Abschlussbericht

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, DFKI GmbH

Dokument-Version	1.0
Datum	06.11.2025
Berichtszeitraum	01.07.2022 – 30.09.2025
Verbreitungsgrad	Öffentlich
Projekt	AIQUAMA
Förderkennzeichen	16IS22032
Laufzeit	01.07.2022 – 30.09.2025
Autoren	Dr. Daniel Porta, DFKI

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 16IS22032 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

1 Eingehende Darstellung der Arbeiten und Ergebnisse

Die im Projekt erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse werden im Folgenden entlang der Arbeitspaketgliederung detailliert dargestellt.

1.1.1 AP 1 – Use Case and Requirements Definition

Es wurden im ersten Projekthalbjahr mehrere virtuelle sowie zwei Präsenztreffen vor Ort bei VW in Dresden durchgeführt. Hierbei wurden im Rahmen einer Werksbesichtigung der Gläsernen Manufaktur mögliche Anknüpfungspunkte für eine Zusammenarbeit auf inhaltlicher sowie auf strategischer Ebene diskutiert. Schließlich wurde gemeinsam ein entsprechender industrieller Anwendungsfall definiert:

Ein mobiler Roboter bewegt sich entlang der Produktionsline und unterstützt Mitarbeitende in der Montage bei ihren Aufgaben, indem er echtzeitnah die durchgeführten Tätigkeiten auf Fehler hin analysiert und bei Bedarf darauf hinweist. Ein besonderer Fokus liegt in der schnellen Anpassbarkeit des Systems auf neue Unterstützungsaufgaben im Sinne eines No- bzw. Low-Code-Ansatzes. Der initiale Anwendungsfall wurde samt Anforderungen in einem gemeinsamen Vortrag mit VW auf dem Kick-Off-Meeting in Berlin vorgestellt. Der Meilenstein MS1 („First draft of the use-cases and requirements“) wurde termingerecht erreicht.

Schließlich wurde dieser Anwendungsfall, im Folgenden als Anwendungsfall „Türspaltoptimierung“ bezeichnet, in enger Zusammenarbeit mit VW zur Erreichung des Meilenstein MS3 („Start for setting up the use-cases“) weiter verfeinert. Einheitliche Spaltmaße an der Karosserie sind für Kunden ein wichtiges und schon von außen wahrnehmbares Qualitätsmaß, die zugleich eine wichtige Funktion hinsichtlich notwendiger Schließkraft und Dichtigkeit erfüllen, z.B. um Wassereintritt zu verhindern. Produktions- und materialbedingt ergeben sich durch den Einbau unterschiedlicher Audiosysteme Gewichtsschwankungen und durch Lackauftrag und Einbrennen thermische Spannungen und Verzug. Dies macht Stellmaßnahmen erforderlich, um Spaltmaße anzupassen und den Anpressdruck im geschlossenen Zustand gleichmäßig zu verteilen. Mathematisch verbirgt sich dahinter ein komplexes lineares Gleichungssystem. Dem Werker soll nun in einem ersten Schritt die Auswirkungen einer Stellmaßnahme transparent gemacht werden. Anschließend sollen dem Werker Handlungsanweisungen kommuniziert werden, welche Stellmaßnahmen für eine fragliche Karosserie genau durchzuführen sind. Die Tätigkeiten sind entsprechend zu dokumentieren, um daraus lernen zu können.

Außerdem wurde ein DFKI-interner Anwendungsfall „Manuelle Montage“ an einem bestehenden Handarbeitsplatz definiert: Werker sollen hier die manuelle Montage eines Microcontrollers samt Platine in ein Gehäuse vornehmen.

Die in AIQUAMA entwickelte Software-Toolbox für KI-basierte, schritthaltende Qualitätskontrolle sollte in beiden Anwendungsfällen gleichermaßen zum Einsatz kommen.

1.1.2 AP 2 – Statistical Process Control with AI-Support

Das DFKI hatte keine Aufwände in diesem AP.

1.1.3 AP 3 – Zero-Defect Production Planning & Execution for Human-Machine-Collaboration

Im Bereich des Deep-Q-Learnings wurden verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung des Anwendungsfalls „Manuelle Montage“ eruiert. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf mögliche Probleme gelegt, die während der Entwicklung auftreten können. Eines der Probleme betraf dabei die Größe der verwendeten Q-Matrix, da diese in unserem bisherigen Verfahren sehr beschränkt war. Dies konnte in komplexeren Szenarien dazu führen, dass das bisherige Verfahren nicht anwendbar war. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, war die Dekomposition der Matrix in kleinere Teile. Dieser Ansatz profitierte auch davon, dass er sich auf Grafikkarten implementieren lässt. Dabei konnten einerseits größere Matrizen bearbeitet werden, andererseits konnte auch eine kurze Laufzeit durch eine geschickte GPU-Implementierung erreicht werden. Weiterhin wurde die Möglichkeit einer Ähnlichkeitsfunktion diskutiert, mit der sich verschiedene Q-Matrizen, die auch durch die Dekomposition entstehen können, auf dasselbe Problem reduzieren lassen. Auch dies versprach eine Verbesserung in Hinblick auf die Laufzeitperformance und gleichzeitig eine größere Komplexität des zugrundeliegenden Szenarios.

Nach der Anpassung der Deep-Q-Learning Methode an größere Matrizen erfolgte die Integration in die bestehende AIQUAMA-Architektur, um sie zur Lösung der dortigen Probleme nutzbar zu machen. Mit Hilfe von Verwaltungsschalenmodellen lässt sich dabei nun auf die nötigen Komponenten und Datenströme zugreifen. Dadurch wurde es möglich, aus diesen Daten ein Modell als Grundlage für das Deep-Q-Learning zu generieren, um anschließend die Planung und Steuerung der darin enthaltenen Komponenten zu optimieren. Zur besseren Durchführung von Testläufen und Evaluation der Methoden wurde der DFKI-interne Anwendungsfall „Manuelle Montage“ herangezogen. Dieser bedient sich dabei an verschiedenen Elementen (Übergabe von Teilen zwischen Roboter und Mensch, automatische Robotersteuerung und Überprüfung von Teilen auf Defekte), die so auch regelmäßig in anderen Produktionslinienszenarien vorkommen. Die Methoden wurden auch dahingehend konstruiert, dass sie sich auf verschiedene Szenarien ohne größere Anpassungen anwenden lassen.

Im Zusammenhang mit Produktionslinien gab und gibt es verschiedene Ebenen, auf denen eine Optimierung stattfinden kann. Da sich das Lernverfahren auf unterschiedliche Anwendungsfälle spezialisieren lässt, wurde jeweils eine Instanz pro Problemstellung genutzt. Einerseits ließ sich so die Steuerung bestimmter Roboter optimieren, andererseits konnten aber auch Aufträge an mehrere Produktionslinien zur Steigerung des Durchsatzes besser verteilt werden. In unserem Use Case wurde vor allem der erste Aspekt genauer durchleuchtet. Ein Roboter führte dabei simuliert mehrere Aufgaben durch, die optimiert gesteuert und abgearbeitet werden konnten. Das System erkannte dabei beispielsweise einen Mangel an Teilen an einem Handarbeitsplatz, beschaffte die fehlenden Teile aus einem Lager und stellte sie anschließend dem Werker zur Verfügung. Im Hinblick auf Null-Fehler-Produktion erfolgte dabei eine automatisierte Vorabüberprüfung der Teile, bevor diese zum Werker gelangten. Weiterhin wurden auch die zeitlichen Aspekte berücksichtigt, damit die fehlenden Teile spätestens dann am Arbeitsplatz zur Verfügung stehen, bevor ein Werker seinen Vorrat aufgebraucht hat.

Um auf mögliche Probleme, die im Produktionszyklus auftreten können, bestmöglich zu reagieren und dadurch die Fehlerquote zu verringern, wurde untersucht, inwiefern sich Reinforcement Learning Methoden zur Detektion unerwarteter Ereignisse eignen, um anschließend die notwendigen Arbeitsschritte in einer angepassten Form durchzuführen. Der Fokus lag dabei

vor allem darauf, wie mit solchen Ereignissen, die die zugrundeliegende Domäne beeinflussen, geschickt umgegangen werden kann. Vor allem im Bereich des Deep Learnings sind Änderungen in der Domäne eine große Herausforderung. Durch diese Änderungen funktionieren bereits trainierte Netze unter Umständen nicht mehr und müssen in einem langwierigen Prozess auf die neue Situation angepasst und neu trainiert werden, was wiederum viel Zeit in Anspruch nimmt. Zu diesem Zweck wurde zunächst untersucht, wie man automatisiert Domänenänderungen in einem gegebenen System detektieren kann. Mit Hilfe einer LSTM Autoencoder Methode, die auf rekurrenten neuronalen Netzen basiert, ist es möglich, in einem Produktionsszenario Abweichungen vom ursprünglichen Produktionsverhalten zu erkennen. Liegt eine solche Abweichung vor, kann in den anschließenden Schritten automatisiert gegengesteuert werden, um das Produktionsziel nicht zu gefährden. Hierfür wird mit Hilfe von Meta-Reinforcement Learning Methoden zunächst überprüft, ob eine Anpassung des bisher genutzten Netzes möglich ist. Dafür wird die Ähnlichkeit der neuen Domäne mit bereits bekannten überprüft. Liegt eine sehr hohe Ähnlichkeit vor, spielen die detektierten Änderungen nur eine untergeordnete Rolle und das aktuelle Modell kann weiterhin genutzt werden. Ist dies jedoch nicht der Fall, muss ein komplett neues Modell mit Deep-Q-Learning Methoden generiert werden, welches mit der Meta-RL Methode zusätzlich weiter verfeinert wird. Anschließend wird dieses neue Modell genutzt, um eine optimierte Arbeitsschrittplanung für den aktuell vorherrschende Zustand zu generieren.

Teilergebnisse dieser Arbeiten fließen aktuell ins EU-Projekt RAASCEMAN zur Resilienzsteigerung von Lieferketten durch Auftragsfertigungsnetzwerke ein.

1.1.4 AP 4 – Understanding & Semantic Representation

Die in AIQUAMA verfolgte Null-Fehler-Produktion erfordert auf semantischer (was soll gemacht werden bzw. was wird gemacht) und operativer Ebene (wie kann etwas gemacht werden bzw. wie wird etwas gemacht) ein tiefes Verständnis vom auszuführenden und beobachteten Fertigungsprozess. Unter Rückgriff auf Vorarbeiten aus BaSys wurden initial vorbereitende Tätigkeiten und vertiefende Literaturstudien u.a. im Bereich Aufgabenmodelle für Mensch-Technik-Interaktion durchgeführt. Ziel ist der Entwurf eines zielorientierten und dekomponierbaren Aufgabenmodells für die manuelle/hybride Fertigung und Montage unter der Annahme, dass sich dieses Modell prinzipiell auch zur Abbildung vollautomatischer Prozesse eignet. Hier müssen beim Entwurf des Modells dann auch einschlägige Standards aus der Ingenieurdomäne (z.B. ISA-88/95) berücksichtigt werden.

In Kooperation mit den tschechischen Partnern wurde in der Folge die Nutzung von semantischen Konzepten der Suggested Upper Merged Ontology (SUMU), eine in der Semantic Web-Domäne etablierte Grundlagenontologie, als Semantic ID in Verwaltungsschalen erörtert. Hierdurch lassen sich Reasoning-Fähigkeiten in ein Verwaltungsschalen-Ökosystem einbinden, um ein tieferes Verständnis jenseits der reinen semantischen Repräsentation zu erschließen.

In Bezug auf frühe (statistische) und späte (semantische) Sensorfusion wurde im Rahmen des Anwendungsfalls „Türspaltoptimierung“ experimentell ein kamerabasierter Türöffnungssensor für die von VW im Projektverlauf zur Verfügung gestellte Tiguan-Karosserie umgesetzt, der auch den Türöffnungswinkel ausgibt. Zum Einsatz kommt hierbei eine in Vogelperspektive

aufgehängte Kamera. In Experimenten wurde ermittelt, dass hierdurch eine hinreichend zuverlässige kontinuierliche Detektion der Öffnungswinkel aller Türen auch bei teilweiser Verschattung durch Menschen gewährleistet ist.

1.1.5 AP 5 – XAI - Explainable AI

Um die Entscheidungen des Systems auf Basis der angewandten KI-Technologien für den Werker sichtbar zu machen, wurden im Werkerführungssystem des Handarbeitsplatzes (siehe AP6) entsprechende Hinweise angezeigt. Diese ergeben sich z.B. aus den erkannten Handgesten oder dem aktuell erfassten Arbeitsschritt und können Rückschlüsse darauf geben, ob eine Aktion nicht wie vom System vorgesehen ausgeführt wurde.

Die Werkerführung wurde zudem um eine Beamerprojektion sowohl am Handarbeitsplatz als auch im Anschluss direkt auf der Karosserie ergänzt. Das notwendige Projektionsmapping zur verzerrungsfreien Darstellung wurde schnell konfigurierbar mit Hilfe der am DFKI in den BaSys-Projekten entwickelten Simulations- und Visualisierungsumgebung SiMRK4.0 in Unity3D umgesetzt. Hiermit konnten auch Qualitäts- bzw. Messdaten der Karosserie in numerischer sowie leicht zugänglicher Weise in Form einer Heatmap ortsgenau angezeigt werden.

1.1.6 AP 6 – Digital Twins and Data Provisioning for AI-based Quality Management

Initial wurden existierende No-/Low-Code KI-Plattformen und -Werkzeuge hinsichtlich der Eignung in AIQUAMA untersucht. Hier wurde einerseits Erfahrungen mit Sordi.ai, einem synthetisch erzeugten und annotierten Datensatz zur Objekterkennung im industriellen Kontext, sowie entsprechenden Werkzeugen zum schnellen Erlernen und Nutzen eines Objekterkennungsmodells gesammelt. Außerdem wurden Experimente mit Google Mediapipe, etwa zum Hand-Tracking, durchgeführt. Trotz No-/Low-Code-Versprechen erfordern diese Werkzeuge eine gewisse Lernkurve in der Anwendung. Im Ergebnis haben sie sich aber prinzipiell als nutzbar erwiesen.

Der Handarbeitsplatz wurde mit ergänzender Sensorik und KI-basierten Verarbeitungsdiensten ausgestattet und nahtlos in die verwaltungsschalenbasierte Infrastruktur des DFKI-MRK-Labors integriert. Unter Verwendung von Mediapipe wurden Handgesten und -bewegungen im Kontext einer Montageaufgabe erkannt. So kann frühzeitig abgeschätzt werden, ob z.B. das richtige Material aus bereitgestellten Kleinladungsträgern entnommen (werden) wird. Entsprechende Hinweise werden dem Werker in einem Werkerführungssystem angezeigt. Unterstützend werden Sensordaten aus anderen Quellen, z.B. dem Hochpräzisionswägesystem korreliert. Nach jedem Arbeitsschritt erfolgt eine visuelle Qualitätsüberprüfung. Hierzu wurde eigens ein KI-Modell zur Validierung des Produktzustands und des Zusammenbaus trainiert. Die einzelnen Softwaremodule sind dabei so gestaltet, dass sie sich einfach zur Realisierung des Anwendungsfalls bei VW nutzen lassen. Der beschriebene Demonstrator wurde zur DFKI-Hausmesse am 08.11.2023 erstmalig der fachkundigen Öffentlichkeit vorgestellt.

Im Hinblick auf die Simulation diverser Mensch-Roboter-Kollaborationsszenarien wurde das Simulations- und Visualisierungsframework SiMRK4.0 um Menschmodelle erweitert und entsprechende Skelette der 3D-Avatare mit einer inversen Kinematik für sämtliche Extremitäten ausgestattet. Hierbei wurde auf den BioIK-Algorithmus und entsprechende Unity3D-Plugins

gesetzt, welche bereits existierende Charakteranimationen, wie etwa das Laufen, durch Konfiguration diverser Randbedingungen und Zielsetzungen für die Kinematik realistischer machen. So wird neben einer Anpassung der Fuß- und Beinposen an diverse Untergründe auch eine Kollisionsvermeidung mit bestimmten Objekten möglich, wie etwa sich bewegenden oder navigierenden kollaborativen Robotern. Zur Abbildung von realem menschlichem Verhalten im Sinne eines echtzeitnahen Monitorings von Körper-, Kopf- und Handposen wurden entsprechende Datenerzeuger und -modelle für Apache Kafka erweitert und verfeinert.

Zur Umsetzung des Anwendungsfalls „Türspaltoptimierung“ wurden relevante Verwaltungsschalen und Teilmodelle modelliert. Hierzu zählen eine Verwaltungsschale „Tiguan“ mit Teilmodellen „CAD“ (ein von VW zur Verfügung gestelltes CAD-Modell der Tiguan- Karosserie), „Messpunkte“ (Koordinaten, die vermessen werden), „Messdaten“ (pro Messpunkt), „Signale“ (Zustandsänderungen der Karosserie detektiert durch externe Sensoren, z.B. Türöffnung) sowie eine Verwaltungsschale „Projektor“ mit Teilmodellen „Technische Spezifikation“ und „Konfiguration“ zum Hinterlegen der aktuellen Transformationsmatrix für das Projektionsmapping. Das CAD-Modell der Tiguan- Karosserie wurde außerdem um Kinematik zur Türöffnung ergänzt und in SiMRK als visueller Digitaler Zwilling importiert. Der Türöffnungssensor (AP4) stellt über das Signalteilmodell vermittelt einen Sensordatenstrom über Apache Kafka bereit, der in der Visualisierung verarbeitet wird. Der Meilenstein MS4 („implemented use-cases should be basically running“) wurde schließlich termingerecht Ende 2024 erreicht.

In der Folge wurde der Anwendungsfall „Türspaltoptimierung“ für eine ansprechende Präsentation auf dem DFKI-Stand der Hannovermesse 2025 auch unter Verwendung einer Microsoft Hololens verfeinert. Dort stieß er auf sehr großes Interesse bei internationalen Fachbesuchern, der Politik sowie der breiten Öffentlichkeit.

1.1.7 AP 7 – Koordination und Projektmanagement, Kommunikation und Dissemination

Im Rahmen des AP7 wurden über die gesamte Projektlaufzeit regelmäßige themenbezogene Workshops mit dem assoziierten Industriepartner VW sowie mit den tschechischen Forschungspartnern organisiert und durchgeführt:

- 27.07.2022: Interner Kick-Off mit VW in Dresden
- 21.09.2022: Workshop zur Definition des Anwendungsfall bei VW in Dresden
- 07.11.2022: Kick-Off im Forum Digitale Innovationen in Berlin
- 25.07.2023: AIQUAMA Workshop in Prag zur gemeinsamen Abstimmung mit den tschechischen Partnern
- 06.10.2023: Workshop zur Vertiefung des VW-Anwendungsfalls (remote)
- 04.03.2024: Workshop zur Finalisierung des VW Anwendungsfalls „Türspaltoptimierung“ in Wolfsburg
- 17.04.2024: AIQUAMA Statustreffen (remote)
- 17./18.07.2024: AIQUAMA-Workshop in Prag

Außerdem fanden in diesem AP maßgeblich die akribische Planung und aufwendige Umsetzung des öffentlichkeitswirksamen Auftritts des Projekts zur DFKI-Hausemesse 2024 sowie auf der Hannovermesse 2025 statt.

Durch eine Projektaufstockung zur Ergebnissicherung wurde AIQUAMA im Nachgang der Hannovermesse um 3 Monate und die folgenden 3 Arbeitspakete verlängert.

1.1.8 AP 8 – Integration MRK-fähiger robotischer Systeme

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein MRK-fähiges, mobiles robotisches System in den Anwendungsfall „Türspaltoptimierung“ integriert. Das System besteht aus einer autonomen Logistikplattform (MiR200) und einem UR5e-Roboterarm, der mit einer sensorischen Endeffektorkombination aus einem Pickit M-HD 2 Kamerasystem zur Verortung und Objekterkennung sowie einem AiO VISIONSCANNER2 für eine exakte Vermessung geometrischer Features der zu überprüfenden Türscharniere ausgestattet ist. Zunächst erfolgten der hardwaretechnische Aufbau und die Integration der Einzelkomponenten. Zur sicheren Stromversorgung des Gesamtsystems wurde ein 1000 W DC/AC-Wandler an die 12 V Batterie der Logistikplattform angeschlossen, um Robotercontroller, Pickit-Steuerrechner, Kamera und WLAN-Router zu versorgen. Der Roboterarm wurde auf einer Umhausung aus Item-Profilen montiert und über die Controller-Eingänge in die Not-Halt-Signalkette der Logistikplattform eingebunden. Für die Montage von Kamera und Laserscanner am Roboterflansch wurde ein passender Adapter konstruiert, in CAD modelliert und mittels 3D-Druck gefertigt. Anschließend wurden die Gelenkparameter des Roboterarms in Kombination mit virtuellen Sicherheitsebenen so konfiguriert, dass ein sicherer Betrieb des Systems innerhalb des vorgesehenen Szenarios gewährleistet ist. Nach Erstellung der Karte für die mobile Plattform wurden Anfahrstationen an der Karosserie definiert und die erforderlichen Roboterbewegungen für die visuelle Inspektion eingelernt. Um eine visuelle Repräsentation des Gesamtsystems im digitalen Zwilling zu ermöglichen, wurden entsprechende 3D Modelle der Einzelkomponenten einerseits über den Unity URDF-Importer, zum anderen über das Aufbereiten entsprechender CAD-Modelle zur Nutzung in SiMRK aufbereitet und importiert und mit entsprechenden Controllern zur Ansteuerung über eine BaSys-Führungskomponente versehen. Im Fall der Logistikplattform und des Roboterarms kann hier auf bereits bestehende Implementierungen für die Datenstromanbindung über Apache Kafka zurückgegriffen werden.

1.1.9 AP 9 – Transfervorbereitung der AIQUAMA-Softwaretoolbox zur industriellen Nutzung

Im Arbeitspaket 9 stand die Weiterentwicklung der AIQUAMA-Softwaretoolbox mit Blick auf einen zukünftigen industriellen Einsatz im Mittelpunkt.

Ein Schwerpunkt betraf die Beamerprojektion und die damit verbundene Kalibrierung. Die ursprünglich monolithische Anwendung wurde dabei in zwei eigenständige Programme überführt: eines zur Projektion von Medieninhalten und ein weiteres zur Durchführung der Kalibrierung. Diese funktionale Trennung erhöht die Übersichtlichkeit und ermöglicht eine gezieltere Anpassung an unterschiedliche Einsatzszenarien, was zugleich die zukünftige Automatisierung des Kalibrierungsprozesses begünstigt. Im Zuge der Überarbeitung wurde insbesondere die Benutzerführung innerhalb der Kalibrierungsanwendung verbessert. Die Darstellung und Auswahl der Korrespondenzpunkte wurden neugestaltet, wodurch der Kalibrierungsprozess

beschleunigt, nachvollziehbarer und weniger fehleranfällig wurde. Zudem wurde eine gemeinsame Schnittstelle zwischen beiden Anwendungen implementiert, über die Kalibrierungsdaten in einem standardisierten Format ausgetauscht werden. So wird sichergestellt, dass Projektion und Kalibrierung stets konsistent zusammenarbeiten. Darüber hinaus wurden alle lizenzrechtlichen Aspekte geprüft und geklärt. Die Kalibrierungsanwendung kann nun aufgrund genutzter Bibliotheken unter der GPL v3-Lizenz veröffentlicht werden und steht somit auch für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Verfügung. Die Projektionsanwendung kann hingegen unter einer liberaleren Lizenz ohne Copy-Left-Effekt veröffentlicht werden.

Für die kamerabasierte Türerkennung wurde eine neue Datenpipeline aufgebaut, die mithilfe der Simulationssoftware Isaac Sim von NVIDIA arbeitet. Auf Basis des 3D-Modells der Fahrzeugkarosserie können damit vollständig synthetische Trainingsbilder erzeugt werden. Die Simulation bildet unterschiedliche Beleuchtungssituationen, Kameraperspektiven und Türzustände ab, sodass ein vielfältiger Datensatz entsteht. In der Pipeline werden verschiedene Parameter, etwa Kamerawinkel, Türöffnungswinkel oder Materialeigenschaften automatisch variiert. Zusätzlich werden alle erzeugten Bilder direkt annotiert, wodurch sie ohne manuelle Nachbearbeitung für das Training von KI-Modellen nutzbar sind. Auf diese Weise konnte ein umfangreicher Datensatz erstellt werden, der die Robustheit der Erkennung deutlich verbessert und gleichzeitig den Aufwand für das Sammeln und Annotieren realer Bilder erheblich reduziert.

Es wurde außerdem eine mögliche Migration einzelner Komponenten des Simulations- und Visualisierungsframeworks SiMRK4.0 von Unity 3D auf die Unreal Engine 5 positiv evaluiert. Im Fokus standen dabei zunächst die Kommunikationsschnittstellen des Frameworks. Der Datenaustausch erfolgt aktuell über Apache Kafka in Kombination mit Apache Avro als Interface-Description-Language (IDL). In einer möglichen Unreal-Portierung wurde geprüft, inwiefern sich ein Wechsel auf Protocol Buffers (Protobuf) anbietet. Protobuf bietet im Vergleich zu Avro eine höhere Serialisierungseffizienz, geringere Latenz sowie eine native Unterstützung in C++, was insbesondere in der Unreal-Architektur Vorteile bringt. Für die direkte Integration von Kafka in Unreal steht zudem das Open-Source-Plugin UE-EasyKafka (github.com/sha3sha3/UE-EasyKafka) zur Verfügung, das eine einfache Anbindung über Blueprints und C++-APIs erlaubt. Ergänzend wurden die bestehenden Anbindungen über MQTT, ROS Messages, ROS Services und ROS ActionLib in Kombination mit der RosBridge betrachtet. Für Unreal Engine 5 existieren ROS2-kompatible Schnittstellen (z. B. über das Unreal ROS2 Plugin), die eine funktional gleichwertige Umsetzung ermöglichen. Ein weiterer Schwerpunkt betraf die Migration bestehender 3D-Modelle und Szenen, die derzeit in Unity größtenteils auf Basis von URDF-Deskriptoren über den Unity URDF-Importer eingebunden sind. Für die Überführung in Unreal können die Modelle über den Unity FBX-Exporter in ein kompatibles Format konvertiert und anschließend in Unreal importiert werden. Die Kinematikdefinitionen der URDF-Dateien lassen sich mit vorhandenen ROS2-Plugins rekonstruieren, wodurch die hierarchische Struktur der Roboterarme erhalten bleibt. Materialien, Texturen und Beleuchtungseigenschaften erfordern in der Regel eine manuelle Anpassung, können jedoch in weiten Teilen automatisiert übernommen werden. Damit ist eine weitgehend verlustfreie Übertragung der Szenen und Komponenten in die Unreal Engine gewährleistet. Hinsichtlich der in Unity genutzten Frameworks für Pfadplanung und Kinematik, insbesondere BioIK (Inverse Kinematik) und Unity NavMesh (Navigation), bieten sich in Unreal Engine 5 äquivalente Mechanismen an. Die inverse Kinematik kann über das integrierte Control Rig-System und die zugehörigen IK Solver abgebildet werden. Für die Navigation steht das native NavMesh-System von Unreal zur Verfügung, das in Verbindung mit AI Controllern und Behavior Trees ein vergleichbares Verhalten und eine realitätsnähere physikalische Simulation ermöglicht. Ein besonderer Vorteil

der Unreal Engine ergibt sich durch die Nutzung von Blueprints, die als visuelle Programmierumgebung eine schnelle und intuitive Umsetzung von Steuerungslogik, Interaktionsmechanismen und Kommunikationsroutinen erlauben. Auch die Integration der Verwaltungsschale in ihrer aktuellen Spezifikation v3.1 über Eclipse BaSyx wurde in Hinblick auf eine Unreal-Portierung untersucht. Die BaSyx-Frameworks stehen plattformunabhängig zur Verfügung und können über REST-basierte Schnittstellen eingebunden werden.

1.1.10 AP 10 – Abschlusspräsentation

Zum Projektabschluss wurde der Anwendungsfall „Türspaltoptimierung“ in einem erweiterten Gesamtsystem im Rahmen der Konferenz der Plattform Lernende Systeme am 29./30.09. in Berlin einem interessierten Fachpublikum demonstriert. Hierzu waren im Vergleich zum Hannovermesseaufbau erhebliche Anpassungen an die Gegebenheiten vor Ort erforderlich. So konnte beispielsweise nicht die gesamte Karoserie, sondern lediglich die beiden Türen einer Seite gezeigt werden. Diese wurden an ein speziell hierfür konstruiertes Gestell vor einer Plakatwand, welche die restliche Karosserie im Originalmaßstab zeigte, aufgehängt. Außerdem wurde aus Platzgründen die Kamera zur Türöffnungserkennung nicht mehr in der Vogelperspektive, sondern direkt unterhalb des Beamers aufgehängt. Hierdurch war mit deutlich mehr Verdeckung durch Menschen zu rechnen. Mit Hilfe der zuvor aufgebauten Datenpipeline zum Modelltraining anhand synthetischer Trainingsdaten konnte reibungslos ein an die Situation angepasstes Modell mit nur wenigen händisch annotierten Realdaten erzeugt werden.

Ein einstweiliger Projektabschluss mit dem Anwendungspartner VW fand (remote) am 15.10. statt. Bereits im Vorfeld wurde vereinbart, sich in regelmäßigen Abständen weiter zu dem Thema auszutauschen und sich gemeinsam um einen (geförderten) Projektanschluss zu bemühen.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises bezieht sich auf die Personalkosten. Details finden sich im zahlenmäßigen Nachweis.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die zentrale Zielsetzung von AIQUAMA war die exemplarische Realisierung einer Null-Fehler-Produktion auf Grundlage einer inkrementellen Qualitätsüberwachung echtzeitnah während der Produktion an durch Auswertung von Multi-Sensor-Datenströmen mit KI-Methoden um langwierige und kostspielige Qualitätsendkontrollen perspektivisch überflüssig zu machen.

Die durch das DFKI geleisteten Projektarbeiten und -ergebnisse waren in enger Zusammenarbeit mit dem Anwendungspartner VW und den tschechischen Forschungspartnern allesamt auf dieses Ziel ausgerichtet und trugen in diesem Zusammenhang signifikant zum Erreichen dieser Zielsetzung bei. Dies wurde mehrfach eindrücklich demonstriert.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in AIQUAMA gewonnenen Erkenntnisse und erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich des Einsatzes von KI zur Null-Fehler-Produktion werden vom DFKI als Multiplikator in andere Kontexte und Domänen einfließen. So werden die Ergebnisse weiterhin als Demonstrationen im MRK-Labor des DFKI in Saarbrücken im Rahmen von Transferaktivitäten wie dem European Digital Innovation Hub (EDIH) Saar und dem Regionalen Zukunftszentrum für Digitalisierung und KI Saarland/Rheinland-Pfalz (RZzKI) fachkundigen Besuchern interaktiv vorgeführt. Gleichzeitig dienen die Demonstrationen als Grundlage für weitere Forschungstätigkeit im Bereich Null-Fehler-Produktion. Die hierfür genutzte Verwaltungsschalen-Infrastruktur für standardisierte Digitale Zwillinge sowie die Anwendungen zur Kalibrierung und Nutzung der Beamer-Projektion werden zeitnah quelloffen veröffentlicht und dienen somit perspektivisch nicht ausschließlich VW zur ortsgenauen Visualisierung von qualitätsbezogenen Informationen und Werkerinteraktion.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Thema KI-basierte Null-Fehler-Produktion hat im letzten Projektjahr von AIQUAMA einen großen Zulauf erhalten. So fand beispielsweise auf der Konferenz Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 2025 ein erster dedizierter Workshop zum Thema „Zero Defects Manufacturing in Industry 4.0: Shaping the Future of Smart Production“ statt. Dieser fand parallel zu unserem 4. ImplAAS-Workshop statt und umfasste lediglich eingeladene Vorträge, einer jedoch mit VW-Beteiligung (Volkswagen Autoeuropa).

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

6.1 Publikationen

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen
  - Matthias Jost, Andreas Luxenburger, Sönke Knoch, Jonas Mohr, Moritz Wolf, Jan Alexandersson, Rudolf Jost, Klaus Posselt. "Augmented Reality-based Worker Assistance for People with Cognitive Disabilities" IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR-2022), IEEE, 2022, doi: 10.1109/AIVR56993.2022.00044
  - Daniel Porta. “AIQUAMA: Towards Zero-Error Manual and Hybrid Assembly Processes”. Proceedings of the 7th World Engineers Convention. World Engineers Convention (WEC-2023), October 11-13, Prague, Czech Republic, WEC, 2023.
  - Daniel Büttner, Dirk Schöttke, Stephan Schäfer, Sönke Knoch, Daniel Porta, Tim Schwartz, Claudette Ocando Röhricht, Aaron Zielstorff, Andreas Bayha. “Bridging the Qualification Gap for the Asset Administration Shell: A Modular and Role-Based Learning Framework”. 2025 IEEE 30th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Porto, Portugal, 2025, pp. 1-8, doi: 10.1109/ETFA65518.2025.11205676.

- Dissertation
  - Sönke Knoch. “Sensor-basierte Erhebung von manuellen Montageprozessen“, Dissertation, Universität des Saarlandes, Tag der Disputation: 14.12.2022.
- Studentische Arbeiten
  - Matthias Jost. “A Spatial Augmented Reality Worker Guidance for the Empowerment of Cognitively Impaired People in Zero-Defect Manufacturing”, Masterarbeit, Universität des Saarlandes. 2023
  - Md Jonybul Islam. “Strategies for a Robust Deep Reinforcement Learning Approach in Job Shop Scheduling with Domain Shifts”, Masterarbeit, Universität des Saarlandes. 2024
  - Dieter Merkel. “AR-basierte Werkerführung für Null-Fehler-Produktion“, Masterarbeit, Universität des Saarlandes. 2025
  - Tobias Schiffmann. „Estimating the Right Level of Support for Assembly“, Bachelorarbeit, Universität des Saarlandes. 2025
- Presseveröffentlichungen
  - Pressemitteilung auf diversen Kanälen zum Projektstart
    - https://www.dfki.de/web/news/forschungsprojekt-aiquama-gestartet
    - https://ricaip.eu/kickoff-aiquama/
  - Veröffentlichungen zur Hannovermesse-Präsenz
    - https://www.linkedin.com/posts/dfki_hm25-activity-7312809611600773121-ZmCP?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAABQMqIABKJEnnqhHKEzAYr-ZUF6ct9R9_FCU
    - Beitrag im Aktuellen Bericht des Saarländischen Rundfunks: https://www.sr-mediathek.de/index.php?seite=7&id=151770&startvid=7
  - Veröffentlichungen zur Präsenz auf der Konferenz der Plattform Lernende Systeme
    - https://www.plattform-lernende-systeme.de/plattformkonferenz-2025.html
    - https://www.linkedin.com/posts/dfki_plskonferenz2025-volkswagen-aiquama-activity-7379510079152377856-C60I?utm_source=social_share_send&utm_medium=member_desktop_web&rcm=ACoAABQMqIABKJEnnqhHKEzAYrZUF6ct9R9_FCU

6.2 Vorträge

- 08.11.2022: Wolfgang Wahlster: „Industrial AI for the Next Decade of Industrie 4.0” im Rahmen des China-Germany Industrial Internet High-end Forum auf der Global Industrial Internet Conference, Shenyang, China

- 16.11.2022, Daniel Porta: AIQUAMA-Pitch im Rahmen des Kick-Offs von Basys4Transfer
- 13.10.2023: Daniel Porta: Towards Zero-Error Manual and Hybrid Assembly Processes, World Engineers Convention 2023, Prag
- 08.11.2023: Daniel Porta: Live-Systemdemonstration vor Fachpublikum im Rahmen der DFKI-Hausmesse DFKI AI.Day
- 31.03. – 04.04.2025: Systemdemonstration Hannovermesse 2025
- 29./30.09.2025: Systemdemonstration Konferenz der Plattform Lernende Systeme