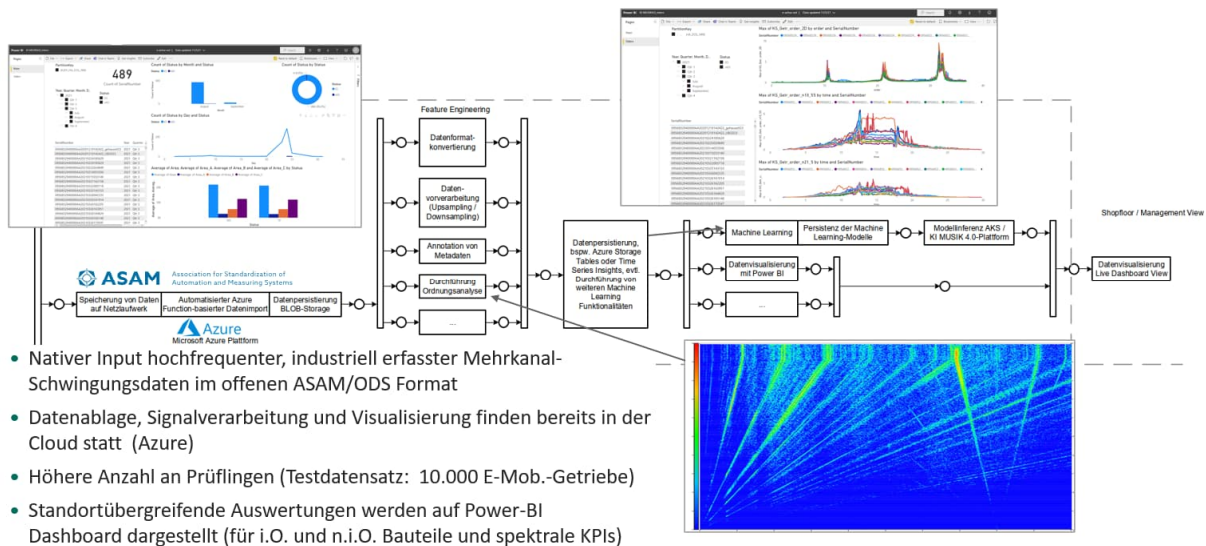


Abbildung 11: Petri-Netz Stufe 2: Beispiel für implementierte Cloud-Services bei Schaeffler



Abschlussbericht

Zu Arbeitspaket 3:

In diesem Arbeitspaket wurde mit folgenden Projektpartnern sehr eng zusammengearbeitet. In den Prozessen Hartdrehen und Fräsen beispielsweise mit der Firma Knowtion, beim Hartdrehen, Wälzschälen, bei den „Elektrischen Antrieben End of Line (EoL)“ und Wälzlagerverunreinigungen intensiv mit der Universität des Saarlandes und beim Hartdrehen, Wälzschälen und den Wälzlager mit der Fraunhofer Gesellschaft IMS.

Im Januar 2022 hat die Firma Knowtion zusammen mit Schaeffler in Herzogenaurach Versuchsreihen durchgeführt, um den Verschleißfortschritt beim Fräsen zu erkennen. Diese Daten wurden mit Knowtion analysiert und gemeinsam die sehr guten Ergebnisse interpretiert. Zu Details zu den Untersuchungen und Ergebnissen wird auf die Ausführungen von Knowtion verwiesen. Abhängig von unterschiedlichen Beanspruchungen wie zum Beispiel Schnittparametervariation, Gleichlauf- und Gegenlaufräsen, etc. war das Ziel, bewerten zu können, wie gut gewählte Algorithmen performen, welches Domainwissen notwendig ist, um die Komplexität der Analysen für die Embedded Anwendung gering zu halten.

Zusammen mit der Universität des Saarlandes (UdS) wurde im November 2022 eine Messkampagne bei Schaeffler in Höchststadt durchgeführt. Ziel war es, die Zusammenhänge beim Wälzschälen besser zu verstehen und die Analysequalität zuvor stattgefundener Messkampagnen am Standort Herzogenaurach zu optimieren. Insgesamt wurden 3 Messkampagnen sowie ein Vorversuch durchgeführt. Die Analyse der Daten wurde in Zusammenarbeit mit UdS und der Fraunhofer Gesellschaft IMS (FhG IMS) ausgeführt. Dieser höchst komplexe Produktionsprozess war in der Literatur bislang spärlich beschrieben. Innerhalb dieses Verbundprojektes wurden die Untersuchungsergebnisse zum Wälzschälprozess Teil von Dissertationen der UdS sowie der FhG IMS. An dieser Stelle wird auf die wertvolle wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse verwiesen.

Zum Thema Wälzlagerverunreinigungen konnten die seitens Schaeffler beigestellten Messdaten in Zusammenarbeit mit der UdS erfolgreich mittels Kombination unterschiedlicher Methoden des maschinellen Lernens so analysiert werden, dass die Ergebnisse im entsprechenden Produktionsbereich direkt verwertet werden konnten, um die Prozesse zu optimieren.

Beim Hartdrehen, als ein sehr wertsteigernder Produktionsprozess, wurden Messdaten aus unterschiedlichen Produktionsprozessen seitens Schaeffler beigestellt. Die ML-basierten Analysen zeigten teilweise sehr gute Ergebnisse, auch mit Bezug auf das Transfer-Learning, jedoch wurden auch Schwächen bei der Messdatenerzeugung bzw. -erfassung offensichtlich (z.B. die abschnittsweise Analyse konkaver Oberflächenprofile von Profilrollen für Großlager). Das Beheben dieser Schwächen bzw. Teile davon konnte im Ergebnis direkt für Folgeprojekte bzw. Messaufgaben genutzt werden, um somit die Analysequalität deutlich zu verbessern.



Abschlussbericht

Anhand des Beispiels „Elektrische Antriebe (EoL)“ zeigen folgende Abbildungen einen Weg, wie mit unterschiedlichen Werkzeugen / Methoden, ausgehend von der komplexen 3-dimensionalen Messdatenanalyse mittels Campbell-Diagramm 3D (Abbildung 12), über den 2D Ordnungsschnitt bzw. dem 2D Ordnungsspektrum (Abbildung 13 und 14) hin zum 1D Kennwert (Abbildung 15), die Datenmengen deutlich reduziert werden konnten.



Abbildung 12: Beispiel Campbell-Diagramm 3D

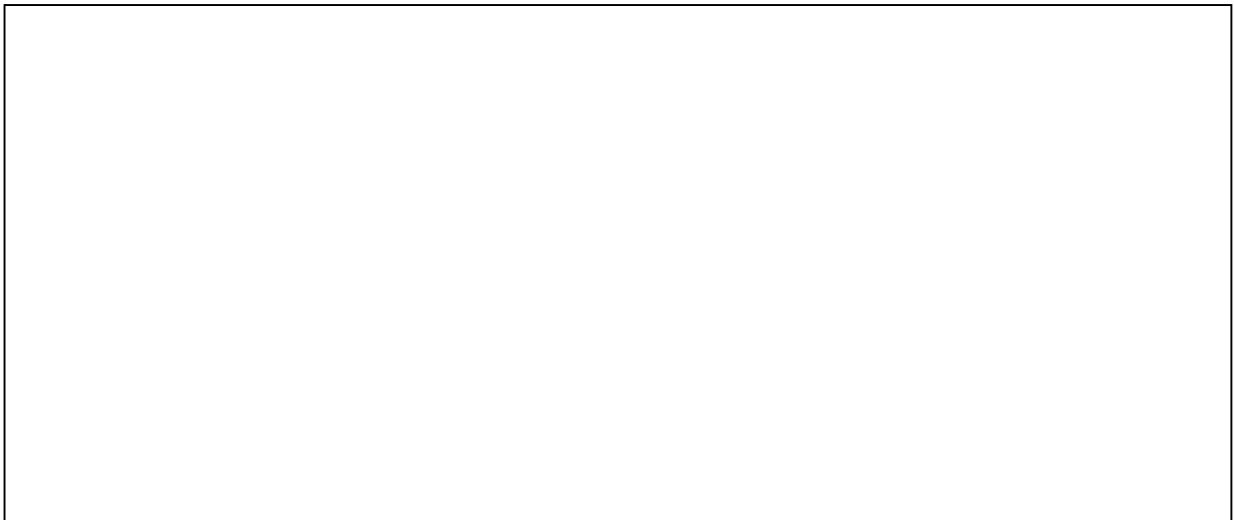


Abbildung 13: Beispiel 2D Ordnungsschnitt bzw. 2D Ordnungsspektrum

Abschlussbericht

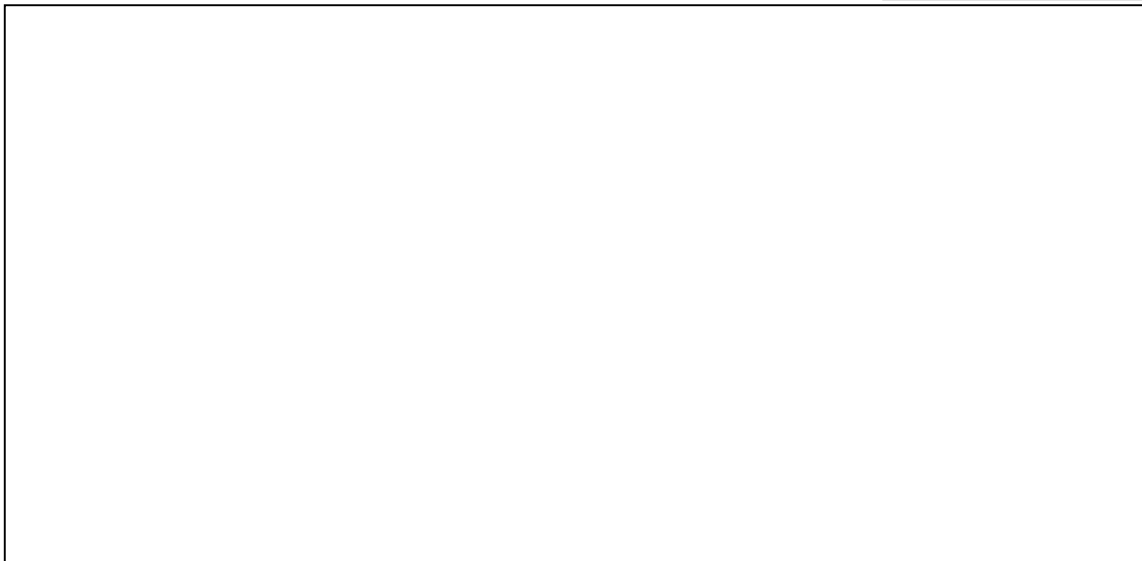


Abbildung 14: Beispiel 2D Ordnungsspektrum



Abbildung 15: Beispiel 1D Kennwert

Um mit den gegebenen Randbedingungen die erforderliche Dynamik und Signalbandbreite in den Sensordaten mit vertretbarem Aufwand analysieren und orchestrieren zu können, ist eine intelligente Datenvorverarbeitung und Datenreduktion eine Grundvoraussetzung.

Neben der oben beschriebenen Vorgehensweise, die sich seit Jahren im Produktionsbereich etabliert hat, wurden Methoden des Maschinellen Lernens intensiv untersucht. Ziel war die Steigerung der Qualität der Produktion bei parallel steigender Effizienz der eingesetzten Ressourcen. Abbildung 16 zeigt die untersuchten Stufen auf dem Weg zu einer ML-gestützten Datenverarbeitung mit kontinuierlicher Reduktion der Daten- und Merkmalsdimensionen.



Abschlussbericht

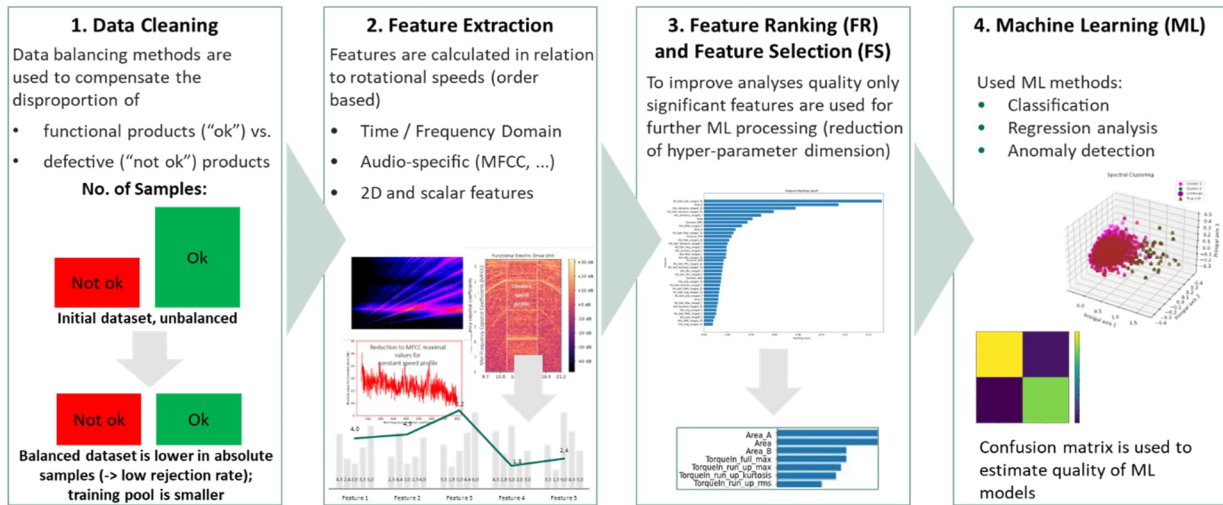


Abbildung 16: Stufen auf dem Weg zu einer ML-gestützten Datenverarbeitung mit kontinuierlicher Reduktion der Daten- und Merkmalsdimensionen

Es ist gelungen, mit Hilfe der großen Anzahl von untersuchten Prüflingen ein balanciertes Datenset zu erzeugen. Problem war bislang immer die deutlich größere Menge an Messungen, die in Ordnung (ok) waren im Vergleich zu denen, die nicht in Ordnung (not ok) waren, vgl. Schritt 1 in Abbildung 16. Mittels statistischer Methoden wurde eine zufällige Verteilung / Zuordnung der Prüflinge in die Gruppen (ok / not ok.) derart ausgeführt, dass im Ergebnis ausbalancierte Datensets zur Verfügung standen. Aus diesen konnte eine Vielzahl unterschiedlicher Merkmale extrahiert werden. Diese Merkmale wurden bewertet und relevante Merkmale selektiert. Abschließend konnten unterschiedliche Methoden des Maschinellen Lernens untersucht und beurteilt werden.

Abbildung 17 zeigt ein Beispiel für durchgeführte Benchmarks in einer frühen Phase dieser Untersuchungen.

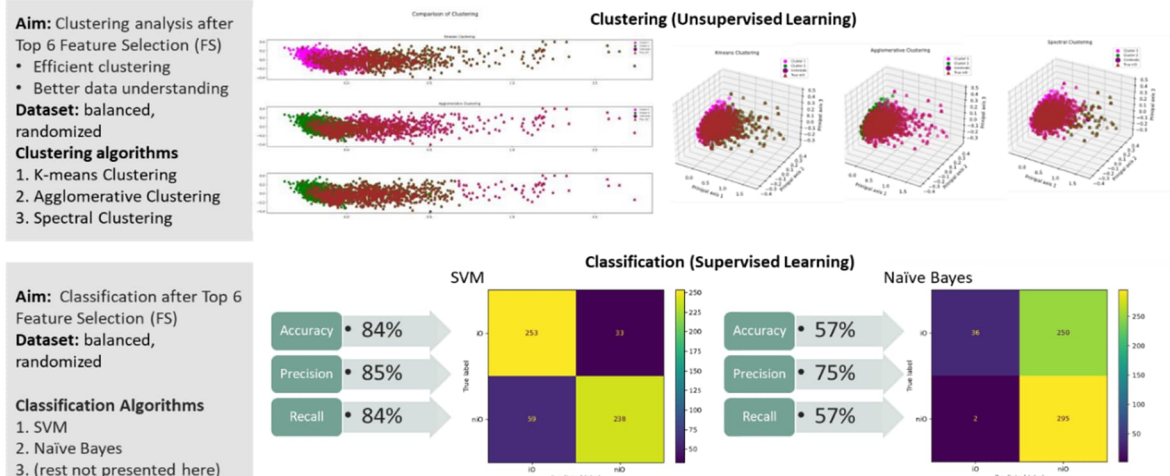


Abbildung 17: Clustering / Classification Benchmark (im Beispiel mit 6 selektierten "Top"-Features in einem sehr frühen Projektstadium)

Abschlussbericht



Für das Verständnis, die Bewertung und das weitere Vorgehen waren diese Vorüberlegungen mit Hilfe von Benchmarks wesentlich, da nicht blind auf Ergebnisse bei der Anwendung unterschiedlicher Methoden vertraut wurde, sondern immer das physikalische Beurteilen und die Nutzung von Domainwissen zu einer möglichst, im weitesten Sinn, erklärbaren Ergebnisqualität geführt hat.

Weitere Informationen können den veröffentlichten und frei zugänglichen Ergebnisdarstellungen während der DAGA 2023 und DAGA 2024 entnommen werden.

Zu Arbeitspaket 4:

In diesem Arbeitspaket waren für Schaeffler die Themen Hardware-Konzepte, Schaltungen und Systeme sowie die weiteren Untersuchungen der Sensor-Funktionsschicht wesentlich. Die Ergebnisse zur Sensor-Funktionsschicht werden auf Grund der besseren Lesbarkeit im Arbeitspaket 6 beschrieben.

Die Hardware konnte stetig weiter verbessert werden, so dass im Ergebnis ein kompakter modularer Systementwurf für den Hardwareaufbau zur Verfügung stand, vgl. Abbildung 18.

- Trenz Electronic **Carrier board** with Zync-7000-FPGA ARM-Cortex-A9
- **Compact Design** (ca. 100 mm x 170 mm x H mm)
- Possibility of integration of **AI Accelerator** (M.2 Form factor base)
 - **Infineon** AI Accelerator
 - **Google Coral** Dual Edge Tensor Processing Unit
 - ...
- Support from many **industrial interfaces**
 - CAN / UART / RS485 / Digital IO's / SPI / I2C / Ethernet...
- **Modular** Design suitable for the application
- Quality inspection of electric drives based on AI-capable multi-sensor systems
- ...
- Unique is the combination of **high-performance analog sensor interfaces, advanced signal processing capabilities** and the implementation of **Model inferences** in a compact platform.



Abbildung 18: KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform / Systementwurf

Einzigartig war die Kombination von leistungsstarken analogen Sensorschnittstellen mit fortschrittlicher Signalverarbeitung und der Implementierung von Modellinferenzen auf einer kompakten Plattform. Es wurde darauf geachtet, dass die Ein- und Ausgänge der Plattform den Anforderungen der in den Arbeitspaketen 1 und 2 definierten Anwendungsfälle weitestgehend genügen. Dazu gehört die Verarbeitung von Audiodaten mit hohen Abtastraten ($\geq 200\text{kHz}$), die Signalverarbeitung in Echtzeit, die Möglichkeit hardwarebeschleunigt Algorithmen auszuführen sowie eine Steuerung mit geringer Latenz.

Die Leiterplatten und FPGA-Boards der Firma Trenz Electronic wurden mit fast einem Jahr Verspätung geliefert. Zusatzplatten für den modularen Aufbau sowie der modularen Funktion wurden parallel beschafft. Für den Entwurf war es notwendig die Kompatibilität der jeweiligen Leiterplatten und Module zu untersuchen und diese aufeinander abzustimmen. Entsprechende Signallisten wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Binder erstellt. Zusammen mit den Projektpartnern wurden wöchentliche Telefonkonferenzen zur engen Abstimmung der Aufgaben sowie zum Fortschritt der Arbeiten durchgeführt. Ein entsprechendes Ergebnis zeigt die Hardwarearchitektur in der nachfolgenden Abbildung 19.

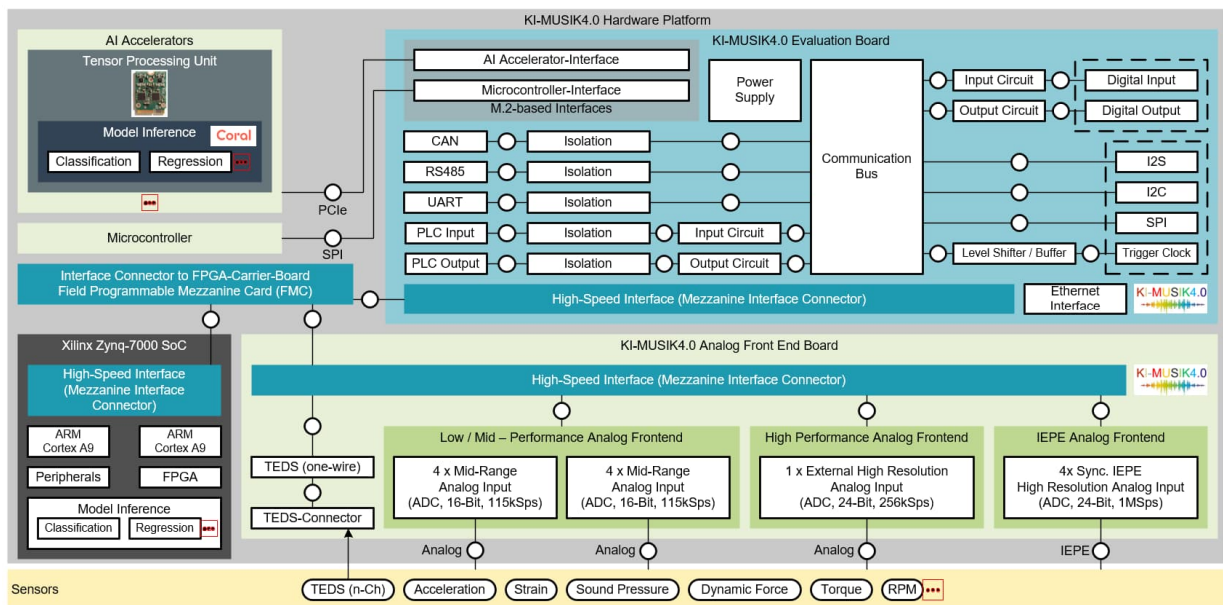


Abbildung 19: KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform / HW-Architektur

Zu erkennen ist die parallele Hardwareausführung mit entsprechender Signalverarbeitung, ebenso das Zync 7000 SoC sowie der Bereich für die KI-Beschleuniger, da diese für die Inferenz von maschinellem Lernen viele Vorteile haben. Die Latenzzeit kann zum Beispiel deutlich verringert werden, da KI-Beschleuniger teilweise 100- bis 1000-fach effizienter im Vergleich zu allgemeinen Rechenmaschinen arbeiten. Mit Hilfe von KI-Beschleunigern lässt sich das Problem der Parallelisierung eines Algorithmus auf mehreren Kernen einfach lösen. Entsprechend führt der Einsatz von KI-Beschleunigern zu einer Geschwindigkeitssteigerung, die der Anzahl der beteiligten Kerne entspricht. Die heterogene Architektur von KI-Beschleunigern ermöglicht es, auf einem System mehrere spezialisierte Prozessoren unterzubringen, um die für eine KI-Anwendung erforderliche Rechenleistung zu erreichen.

Der Partner Infineon hatte sich bereit erklärt, die digitale ASIC-Lösung mittels M2-Schnittstelle an die Plattform anzubinden. Dieser Standard sollte ebenso für das Google Coral M2 sowie Hailo-8 M2 KI-Beschleunigungsmodul verwendet werden. Die beiden ASICs („analog“ und „feature extraction“) der Firma Hahn-Schickard können über die SPI-Schnittstelle mit der Plattform verbunden werden. Zusätzlich war eine direkte Verbindung aller ASICs (analog, feature extraction, digital) auf einem Modul geplant, um diese über eine M2-Schnittstelle betreiben zu können. Für die spätere Implementierung kann auf das Knowhow des Projektpartners Binder zurückgegriffen werden. Somit war eine modulare vollumfängliche Lösung mit der Nutzung bei fast allen Projektpartnern gegeben. Firma Binder hat eine Übersicht erarbeitet, welcher Partner wieviel KI-MUSIK4.0 Hardware Plattformen mit welcher Ausstattung für notwendige Untersuchungen benötigt.

Nach erfolgreicher Erstinbetriebnahme der Hardware von Firma Trezz Electronic GmbH wurde das FPGA Design mit dem PYNQ Z1-Board von Digilent begonnen und in Hardware implementiert, vgl. folgende Abbildung 20.



Abschlussbericht

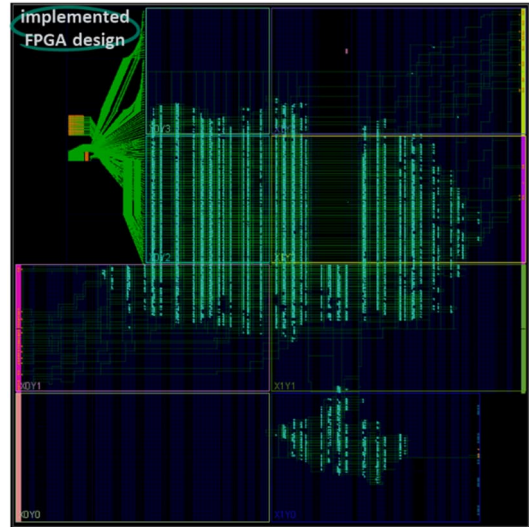
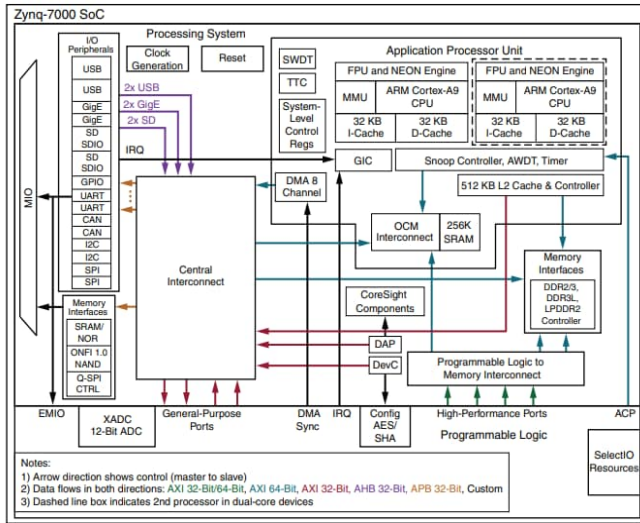


Abbildung 20: KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform / Zync 7000 SoC, implementiertes FPGA-Design

Hier der verwendete KI-MUSIK4.0 Stack, vgl. Abbildung 21:

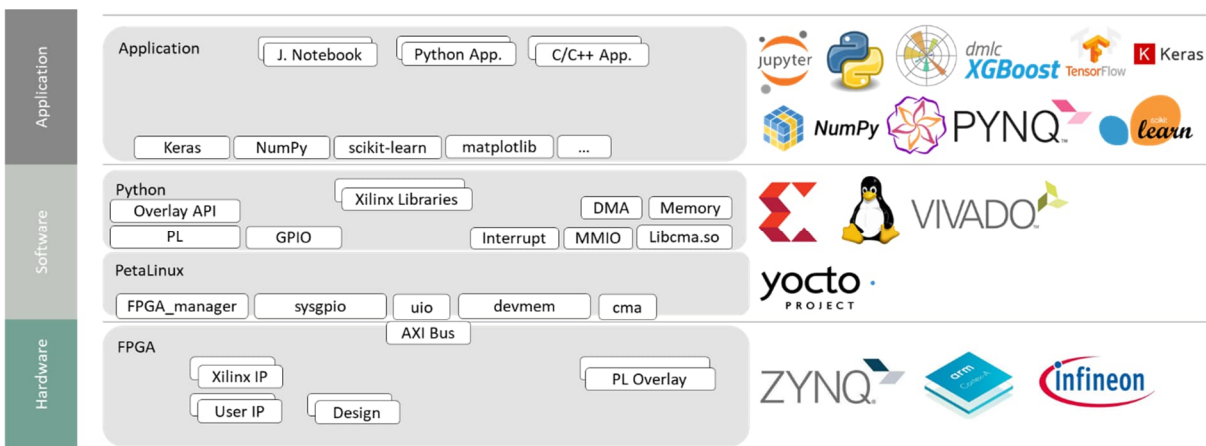


Abbildung 21: KI-MUSIK4.0 Stack

Diese vereinfachte Darstellung ist eine Übersicht der verwendeten Bibliotheken und Software-Tools für die Untersuchungen im Rahmen des Hard- und Software Co-Designs.

Die ersten Ergebnisse zeigten Vorteile der Eigenschaften der gewählten hardwarebeschleunigten Komponenten im Vergleich zum Standard, vgl. Abbildung 22. Sei es die Berechnungsgeschwindigkeit bei der Feature Berechnung am Beispiel MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients), der FFT-Berechnung oder die Verarbeitungsgeschwindigkeit mit Direct Memory Access. Hier waren die Vorteile deutlich erkennbar.

Abschlussbericht

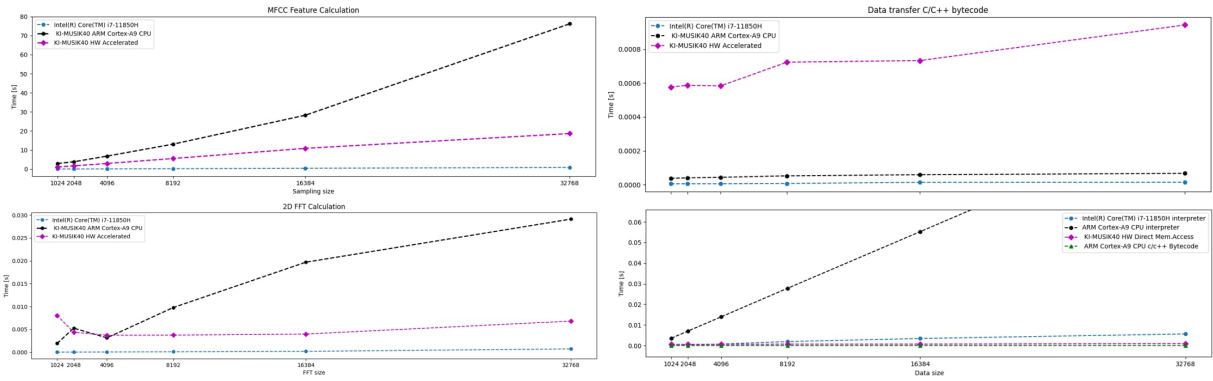


Abbildung 22: Untersuchungsergebnisse, Vergleich HW-/SW – Komponenten

Zu Arbeitspaket 5:

Zur Definition verteilter KI-Systeme wurde bereits in den Arbeitspaketen zuvor berichtet. Die Gesamtsystemarchitektur wurde weiter detailliert, um das Verhalten der jeweiligen Systemkomponenten zu beschreiben und den entsprechenden Datenfluss abbilden zu können.

Ein Ergebnis war die Gesamtarchitektur für eine Integration der KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform im Anwendungsfall „Elektrische Antriebe (EoL)“. Hier wurde die Integration als eine Art “Beistellung” bzw. Koexistenz zum etablierten Produktionsprozess ausgeführt. Der Hauptgrund dafür war das hohe Risiko, dass der empfindliche Produktionsprozess möglicherweise in der LERN-Phase verzögert oder gar gestört wird.

Die KI-Methoden sollen vorerst die klassische und robuste - jedoch teilweise sehr aufwändig zu entwickelnde - Bewertung ergänzen und vor allem auf unbekannte und / oder komplexere Fehlerbilder hinweisen. Auffälligkeiten der Prüflinge, Langzeitabweichungen (Drifts) und weitere Einflussmöglichkeiten können so schneller erkannt werden (spezifisches Fehlerbildcluster).

Da die KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform innerhalb des Projektes nicht in der ursprünglich geplanten Ausbaustufe zur Verfügung stand, wurde der Fokus auf die Erfassung der Daten, deren Vorverarbeitung sowie Reduzierung und die Analyse möglicher Lernverfahren gelegt, vgl. Ausführungen in den Arbeitspaketen zuvor. Ebenso wurde die Cloud-Anbindung vorangetrieben. Hier bestand die Herausforderung, dass proprietäre zertifizierte Prüfstände nicht einfach “im Vorbeiflug” Modifikationen zulassen.

In Abbildung 23 ist die Gesamtarchitektur mit der geplanten Möglichkeit der Integration der KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform dargestellt (rote Box). Das aktuelle Testsystem in der vorhandenen Montagelinie ist mit der Farbe „gelb“ hervorgehoben.

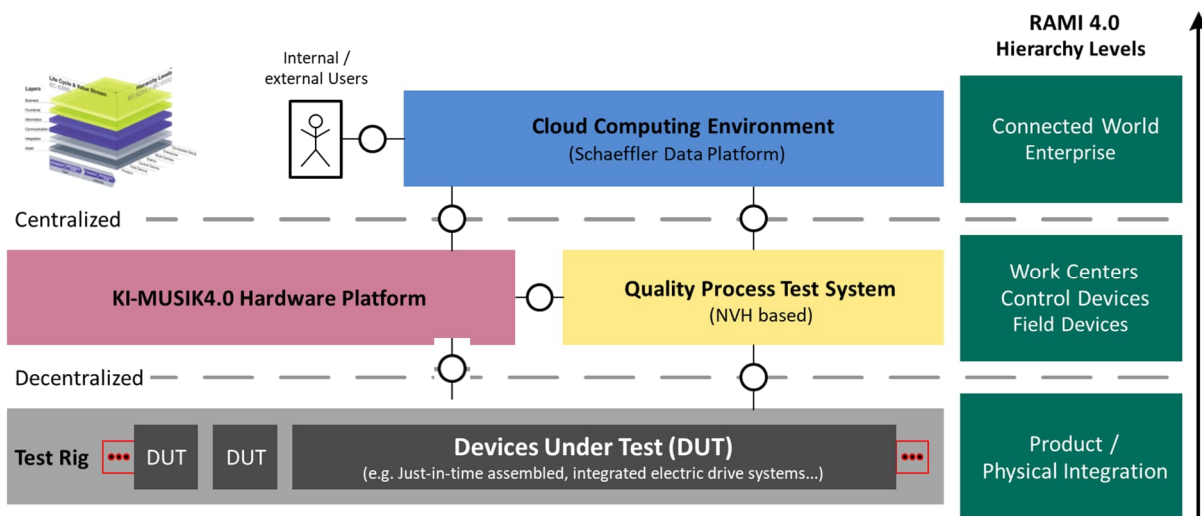


Abbildung 23: Gesamtarchitektur in Anlehnung an das Referenz Architektur Modell Industrie 4.0 (Integration der KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform in die Produktlinie und den NVH basierten Qualitätstest)



Abschlussbericht

Details dieser Architektur zeigen Beispiele der Datenerfassung, Signalverarbeitung, Feature Extraction, Classification / Clustering (on Edge), Cloud-Interaktion sowie das Zusammenwirken im Gesamtsystem, vgl. Abbildung 24.

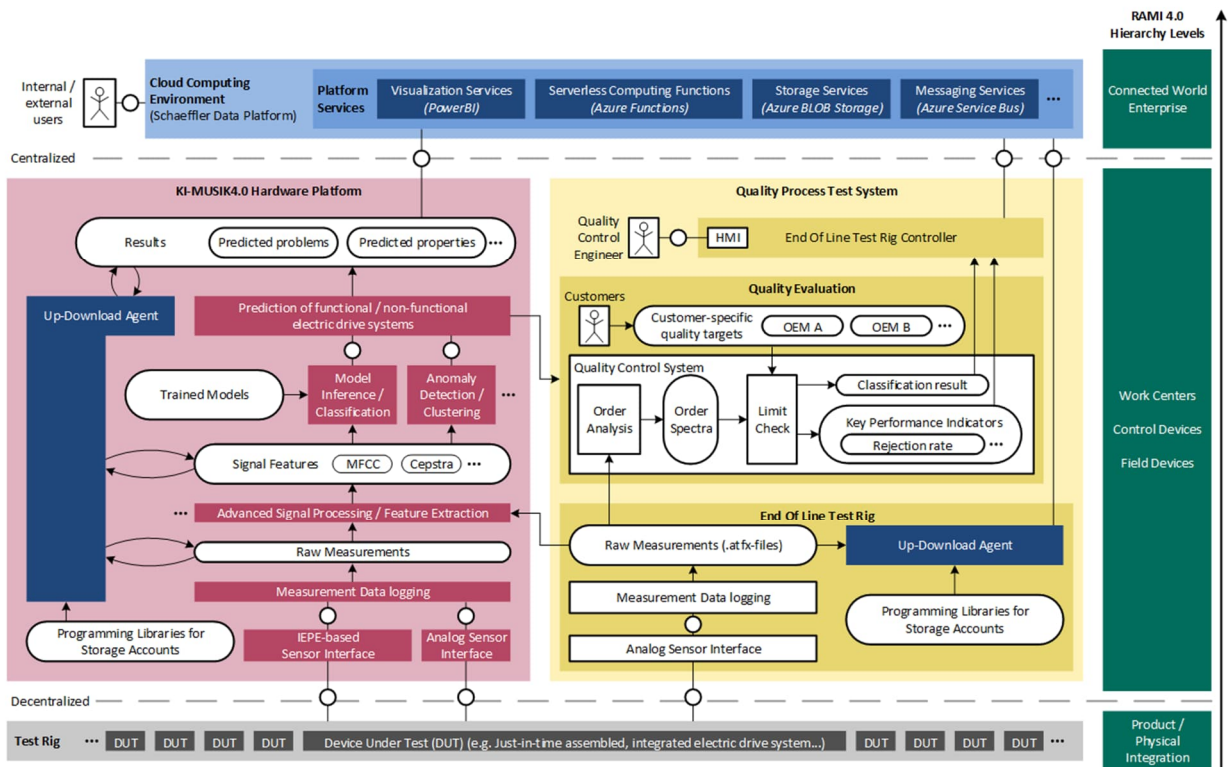


Abbildung 24: Detaillierung der Gesamtarchitektur in Anlehnung an das Referenz Architektur Modell Industrie 4.0 (Integration der KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform in die Produktlinie und den NVH basierten Qualitätstest)

Die Möglichkeit der parallelen Integration steigerte die Akzeptanz der Kunden erheblich.

Zu Projektbeginn war bereits geplant, das zur Verwertung der Projektergebnisse im Hause Schaeffler, die Ergebnisse der Untersuchungen des ML-basierten Hard- und Software Co-Designs möglichst umfangreich auf die intern innerhalb der Produktionsprozesse eingesetzte Edge-Computing-Lösung Pro+Connect übertragen werden kann. Ähnlich wie die KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform basiert diese ebenfalls auf einem Xilinx Zynq-7000-SoC (FPGA + ARM-Cortex-A9).

Hohe Datenraten von bis zu 2 MHz bei eingeschränkten Ressourcen erfordern

Abschlussbericht



intelligente Herangehensweisen über die gesamte Wertschöpfungskette vom Sensor, als Quelle der Daten, bis hin zur gewünschten Information bzw. dem daraus folgenden Wissen. Wie bereits auf der DAGA 2023 vorgestellt, wurde unter anderem der Einsatz von KI-Beschleunigern untersucht und effiziente Lösungen für deutlich höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten bei gleichbleibenden Ressourcen erarbeitet.

Somit war es möglich die Verteilung der KI-Aufgabenstellungen vom Sensor bis hin zur Cloud zu untersuchen und zu bewerten, welche Arbeiten im Sensor, in der Edge-Hardware oder in der Cloud sinnvoll unter den gegebenen Randbedingungen ausgeführt werden können.

Zu Arbeitspaket 6:

Im Rahmen der Festlegung der Spezifikationen eines Sensorschichtsystems zur Messung von Normalkräften in bzw. nahe der Wirkzone wurde als Anwendung die Spannkraftmessung in Spannsystemen definiert. Am Beispiel der Werkstückspannung im Wälzschälprozess war geplant die Funktion des Sensorschichtsystems am Projektende zu demonstrieren, vgl. Abbildung 25.



Abbildung 25: Prinzipdarstellung Anwendung Spannkraftmessung

Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Schichtsystem eines Lieferanten für diese Anforderungen vielversprechend war. Es wurden Testmuster dieses Schichtsystem abgedruckt und im Labor spezifiziert. Mit dem Partner Hahn-Schickard wurden mögliche Eingangsschaltungen im Analog-ASIC untersucht und bewertet.

Bezüglich der Datengenerierung, -übertragung und -erfassung über die Luftschnittstelle (OTA) standen Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt FreiForm zur Verfügung.

Die im Jahr 2021 erfolgreich durchgeführten Erstuntersuchungen der Funktionsmuster wurden im Jahr 2022 weiter vertieft. Leider wurden die positiven Forschungsergebnisse zum Schichtsystem, wie im ersten Berichtsjahr vorgestellt, mit den detaillierten Folgeuntersuchungen nicht bestätigt. Ob z.B. Veränderungen in der Zusammensetzung des Schichtsystems, der Prozessführung oder der Grundmaterialien ursächlich waren, konnte seitens Schaeffler nicht nachvollzogen werden. Laut Untersuchungen vom Lieferanten waren die verwendeten Materialien im Schichtsystem sowie deren Kombinationen nicht optimal. Eine abschließende Erklärung der Ursache bzw. ein Vorschlag zur Optimierung des Schichtsystems wurde nicht zur Verfügung bzw. in Aussicht gestellt.

Die Krafteinleitung mittels Flächenkontakt (Rechteckquerschnitt) über ein Keramikplättchen zeigt Abbildung 26. Ebenfalls dargestellt sind verwendete Verstärker.

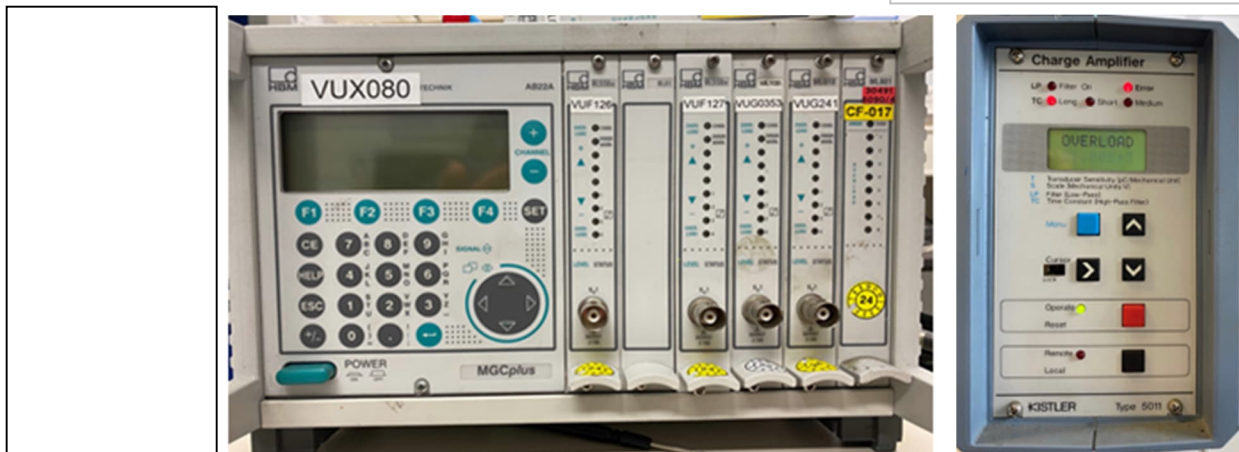


Abbildung 26: links: Krafteinleitung mittels Stempel und Keramikplättchen in einen der beiden Sensoren, der zweite Sensor war unbelastet und diente der Temperaturkompensation; Mitte: Gleichspannungs- und Trägerfrequenzmessverstärker; rechts: Ladungsverstärker

Das Ladungsverstärkerprinzip wurde nach ersten Ergebnissen verworfen, da innerhalb der Charakterisierungen die Einsatzbereichsgrenzen häufig überschritten wurden. Dies geschah bereits während der Aufwärmphase ohne Last bzw. während der Haltephasen auf konstantem Lastniveau. Für weitere Untersuchungen wurden entsprechend Gleichspannungs- und Trägerfrequenzmessverstärker eingesetzt.

Der Fokus lag auf Eigenschaften wie Linearität, Wiederholbarkeit, Temperaturstabilität, Setzen, Kriechen, Langzeitverhalten. Abbildung 27 zeigt ausgewählte Ergebnisse.

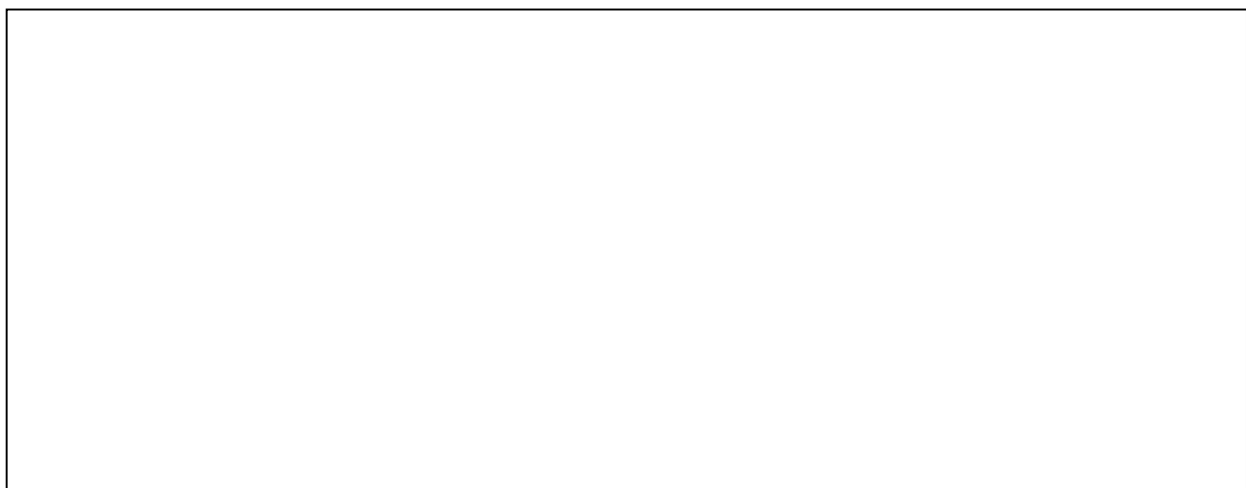
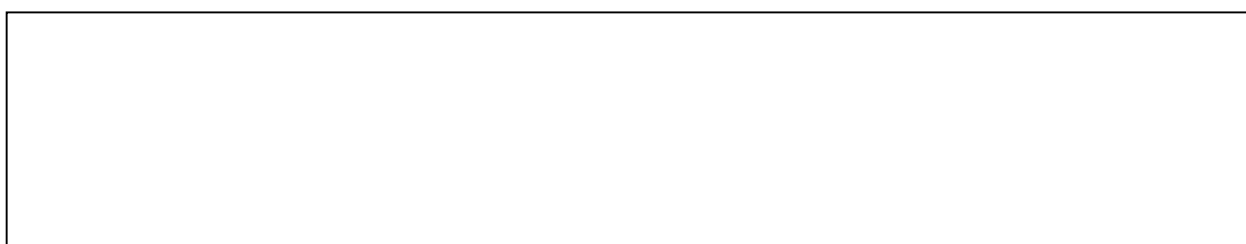


Abbildung 27: Treppenstufen (oben), Sägezahn (unten), Last zwischen 0 und 10kN (grün: Referenz, rot: Schichtsystem), geprüft mit Gleichspannungs- (links) und Trägerfrequenzmessverstärker/n (Mitte, rechts)



Abschlussbericht



Belastungsstempels, Winkelabweichungen des Stempels zur Grundfläche, Überlast) beeinflusste die Qualität der Messergebnisse.

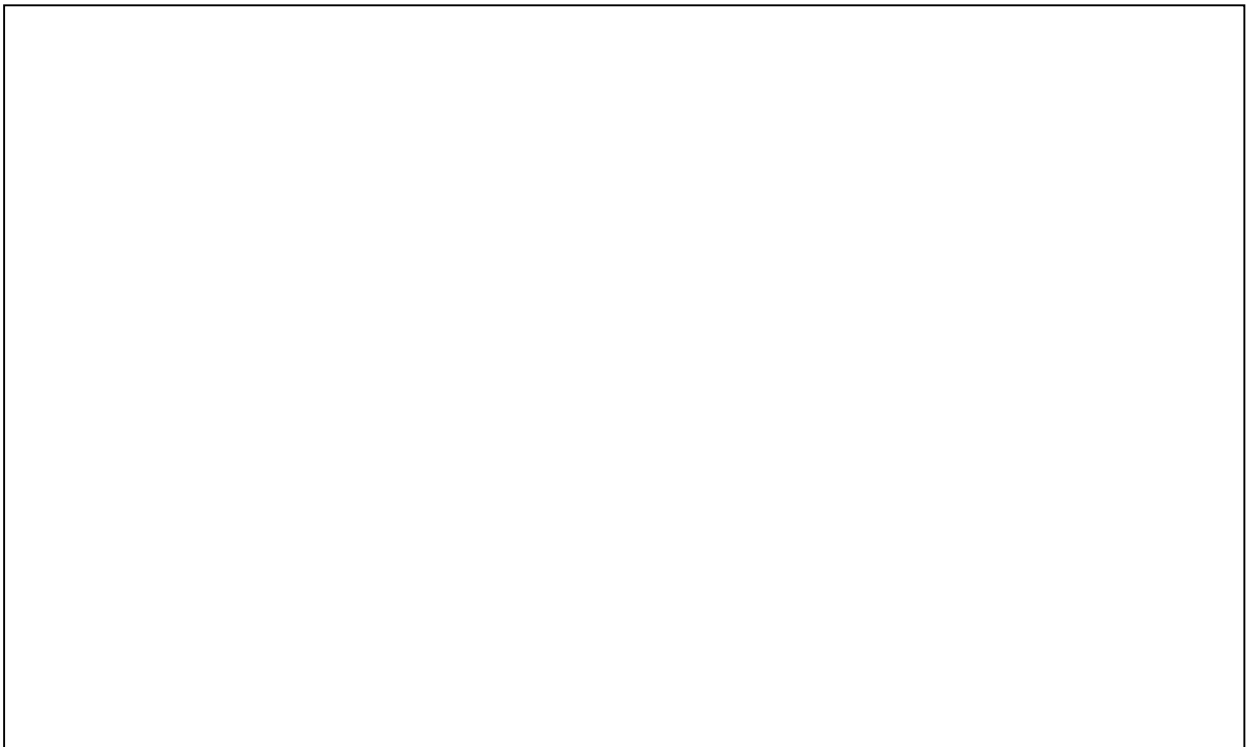
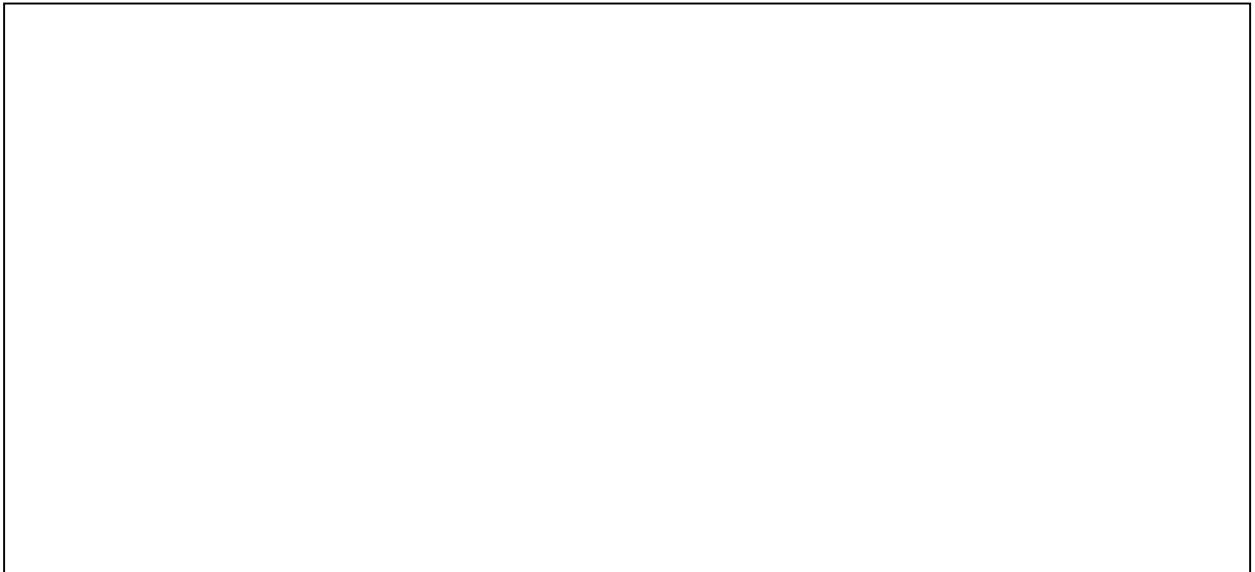
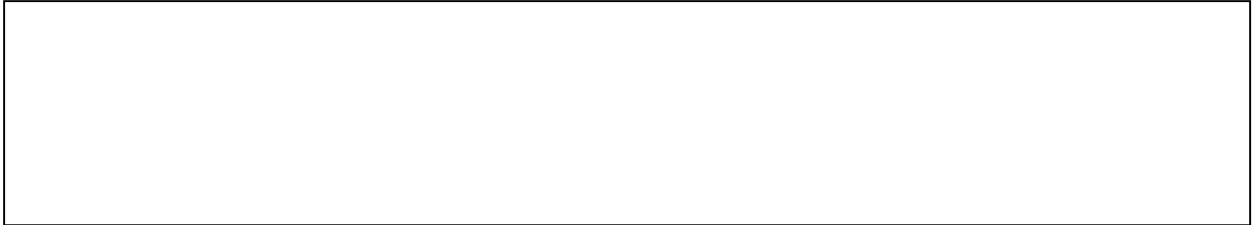


Abbildung 29: Kontaktierung der Sensorschichten (identische Bauteile beim Lieferanten und Schaeffler)

Abschlussbericht

Abbildung 29 zeigt unterschiedliche Prüfaufbauten im Hause Schaeffler. Entsprechendes Equipment zur Kontaktierung und des generellen Aufbaus wurden vom Lieferanten beigestellt, um diese Fehlerquelle ausschließen zu können.



Abbildung 30: Messreihen im Temperaturofen mit unterschiedlichen Sensorpaarungen



Abschlussbericht



Abbildung 31: Versuch Kraftkalibrierung von Sensor 2



Abschlussbericht

Zu Arbeitspaket 7:

In diesem Arbeitspaket wurde die Systemintegration und Funktionsverifikation näher untersucht. Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen waren die Grundlage, da in den Arbeitspaketen 3 bis 6 erzeugte Arbeitsergebnisse mit den zuvor erarbeiteten Funktionsanforderungen und Systemspezifikationen abgeglichen wurden.

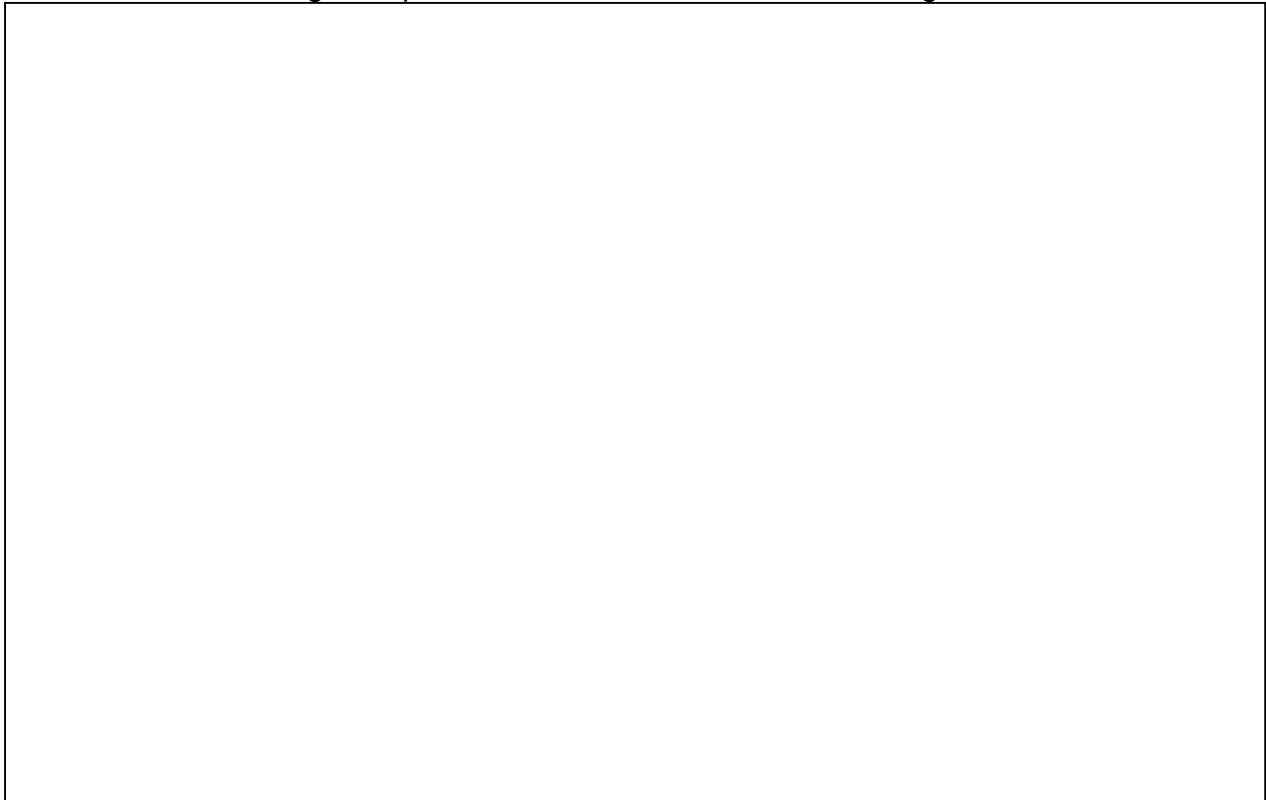
Aufgrund der bekannten ungünstigen Rahmenbedingungen während der gesamten Projektlaufzeit, mussten Zwischenziele teilweise angepasst werden und ursprünglich geplante Abläufe adaptiert, neu gedacht und teilweise komplett überarbeitet werden, um die Projektziele zu erreichen.

Entsprechend kamen, wie abgestimmt und im Abschlusstreffen von den jeweiligen Partnern vorgestellt, verfügbare Sensoren sowie vorhanden Entwicklungsplattformen für diese Zwecke zum Einsatz. Grundlage war für FPGA-Untersuchungen, die in der ersten Projektphase seitens FhG IMS vorgeschlagene Xilinx-Familie in unterschiedlichen Ausprägungen. Diese wurde so weit adaptiert, dass die Übertragbarkeit von Funktionen gegeben war. Die Modularität wurde im Projektverlauf bald zum Standard, da eine sehr hohe Flexibilität bei vielen Aufgabenstellungen auf Grund der Rahmenbedingungen notwendig wurde. Die ursprünglich nach dem Projektende geplante Implementierung von Funktionalitäten in der Schaeffler-internen Edge-Computing-

Abschlussbericht



Die Konnektivität ins Produktionsnetzwerk konnte somit realisiert werden, ebenso wie die Cloud-Anbindung, entsprechend der Architektur in Abbildung 33.



Mit diesem Kraftakt wurde ein großer Schritt in Richtung Verwertung der Projektergebnisse vollzogen, da mittels dieser produktionsnahen Lösung sehr effizient neue Funktionalitäten implementiert werden können und so ein wertvoller Beitrag zur Optimierung der Prozesssteuerung und Vermeidung von Störungen im Produktionsprozess geleistet wird.

Die gezielte Einbringung von Fehlerbilder wurde beispielsweise beim Gleich- und Gegenlaufräsen in Zusammenarbeit mit Firma Knowtion, wie auch beim End-of-Line Test von e-Achsen erfolgreich untersucht. Im folgenden Arbeitspaket 8 ist das zum Teil beschrieben.

Abschlussbericht

Zu Arbeitspaket 8:

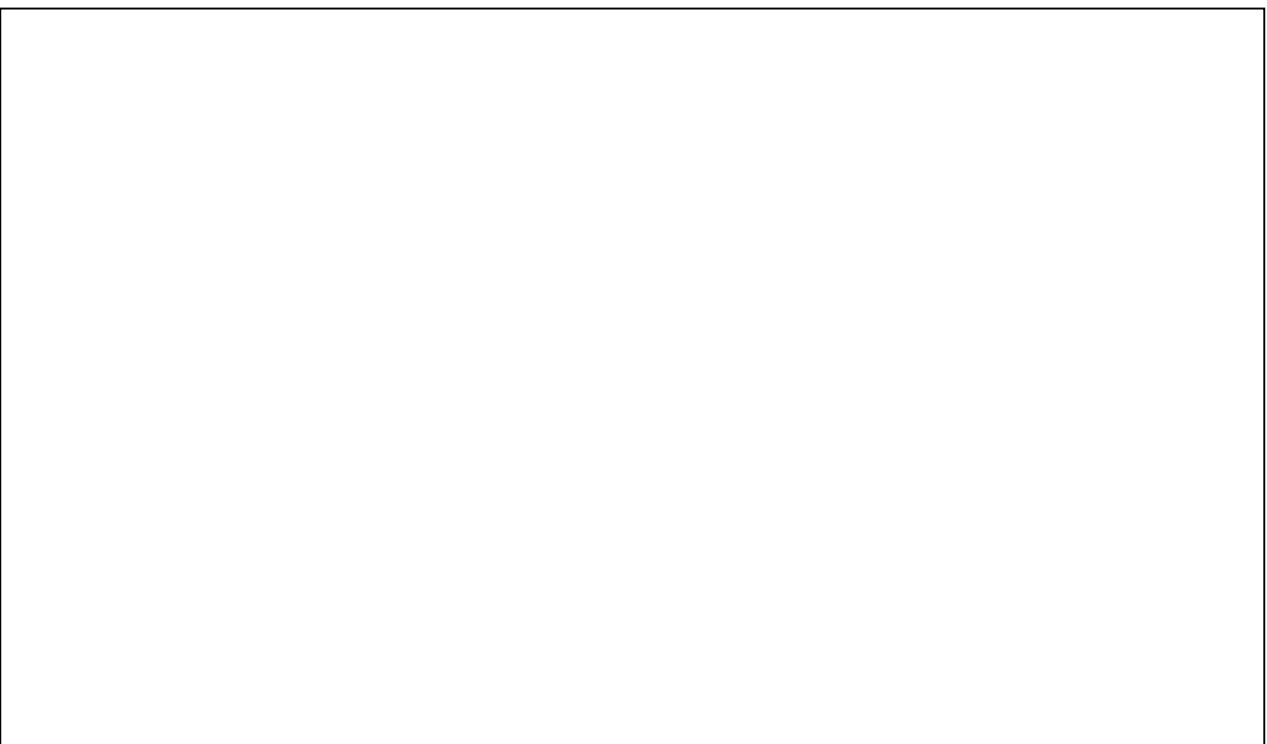
Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die erreichten Ergebnisse in den Anwendungsfällen zu demonstrieren, entsprechende Daten zur Bewertung aufzunehmen und mit den Ergebnissen der Anwendungsanalyse zu vergleichen. Im Hause Schaeffler wurden mehrere Anwendungen untersucht, vgl. Ausführungen zum Arbeitspaket 1.

Beispielhaft wird hier auf die Anwendungen Gleich- und Gegenlaufräsen, die Untersuchungen zum Wälzschälprozess sowie den End-of-Line-Prüfstand E-Achse eingegangen. Diese Ergebnisse wurden teilweise während des Abschlusstreffens am 18. Januar 2024 vorgestellt.

Gleich- und Gegenlaufräsen

Mit der Firma Knowtion wurde der Fräsprozess detailliert untersucht. Die für die Messkampagnen von Knowtion zur Verfügung gestellte Sensorik konnte leicht adaptiert werden, mittels mitgelieferter Software wurden die Daten des Multisensorsystems während der Messkampagnen dokumentiert und mit den parallel erzeugten Labels durch die Firma Knowtion und Schaeffler analysiert und entsprechend aufgearbeitet. Die Ergebnisse waren äußerst positiv und für einfache Prozesse sehr zuverlässig einsetzbar.

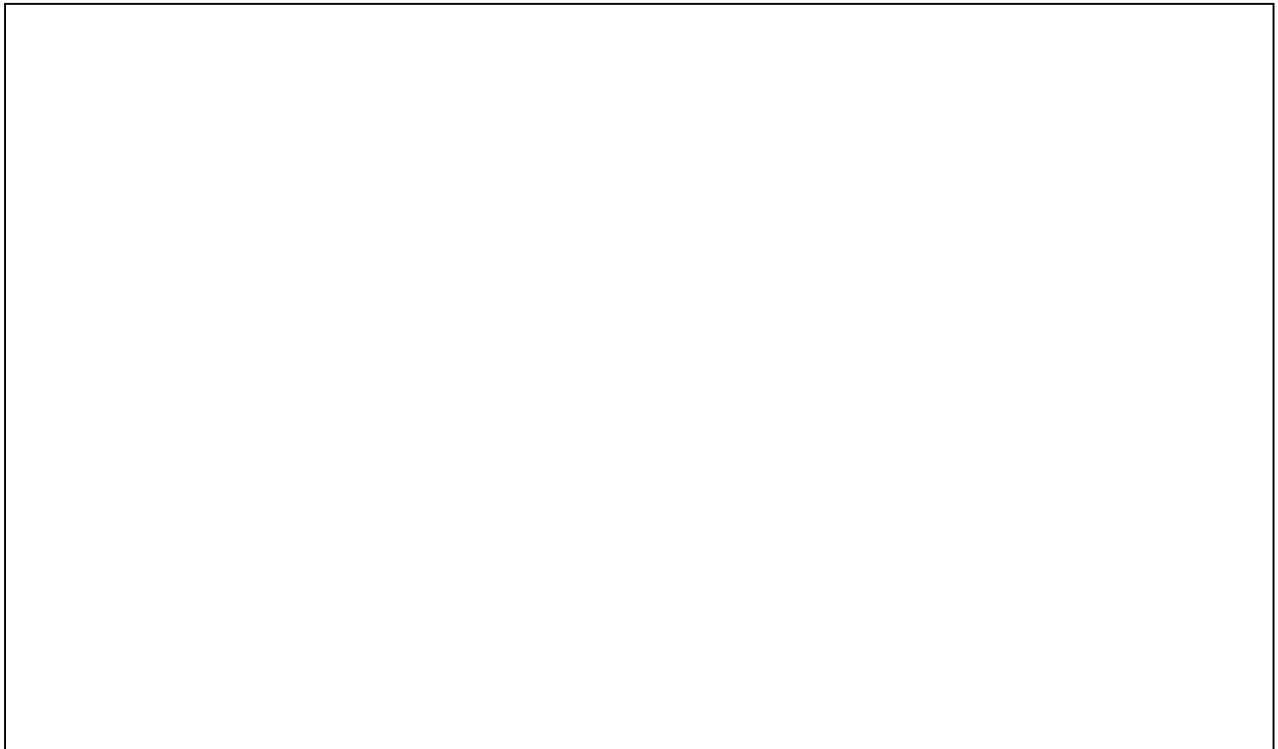
Die folgende Abbildung 34 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse, die mittels Mikrophone erfasst und weiterverarbeitet wurden. Zu erkennen sind die unterschiedlichen Randbedingungen bzgl. neuem Werkzeug, Verschleißfortschritt und Schneidenbruch. Die Unterschiede sind deutlich erkennbar.





Abschlussbericht

Zusätzlich zur Datenerfassung mit Mikrofon wurden Temperatur, Beschleunigung und Magnetsensordaten in unterschiedlichen Achsen gemessen und analysiert. Das Ergebnis der Klassifikation durch Firma Knowtion mit ausgewählten Sensoren und ausgewählten relevanten Sensordaten zeigt beispielhaft die Abbildung 35:

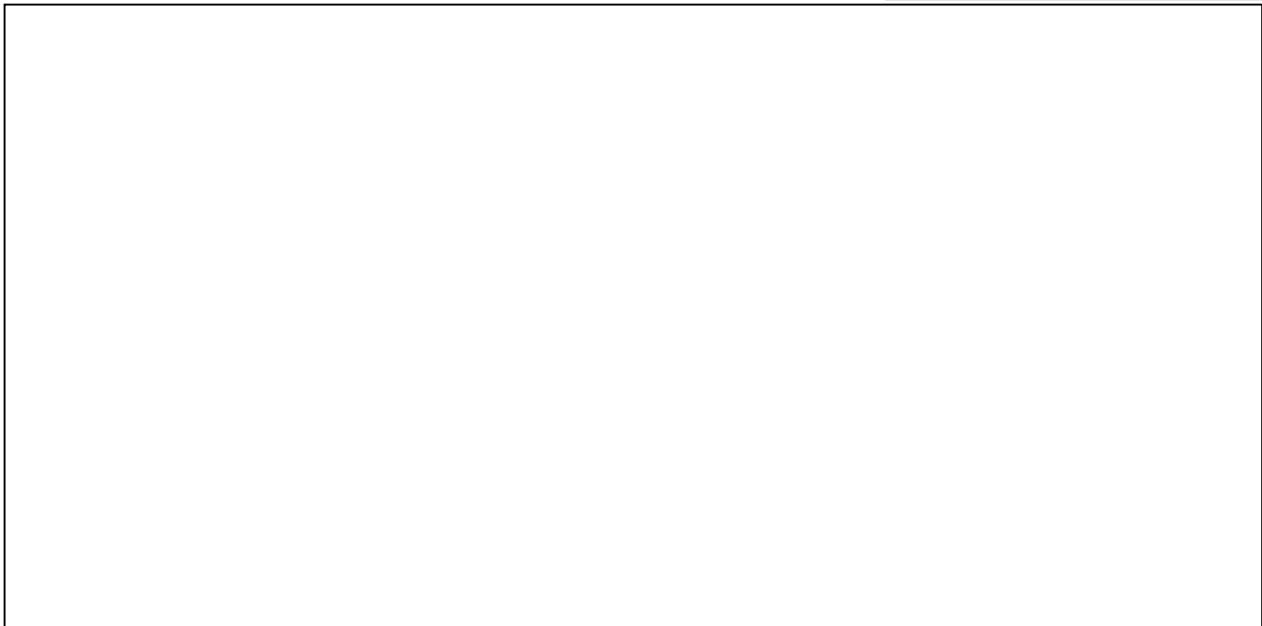


Wälzschälprozess

In sehr enger Zusammenarbeit mit den Partnern UdS und FhG IMS wurden mehrere Messkampagnen geplant, durchgeführt und analysiert. Die Ergebnisse waren sehr vielversprechend, jedoch traten teilweise Schwierigkeiten bei variierenden Prozessparametern auf. Es wurde klar, dass der Einsatz von einfachen ML-Modellen nicht ausreicht, um das komplexe Wälzschälverfahren abzubilden. Sich regelmäßig anpassende ständig lernende Modelle können im Vergleich zu einfach trainierten Modellen Abhilfe schaffen.

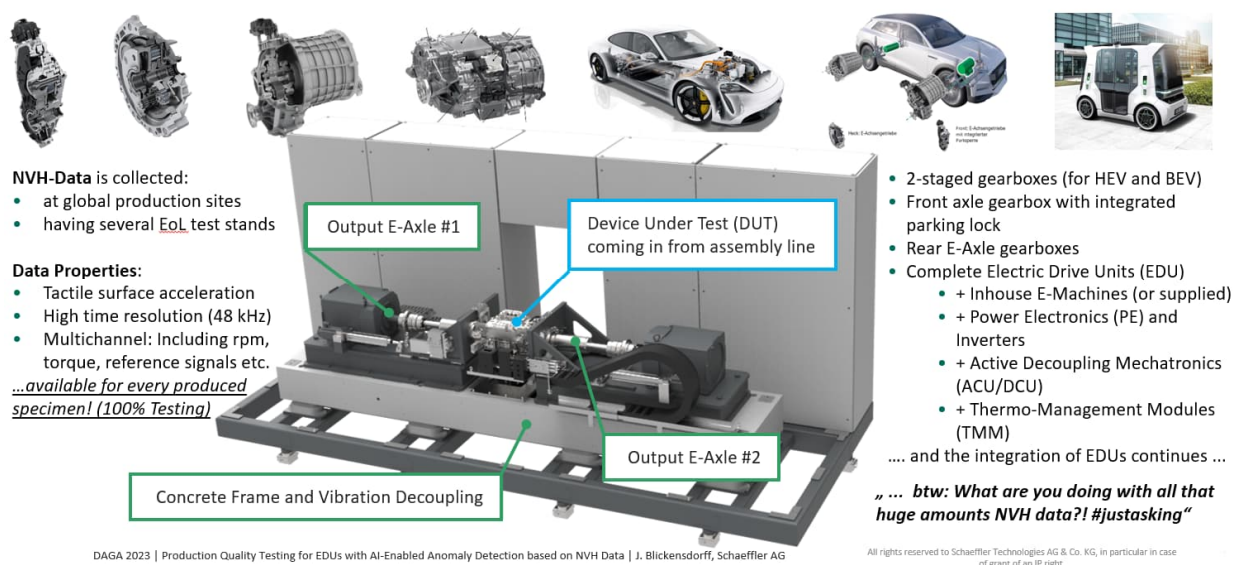
Detaillierte Ergebnisdarstellungen sind in den Arbeiten der Projektpartner UdS und FhG IMS bzw. in den entsprechenden Dissertationen der beteiligten Mitarbeiter beschrieben.

Die Abbildung 36 zeigt beispielhaft einen Überblick zum Wälzschälprozess und wie die Rohdaten erzeugt wurden.



EoL E-Achsen

In diesem Beispiel wird auf die Untersuchungen im End of Line Test von E-Achsen eingegangen, vgl. Abbildung 37. Zu Projektbeginn wurde mit den Partnern UdS und FhG IMS dieser Anwendungsfall untersucht. Seitens Schaeffler wurden Beispieldaten zur Verfügung gestellt. Diese wurden mittels „Golden-Samples“ erzeugt. Hierbei wurden gezielt Fehler eingebaut, die mit geeigneten Methoden zur Detektion von Anomalien führen sollten. Grundsätzlich wurden diese Fehler erkannt.



NVH-Data is collected:

- at global production sites
- having several EoL test stands

Data Properties:

- Tactile surface acceleration
- High time resolution (48 kHz)
- Multichannel: Including rpm, torque, reference signals etc.

...available for every produced specimen! (100% Testing)

Labels in diagram:

- Output E-Axle #1
- Device Under Test (DUT) coming in from assembly line
- Output E-Axle #2
- Concrete Frame and Vibration Decoupling

Components and Features:

- 2-staged gearboxes (for HEV and BEV)
- Front axle gearbox with integrated parking lock
- Rear E-Axle gearboxes
- Complete Electric Drive Units (EDU)
 - + Inhouse E-Machines (or supplied)
 - + Power Electronics (PE) and Inverters
 - + Active Decoupling Mechatronics (ACU/DCU)
 - + Thermo-Management Modules (TMM)

... and the integration of EDUs continues ...

„ ... btw: What are you doing with all that huge amounts NVH data?! #justasking“

DAGA 2023 | Production Quality Testing for EDUs with AI-Enabled Anomaly Detection based on NVH Data | J. Blickensdorff, Schaeffler AG

All rights reserved to Schaeffler Technologies AG & Co. KG, in particular in case of grant of an IP right.

Abbildung 37: NVH based End of Line Testing for E-Mobility Applications

Zur Verstetigung und Absicherung des EoL-Prozesses war es jedoch notwendig die zur Verfügung gestellte Datenmenge deutlich zu erhöhen. Leider konnte Schaeffler

intern die Freigabe weiterer Daten nicht erreichen, so dass Schaeffler-intern mit der Unterstützung der Partner weitere Untersuchungen durchgeführt wurden. Hierfür wurden mehrere Terrabyte Daten von mehreren Produktlinien gesammelt und analysiert.

Am End-of-Line-Prüfstand wurden Schwingungsmessdaten im Hochfrequenzbereich erfasst und in großen Datenmengen gespeichert. Ebenso Drehzahl, Drehmoment und Referenzsignale. Mit Hilfe einer Edge-Computing-Hardware und einer Cloud-Anbindung wurden diese Daten aufbereitet, gefiltert und für das Training von ML-Modellen herangezogen. Insbesondere die Orderanalyse, MFCC-Berechnungen und andere Frequenz- bzw. Zeitbereichsfeatures spielten hierbei eine zentrale Rolle.

So gewonnenen Merkmale durchliefen ein Feature Ranking und eine Reduktion, um die aussagekräftigsten Indikatoren für Produktqualität zu bestimmen. Klassifikations- und Clustering-Algorithmen (z.B. SVM, K-means) lieferten erste vielversprechende Resultate darin, Abweichungen vom Normalzustand zu erkennen.

Im Ergebnis wurden die Prozesse segmentiert, die Baseline für den Einsatz von ML-Methoden optimiert und zur Verwertung der Öffentlichkeit präsentiert (z.B. DAGA 2023 und DAGA 2024).

1.2 *Ergebnistransfer / Kooperation*

Während des Berichtszeitraums erfolgte die Teilnahme an Projekt- und Arbeitstreffen, organisiert als Online-Meetings. Hybridveranstaltungen waren teilweise unter Auflagen möglich (z.B. das 2. Jahrestreffen in Villingen-Schwenningen beim Projektpartner Hahn-Schickard). Hinzu kamen wöchentliche Regeltermine zu den jeweiligen Arbeitspaketen. Hier wurden die Arbeiten der Partner koordiniert und über Arbeitsfortschritte / -ergebnisse berichtet. Schwerpunkte waren die Detailspezifikationen der Anwendungsfälle, die Gesamtarchitektur, die Erforschung des Maschinellen Lernens zur Zustands- und Schadenserkennung in den Anwendungen, der Hardware-Entwurf für die „KI-MUSIK4.0 Hardware Plattform“ sowie die Untersuchung der Sensorfunktionsschicht.

Die Projektergebnisse wurden auf vielen öffentlichen Veranstaltungen vorgestellt, z.B. Halbzeittreffen vor dem Mikrosystemtechnik-Kongress 2021, HMI 2022, Festo.io 2023, DAGA 2022, 2023 und 2024, um nur einige Veranstaltungen zu nennen.

Mehrere Dissertationen und studentische Arbeiten konnten von den Projekthalten / -ergebnissen profitieren und wurden somit in Wissenschaft und Lehre präsent.



Abschlussbericht

2. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Der Stand der Bearbeitung entspricht im Groben der Planung, Abweichungen und Verzögerungen müssen jedoch offen eingestanden werden.

Auf Grund der geopolitischen, aber auch der sich speziell in Deutschland sehr dynamisch geänderten politischen, Rahmenbedingungen während der Corona-Zeit und den damit verbundenen Unwägbarkeiten (z.B. Mitarbeiterverfügbarkeit, Lieferengpässe), waren Abweichungen nicht zu vermeiden. Beispielhaft sind hier einige Rahmenbedingungen aufgeführt, vgl. Anlage 38.



Abbildung 38: Rahmenbedingungen (beispielhaft) von der Projektskizze bis zum Abschlusstreffen

Unabhängig von den äußerst ungünstigen Rahmenbedingungen wurde stetig versucht, geplante Arbeiten entsprechend der veränderten Situation anzupassen, teilweise zu parallelisieren bzw. wenn möglich vorzuziehen, um Abweichungen und Verzögerungen zu minimieren. Unter diesen Umständen war es erforderlich die Projektlaufzeit kostenneutral um 9 Monate zu verlängern.



3. Änderung der Aussichten zur Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Kostenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse erlauben es, das Erreichen der Vorhabenziele als gut einzustufen. Eine kostenneutrale Projektverlängerung war jedoch notwendig.

4. Bekannt gewordene FE-Ergebnisse Dritter, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind

Während des Berichtszeitraumes wurden keine FE-Ergebnisse Dritter bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

5. Notwendige Änderung der Zielsetzung

Aufgrund des Projektverlaufs war keine Änderung der Zielsetzung notwendig.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans

6.1 *Gemachte Erfindungen, vorgenommene Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte*

Keine.

6.2 *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende*

Hierzu ergaben sich keine Änderungen gegenüber dem Antrag.

Abschlussbericht



6.3 *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende*

Hierzu ergaben sich keine Änderungen gegenüber dem Antrag.

6.4 *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

Hierzu ergaben sich keine Änderungen gegenüber dem Antrag.