

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht

ZE: AUDI AG	Förderkennzeichen: 13IK001E
Vorhabenbezeichnung:	SDM4FZI – Software-Defined Manufacturing für die Fahrzeug- und Zuliefererindustrie
Teilvorhaben:	Zukunftsfähige cloudbasierte Steuerungstechnologie
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2021 – 30.09.2024
Projektleitung:	Herr Markus Weißmann AUDI AG

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Voraussetzungen	5
1.3 Planung und Ablauf.....	7
1.4 Ausgangspunkt	9
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
2. Eingehende Darstellung	11
2.1 Ergebnisse des Forschungsvorhabens	11
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	25
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	25
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	25
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mechanismen von Software-Defined Manufacturing	6
Abbildung 2:Arbeitspaketstruktur	8
Abbildung 3: Verbundpartner SDM4FZI.....	10
Abbildung 4: DevOps-Prozess.....	12
Abbildung 5: Architekturentwurf einer virtuellen Steuerung im Shopfloor bei Audi	13
Abbildung 6: Virtualisierung der Steuerung.....	14
Abbildung 7: Vergleich derzeitiges Produktionsnetz (links) vs. verbessertes Produktionsnetz (rechts)	15
Abbildung 8: Architektur Cloud-Robotics	16
Abbildung 9: Roboter-Endpunkt mit MQTT-Client und Programm-Cache	17
Abbildung 10: Prototyp Roboter-Endpunkt mit MQTT-Konfiguration	17
Abbildung 11: Applikationsserver mit Anwendung/Modell und Kommunikationspartnern.....	18
Abbildung 12: Föderierte MQTT-Broker mit Rechenzentrums- und Produktionsanlagenzone	19
Abbildung 13: Alte Roboterzelle	20
Abbildung 14: Konzept für die neue Roboterzelle	21
Abbildung 15: CAD-Modell der Produktionshalle mit Roboterzelle und Datacentercontainer	21
Abbildung 16: CAD-Modell der geplanten Roboterzelle mit FTS.....	22
Abbildung 17: Geplante Radarüberwachung für die Roboterzelle.....	23

1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die IT- und Automatisierungsinfrastruktur ist über die letzten zwanzig Jahre historisch gewachsen. In einer modernen Fertigung finden sich immer noch die gleichen technologischen Lösungen wie in den 90er Jahren. Dementsprechend hat sich auch die SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) kaum verändert. Daher sind sämtliche Umbauten und die Flexibilisierung der Anlagen nur sehr umständlich machbar. Gerade in der heutigen Zeit, in der die Fertigung viel schneller und flexibler werden muss (z.B. E-Mobilität und Digitalisierung), ist es unerlässlich, neue Konzepte und Lösungen für die Steuerungstechnik zu entwickeln.

Die Herausforderung in der Fahrzeug- und ihrer Zulieferindustrie besteht somit heute vor allem darin, in sich schnell verändernden Märkten und unter turbulenten Bedingungen wirtschaftlich zu agieren. Deshalb müssen Produktionssysteme mit ihren Anlagen, Maschinen, Prozessen, Logistik und Mitarbeitern bei sich ändernden Rahmenbedingungen anpassungsfähig und vor allem wandelbar sein. Gerade in der Automobilproduktion ist diese Herausforderung seit der COVID-19-Pandemie, der Transformation zu neuen Mobilitätskonzepten oder Lieferengpässen von Computerchips deutlich zu erkennen.

Eine wesentliche Zielsetzung der Industrie 4.0 sind hochwandlungsfähige Produktionssysteme. Die Wandlungsfähigkeit bezieht sich dabei auf die Stückzahl und den Variantenreichtum der zu fertigen Produkte sowie die dazu notwendigen Prozesstechnologien. Zusätzlich sind auch die Geschwindigkeit und Häufigkeit von erforderlichen Anpassungen entscheidende Faktoren. Eine konsequente Umsetzung derartiger Wandlungsfähigkeit über die gesamte Zulieferkette ermöglicht auch ein schnelleres Time-to-Market bei neuen Produkten. Dabei ist schon bei kleineren Losgrößen eine wirtschaftliche Automatisierung möglich. Zusätzlich werden die stetige Skalierbarkeit und somit die wirtschaftliche Herstellung steigender Stückzahlen möglich. Nur durch eine konsequente Umsetzung der digitalen Transformation mit der Vision einer wandlungsfähigen Produktion über die gesamte Zulieferkette hinweg kann der Wirtschaftsstandort Deutschland international wettbewerbsfähig bleiben.

Um Wandlungsfähigkeit zu erreichen, sind Produktionssysteme hardwareseitig oft bereits modular gestaltet und können bei Bedarf mechanisch umgebaut werden. Vorgedachte Umbauten werden in der zugehörigen Software über alle Ebenen hinweg bislang jedoch starr abgebildet und erlauben daher nur eine eingeschränkte Flexibilität, aber keine echte Wandelbarkeit. Sind Umbauten oder Änderungen bei Prozessabläufen nicht vorgedacht, ist ein aufwendiges manuelles Neuprogrammieren der Software notwendig. Darüber hinaus ist die Software bislang jeweils speziell für eine bestimmte Hardwarekonfiguration entwickelt und fest integriert. Sämtliche Softwareänderungen aufgrund von Fehlern, Defekten und insbesondere der Schaffung von Mehrwertdiensten zu neuen Fertigungsprozessen sowie Personalunterstützung, Regelungsmethoden, Optimierungsverfahren, Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI), usw. sind daher zeitaufwendig und wenn überhaupt nur eingeschränkt durchführbar. Die Entwicklung von Software stellt inzwischen den Hauptkosten- und -risikofaktor für viele Unternehmen der Automobil- und Zulieferindustrie dar und der Softwareanteil in der Wertschöpfung nimmt stetig zu. Gleichzeitig liegt aber genau darin die größte Chance. Mit welchem Aufwand und wie effizient Software für die Fahrzeugproduktion erzeugt und angepasst werden kann, ist somit ein entscheidender Wettbewerbsfaktor.

Dem Aspekt der Softwareerstellung über alle Ebenen der Produktion hinweg wurde von der Industrie 4.0 bislang nur wenig Aufmerksamkeit gezollt. Ein Grundproblem, warum Wand-

lungsfähigkeit heute nur eingeschränkt möglich ist, liegt vor allem darin, dass es keine konsequente Entkopplung (Abstraktion) zwischen dem ausführenden physikalischen Anteil (Hardware) der Produktionssysteme und dem steuernden Softwareanteil gibt. Auch heutige mechatronische Module und cyber-physische Systeme haben diese extrem enge Kopplung zwischen Hardware und Software. Auch Software in höheren Ebenen der Produktion ist meist starr auf die Produktionssysteme hin angepasst und daher eng mit ihnen gekoppelt. Dabei sind Ansätze für eine effiziente Adaptierbarkeit von Geräten, deren Funktionalitäten und Infrastruktur rein durch Software in anderen Branchen, wie z.B. in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) durch Hardwareabstraktion, bereits verfügbar. Um Software effizient zu erstellen, kommen dort modellgetriebene Ansätze zum Einsatz. Aber auch ausreichend genaue Modelle (Digitale Zwillinge) fehlen bis heute in der Fahrzeugproduktion und entlang der Zulieferkette für die eingesetzten Produktionssysteme, deren Komponenten und für die zu fertigenden Produkte. Insbesondere der konsequente Aufbau digitaler Zwillinge über die Entwicklung und den Betrieb von Produktionssystemen über das Zuliefernetzwerk hinweg fehlt. Ebenso fehlen Methoden zur Beherrschung und wirtschaftlichen Betrachtung von wandlungsfähigen Produktionssystemen.

Im Rahmen des Förderprojektes SDM4FZI wird dem Streben nach Wandlungsfähigkeit durch die effiziente (weil automatisierte) Erstellung von Software anhand digitaler Zwillinge auf allen Ebenen der Automobilproduktion und der Zuliefernetzwerke Rechnung getragen. Das Zuliefernetzwerk fokussiert sich in diesem Projekt insbesondere auf die Hersteller von Komponenten, Maschinen und Produktionssystemen, die notwendig sind, um ein Fahrzeug und dessen Bauteile zu fertigen. Durch die Projektergebnisse wird die gesamte deutsche Fahrzeug- und Zulieferindustrie wandlungsfähiger und kann auch zukünftig wirtschaftlich in turbulenten Märkten produzieren und bleibt innovationsfähig.

Das Gesamtziel von SDM4FZI besteht darin, die komplette Steuerungssoftware unabhängig von der Hardware der Produktionssysteme zu gestalten und einen erweiterten digitalen Zwilling zu schaffen, anhand dessen Software automatisch generiert und getestet werden kann.

Audi hat es sich im Rahmen des Verbundvorhabens SDM4FZI zum Ziel gesetzt, die Steuerungstechnik nach modernen IT-Paradigmen weiterzuentwickeln. Gerade Cloud-native Ansätze, die vollständig virtualisiert sowohl im lokalen Rechenzentrum als auch in der Cloud lauffähig sind, sollen als Lösungsansatz für neue Steuerungssysteme dienen. Audi, als zukünftiger Endkunde, nimmt die Rolle des Anforderers und Testers ein. Dies ist eine wichtige Rolle, da so sichergestellt wird, dass die entwickelten Konzepte schlussendlich in der Industrie zielführend eingesetzt werden können.

1.2 Voraussetzungen

Das Forschungsvorhaben SDM4FZI bezieht sich auf das Modul (a) der Bekanntmachung der Förderrichtlinie „Investitionsprogramm zur Modernisierung der Produktion in der Fahrzeughersteller- und Zulieferindustrie“ im Förderrahmen „Zukunftsinvestitionen Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie“ im Bundesanzeiger BAnz AT 26.03.2021 B4 und zielt auf die Modernisierung der Produktion der Fahrzeughersteller und Zulieferbetriebe als Schub für Produktivität und Resilienz ab.

Damit fokussiert SDM4FZI die förderpolitischen Kernziele des Programms. Die wichtigste Zielgröße des Projektes ist die Wandlungsfähigkeit, um insbesondere Arbeitsplätze am Standort Deutschland sicherzustellen – auch in zukünftigen volatilen Märkten. Die Beherrschung der Wandlungsfähigkeit stellt einen wichtigen Kernforschungs- und Innovationsinhalt

dar. Die beteiligten SDM4FZI-Partner bilden dabei die unterschiedlichsten Stufen der automobilen Zuliefererkette ab und fokussieren maßgeblich die Zuliefererbetriebe, welche den Großteil des Transformations- und Veränderungsdrucks zu spüren bekommen und somit gleichzeitig als Anwender sowie Befähiger der SDM-Innovation fungieren.

Software-Defined Manufacturing (SDM) ist ein neuartiger Lösungsansatz zur Schaffung von Wandlungsfähigkeit für die Fahrzeug- und Zulieferindustrie (SDM4FZI), der sich aus der IKT ableitet. Als Analogie dient das Konzept des Software-Defined Networking (SDN), das es erlaubt, dass Netzwerkadministratoren ein Kommunikationsnetzwerk effizient und wirtschaftlich anpassen können, da unterlagerte Hardware-Funktionen abstrahiert und geeignet modelliert sind. Die Netzwerkfunktionen werden rein durch die Software bestimmt. Entsprechend lässt sich ein Smartphone mit der integrierten Sensorik beispielsweise rein durch Apps auch als Wasserwaage, Visitenkartenscanner oder Lautstärkemessgerät verwenden. Die Kombination mehrerer Geräte erlaubt beispielsweise eine Stauerkennung für den Straßenverkehr oder eine Corona-Warn-App. Diese Funktionen waren nicht während der Entwicklung des Smartphones vorgedacht, sondern sind rein durch Softwareerweiterungen definiert und erlauben so eine hohe Wandlungsfähigkeit des Smartphones und dessen Infrastruktur rein durch Software. Analog wird bei SDM4FZI die Hardware, d.h. die physikalischen realen Module der Produktionssysteme, nicht mehr manuell programmiert und statisch konfiguriert, sondern die Fähigkeiten der modularen Produktionssysteme rein durch Software definiert. Abbildung 1 zeigt die Mechanismen von Software-Defined Manufacturing.

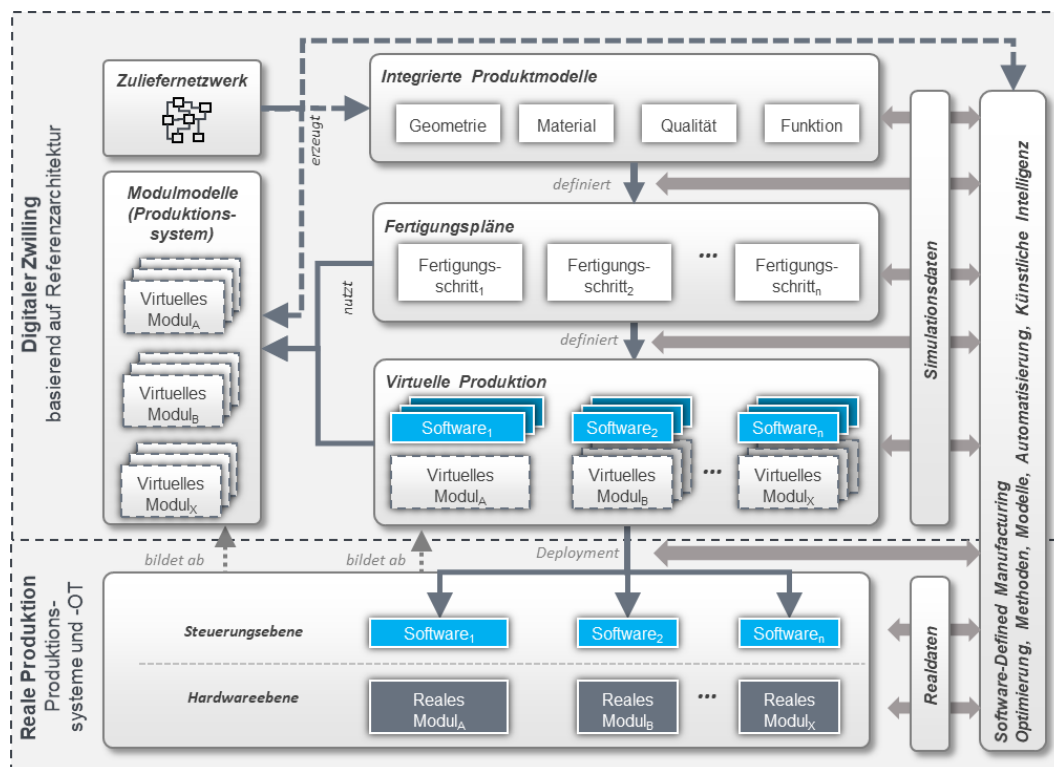


Abbildung 1: Mechanismen von Software-Defined Manufacturing

SDM4FZI wird es erlauben, frei definierte Funktionalitäten innerhalb der physikalischen Grenzen der mechanischen, elektrischen und fluidischen Komponenten eines Produktionssystems beliebig zu definieren. Heutige Fertigungsanlagen mit ihrer aktuellen Steuerungsarchitektur bieten jedoch nicht die technische Grundlage für ein solches Konzept. Zentrale Voraussetzung für SDM4FZI seitens der Produktions-OT (Operational Technology) ist daher die

Entkopplung von physikalischen Modulen der Produktionssysteme und der darauf ausgeführten Software durch Abstraktion und Virtualisierung (Trennung in Hardware- und Steuerungsebene). Die Steuerungsebene erstreckt sich dabei von der Firmware auf der Feldebene bis hin zur Produktionssteuerung.

Für die AUDI AG lag der Schwerpunkt auf dem Einsatz von modernen IT-Technologien, um die Fertigung von morgen aktiv mitgestalten zu können. Audi nutzt dieses Forschungsprojekt, um frühzeitig bei der Entwicklung eines neuen, ökologischen Ansatzes hinsichtlich der Automatisierungstechnik mitarbeiten zu können. Dabei lag der Fokus auf der Definition der notwendigen Anforderungen, damit die neuen Technologien auch wie geplant eingesetzt werden können. Das wichtigste Arbeitsziel der AUDI AG war hierbei, neue Steuerungstechnologien zu entwickeln. Dabei spielte es eine essenzielle Rolle, eine Ende-zu-Ende Lösung zu entwickeln. Folgende notwendige Schritte galt es dafür umzusetzen:

- Entwicklung der neuen Steuerungstechnik
- Konzeption für die Netzwerkanbindung der Anlagentechnik mit der Cloud
- Automatisiertes Testing und Deployment

Diese einzelnen Arbeitspakete ergeben zusammen einen schlüssigen Lösungsbaukasten, der eine neue und gleichzeitig innovative Methode beschreibt, wie die Automatisierungstechnik in Zukunft Lösungen entwickelt.

Die Expertise der AUDI AG floss in folgende Bereiche ein:

- Erfahrung aus dem Betrieb mehrerer Großserienfertigungen
- Einsatz modernster Fertigungstechnologien
- Einsatz von Cloud-Technologien in der Shopfloor-IT

1.3 Planung und Ablauf

Die technischen Projekteinhalte des Förderprojektes SDM4FZI untergliedern sich in 7 Arbeitspakete (APs), wobei zwischen Befähiger-APs (AP B1-3) und Solution Set APs (AP S1-4) unterschieden wird. Im Rahmen der Solution Sets (S) werden, unter Leitung der Industriepartner, Lösungsansätze anhand von konkreten Use Cases (UCs) erforscht. Bei den universitätsgeleiteten Befähigern (B) werden Querschnittsthemen (Architekturen, Methoden, Infrastrukturen, Modelle, Strategien und Konzepte) erforscht, sodass sich insgesamt eine Matrixstruktur ergibt, wie es Abbildung 2 zeigt. In den S-APs werden themenspezifische Demonstratoren aufgebaut, sodass sich die entwickelten S-Lösungsansätze unter Verwendung der Lösungen aus B validieren lassen.

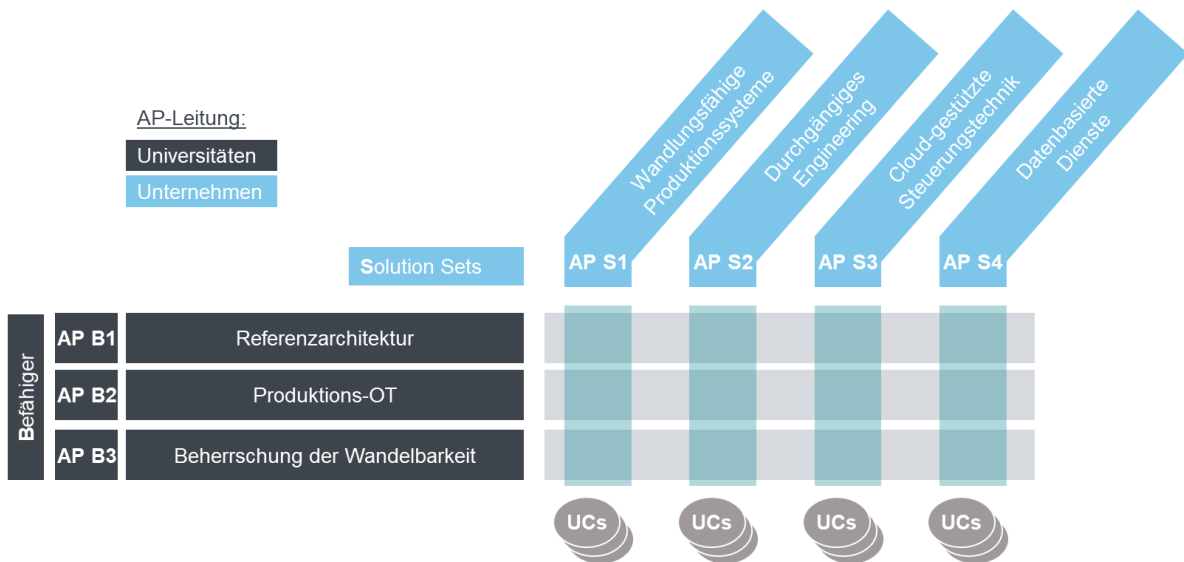


Abbildung 2:Arbeitspaketstruktur

Nachfolgend werden die wesentlichen Inhalte der Arbeitspakete beschrieben, an denen Audi aktiv beteiligt war. Eine detaillierte Beschreibung der Tätigkeiten erfolgt im Kapitel 2.1.

Arbeitspaket B1: Referenzarchitektur zur Digitalisierung

Im Arbeitspaket B1 lag der Fokus auf der Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Digitalisierung bestehender und zukünftiger Zuliefernetzwerke in der Fahrzeug- und Zuliefererindustrie. Basis hierfür bildeten zu schaffende Definitionen mit Referenzcharakter, die festlegen, wie unterschiedliche Aspekte von Produktionsnetzwerk und von den untergeordneten Produktionssystemen durchgängig als digitale Zwillinge abgebildet werden können. Für Audi lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung allgemein einsetzbarer Produkt-, Werkstück- und Qualitätsmodelle. Dabei spielte es auch eine wichtige Rolle, moderne Methoden (z.B. DevOps) dahingehend zu untersuchen, inwieweit sie sich für den Einsatz in der Automatisierungstechnik eignen.

Arbeitspaket B2: Produktions-OT

Das Ziel von AP B2 war die Entwicklung grundlegender Virtualisierungs- und Cloud-Konzepte als technologische Basis der zukünftigen Produktions-OT für den SDM-Ansatz. Die Virtualisierung hat bereits in vielen Bereichen der IT revolutionäre Innovationen wie das Cloud-Computing, App-Konzepte und Software-Defined Networking ermöglicht und soll nun für die Nutzung im Rahmen der Produktions-OT weiterentwickelt werden. Audi legte dabei besonderen Fokus auf die Weiterentwicklung der klassischen Automatisierungstechnik durch den Einsatz moderner Cloud-Technologien mit dem Ziel, eine Edge-Cloud mit SPS-Funktionalität aufzubauen sowie ein Konzept zur Notlauffähigkeit zu erstellen.

Arbeitspaket S3: Virtualisierte Steuerungstechnik und Softwareentwicklung

Im Rahmen des Arbeitspakets S3 ging es um neue Möglichkeiten, die sich durch eine virtualisierte Steuerung in Kombination mit digitalen Zwillingen ergeben. Hierbei lag ein Fokus darauf zu untersuchen, wie Komponenten wiederverwendet werden können, indem benötigte Software und die digitalen Zwillinge modularisiert werden. Des Weiteren wurde betrachtet, wie Updates einzelner Module in ein bestehendes Gesamtsystem überführt werden können. Audi konzentrierte sich auf das Testen von virtuellen „Hardware-in-the-Loop“ – Ansätzen. Diese dienen dazu, schneller und kostengünstiger entwickeln und testen zu können.

1.4 Ausgangspunkt

Stand der Wissenschaft und Technik

Die aktuelle Steuerungstechnik ist als dezidierte Hardware ausgeführt und diese Produkte stellen den aktuellen Stand der Technik dar. Die Wissenschaft beschäftigt sich zum Teil mit der Weiterentwicklung, jedoch geht die Forschung nicht weit genug. Es reicht nicht aus, nur allein die Steuerungstechnik weiterzuentwickeln, es müssen radikal neue Ansätze gefunden werden, um die in die Jahre gekommene Automatisierungstechnik in das neue digitale Zeitalter zu heben. Daher ist es so wichtig, dass die AUDI AG als zukünftiger Endnutzer dieser Technologie die Lösungsbausteine mitgestaltet.

Um die digitale Transformation im Sinne von SDM4FZI in den beteiligten Unternehmen reibungsfrei umzusetzen, ist eine geeignete Vorgehensweise zur Gestaltung des digitalen Wandels in der Automobilindustrie unter Einbeziehung aller an Produktion und Produkt beteiligten Parteien notwendig. SDM4FZI knüpft an Projekte mit Fokus auf die Optimierung des Produktentstehungsprozesses an, indem am Ende des durchgängig digitalen Produktentstehungsprozesses eine Produktbeschreibung steht, die von SDM4FZI zur Softwaregenerierung genutzt und durch Rückspeisung von Produktionsdaten optimiert werden kann.

Als besondere Alleinstellungsmerkmale von SDM4FZI sind vor allem die Virtualisierung und nahtlose Komponenten-Integration über alle Steuerungsebenen, die effiziente Generierung von Software, die wegweisende Referenzarchitektur für den Digitalen Zwilling sowie die einfache Anpassung an Standards der Automobilproduzenten zu nennen.

Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Der AUDI AG sind gegenwärtig keine bestehenden Schutzrechte bekannt, die einer Verwertung der Projektergebnisse im Wege stehen.

Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Der Audi-Konzern mit seinen Marken Audi, Bentley, Ducati und Lamborghini ist einer der erfolgreichsten Hersteller von Automobilen und Motorrädern im Premiumsegment. Er ist weltweit in mehr als 100 Märkten präsent und produziert an 22 Standorten in 13 Ländern. 100-prozentige Töchter der AUDI AG sind unter anderem die Audi Sport GmbH (Neckarsulm), die Automobili Lamborghini S.p.A. (Sant'Agata Bolognese/Italien) und die Ducati Motor Holding S.p.A. (Bologna/Italien).

2023 hat der Audi-Konzern rund 1,895 Mio. Automobile der Marke Audi sowie 10.112 Sportwagen der Marke Lamborghini, 13.560 Luxusautomobile der Marke Bentley und 58.224 Motorräder der Marke Ducati an Kunden ausgeliefert. Im Geschäftsjahr 2023 erzielte der Premiumhersteller bei einem Umsatz von 69,9 Mrd. € ein Operatives Ergebnis von 6,3 Mrd. €. Zurzeit arbeiten weltweit rund 87.736 Menschen für das Unternehmen, davon 53.919 in Deutschland. Mit neuen Modellen, innovativen Mobilitätsangeboten und attraktiven Services wird Audi zum Anbieter nachhaltiger, individueller Premiummobilität.

Im Geschäftsjahr 2023 wurden insgesamt 5.436 Mio. € in F&E-Aktivitäten investiert. Ferner sind aktuell ca. 13.898 Mitarbeiter für F&E innerhalb der AUDI AG beschäftigt.

Audi war und ist an verschiedenen nationalen und europäischen Forschungsprojekten im Bereich XY auch in enger Kooperation mit Universitäten und Forschungseinrichtungen beteiligt, Projekte hierzu sind z. B. AI4DI und 5GInsel.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die AUDI AG konnte im Rahmen des Projektes SDM4FZI mit namhaften Partnern aus Wirtschaft und Forschung zusammenarbeiten. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht aller Verbundpartner.



Abbildung 3: Verbundpartner SDM4FZI

2. Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse des Forschungsvorhabens

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, die im Projektverlauf erzielt wurden, zusammengefasst. Ebenfalls aufgezählt werden andere wesentliche Ereignisse, die den Projektverlauf beeinflusst haben. Die nachfolgende Beschreibung im Projekt SDM4FZI ist nach den Arbeitspaketen strukturiert, in denen die AUDI AG aktiv war.

Arbeitspaket B1: Referenzarchitektur zur Digitalisierung

Für das Arbeitspaket B1 hat Audi die erarbeitete Referenzarchitektur aus der Sicht eines Automobilherstellers überprüft. Hierbei wurde untersucht, ob sich die Anwendungsfälle von Audi damit umsetzen lassen und sich die Architektur in bestehende Standards von OEMs einfügen lässt. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf den Schnittstellenfunktionen zwischen Automatisierungsanlagen und Shopfloor-IT. Dabei wurde festgestellt, dass eine starke Aufrüstung im Produktionsnetz benötigt wird, um den Anforderungen des Projektes SDM4FZI an die Netzwerkinfrastruktur gerecht zu werden.

Neben der Betrachtung und Analyse der Referenzarchitektur hat sich die AUDI AG im Rahmen des AP B1 stark mit der Datenkonsistenz von Software für Produktionsanlagen beschäftigt. Es wurde untersucht, wie die Software von Anlagen in der Fabrik von morgen über den kompletten Lebenszyklus der Produktionsanlage verwaltet werden kann. Hierbei lag das Hauptaugenmerk auf Datenkonsistenz, Standardisierung und Automatisierung des Ablaufes, um eine kontinuierliche Anpassung über den gesamten Lifecycle zu gewährleisten. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass eine Vereinheitlichung des Vorgehens über mehrere Anlagen und Produktionsstandorte ermöglicht werden soll.

Dieser Problematik der Wandelbarkeit wird in der Software-Entwicklung der Ansatz der DevOps-Methoden gerecht, wobei „Dev“ für „development“ (Entwicklung) und Ops für „operations“ (Betrieb) steht. Bei deren Verwendung wird die Software während des Betriebs kontinuierlich weiterentwickelt. Dieser Ansatz der verschiedenen Phasen in einer kontinuierlichen Schleife ist in Abbildung 4 dargestellt, wobei die Entwicklung und der Betrieb ineinandergreifen. Iterative Verbesserungen und Anpassungen an neue Anforderungen sowie verringerte wartungsbedingte Ausfälle stellen die Vorteile dieser Methode dar. Durch die Verwendung verschiedener Tools zur Verwaltung der Software kann der Vorgang automatisiert verlaufen, zugleich die Datenkonsistenz gewährt und das Vorgehen anwendungsübergreifend vereinheitlicht werden.

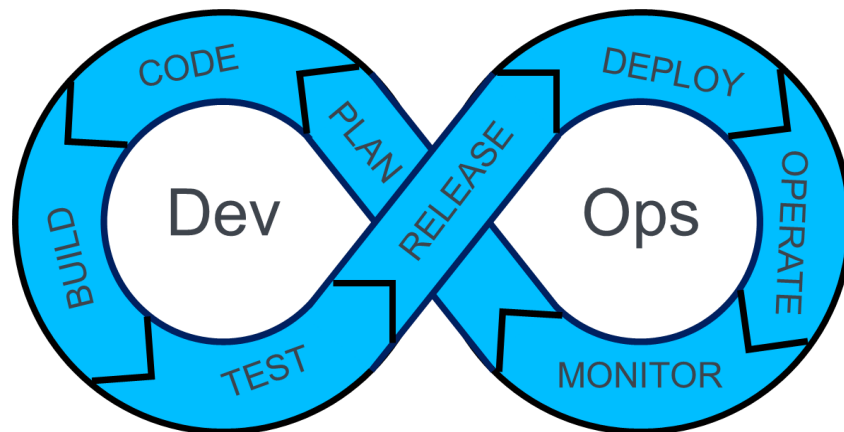


Abbildung 4: DevOps-Prozess

Im Projekt SDM4FZI wurden entsprechend dem Ansatz des SDM (Software Defined Manufacturing) die Methoden des DevOps von Software auf die Produktion und Maschinen übertragen. Entsprechend wurde die iterative Softwareentwicklung durch eine iterative Planung automatisierter Produktionsanlagen ersetzt. Dabei muss beachtet werden, dass die Hardware im Betrieb entsprechend den Vorgaben und digitalen Modellen gestaltet ist, um die Wandelbarkeit zu gewährleisten.

Die AUDI AG sieht den Einsatz von DevOps-Methoden im Automatisierungsumfeld als zielführend an und hat sich daher mit der Umsetzung dieser bei Anlagensoftware auseinandergesetzt. Im Rahmen des Förderprojektes analysierte Audi den Einsatz von Repository für die Verwaltung und Versionierung der Automatisierungsprogramme von Steuerungen. Die neuen virtuellen SPS bieten durch ihre Hardwareunabhängigkeit mehr Freiheit und sind leichter aktualisierbar als der Austausch von Hardware, müssen deshalb aber mit in den DevOps-Vorgang aufgenommen werden, da sich diese im Gegensatz zu Hardware verändern können. Auch wurde untersucht, wie Soft-SPS mittels Build-Server gebaut werden können, um Systemabhängigkeiten auszuschließen und den Vorgang weiter zu automatisieren.

Audi untersuchte weiter Werkzeuge und Lösungen für die Umsetzung eines DevOps-Verfahrens in der Automatisierungstechnik und hat diese in einzelnen Anwendungen getestet. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Tests und die entwickelte Verfahrenskette sind für die Produktion der AUDI AG von Vorteil und teilweise bereits im Einsatz.

Als nächstes hat Audi damit begonnen, die notwendigen Schritte hin zu einer Umsetzung von Teilaspekten von SDM4FZI einzuleiten. Diese Priorisierung der unmittelbar aus dem Vorhaben gezogenen Schlüsse verändert auch die Prioritäten von Audi im Projekt hin zu Komponenten der Steuerungstechnik, die bisher weniger intensiv betrachtet wurden.

Die von Audi bereits zur realen Umsetzung gestarteten Aspekte betreffen unmittelbar die Netzwerkanbindung einer Produktionsanlage und die Virtualisierung von Shopfloor-IT. Hierbei liegt der Fokus auf Datenkonsistenz sowie Standardisierung und Automatisierung des Ablaufes, um eine kontinuierliche Anpassung über den gesamten Lifecycle einer Produktionsanlage bzw. ihrer IT zu gewährleisten. Die Adaption zielt zunächst auf eine Virtualisierung von Shopfloor-IT, was eine Zentralisierung und Vereinheitlichung mit sich bringt, die neue DevOps-Methoden der kontinuierlichen Entwicklung der Anlagen-Software ermöglicht. Diese können sich nun auch auf die Virtualisierung erstrecken, also die Shopfloor-IT praktisch zu einer Komponente machen, die nun auch vollständig durch Software bestimmt werden kann.

Die Adaption im Projekt fokussiert nun stärker auf Komponenten, deren Meta-Steuerbarkeit technisch noch nicht im gleichen Maße gegeben ist: Industrie-Roboter und deren Einbindung in eine SDM-Architektur. Die existierende und stark standardisierte Steuerung der Roboter sieht eine statische Programmierung vor, die primär zum Inbetriebnahme-Zeitpunkt einer Produktionsanlage fertiggestellt ist und im Betrieb nur noch kleineren Optimierungen unterzogen wird. Eine Eingliederung in die DevOps-Entwicklung bedarf hier zunächst Schritte hin zu einer Dynamisierung, die zusätzliche Sicherheits- und Stabilitätsaspekte einbezieht, die der Gefährdung des Anlagenpersonals, der Anlage selbst und des Produktionsprozesses Rechnung trägt.

Arbeitspaket B2: Produktions-OT

Im Arbeitspaket B2 befasste sich Audi mit mehreren für eine Digitalisierung und Virtualisierung der Produktion notwendigen Teilsystemen. Der Fokus lag hierbei auf der Ablösung von herkömmlicher Hardware-basierter Automatisierungstechnik wie den SPS und einer Entwicklung hin zu rein virtuellen, Hardware-unabhängig betriebenen Steuerungsmöglichkeiten. Für diesen Ansatz untersuchte Audi die Anforderungen an ein solches Soft-SPS-System und prüfte die Möglichkeit der Eignung einer Cloud-Architektur für diese Anwendung. Abbildung 5 zeigt den Architekturentwurf für die Umsetzung einer virtuellen SPS in der Shopfloor-Edge-Cloud. Die Echtzeitanforderung an das Netzwerk ist im Shopfloor an den Maschinen besonders hart und zeitkritisch.

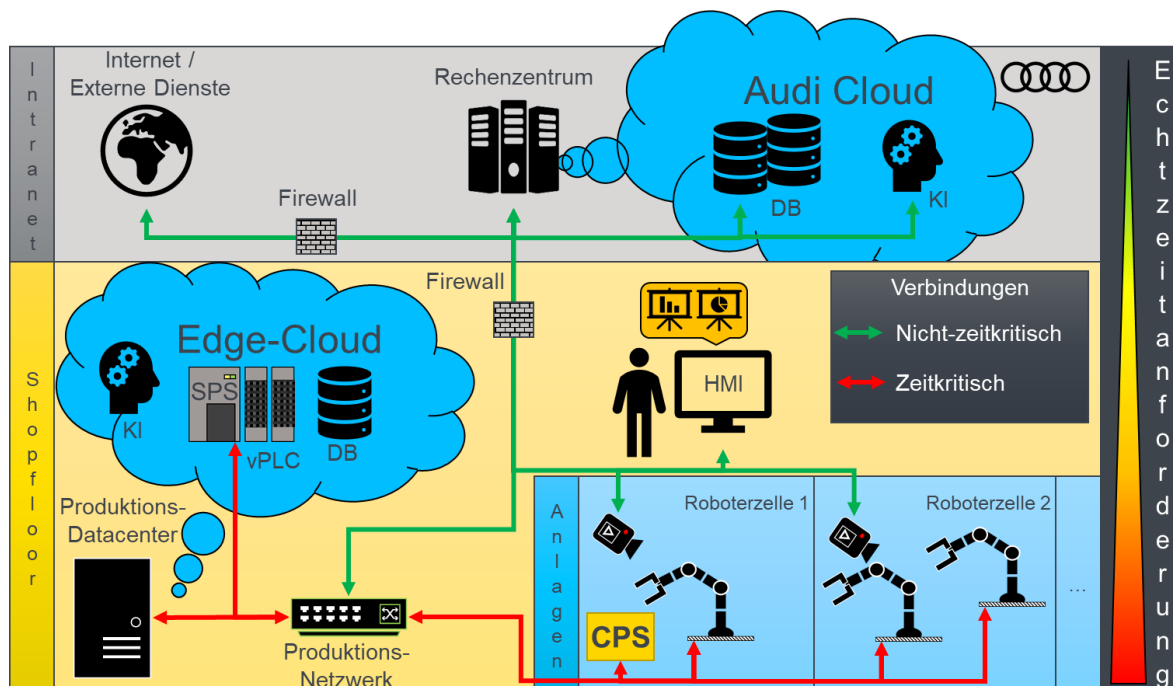


Abbildung 5: Architekturentwurf einer virtuellen Steuerung im Shopfloor bei Audi

Audi hat die virtuelle SPS in kleinem Maßstab getestet und experimentiert, ob die Verwendung einer virtuellen Maschine (VM) für die virtuelle SPS Sinn macht. Die VM entkoppelte die virtuelle SPS von der Rechnerhardware und erwies sich als besonders vorteilhaft. Sie bedarf nur noch weniger zusätzlicher Verfeinerungen.

Die Ausarbeitung der Architektur zeigte mehrere Probleme auf, die einer vollständigen Digitalisierung und Virtualisierung im Wege stehen. Ein Problem liegt hierbei in der Überführung der Safety SPS ins Virtuelle. Dieses Problems hat sich Audi bereits in einer

Vorarbeit angenommen, welche im Rahmen des vorliegenden Projektes verwertet und um weitere Versuche ergänzt werden konnte.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dieser Untersuchung zur virtuellen SPS werden bereits bei der Produktion im Audi-Werk Böllinger Höfe in Heilbronn verwertet. Diese wurde umgebaut und mit den virtuellen Steuerungen ausgestattet. Voraussichtlich kann das Werk von den Erkenntnissen aus dem vorliegenden Forschungsprojekt noch viele Jahre profitieren.

Ein weiteres Problem stellen die erhöhten Echtzeitanforderungen an das Netzwerk und die geforderte Ausfallsicherheit dar. Audi hat sich auch mit dieser Problematik bereits in einer Vorarbeit befasst und diese im Rahmen des Projektes SDM4FZI aufgearbeitet sowie um zusätzliche Versuche und Analysen ergänzt. Die Vorarbeiten und die durchgeführte Aufarbeitung im Rahmen des Förderprojektes wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Verwertung einer Voruntersuchung zur virtualisierten Safety SPS

In einer Vorarbeit ist die Umsetzung und Nutzung der Safety SPS als virtuelle Komponente untersucht worden. Abbildung 6 zeigt, wie die einzelnen Steuerungskomponenten einer Anlage zukünftig zusammengefasst werden und als virtuelle Prozesse in die Cloud laufen. Dies erleichtert nicht nur das Hardware-Management, sondern ermöglicht auch, die Systeme leichter zu aktualisieren, da es sich nur noch um Software handelt. Dies ermöglicht eine leichter wandlungsfähige Produktion und schafft so einen wichtigen Wettbewerbsvorteil.

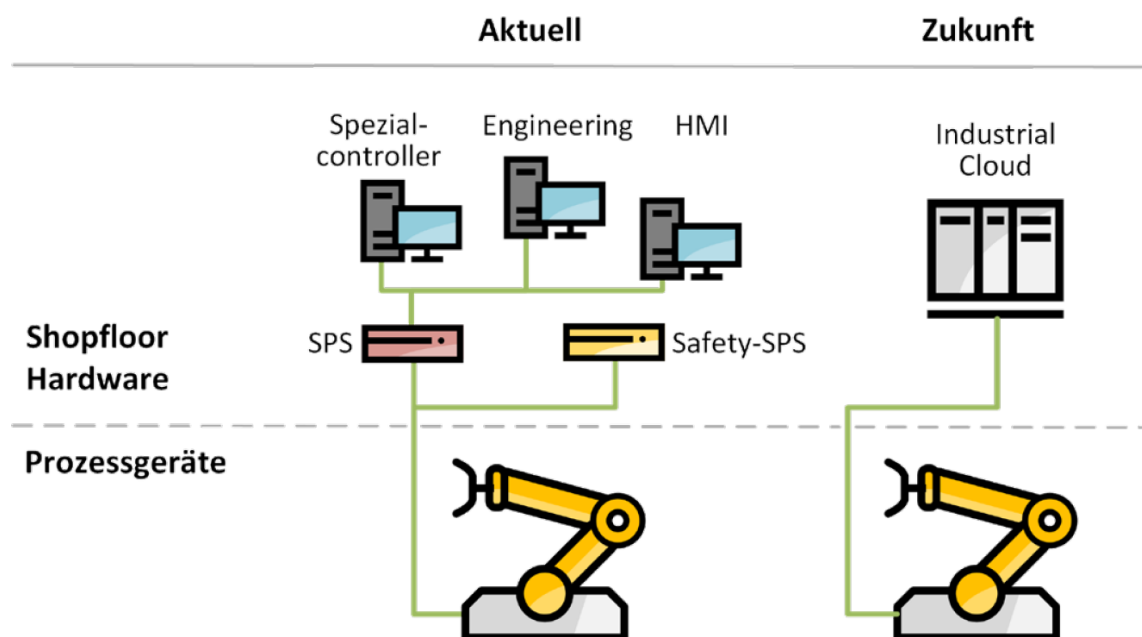


Abbildung 6: Virtualisierung der Steuerung

Die Untersuchung der Safety SPS ist abgeschlossen (https://atpinfo.de/wp-content/uploads/2020/11/atp11122020_TT_ISW.pdf). Eine Produktlösung auf Basis des entwickelten Konzepts hat derzeit Beta-Status. Langfristig wird mit einem großflächigen Einsatz in den Audi-Produktionsanlagen gerechnet.

Auf Basis dieser Untersuchungsergebnisse wurde im Zusammenhang mit SDM4FZI analysiert, wie sich zukünftige Sicherheitssysteme und Schutzvorkehrungen in die Software-definierte Fabrik einbinden lassen. Dabei lag der Fokus darauf, wie IT-Netzwerke

aufgebaut und konfiguriert werden müssen, um Sicherheit aus der Cloud zu gewährleisten und so als gute Grundlage für eine zukünftige Produktionsplanung zu dienen.

Verwertung von Vorversuchen zu Produktions-OT und Netzwerktechnik

In der anderen oben beschriebenen Vorarbeit wurde bereits vor Beginn des Projektes SDM4FZI untersucht, wie das derzeitige Produktionsnetz bei Audi verbessert werden kann, um virtuelle und digitale Steuerungssysteme aus der Edge Cloud zu realisieren. Die Ergebnisse wurden unter <https://doi.org/10.1109/WFCS53837.2022.9779162> veröffentlicht. In Abbildung 7 ist aufgezeigt, wie das bestehende Produktionsnetz aussieht und das zukünftige Produktionsnetz möglicherweise aussehen kann.

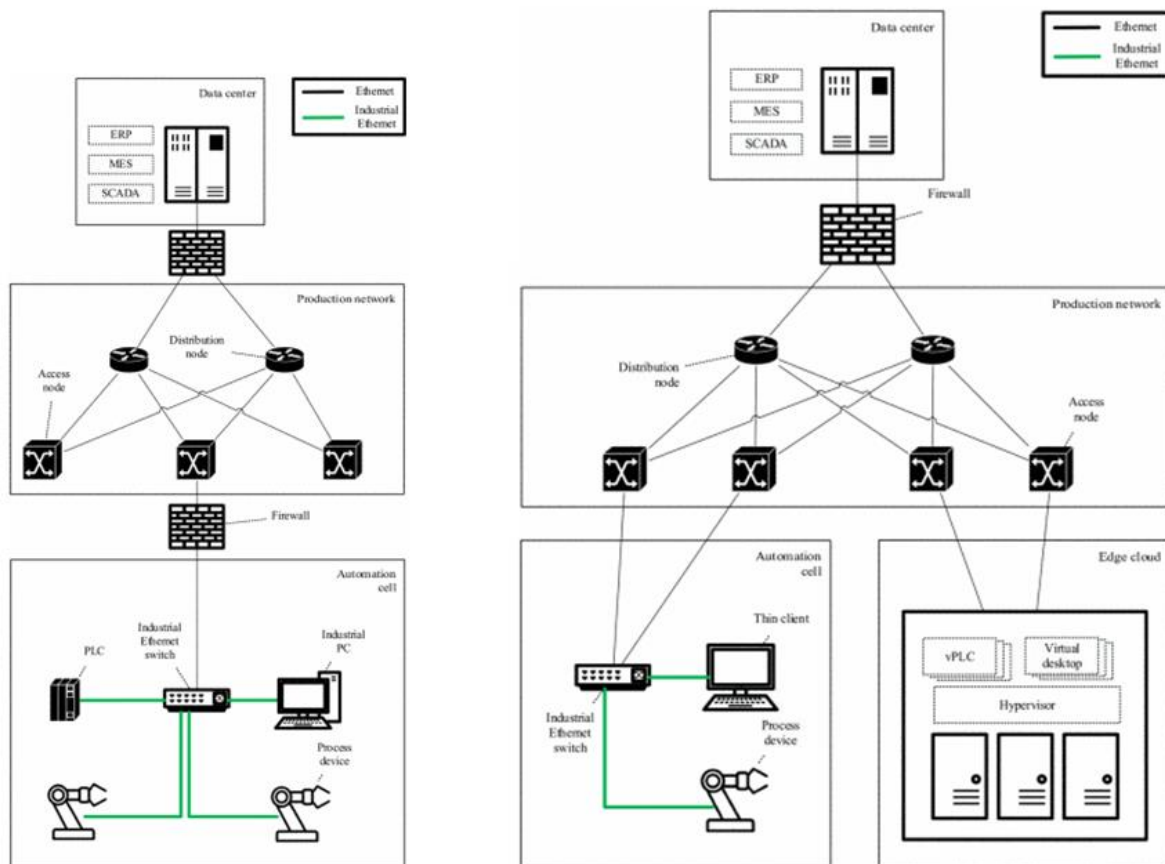


Abbildung 7: Vergleich derzeitiges Produktionsnetz (links) vs. verbessertes Produktionsnetz (rechts)

Die Erkenntnisse aus dieser Forschung wurden im Rahmen von SDM4FZI aufbereitet und in weiteren Untersuchungen weiter verfeinert. Die verwendeten Testaufbauten simulierten hierbei die Netzarchitektur der Audi-Produktion mit den geplanten Anpassungen durch eine Vielzahl von miteinander verbundenen Switchen und Dummy-Geräten. Hierbei wurden verschiedene Konfigurationen untersucht und die Ausfallsicherheit getestet. Da die Echtzeitfähigkeit des Netzwerkes dabei im Zentrum stand, wurden Latenz, Jitter und Übertragungsrate wiederholt gemessen.

Audi kann die aus dieser Untersuchung gewonnenen Kenntnisse dazu nutzen, zukünftige Anlagen und Produktionen zu modernisieren und zukunftsorientiert auszurüsten. Die AUDI AG verspricht sich hierdurch einen großen Vorteil für die Zukunft.

Cloudbasierte Systeme

Die von Audi betrachteten Teilsysteme im Arbeitspaket B2 sind Virtualisierung/cloudbasierte IT (Cloud-Robotics), offene Architektur und industrielle Kommunikation. Das Kernsystem ist eine reaktive Cloud-Anwendung, die in Abbildung 8 dargestellt ist. Diese reagiert auf eingehende Daten wie beispielsweise Sensor-Nachrichten einer Messstation. Auf Basis dieser Daten wird ein neues Roboterprogramm berechnet, welches der Produktionsanlage zur Verfügung gestellt wird. Diese kann das neue Programm zu einem späteren Zeitpunkt automatisch einspielen und verwenden. Nachgehend werden die einzelnen Teilsysteme detailliert erläutert.

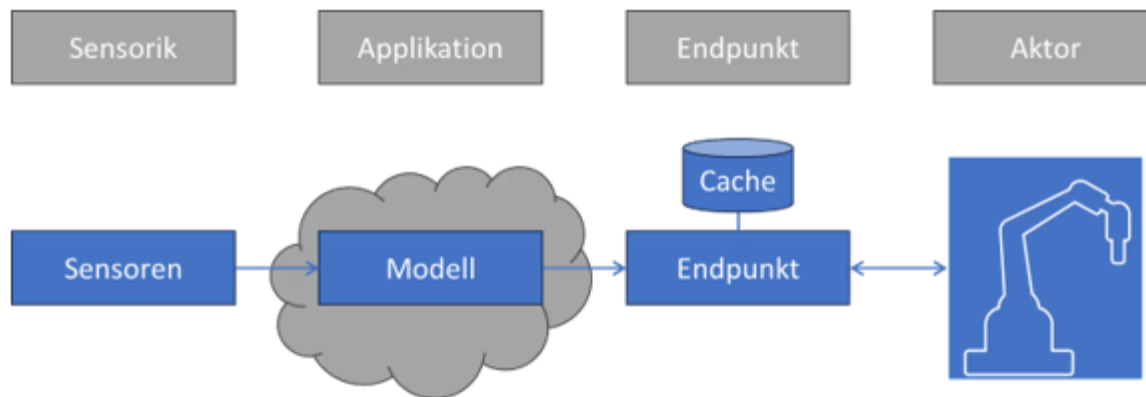


Abbildung 8: Architektur Cloud-Robotics

Cloud-Robotics

Die Industrieroboter benötigen weiterhin ihre lokale Steuerung. Außerdem muss die Steuerung zur stärkeren Beeinflussbarkeit durch Cloud-Applikationen dynamisiert werden.

Die Entwicklung eines Prototypen zum Nachladen bzw. Austauschen von Roboterprogrammen in der laufenden Produktion konnte ebenfalls erfolgreich fortgesetzt werden. Des Weiteren wurden Fortschritte in der Synchronisation und der lokalen Vorhaltung von Programm-Modulen zur Sicherstellung der Stabilität der Produktion erzielt.

Als vielversprechend zeigt sich hier die Idee des asynchronen Nachladens: In unmittelbarer Nähe des Roboters läuft eine Software „Roboter-Konnektor“. Diese kann fortlaufend von einem Server mit Roboterprogrammen inklusive Meta-Daten versorgt werden. Diese wiederum werden vom Konnektor lokal in einem Cache abgelegt. Der Roboter selbst kann in einem geeigneten Moment – vorzugsweise während eines ohnehin vorhandenen Stillstands – ein neues Programm vom Endpunkt anfordern. Der Roboter kann hierbei zusätzliche Meta-Daten wie eine Werkstück-Nummer übermitteln. Der Endpunkt wählt auf Basis der Meta-Daten das korrekte Programm aus und kopiert es auf den Roboter, der Roboter lädt dieses und benutzt es ab sofort. In Abbildung 9 ist dieser Vorgang dargestellt.

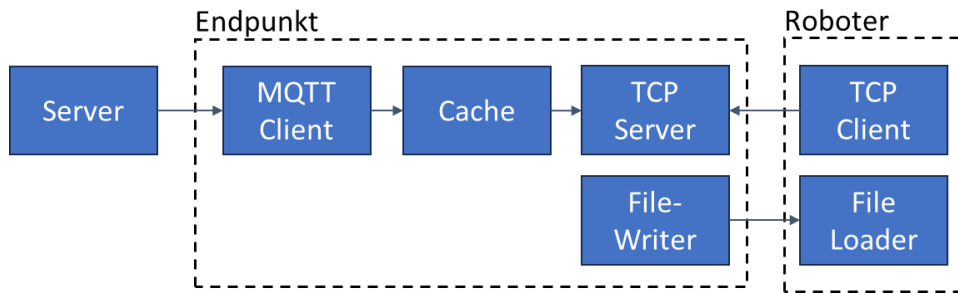


Abbildung 9: Roboter-Endpoint mit MQTT-Client und Programm-Cache

Dieses Vorgehen erlaubt sowohl ein simples Software-Update zu implementieren als auch Werkstück-spezifische Programme einzuspielen. Als Rückfalllösung kann ein Standard-Programm im Endpunkt hinterlegt sein, das beispielsweise kopiert werden kann, sollte der Endpunkt nicht über ein spezifisches Programm für eine konkrete Werkstück-Nummer verfügen.

Die Verfügbarkeit einer Produktionsanlage bleibt gewahrt und fällt nicht unter das aktuelle Niveau, da die Verfügbarkeit der Cloud-Steuerung für den Betrieb nicht notwendig ist. Beim Ausfall dieser würde die Anlage wie mit dem aktuellen Technik-Stand weiter produzieren können.

Abbildung 10 zeigt die Oberfläche der Endpunkt-Software: Hier wird das Austausch-Verzeichnis mit der KUKA-Software und den MQTT-Einstellungen konfiguriert. Es werden außerdem noch der Verbindungsstatus mit dem MQTT-Broker und die lokal vorgehaltenen Subroutinen bzw. Roboterprogramme angezeigt.

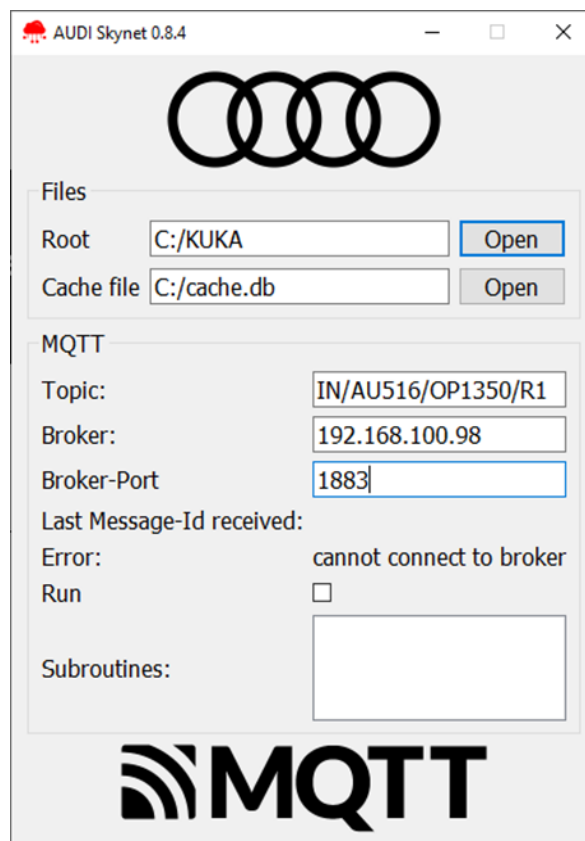


Abbildung 10: Prototyp Roboter-Endpoint mit MQTT-Konfiguration

Offene Architektur

Es hat sich herausgestellt, dass der Konnektor zum Industrieroboter stark herstellerabhängig ist – in Architektur als auch Implementierung -- bedingt durch die jeweilige Software-Architektur der Roboter bzw. Hersteller. Der Anschluss des Konnektors an eine übergeordnete Cloud-Applikation wiederum ist herstellerunabhängig (vgl. industrielle Kommunikation), die Cloud-Applikation selbst ist vollständig offen. Prinzipiell muss nur eine korrekte Nachricht mit einem Roboterprogramm versendet werden. Es wurde ein Event-orientierter Applikationsserver implementiert, der wiederkehrende Funktionen zur Verfügung stellt, die Applikation selbst wird als beliebiges Linux-Programm implementiert. Der Applikationsserver stellt primär die Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung, sodass diese nicht in jeder Anwendung neu implementiert werden muss. Zusätzlich sind noch Datenbankfunktionen vorgesehen, die der Applikation erlauben, einen Zustand abzulegen und rudimentäre Aggregationsfunktionen wie ein Rolling-Window über eingehende Nachrichten zu nutzen. Dem Applikationsprogramm selbst wird eine JSON-Nachricht zur Verfügung gestellt; am Ende seiner Berechnungen stellt das Applikationsprogramm selbst wiederum dem Applikationsserver eine JSON-Nachricht zur Verfügung, die ein oder mehrere Roboterprogramme nebst Metadaten enthält. Abbildung 11 zeigt den Applikationsserver.

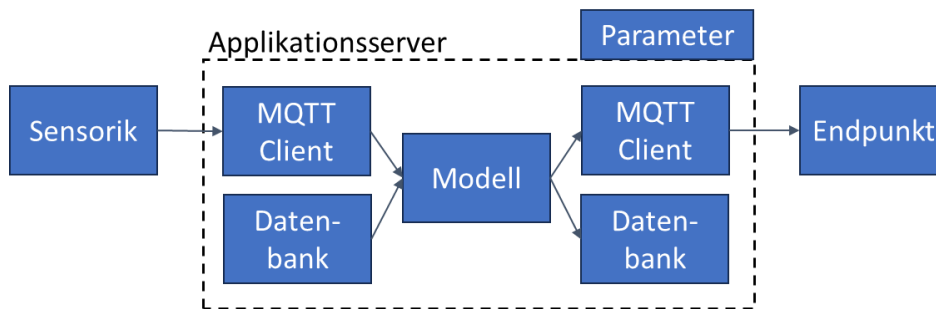


Abbildung 11: Applikationsserver mit Anwendung/Modell und Kommunikationspartnern

Die Architektur des Applikationsservers setzt gegenüber dem Applikationsprogramm nur die Fähigkeit voraus, das JSON-File von Standard-Eingabe zu lesen und selbst wiederum eine Antwort als JSON-File auf Standard-Aufgabe auszugeben. Dies erlaubt eine Programmierung der Anwendungen in praktisch beliebigen Programmiersprachen. Dies stellt einen großen Vorteil für Neuentwicklungen dar, da oft die Domäne der Anwendung spezifische Programmiersprachen, Bibliotheken, Simulations- und andere Software-Werkzeuge mit sich bringt (aktuell beispielsweise Python bei Machine-Learning).

Der Applikation-Server abonniert nun applikations-spezifische Kanäle und wartet dann auf eingehende Nachrichten. Wird eine Nachricht für eine Applikation empfangen, wird diese zunächst in einer Datenbank abgelegt. Diese Nachricht löst sodann einen Aufruf der Applikation aus. Für diese wird eine JSON-Datenstruktur angelegt, die i.A. die eingehende Nachricht enthält, potenziell zusammen mit älteren Nachrichten oder Nachrichten aus anderen Kanälen oder einem Applikations-Zustand. Zum Start des Applikationsprogramms wird diesem nun über Standard-Eingabe die als UTF-8-serialisierte JSON-Struktur übergeben. Das Applikationsprogramm liest nun diese Struktur von der Standard-Eingabe und führt seine Berechnungen hierauf aus. Das Ergebnis gibt das Applikationsprogramm am Ende seiner Laufzeit ebenfalls als JSON-Struktur auf Standard-Aufgabe aus. Der Applikationsserver liest seinerseits diesen Rückgabewert ein: Die Antwort besteht aus den generierten Roboterprogrammen und dem neuen Zustand (State) des Applikationsprogramms. Die Roboterprogramme werden vom Applikationsserver an die

Roboter versendet, der Zustand wird abgespeichert und der Applikation bei ihrem nächsten Aufruf wieder als Input zur Verfügung gestellt. Die Zuweisungen der jeweiligen konkreten Kanäle zu denen der Applikation werden parametrisiert, sodass ein Applikationsprogramm für verschiedene Anlagen-Instanzen benutzt werden kann.

Industrielle Kommunikation

Im Rahmen der industriellen Kommunikation hat sich die Benutzung von MQTT als asynchrones Transportmittel bewährt. Dies ist insoweit vorteilhaft, da MQTT bereits ein VW-Standard ist. Die Sicherung der Kommunikation erfolgt durch föderierte MQTT-Broker. Ein lokaler MQTT-Endpunkt erlaubt die unverschlüsselte Kommunikation mit Feldgeräten. Dies ist zum aktuellen Stand der Technik unerlässlich, da Zertifikats-Handling auf Feldgeräten wenig praktikabel ist. Die Broker-2-Broker-Kommunikation, welche dann die Anlage selbst verlässt, findet verschlüsselt und gefiltert statt. Für die unmittelbare Kommunikation in Anlagen hingegen bleibt der VW-Standard PROFINET, dies ist aufgrund der Safety-Aspekte unerlässlich. In Abbildung 12 sind föderierte MQTT-Broker mit Rechenzentrums- und Produktionsanlagenzone dargestellt.

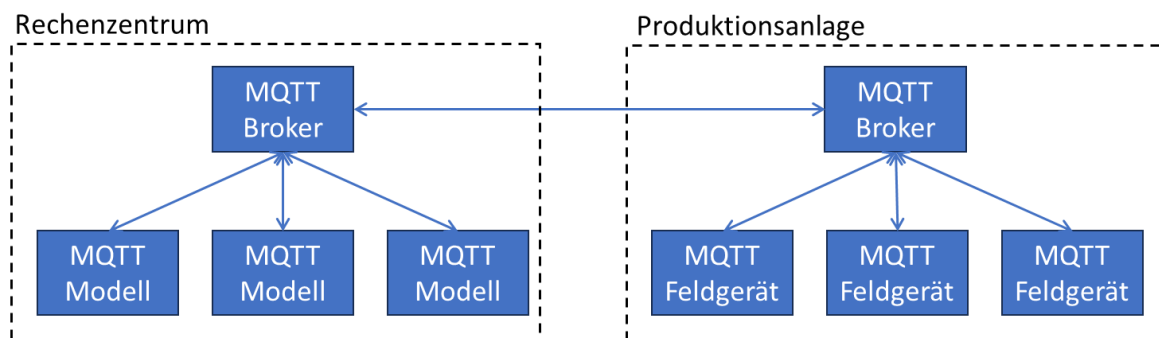


Abbildung 12: Föderierte MQTT-Broker mit Rechenzentrums- und Produktionsanlagenzone

Die asynchrone Kommunikation erlaubt eine Nutzung der vorhandenen Kommunikationskanäle, ohne diesen zusätzliche Quality-of-Service-Anforderungen aufzubürden. Selbst ein kompletter Ausfall der Cloud-Verbindung kann durch ein hinterlegtes Standard-Roboterprogramm (vgl. Cloud-Robotics) soweit kompensiert werden, die Verfügbarkeit der Anlage hierdurch nicht zu beeinflussen.

Das MQTT-Protokoll erlaubt prinzipiell einen beliebigen Payload. Eine Einschränkung auf JSON-Datenstrukturen erlaubt es jedoch, gewisse Aggregationsfunktionen auf ihnen vorzunehmen, ohne die konkreten Daten zu kennen. Es erscheint ohnehin eine Best-Practice-Lösung bei MQTT-Kommunikation zu sein, den Payload so auszuführen. Als föderierter MQTT-Broker wird die Software Hive-MQ verwendet.

Ein Mapping der MQTT-Topics zu den Kanälen der jeweiligen Applikation wird durch den Applikationsserver vorgenommen. Auf diese Weise kann ein Applikationsprogramm wiederverwendet werden, eine konkrete Parametrierung für eine Anlage bedarf so nur einer serverseitigen Parametrierung. Dies erlaubt, eine einmal auf einem Server installierte Applikation beliebig oft zu instanzieren, die instanzspezifischen Daten wie konkrete MQTT-Kanäle und der Applikationszustand werden unabhängig konfiguriert.

Arbeitspaket S3: Virtualisierte Steuerungstechnik und Softwareentwicklung

Um die Konzepte und die Architektur des SDM4FZI zu testen, hat die AUDI AG einen Demonstrator gebaut, der sich weitgehend an den bei Audi - und anderen deutschen Fahrzeugherstellern - verwendeten Standards orientiert. Dadurch konnten die im Förderprojekt erzielten Ergebnisse anwendungsnah in einer Umgebung getestet werden, die auch in der Industrie eingesetzte Technologien nutzt.

Die AUDI AG hatte bereits eine Testzelle (Abbildung 13) für Forschungszwecke im Einsatz, an der verschiedene Themen der Digitalisierung und Netzwerktechnologien untersucht wurden. Für den Demonstrator des Projektes SDM4FZI wurde diese demontiert und neu aufgebaut. Dabei konnten nicht alle Komponenten wiederverwendet werden, da sie veraltet und für die Umsetzung der geplanten Anwendungsfälle und Konzepte nicht mehr geeignet waren. Deshalb wurden bei der Planung neue Komponenten vorgesehen, die auch für zukünftige Produktionsanlagen interessant sind. Da im Rahmen von SDM4FZI der gesamte Lebenszyklus von Produktionsanlagen betrachtet werden soll, bietet dies auch eine gute Möglichkeit, sowohl die VIBN (Virtuelle Inbetriebnahme) als auch die IBN an einer realen Anlage durchzuführen.



Abbildung 13: Alte Roboterzelle

Für die neue Roboterzelle wurde ein simples Layout mit mehreren einfachen Use-Cases definiert. Die geringe Komplexität soll hierbei die Durchführung der Tests vereinfachen und die Verständlichkeit der Ergebnisse stärken. Ein minimalistisches Layout, das die Abläufe in der Zelle gut abbildet, reduziert den Installationsaufwand erheblich und veranschaulicht die dargestellten Abläufe besser. So wurden nur zwei Bahnhöfe für die Anlieferung und Abholung der Ware, ein Regal für die temporäre Zwischenlagerung und ein Roboter installiert. Zur Überwachung der Zelle wurden eine HMI-Schnittstelle und ein Überwachungssystem vorgesehen, wie Abbildung 14 zeigt.

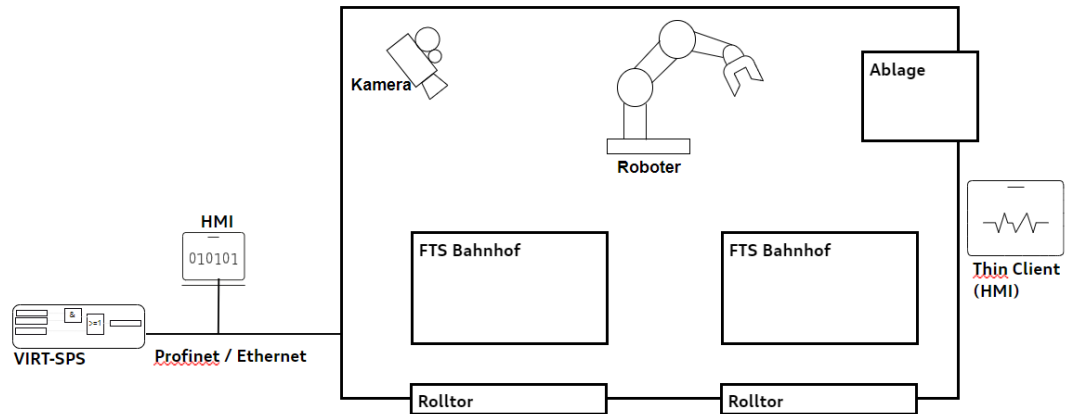


Abbildung 14: Konzept für die neue Roboterzelle

Als Anwendungsfälle für die Zelle wurden nur einfache Handling-Aufgaben gewählt, wie z.B. das Umlagern von Waren oder das Sortieren mit einer Ablage für Ausschussware.

Die gesamte Produktionshalle mit den Containern für das Rechenzentrum und die Testzelle wurde in einem digitalen Modell erstellt (**Abbildung 15**). Dieses Modell wurde im Laufe des Projekts noch um weitere Komponenten ergänzt. Bei der Planung wurde ausreichend Platz für das fahrerlose Transportsystem (FTS) vor der Roboterzelle vorgesehen sowie die Nähe von Rechenzentrum und Testzelle berücksichtigt.

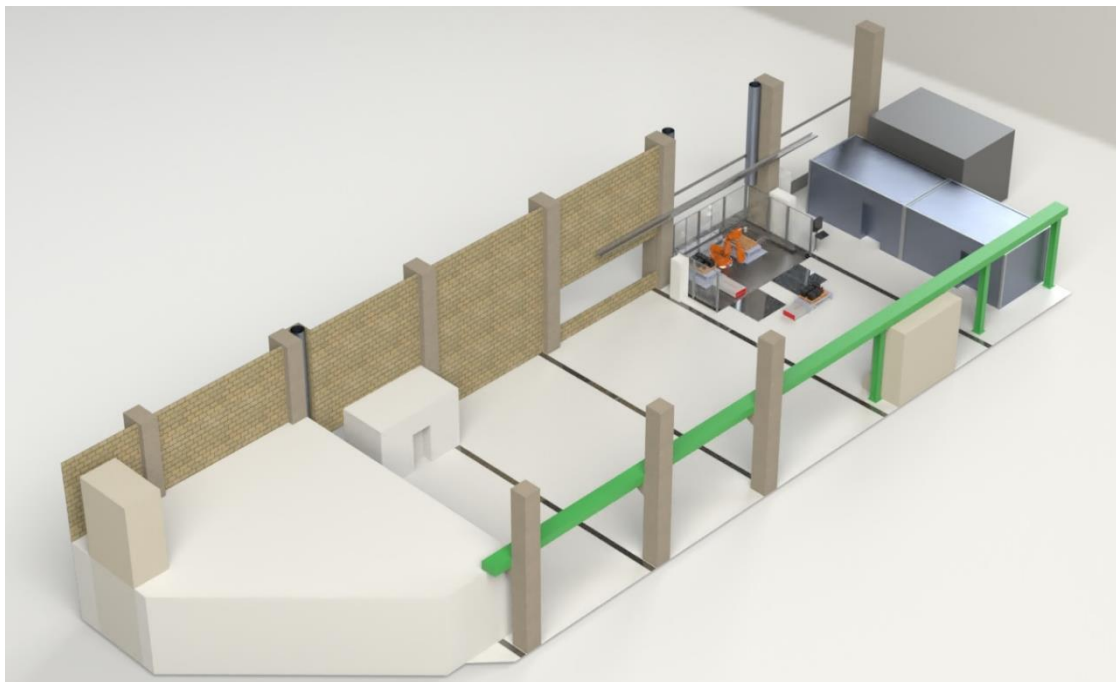


Abbildung 15: CAD-Modell der Produktionshalle mit Roboterzelle und Datacentercontainer

Die Roboterzelle wurde bei der Planung hochdetailliert in einem digitalen Modell modelliert (**Abbildung 16**), um später eine VIBN daran durchführen zu können und die Erstellung von digitalen Zwillingen zu ermöglichen.

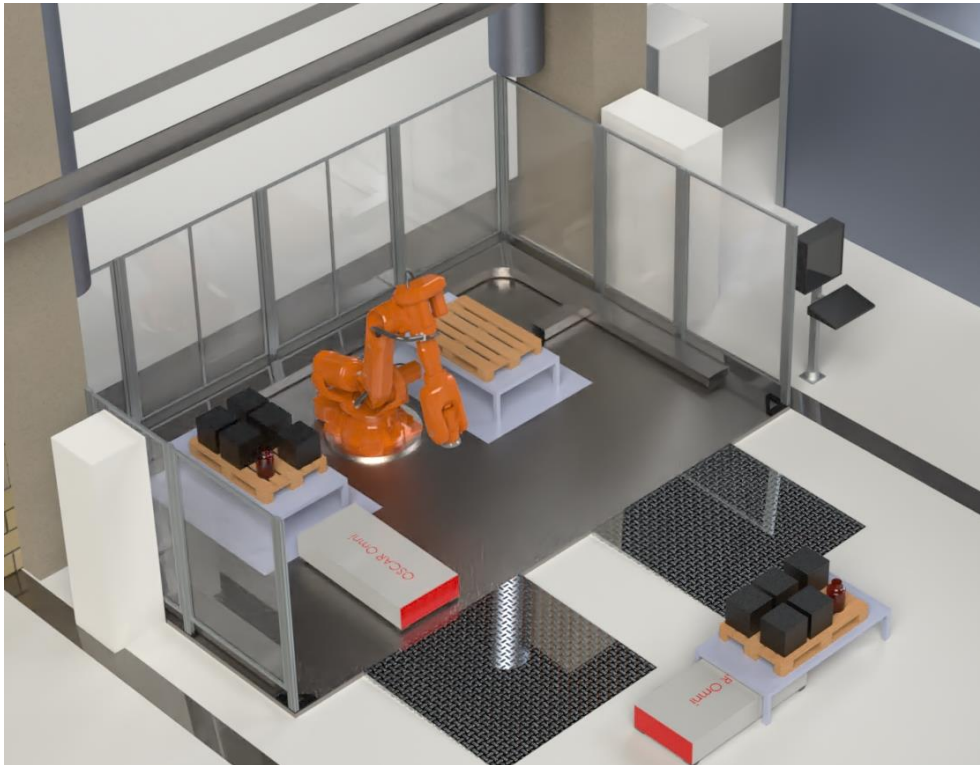


Abbildung 16: CAD-Modell der geplanten Roboterzelle mit FTS

Der Demonstrator war Ende 2022 vollständig geplant und umgesetzt. Die Zelle wurde mit Schutzzaun und der notwendigen Infrastruktur aufgebaut.

Im Rahmen der Planung und der Vorversuche wurde festgestellt, dass die Infrastruktur der alten Roboterzelle für die geplante Anwendung der SDM4FZI-Inhalte nicht ausreicht und dies wahrscheinlich auch für die meisten bestehenden Anlagen gilt.

Für die Sicherheitseinrichtungen des Demonstrators untersuchte Audi den Einsatz von Radarsystemen für die Zugangs- und Innenraumüberwachung. Ein solches System erscheint für den Einsatz in der Testzelle besonders geeignet, da für die Zugangsüberwachung keine Schleuse für das FTS benötigt wird. Außerdem ist die Überwachung innerhalb der Zelle wesentlich einfacher, da nur bewegte Objekte erfasst werden und somit alle stationären Elemente direkt ignoriert werden und nicht eingelernt werden müssen. Dies ist besonders hilfreich, da es sich um eine Testzelle mit wechselndem Aufbau handelt und eine Überwachung des Innenraums notwendig ist, weil sich dort häufig Personen für Arbeiten aufhalten.

Audi hat in Zusammenarbeit mit einem Zulieferer eine mögliche Integration des Radarsystems geplant. Dazu wurde das digitale Modell der Zelle um mögliche Radarsensoren erweitert (**Abbildung 17**). Durch den Einsatz von vier Radarsensoren kann die Personensicherheit an allen Orten (in der Abbildung rot markiert) in der Zelle gewährleistet werden. Zugleich besteht die Möglichkeit, die Vorderseite der Zelle für einen leichten Zugang bzw. gute Sicht auf die Anwendung offen zu lassen und somit auch dem geplanten FTS (Fahrerloses Transportsystem) einen guten Zugang zu ermöglichen.

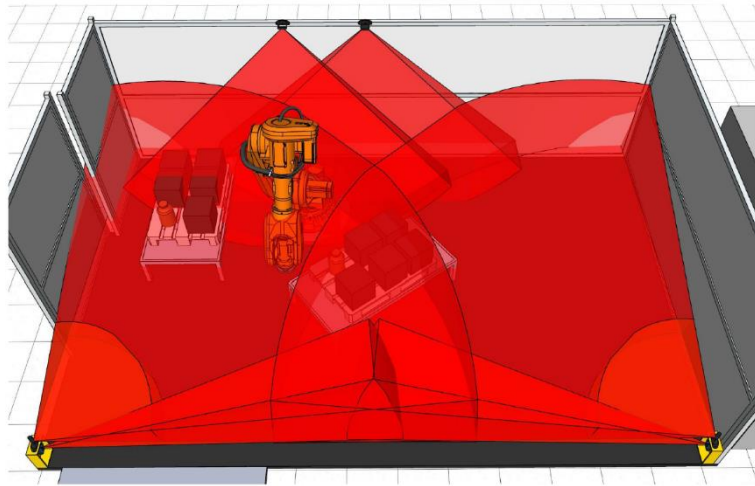


Abbildung 17: Geplante Radarüberwachung für die Roboterzelle

Durch die digitalen Modelle wurde die Planung des Radars und des FTS stark erleichtert. Die AUDI AG untersuchte bei der Planung des FTS, welche Vorteile omnidirektionale Systeme für eine modulare und sich wandelnde Produktion mit sich bringen. Auch wurde betrachtet, wie sich diese in den Safety-Schutzkreis einbinden lassen.

Cloud-Robotics

Audi hat Versuche an einem Demonstrator durchgeführt, um die Machbarkeit des Cloud-Robotics-Ansatzes zu verifizieren. Getestet wurde in einem Labor an einem Standard-Industrieroboter der Firma KUKA mit VKRC-Runtime (VW-KUKA-Standard-Software-Stack). Der Roboter war in eine Standard-Infrastruktur eingebettet, in welcher eine SPS die Ablaufsteuerung der Zelle und die Safety-Funktionen übernimmt. Der Roboter selbst unternimmt nach Freigaben durch die SPS autonome Fahrten und steuert am Roboterarm montierte Werkzeuge wie beispielsweise eine Schweißzange an. Der verwendete Roboter hatte einen Greifer als eine solche Komponente.

Für die Tests wurde ein lokaler MQTT-Broker verwendet. Zunächst wurden vorgenerierte Roboter-Software-Module verwendet. Diese wurden manuell per MQTT-Client verschickt. Der Empfänger war der im Projekt entwickelte Client („Endpunkt“), eine Software, welche auf der Steuerung des Roboters läuft. Der Endpunkt legt die an ihn gesendeten Software-Module inklusive der mitgelieferten Attribute zunächst in einer lokalen Datenbank ab. Im Ablaufprogramm des Roboters befindet sich nun ein spezieller Programmaufruf, der den auf dem Roboter laufenden Endpunkt kontaktiert. Bei dieser Kommunikation wird der Name des gewünschten Software-Moduls übermittelt. Optional wird noch eine Werkstückkennung und eine Priorität übertragen. Auf Basis dieser Anfrage speichert der Endpunkt nun eine Datei mit dem Software-Modul im Dateisystem des Roboters. Nach einer Erfolgsmeldung löst das Roboterprogramm nun den eigentlichen Nachladevorgang aus. Hierzu kommt die Software KUKA-Directory-Loader zum Einsatz, die Software-Module aus Dateien laden kann. Im Anschluss ist das neue Software-Modul auf dem Roboter geladen und wird ab sofort verwendet.

Der Algorithmus zu Auswahl des konkreten Software-Moduls auf Basis der Anfrage versucht, die bestmögliche Version im lokalen Speicher zu finden. Hierbei sind zwei Verfahren vorgesehen: Eine kontinuierliche Verbesserung (Regelkreis) und eine bauteilspezifische Behandlung. Für einen Regelkreis werden stets neue Roboterprogramme generiert und an

den Endpunkt gesendet. Der Roboter fragt stets nach der neuesten Version des Software-Moduls. Der Endpunkt übergibt dann jeweils das letzte Programm, das er in seiner lokalen Datenbank vorhält. Sind bauteilspezifische Behandlungen vorgesehen, so können vorab Programme generiert werden, die beispielsweise auf die konkrete Geometrie des individuellen Bauteils Rücksicht nehmen. Bei einer solchen Anwendung übermittelt der Roboter die Werkstückkennung des als nächstes zu verarbeitenden Bauteils an den Endpunkt. Dieser antwortet dann mit dem für dieses Bauteil generierten Programm oder, falls ein solches nicht vorhanden ist, mit einem Standardprogramm.

Der Algorithmus sieht das Ablegen solcher Rückfall-Programme vor. Sofern kein Modul mit der angegebenen Werkstückkennung gefunden wird, wird ein Programm gesucht, das dem angefragten Modul-Namen entspricht, aber keine Kennung hat (das Standard-Programm). Zusätzlich werden alle Programme mit einem Verfallsdatum ausgestattet. Nach Ablauf dieses Datums kann das Programm vom Endpunkt aus seiner Datenbank gelöscht werden. Dies ermöglicht eine Garbage-Collection auf dem Endpunkt, dass beispielsweise nur werkstückspezifische Programme löscht, die Standardprogramme aber nie.

Eine der Safety geschuldete Einschränkung des Verfahrens ist, dass Programme nur in der sogenannten Grundstellung des Roboters ausgetauscht werden dürfen. Wenn sich der Roboter also nicht in dieser Position befindet, würde eine Sicherheitsverletzung ausgelöst werden, da die aktuelle Position des Roboters durch den zwischenzeitlichen Verlust des Programms nicht mehr bekannt ist und er sich prinzipiell in einer unzulässigen Position befinden könnte.

Eine weitere gefundene Einschränkung ist die Zeit, die der Nachladevorgang benötigt: Vom Auslösen der Anfrage an den Endpunkt bis zum erfolgreich nachgeladenen Programm werden bis zu 2 Sekunden benötigt. Dies kann unter Umständen eine signifikante Einschränkung in Anlagen sein, in denen der entsprechende Roboter das Nadelöhr im Bezug auf die Einhaltung der Taktzeit ist.

Beim Einsatz von MQTT-basierten Anwendungen stellte sich darüber hinaus die Server-Komponente als nützlicher eigenständiger Service heraus. Der Server benutzt als Schnittstellen selbst ausschließlich MQTT zum Empfangen der Sensordaten und Senden der Roboterprogramme. Das eigentliche generieren der Roboterprogramme obliegt der Applikation, die der Server ausführt. Somit lassen sich auch andere Resultate als Roboter-Programme generieren und versenden. Hier wurden erfolgreiche Versuche unternommen, die Anlagenparameter generieren und an Prozessgeräte versenden, sodass hiermit moderne Regelkreise implementiert werden können, die andere Prozessgeräte verwenden als Roboter.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Detaillierte Informationen hierzu sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei dem Förderprojekt SDM4FZI handelt es sich nicht um eine Weiterentwicklung einer bestehenden Lösung, sondern um einen komplett neuen Lösungsansatz. Aus diesem Grund ist es so wichtig, das komplette Ökosystem abbilden zu können. Mithilfe der Förderung war es möglich, Lösungen zu generieren, die einzeln wirtschaftlich umsetzbar sind, in der Gesamtheit jedoch einen großen Mehrwert bringen. Dadurch konnte das Projekt schneller Fahrt aufnehmen und so ein technologischer Durchbruch erzielt werden.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Mit den erreichten Ergebnisse im Verbundvorhaben SDM4FZI zielt die AUDI AG darauf ab, ihre Fertigung zukunftsfähig zu gestalten. Durch die Modernisierung und Reorganisierung der Shopfloor-IT und der Automatisierungstechnik können sowohl die Flexibilität der Fertigung erhöht als auch die Instandhaltungs- und Wartungskosten reduziert werden. Darüber hinaus ist geplant, diese Erkenntnisse im VW-Konzern zur Verfügung zu stellen.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Durch die Mitwirkung der AUDI AG beim Fördermittelprojekt SDM4FZI ergeben sich zahlreiche technische Entwicklungen, von denen Audi langfristig profitieren wird. So wird das Projekt beispielsweise zur Schaffung einer modernen Automatisierung beitragen, was darüber hinaus auch von Nutzen für die gesamte Automatisierungswelt ist. Durch die erzielten Ergebnisse im IT-Bereich sichert sich Audi die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber internationalen IT-Firmen. Außerdem trägt das Projekt zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit bei, was gerade in der heutigen Zeit einen wichtigen Faktor auf dem Weg in eine erfolgreiche Zukunft darstellt.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Durch die Entwicklung der SDM-Konzepte und Umsetzung als Demonstrator können Referenzlösungen für die Digitalisierung der Produktion allgemein geschaffen werden. Aufgrund des Stellenwertes der Automobilzulieferindustrie in Deutschland soll es Firmen auch aus anderen Branchen wie beispielsweise der Medizintechnik, der Pharmaindustrie, der Konsumgüterindustrie, etc. so in Zukunft ermöglicht werden, schneller eine digitale und hocheffiziente (Serien-) Produktion umzusetzen. Dies bietet die Basis für die Sicherung des Industriestandorts Deutschland und unterstützt und integriert die GAIA-X Strategie der Bundesregierung.

Darüber hinaus kann die entwickelte Methodik zur Beherrschung der Wandlungsfähigkeit nicht nur für die Automobilzuliefererproduktion, sondern in einem ersten Schritt für verwandte diskrete Fertigungsindustrien und in einem zweiten Schritt für die Prozessindustrie genutzt und erweitert werden. So kann die Effizienz und Qualität des Engineerings von automatisierten Produktionsanlagen verbessert werden, was besonders den Wirtschaftsstandort Deutschland mit vielen Firmen aus der Automatisierungsbranche fördern wird.

Das Forschungsprojekt spielt ferner eine große Rolle dabei, ein neues Automatisierungstechnik-Ökosystem zu schaffen. Audi tritt in diesem als Anforderer auf. Angestrebt wird, neue Lösungen zu kaufen und in der Fertigung einsetzen zu können. Dies ist unerlässlich, da die Fertigungslandschaft sich in den nächsten Jahren extrem wandeln wird und dieser Wandel dringend nach neuen Lösungen verlangt.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind der AUDI AG keine Fortschritte von anderen Unternehmen auf diesem Gebiet bekannt geworden.