Sachbericht zum Verwendungsnachweis

- Gemeinsamer Sachbericht -

Verbundprojekt

Selbstgesteuerte Assistenz für die manuelle Montage sowie Kommunikation und Interaktion

SAM-KI

in der Fördermaßnahme

Zukunft der Arbeit: Mittelstand – innovativ und sozial (ZdAM)

Autoren

Fraunhofer IPA, Kevin Klöpfer, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, kevin.kloepfer@ipa.fraunhofer.de
Fraunhofer IPA, Larissa Eiler, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, larissa.eiler@ipa.fraunhofer.de
Visometry, Ulrich Bockholt, Fraunhoferstr. 5, 64283 Darmstadt, ulrich.bockholt@visometry.com
DILO, Wolfgang Buchmüller, Frundsbergstr. 36, 87727 Babenhausen, Wolfgang.Buchmueller@dilo-gmbh.com
SEHO, Andreas Reinhardt, Frankenstr. 7 - 11, D-97892 Kreuzwertheim, andreas.reinhardt@seho.de
IFAB, Josephine Hanebeck, Engler-Bunte-Ring 4, 76131 Karlsruhe, josephine.hanebeck@kit.edu

Projektlaufzeit: 01.03.2022 – 31.05.2025

Erstellungsdatum: 12.11.2025

Projektpartner
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (02L20C530) – IPA Visometry GmbH (02L20C531) – Visometry DILO Armaturen und Anlagen GmbH (02L20C532) – DILO SEHO Systems GmbH (02L20C533) – SEHO Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ifab - Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (02L20C534) – IFAB

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

I. Teil I Kurzfassung 3
I.1 Aufgabenstellung 3
I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 3
I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick 3
II. Teil II Eingehende Darstellung 6
II.1 Motivation und Aufgabenstellung 6
II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 9
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 10
II.4 Erzielte Ergebnisse 11
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen 29
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse 29
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes 31
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc. 31
II.9 Literaturverzeichnis 32

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Durch die Position am Ende der Wertschöpfungskette treten in der Montage fast alle organisatorischen, terminlichen und qualitativen Fehler der vorhergehenden Prozessschritte zu Tage. Der Monteur muss hierbei, vor allem in Unternehmen mit breitem Variantenspektrum, als Kommunikator und Lösungsmanager mit anderen Abteilungen interagieren, um den Arbeitsvorgang abzuschließen. Das Vorhaben „Selbstgesteuerte Assistenz für die manuelle Montage sowie Kommunikation und Interaktion“ (SAM-KI) verfolgte das Ziel, die Potenziale digitaler Assistenzsysteme für die Arbeitswelt humanorientiert und mehrwertstiftend auszugestalten. Die technische Basis des in diesem Projekt angedachten Montageassistenzsystems war ein mobiles Tablet, das den Nutzer bei Montagetätigkeiten unterstützt. Der Fokus lag auf der Anwendergruppe „kleine und mittlere Unternehmen“ (KMU) mit Montagetätigkeiten, die sich insbesondere durch eine hohe Variantenvielfalt und Kleinserien mit besonders hohen Qualitätsanforderungen auszeichnen. Hierbei sollte innerhalb des Verbundprojekts SAM-KI ein Montageassistenzsystem demonstratorisch aufgebaut werden, das automatisiert Fehler vorgelagerter Prozessschritte oder des Montageprozesses erfasst (Qualitätskontrolle) und an den Nutzer übermittelt, eine Kommunikations- und Interaktionsmöglichkeit bietet, um Fehlzustände in der Montage, die selbstständig nicht gelöst werden können, digitalisiert an prozessbeteiligte Fachabteilungen kommuniziert sowie relevante Dokumente zur Montage visualisiert.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zu Beginn des Verbundprojekts war der wissenschaftliche und technische Stand fragmentiert. Diverse Ansätze und Systeme boten der Zielgruppe keine praxistaugliche und gesamtheitliche Lösung der Problemstellungen in variantenreichen Montagebereichen in KMU. Viel mehr ist ein Fokus auf große Losgrößen charakteristisch, was bei einer hohen Variantenvielfalt und kleinen Losgrößen keine wirtschaftliche Begründung für den Einsatz bietet. Exemplarische Ansätze sind folgend kurz dargestellt.

Das Fraunhofer IFF (Magdeburg) fokussiert eine Monteurassistenz und Qualitätsprüfung für manuelle Montageprozesse [1, S. 1-2]. Dabei werden visuelle Informationen eines zu montierenden Bauteils bzw. einer Baugruppe über einen im Sichtbereich des Monteurs angeordneten Bildschirm bereitgestellt. Zur realen Kamerabildansicht wird somit der aktuelle Arbeitsschritt virtuell hinzugefügt.

Ein weiteres System ist der schlaue Klaus des Unternehmens Optimum datamanagement solutions GmbH. Ein kamerabasierter Montageassistent, bestehend aus Touchmonitor und Kamera, überprüft die korrekte Ausführung von Montagearbeitsgängen einer standardisierten Handmontage. Der schlaue Klaus zeigt dem Arbeiter die durchzuführenden Schritte an und überwacht sowie protokolliert diese automatisch. Bei Montagefehlern wird ein audiovisueller Fehlerhinweis durch das System ausgegeben.

Der Assistent von ulixes Robotersysteme GmbH ist ein App-basiertes System für eine digitale Montageanleitung. Nach dem Scannen eines Barcodes wird der Monteur durch ein Pick-by-Light-System und visuelle Einblendungen mittels eines Projektors durch den Montageprozess geführt.

Alle drei Systeme sind hauptsächlich für den Anwendungszweck einer standardisierten Handmontage im Rahmen einer Großserienfertigung ausgelegt. Dementsprechend ist zur Anpassung des Systems auf den jeweiligen Montagevorgang ein hoher personeller und somit finanzieller Initialaufwand notwendig. Des Weiteren berücksichtigen die Systeme nicht die Vorerfahrung des Monteurs, sondern sind eher als ein Kontrollwerkzeug zur Protokollierung des Arbeitsfortschritts zu sehen. Vor allem eingelernte Mitarbeiter können dies eher als eine Last, anstelle einer zielführenden Unterstützung empfinden [2].

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Im Rahmen des Verbundprojekts SAM-KI konnten mehrere wesentliche Ergebnisse erzielt werden, die neue, entlastende Funktionen zur Kommunikation, Anleitung und Dokumentation in der Montage in ei-

nem Assistenzsystem integrieren. Nachgewiesen führen diese zur Steigerung der Effizienz und Zufriedenheit der Mitarbeitenden in den beiden Anwendungsunternehmen, als Repräsentanten für KMU mit variantenreichen Montagetätigkeiten und kleinen Losgrößen.

Zu Projektbeginn wurden die Anforderungen an das Montageassistenzsystem ermittelt. Dafür wurden bei beiden Anwendungsunternehmen Anforderungsanalysen durchgeführt, die sowohl auf Fragebögen als auch auf Videoanalysen, unter Einbindung von Montagemitarbeitenden, basierten. Die gewonnenen Ergebnisse wurden dokumentiert und bildeten die Grundlage für die anschließende Entwicklung des SAM-KI-Assistenzsystems, das mehrere Teilsysteme integriert. Dadurch war gewährleistet, dass die Entwicklung eng an den realen Arbeitsbedingungen der Unternehmen und Montagemitarbeitenden orientiert war und die Mitarbeitenden von Anfang an aktiv in den Prozess eingebunden wurden. Die eng verzahnte Nutzereinbindung in die FuE-Arbeiten wurde über den kompletten Projektverlauf beibehalten; sowohl formativ als auch summativ.

Ein zentrales Projektergebnis (Modul 1) ist eine auf Augmented Reality (AR) basierte Komponente des Assistenzsystems zur Bereitstellung von Montageanleitungen und Qualitätsprüfung. Dieses Modul ermöglicht es Unternehmen, zum einen AR-basierte Anleitungen für einzelne Montageschritte auf Basis von CAD-Daten selbst, variantenspezifisch und aufwandsarm zu erstellen. Zum anderen können sich Mitarbeitende in der Montage mittels der AR-basierten Montageassistenz selbstständig Wissen aneignen und hierbei zusätzlich eine Bauteilkontrolle durchführen. Die Bauteilkontrolle unterstützt die Mitarbeitenden bei der Erkennung von Montagefehlern in jedem Montageschritt und auch abschließend nach Fertigstellung. Hervorzuheben sind deutliche Vorteile zum Stand der Technik, da die Erstellung der variantenspezifischen AR-Assistenz zeiteffizient durch Verwendung von CAD-Daten erfolgt, unterstützende Annotationen ergänzt werden können und die Assistenz mobil über ein Tablet nutzbar ist.

Der Workflow des Augmented-Reality-Assistenzsystems ist in Abbildung 1 dargestellt:

- Für den Montageschritt, der als Nächstes durchgeführt werden soll, wird in Überlagerung zum Kamerabild der iPad-Kamera angezeigt, wo Montagearbeiten ausgeführt werden sollen. So wird im Beispiel von Abbildung 1 links etwa angezeigt, an welchen Stellen die Nieten gesetzt werden sollen.
- Die Montagearbeiten werden dieser Anleitung entsprechend ausgeführt (siehe Abbildung 1 Mitte)
- Im anschließenden Kontrollschritt („Werkerselbstkontrolle“) wird überprüft, ob die Montagearbeiten auch so ausgeführt wurden, wie im Bild dargestellt: Korrekt montierte Objekte werden grün markiert, falsch montierte Objekte werden rot markiert.

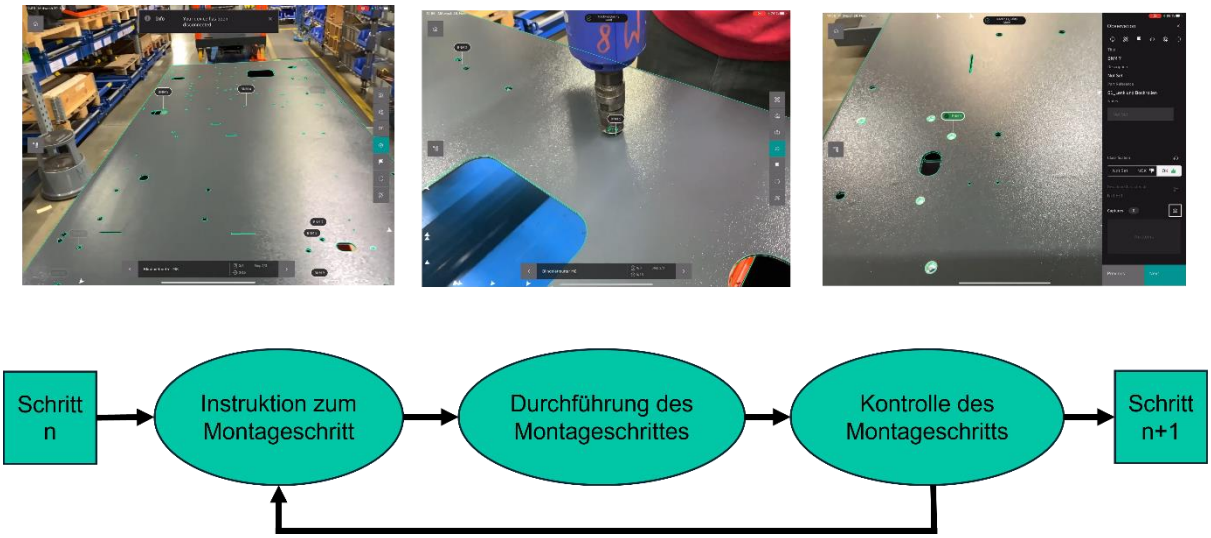

Abbildung 1: Workflow zur Montageassistenz mit dem Augmented-Reality-Assistenzsystem

In Modul 2 wurde die Umsetzung von drei Apps erforscht, durchgeführt und evaluiert, die Mitarbeitende in der Montage bei der Kommunikation, Interaktion und Dokumentation von Montagefehlern unterstüt-

zen. Die App SAM-KI-Nachricht wurde anhand eingangs erhobener Anforderungen und Kommunikationsgründe implementiert. Mit der App wird die Kommunikation von Fehlern in der Montage zwischen verschiedenen Fachabteilungen erleichtert. SAM-KI-Nachricht trägt dazu bei, Probleme schneller zu identifizieren und Lösungen effizient umzusetzen. Zur weiteren Verbesserung der Kommunikation wurde zudem die App SAM-KI-Video eingeführt, die eine schnelle Absprache zwischen den Fachabteilungen bei komplexen Problemstellungen ermöglicht. Die App bietet die Möglichkeit, verschiedene fachliche Ansprechpartner anderer Abteilungen per Videoanruf zu kontaktieren, um Details zu einem Auftrag und dessen Umsetzung abzustimmen. SAM-KI-Video wurde allerdings von Montagemitarbeitenden weniger gut als SAM-KI-Nachricht angenommen, da eine textbasierte Kommunikation von den Nutzern in den meisten Problemsituationen präferiert wurde. SAM-KI-Video wurde als ergänzende Option für komplexe, aber weniger häufige Problemstellungen adoptiert. Die App SAM-KI-Check wurde zur abschließenden Dokumentation und Qualitätssicherung umgesetzt. SAM-KI-Check wurde von den Nutzern sehr gut angenommen. Die App stellt sicher, dass Prüfprotokolle und dahinterliegende Kontrollvorgänge nicht mehr papierhaft, sondern vollständig digital und kollaborativ durchgeführt sowie zentral dokumentiert werden können. Hierbei können Prüfprotokolle mit Checklisten, Bildern und anderen Anlagen digital ausgefüllt werden. SAM-KI-Check ermöglicht zudem eine variantenspezifische Erstellung von Prüfprotokollen in der Arbeitsvorbereitung mit wenigen „Klicks“. So kann nicht nur ein variantenspezifisches Prüfprotokoll erstellt werden, sondern auch der gesamte Prozess effizienter und digitaler gestaltet werden.

In Modul 3 wurde eine Studie durchgeführt, die das Lernverhalten der Mitarbeitenden in der Montage in Abhängigkeit von unterschiedlichen Informationsdarstellungen (globale vs. lineare, sequenzielle Darstellung) untersuchte. Ziel war es, herauszufinden, inwiefern die Adaptivität eines Systems das Lernen und die generelle Handhabung des Assistenzsystems unterstützt. Dabei wurde betrachtet, wie sich sowohl die objektiv messbare Performanz als auch die subjektive Wahrnehmung eines Lernkurses durch die Anpassung der Darstellungsform an die individuelle Arbeitsgedächtniskapazität der Probanden verändern. Die Studie wurde zunächst im Labor mit Auszubildenden technischer Berufe durchgeführt und im späteren Verlauf im Unternehmenskontext validiert. Die Ergebnisse der Studie wurden hinsichtlich des Interaktionskonzeptes und der Ausgestaltung des User Interfaces des Assistenzsystems analysiert, was in die Entwicklung von Modul 2 einfloss und so eine Nutzer- und Aufgabenzentrierung sicherstellte.

Sowohl projektbegleitend als auch summativ erfolgte eine stetige Nutzereinbindung und damit eine sukzessive Evaluation der (Teil-)Projektergebnisse. Es wurden die Mitarbeitenden der Anwendungspartner in die Ausgestaltung des Assistenzsystems eingebunden, frühzeitig Zwischenergebnisse getestet, Optimierungen iterativ implementiert und mehrere Evaluationen durchgeführt. Die Rückmeldungen der Mitarbeitenden innerhalb der Evaluation zum Projektende und über den Projektverlauf zeigen eine gesteigerte Zufriedenheit und eine verbesserte digitale Kompetenz im Vergleich zum Projektbeginn. Zudem war das messbare und qualitative Feedback hinsichtlich der Prozesseffizienz positiv. Weiter konnte mit SAM-KI ein einfach zu nutzendes, mobiles Assistenzsystem umgesetzt werden, das die Mitarbeitenden in der Montage als stetigen Begleiter auf einem Tablet mitführt.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

In Montageprozessen von mittelständischen Unternehmen werden bis heute wesentliche Arbeitsschritte oder Kommunikationsbedarfe zur Klärung technischer Detailfragen zwischen dem Monteur (auch Nutzer genannt) und den prozessbeteiligten Fachabteilungen vorrangig analog und manuell abgewickelt. Unterschiedliche Listen und Programme können sind nicht synchronisiert, Ab- oder Rücksprachen erfolgen per E-Mail, telefonisch oder mit Stift und Zettel am jeweiligen Arbeitsplatz. Die Montage ist – nicht zuletzt durch die Position am Ende der Wertschöpfungskette – der Ort, an dem fast alle organisatorischen, terminlichen und qualitativen Fehler der vorhergehenden Schritte zu Tage treten [3]. Solche qualitativen Fehler in Form von Qualitätsmängeln, konstruktiven Fehlern der zu montierenden Komponenten, fehlenden Materialbereitstellungen oder montagetechnischen Detailfragen veranlassen den Monteur zur Kommunikation und Interaktion mit dem Vorgesetzten oder der jeweiligen Fachabteilung. Trotz einer zunehmenden Digitalisierung der Arbeit, des vermehrten Einsatzes von Informations- und Kommunikationstechnologien und der Berücksichtigung sozialer Aspekte der Arbeitsgestaltung ist dieser Status unverändert. Zugleich werden die bislang praktizierte analoge Interaktion und Kommunikation durch Telearbeit und die damit zusammenhängende dezentrale Arbeitsweise der prozessbeteiligten Fachabteilungen erschwert.

In der Montage findet der Zusammenbau einzelner vorgefertigter Teile zu einer funktionsfähigen Maschine oder Baugruppe statt. Trotz einfach beherrschbarer Abläufe ergibt sich, im Vergleich mit anderen Fertigungsprozessen, ein stark reduzierter Katalog von denkbaren Fehlerursachen in der Montage. Diese manifestieren sich als ein begrenzter Satz von Fehlern wie „vergessen“, „vertauscht“, „falsch gefügt“ [4, S. 23]. In Unternehmen mit großer Stückzahl arbeiten die Monteure oft die gleichen Montageschritte ab und müssen in vorgegebenen Taktzeiten möglichst fehlerfrei montieren. Diese monotone Tätigkeit möglichst fehlerfrei auszuüben kann zu mentalem Stress führen. Darüber hinaus führt die wachsende Komplexität der Produkte zu steigenden Anforderungen an den Monteur hinsichtlich seiner Merkfähigkeit und motorischen Fähigkeiten [4, S. 23]. Werden Monteure nicht auf die sich verändernde Situation vorbereitet, kommt es zu Folgen wie hohen Fehlerquoten [5, S. 73]. Demgegenüber sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU) oft mit heterogenen Kundenanforderungen konfrontiert, welche in der Regel in Form von kundenspezifischen Lösungen bedient werden. Hierdurch ergeben sich im Vergleich zu Großunternehmen nur niedrige bis mittlere Absatzstückzahlen in Kombination mit einem sehr breiten Variantenspektrum.

Ziel des Projekts war es, die Potenziale digitaler Assistenzsysteme für die Arbeitswelt humanorientiert und mehrwertstiftend auszugestalten. Die technische Basis des in diesem Projekt angedachten Montageassistenzsystems ist ein mobiles Tablet, das den Nutzer bei Montagetätigkeiten unterstützt. Hierunter fallen z.B.:

- Produkte, die eine hohe Variantenvielfalt aufweisen,
- Kleinserien, die nur selten bzw. in großen zeitlichen Abständen auftreten, sodass wenig Routine vorhanden ist,
- Produkte mit besonders hohen Qualitätsanforderungen, bei denen häufige Zwischenprüfungen erforderlich sind.

In Abbildung 2 ist der anwendungsfallneutrale Prozessablauf eines Montagevorgangs mit dem Montageassistenzsystem SAM-KI dargestellt, welcher nachfolgend erläutert wird: In Schritt A rendert der Konstrukteur bzw. Entwickler im Rahmen seiner Konstruktion die 3D-Geometriedaten und legt diese im System ab. Abgespeichert werden prüfbare Zwischenstände und der Endzustand sowie relevante Begleitdokumente. Im anschließenden Schritt B beginnt der Monteur für die zuvor konstruierte Baugruppe seine Montageaufgabe, welche nun in einzelnen Komponenten am Montagearbeitsplatz vorliegt. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls ist es möglich, mittels Kamera des Tablets einen Strich-/ oder Barcode zu scannen oder die Auftrags- bzw. Baugruppennummer manuell einzugeben. Im darauffolgenden Schritt C hat der Monteur Zugriff auf die am Tablet visualisierte Montageaufgabe. Um das Verständnis

der bevorstehenden Montageaufgabe zu vertiefen, kann der Monteur am Tablet relevante Begleitdokumente wie Zusammenbauzeichnungen, 3D-Modelle oder die Stückliste einsehen. Im darauffolgenden Schritt D kann die Qualität einzelner intern oder extern gefertigter Komponenten geprüft werden. Hierbei ist zu bemerken, dass diese Prüfung aus arbeitserleichternden und monetären Gründen nicht zu einem Mehraufwand führen darf, in dessen Rahmen der Monteur aufwendig einzelne Komponenten vor die Kamera führt.

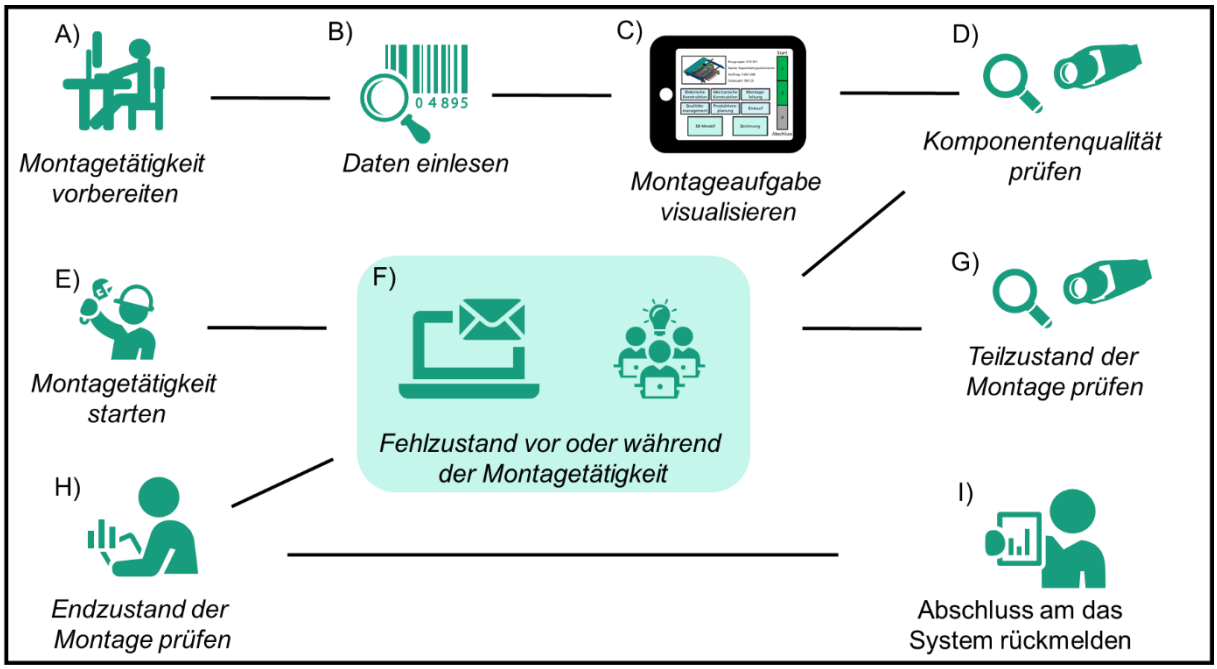

Abbildung 2: Anwendungsfallneutrale Prozessbeschreibung des Montageassistenzsystems SAM-KI

Die Ausgestaltung von Schritt D ist somit im Wesentlichen abhängig vom vorliegenden Anwendungsfall. Hierbei ist beispielsweise zu unterscheiden, wie die Kommissionierung einzelner Komponenten stattfindet (z.B. Kanban) oder inwiefern das Qualitätsmanagement (unternehmensspezifisch) in bestimmte Prozesse eingreift bzw. in diese involviert ist. Sollte während Schritt D (oder auch in Schritt G oder Schritt H) ein Fehlzustand vorliegen, kann der Monteur mit dem entsprechenden Ansprechpartner via Tablet kommunizieren bzw. interagieren, um dieses Problem zu lösen (Schritt F). Im Regelfall sind dies Prozessbeteiligte. Falls ein Fehlzustand von extern in das Unternehmen getragen wurde (z.B. fehlerhaft extern gefertigte Komponenten), ist die Kommunikation üblicherweise nicht Aufgabe des Monteurs, sondern wird je nach Aufgabenverteilung durch Vorgesetzte oder das Qualitätsmanagement übernommen. Für die interne Kommunikation und Interaktion werden dem Monteur zwei wesentliche Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, die mittels Tablets bedienbar sind (Schritt F). Zum einen ermöglicht das System dem Monteur das Versenden einer standardisierten Nachricht an den jeweiligen Kollegen der Fachabteilung, welcher zur Behebung des Fehlzustands beitragen kann. Durch die bereits referenzierte Baugruppennummer kann der Monteur mit wenigen Klicks und ohne die Eingabe von Text somit schnell seinen Fehlzustand übermitteln. Das Assistenzsystem schlägt dem Monteur hierzu proaktiv einen geeigneten Ansprechpartner und standardisierte Texte vor. Zum anderen besteht die Möglichkeit einer AR-Remote-Schaltung mit Kamerabild und Ton – die sogenannte multimodale Kommunikation und Interaktion. Während des Gesprächs besteht die Möglichkeit, mit Screenshots oder mit Markierungen auf den Bauteilen zu interagieren. In Schritt G und Schritt H werden Teilzustände bzw. der Endzustand der montierten Baugruppe auf die vorhandene Qualität bzw. Vollständigkeit kontrolliert. Diese Assistenz erfolgt adaptiv, d. h. angepasst an den aktuellen Zustand und die Wünsche des Monteurs. So können diese je nach Vorerfahrung mit einem bestimmten Produkt und ihrem Qualifizierungsniveau einen höheren oder geringeren Grad an Unterstützung durch das System bekommen. Bei einem Meister mit hohem Erfahrungslevel werden dahingehend deutlich weniger Teilzustände geprüft als bei Auszubildenden oder ungelernten Facharbeitern. Zudem kann bei steigender Routine der Grad an Unterstützung auch wieder

reduziert werden. Ein möglicher weiterer Ausgestaltungspunkt des Projektes ist es, dass neben den vom Konstrukteur prüfbaren CAD-Daten auch ein Mitarbeiter mit hohem Erfahrungslevel und Qualifizierungsniveau bestimmte Teilzustände der Montage (z.B. nach seiner eigenen Montage) im System abspeichert. Zusammenbauten von anderen Mitarbeitern könnten anschließend mit dieser Referenz auf ihre Qualität kontrolliert werden. Dies hat vor allem dann eine hohe Relevanz, wenn davon auszugehen ist, dass eine bestimmte Baugruppe in dieser Form noch einmal zusammengebaut werden muss. Die Rückmeldung durch das System erfolgt mittels akustischer, visueller und/oder taktiler (z.B. Vibrationen über ein Armband) Signale und orientiert sich an der Art der Unterstützung und an der individuellen Präferenz des Monteurs. Der Montagevorgang kann manuell durch einen Klick oder durch die automatisierte Prüfung der Qualitätskontrolle abgeschlossen werden (Schritt I).

Alle ausgegebenen Daten zur Qualitätskontrolle werden lediglich dem Monteur mittels Tablets zugänglich gemacht. Vorgesetzte oder andere Fachabteilungen werden nicht über einen vom selbstgesteuerten Assistenzsystem ermittelten Montagefehler informiert. Das Montageassistenzsystem wird federführend in der Montage eingesetzt. Weshalb diese Abteilung auch vorrangig für die Aktualisierung und Weiterentwicklung des Assistenzsystems zuständig ist. Die Nutzer werden durch Mitarbeiterschulungen und eine Qualifizierung auf die Zusammenarbeit mit dem Assistenzsystem vorbereitet. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird insbesondere so gestaltet, dass auch ältere Montagemitarbeiter das System als Hilfsmittel akzeptieren werden.

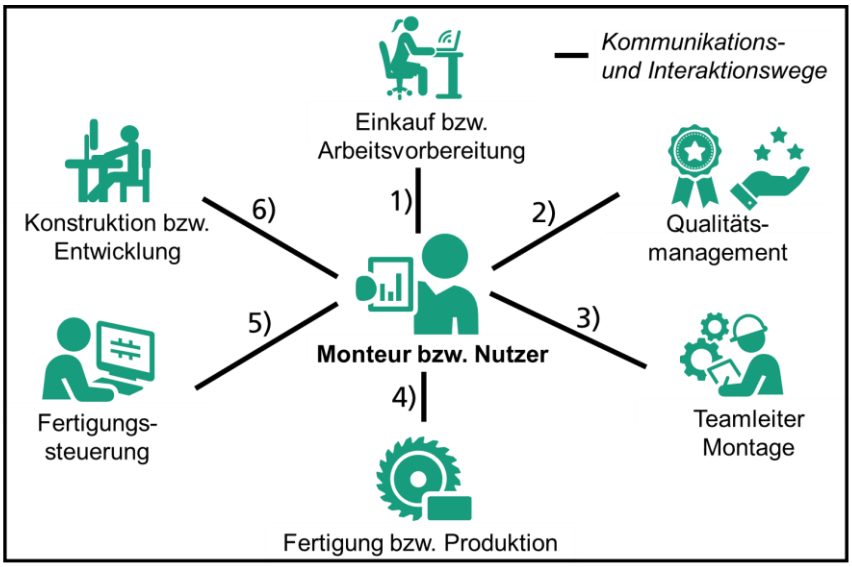

Abbildung 3: Kommunikations- und Interaktionswege mit prozessbeteiligten Kollegen für SAM-KI

Zur Übermittlung von Fehlzuständen vor oder während der Montage dient der Kommunikations- und Interaktionsstrang (Schritt F). Die in den Anwendungsfällen vorliegenden Kommunikations- und Interaktionswege werden zu Beginn des Forschungsvorhabens näher spezifiziert. Im Zentrum der Kommunikation und Interaktion steht der Monteur mit seinem Tablet (Abbildung 3). Bei fehlender oder falscher Materialbereitstellung kann dieser mit dem Einkauf bzw. der Arbeitsvorbereitung (siehe 1) kommunizieren oder interagieren. Bei fehlerhaft angelieferten Komponenten können Kommunikation und Interaktion mit dem Qualitätsmanagement oder dem Teamleiter der Montage stattfinden (siehe 2 und 3). Der Teamleiter kann ebenso kontaktiert werden, wenn die Priorisierung von mehreren Aufträgen unklar ist oder montagetechnische Detailfragen vorliegen. Möglich ist auch eine direkte Abstimmung mit der Fertigung oder Produktion, um beispielsweise angelieferte Teile nachzufordern oder qualitativ zu bemängeln. Ebenso könnte das Projektmanagement respektive die Fertigungssteuerung bei einem möglichen Zeitverzug der Montage vor der Überschreitung des Liefertermins eingebunden werden. Die Konstruktion oder Entwicklung (siehe 6) kann bei einem vorliegenden Konstruktionsfehler konsultiert werden. Der Monteur nutzt für jegliche Kommunikation und Interaktion sein Tablet. Die jeweiligen Fachabteilungen nutzen ihre bereits vorhandenen Desktop-PCs oder Laptops.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Im Folgenden werden Lösungsansätze für die eingangs beschriebene Problematik in der Montage auf der Basis von Assistenzsystemen vorgestellt. Das Fraunhofer IFF (Magdeburg) fokussiert eine Monteurassistenz und Qualitätsprüfung für manuelle Montageprozesse [1, S. 1-2]. Dabei werden visuelle Informationen eines zu montierenden Bauteils bzw. einer Baugruppe über einen im Sichtbereich des Monteurs angeordneten Bildschirm bereitgestellt. Zur realen Kamerabildansicht wird somit der aktuelle Arbeitsschritt virtuell hinzugefügt. Ein weiteres System ist der schlaue Klaus des Unternehmens Optimum datamanagement solutions GmbH. Ein kamerabasierter Montageassistent, bestehend aus Touchmonitor und Kamera, überprüft die korrekte Ausführung von Montagearbeitsgängen einer standardisierten Handmontage. Der schlaue Klaus zeigt dem Arbeiter die durchzuführenden Schritte an und überwacht sowie protokolliert diese automatisch. Bei Montagefehlern wird ein audiovisueller Fehlerhinweis durch das System ausgegeben. Der Assistent von ulixes Robotersysteme GmbH ist ein App-basiertes System für eine digitale Montageanleitung. Nach dem Scannen eines Barcodes wird der Monteur durch ein Pick-by-Light-System und visuelle Einblendungen mittels eines Projektors durch den Montageprozess geführt. Alle drei Systeme sind hauptsächlich für den Anwendungszweck einer standardisierten Handmontage im Rahmen einer Großserienfertigung ausgelegt. Dementsprechend ist zur Anpassung des Systems auf den jeweiligen Montagevorgang ein hoher personeller und somit finanzieller Initialaufwand notwendig. Des Weiteren berücksichtigen die Systeme nicht die Vorerfahrung des Monteurs, sondern sind eher als ein Kontrollwerkzeug zur Protokollierung des Arbeitsfortschritts zu sehen. Vor allem eingelernte Mitarbeiter können die ständig wechselnden Einblendungen eher als eine Last, anstelle einer zielführenden Unterstützung empfinden [2]. Vergleichbare Systeme sind ausschließlich auf wiederkehrende/standardisierte Montagetätigkeiten ausgelegt und bieten keine Kommunikations- oder Interaktionsmöglichkeit zu anderen Abteilungen.

Als Projektergebnis von SAM-KI wurde daher ein übertragbares und skalierbares Montageassistenzsystem fokussiert, welches für unterschiedlichste Montageumgebungen einsetzbar ist. Im Unterschied zum Stand der Technik, liegt das anvisierte Forschungsfeld nicht in einer hoch standardisierten Montageaufgabe, die komplett digital hinterlegt ist und mit Sensorik kleinschrittig auf Abweichungen hin überwacht werden kann. Vielmehr ist eine Lösung das Ziel, die das spezifische Umfeld von KMU sowie die Qualifikation des jeweiligen Monteurs berücksichtigt. Dementsprechend sollte das entwickelnde Assistenzsystem keinen erheblichen vorgelagerten Initialaufwand verlangen, sondern ist ohne größeren Zeitaufwand initialisierbar. Daher ist ein einziges System deutlich universeller für Montageaufgaben einsetzbar als bisherige Assistenzsysteme dieser Art. Dies ist mittels einer Bauzustandserfassung, z.B. über eine KI-Bilderkennung, möglich. Durch Verfahren der Bildverarbeitung wird das Kamerabild in Echtzeit nach bekannten 3D-Objekten abgesucht. Hierdurch können gänzlich fehlende oder falsch montierte Bauteile im anschließenden Montageprozess detektiert und Teilzustände der Montage (siehe Start - Abschluss; Abbildung 4) geprüft werden. Außerdem wird das Tablet genutzt, um eine audiovisuelle Abstimmung zwischen Fachexperte und Monteur zu ermöglichen. Dies gelingt über eine AR-Remote-Schaltung mit Kamerabild, Ton und AR-Überblendung. Das Assistenzsystem schlägt dem Monteur hierzu proaktiv einen geeigneten Ansprechpartner vor, um bestimmte Fehlerzustände zu besprechen. Während des Gesprächs besteht die Möglichkeit, mit Screenshots oder mit Markierungen auf den Bauteilen zu interagieren. Falls eine unmittelbare Abstimmung nicht möglich ist, kann die Kommunikation und Interaktion mittels standardisierter Texte per Klick. Beispielsweise kann so eine fehlende Materialbereitstellung an die Montageleitung, Produktionsplanung oder den Einkauf rückgemeldet oder visuell wahrgenommene Qualitätsfehler an das Qualitätsmanagement übermittelt

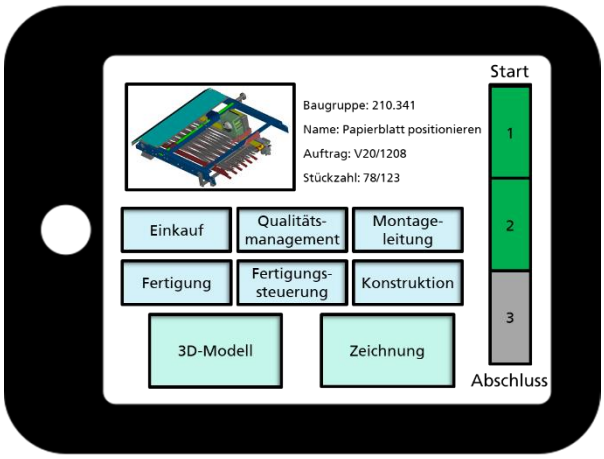

Abbildung 4: Exemplarische Visualisierung des Assistenzsystems

werden. Sobald eine Remote-Schaltung oder ein Soll-/Ist-Vergleich stattfinden soll, bewegt der Monteur das Tablet in seiner mitentwickelten Vorrichtung in seinen Tätigkeitsbereich. Die Kamera wird daraufhin automatisch auf das Bauteil gerichtet und die Kommunikation und Interaktion mit dem Fachexperten können beginnen. Eine Screenshot-Funktion ermöglicht es überdies, bestimmte statische Ansichten zu dokumentieren oder zu teilen. Zusätzlich untersucht das Assistenzsystem die zu montierenden Komponenten automatisch auf das Vorhandensein eines im Vorfeld definierten Qualitätsniveaus. Diese Prüfung stellt sicher, dass ausschließlich Komponenten verwendet werden, welche dem zuvor definierten Anforderungskriterium entsprechen. Die Prüfung unterstützt den Monteur in seiner Tätigkeit und verhindert einen Zusammenbau von zuvor fehlerhaft produzierten Komponenten.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben gliederte sich in sechs aufeinander abgestimmte Arbeitspakete und drei Module, die als Gesamtheit das SAM-KI-Assistenzsystem darstellen.

Zunächst wurden in Arbeitspaket A (Federführung: KIT ifab) die nutzerbezogenen Anforderungen an das Assistenzsystem erfasst. Hierzu wurde der Arbeitsablauf ohne Assistenzsystem beobachtet und Interviews mit den zukünftigen Nutzern geführt. Parallel dazu wurden die technischen Anforderungen ermittelt. Es wurden Lastenhefte für die beiden Anwendungsfälle erarbeitet, welche als Ausgangsdokumente für die nachfolgenden Arbeiten dienen. Systemkonzeptionen wurden durchgeführt und erstes Nutzerfeedback wurde eingeholt. Zeitlich erstreckte sich dieses Arbeitspaket über das komplette erste Projektjahr.

Für das Montageassistenzsystem wurden parallel drei Module entwickelt und als Gesamtlösung in den Montageprozess der beteiligten Anwenderunternehmen integriert. Im ersten Modul, Arbeitspaket B (Federführung: Visometry), wurden die Montageanleitung und Qualitätskontrolle von Komponenten und Baugruppen auf der Basis von KI-Verfahren erarbeitet. Im zweiten Modul, Arbeitspaket C (Federführung: Fraunhofer IPA), wurde der Kommunikations- und Interaktionsbedarf des Monteurs in ein multimodales System zur Verschlankung der unternehmensinternen Kommunikation und Dokumentation überführt. Die Umsetzung basiert auf einer zuvor erfolgten Aufnahme der Kommunikations- und Interaktionswege des Monteurs in den definierten Anwendungsfällen. Das dritte Modul, Arbeitspaket D (Federführung: KIT ifab), gestaltete die Mensch-Maschine-Schnittstelle, basierend auf einer intuitiven Systemgestaltung und adaptiver Assistenz. Im nachfolgenden Arbeitspaket E (Federführung: DILO und SEHO) wurden die Module in die Montageumgebung der anwendenden Unternehmen überführt. Die Arbeitsabläufe zu Projektbeginn und mit Montageassistenzsystem wurden gegenübergestellt und final evaluiert.

Folgend sind die Partner mit den jeweiligen Arbeitsschwerpunkten im Verbundprojekt aufgeführt.

Firma	**Visometry GmbH (Visometry)**
Branche	Softwareentwicklung und -lizenzierung, insbesondere die Entwicklung von AR-Lösungen
Arbeitsschwerpunkte	Federführung Arbeitspaket: B
	Mitarbeit Arbeitspaket: A, D, E, F.

Institut	**Karlsruher Institut für Technologie: KIT** **ifab - Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (KIT ifab)**
Branche	Forschung, insbesondere hinsichtlich Arbeitssystemgestaltung
Arbeitsschwerpunkte	Federführung Arbeitspaket: A, D
	Mitarbeit Arbeitspaket: C, E

Institut	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Fraunhofer IPA)
Branche	Forschung, insbesondere hinsichtlich Produktionstechnik und Automatisierung
Arbeitsschwer-punkte	Federführung Arbeitspaket: C, F
	Mitarbeit Arbeitspaket: A, D, E, F

Firma	SEHO Systems GmbH (SEHO)
Branche	Maschinen- und Anlagenbau
Produkte	Lötmaschinen und Transportlösungen für die Elektronikindustrie
Arbeitsschwer-punkte	Federführung Arbeitspaket: E
	Mitarbeit Arbeitspaket: A, B, C, D, F

Firma	DILO Armaturen und Anlagen GmbH (DILO)
Branche	Maschinen- und Anlagenbau
Produkte	Lösungen für emissionsfreies Gashandling vorwiegend für Schaltanlagen
Arbeitsschwer-punkte	Federführung Arbeitspaket: E
	Mitarbeit Arbeitspaket: A, B, C, D, F

II.4 Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket A: Anforderungsanalyse

Arbeitspaket A wurde gemeinschaftlich durch das Projektkonsortium bearbeitet. Zu Beginn des Projekts wurden eine Identifikation und Analyse der Anforderungen an das SAM-KI-Assistenzsystem durchgeführt. Die Anwendungspartner starteten mit einer Aufbereitung und Strukturierung von Montageunterlagen (Anweisungen, Arbeitsblätter, 3D-Modelle, zusätzliche Informationen) und einer Beschreibung beispielhafter Arbeitsabläufe, Kommunikations- und Interaktionswege sowie von Reklamationsfällen (Fehlzuständen) in den jeweiligen Montagebereichen. Die Unterlagen dienten zur Vorbereitung der Anforderungs- und Prozessanalyse. Nachfolgend wurde federführend durch das KIT ifab, unterstützt durch Visometry und das Fraunhofer IPA, für beide Anwendungsunternehmen (DILO und SEHO) eine umfassende Vor-Ort-Analyse durchgeführt, um auf dieser Grundlage spezifische Lastenhefte für die Gestaltung der Montageassistenzsysteme abzuleiten. In beiden Unternehmen erfolgte zunächst eine allgemeine Mitarbeitendenbefragung (n = 10; n = 11), mit dem Ziel, Informationen zur Zusammensetzung der Nutzergruppe, zur Varianz der Berufserfahrung sowie zu bestehenden Fehlerquellen in der Montage zu erheben. Die Befragung umfasste neben demografischen und erfahrungsbezogenen Angaben weitere Fragebögen: einen Fragebogen zu digitalen Kommunikations- und Kollaborationsfähigkeiten am Arbeitsplatz nach [6], einen Kurzfragebogen zur Arbeitsanalyse nach [7] sowie die „Utrecht Work Engagement Scale“ (UWES). Ergänzend wurden die bestehenden Arbeitsprozesse in der Montage ohne Assistenzsysteme durch Videoanalysen dokumentiert und ausgewertet. Mehrere Kameras zeichneten dabei die Montageschritte aus unterschiedlichen Perspektiven auf, sodass unter anderem Parameter wie die Dauer, Art und Anzahl der einzelnen Montageschritte sowie die Anzahl der beteiligten Mitarbeitenden systematisch erfasst werden konnten.

Die aufgenommenen Daten wurden anschließend durch das KIT ifab aufbereitet und im Konsortium analysiert. Es zeigte sich, dass die Belegschaft eine breite Altersspanne aufweist, was sich in unterschiedlichen körperlichen Voraussetzungen widerspiegelt. Zudem wurde eine erhebliche Spannweite an Berufserfahrung unter den Mitarbeitenden festgestellt. Die daraus resultierende Heterogenität der Nutzer sollte bei der Entwicklung der Assistenzsysteme explizit berücksichtigt werden. In beiden Unternehmen zeigte sich, dass die digitalen Kompetenzen der Mitarbeitenden in der Montage bislang eher gering ausgeprägt sind. Eine gezielte Schulung und begleitende Unterstützung der Beschäftigten sind daher vor der Einführung digitaler Technologien essenziell. Zudem wurde deutlich, dass Fehler häufig bereits in der Konstruktion entstehen, jedoch erst im Rahmen der Montage sichtbar werden. Die Behebung solcher Fehler beansprucht in der Regel zwischen 30 und 60 Minuten. Bei gravierenderen Konstruktionsmängeln kann der Aufwand bis zu einem halben Arbeitstag betragen. Hier kann ein Montageassistenzsystem unterstützend wirken – einerseits durch die frühzeitige Prüfung von Bauteilen, andererseits durch eine vereinfachte Möglichkeit zur Rückmeldung von Fehlern an vorgelagerte Prozesse. Zudem wurde angemerkt, dass auch Mitarbeitende mit langjähriger Erfahrung in der Montage, bei größeren Baugruppen bis zu 20-mal auf den Plan am Desktop-Rechner schauen müssen, da Zeichnungen allein oft nicht ausreichen. Das Nachschauen auf dem Plan dauert dann nur wenige Sekunden, führt aber trotzdem zu Arbeitsunterbrechungen und unnötigen Laufwegen. Das Assistenzsystem soll das häufige Nachsehen auf dem Computer durch ein informierendes und zugleich überprüfendes Einsetzen des Tablets ersetzen. Auf Basis dieser Analysen wurden anwendungsspezifische Lastenhefte für die Module A, B und C entwickelt, aus denen konkrete Anforderungen für die Gestaltung des Assistenzsystems abgeleitet wurden.

Die Utrecht Work Engagement Scale (UWES) erfasst das Arbeitsengagement anhand der drei zentralen Dimensionen Vigor, Dedication und Absorption. Im Rahmen der Anforderungsanalyse bewerteten die Mitarbeitenden der beiden Anwendungsunternehmen ihr Engagement auf einer 7-stufigen Skala. Auf der Dimension Vigor („Bei meiner Arbeit bin ich voll überschäumender Energie.“) gaben sie einen Mittelwert von 3,58 (SD = 1,23) an. Die Dimension Dedication („Ich bin begeistert von meiner Arbeit“) erreichte einen Mittelwert von 3,81 (SD = 1,40). Für die Dimension Absorption („Ich gehe völlig in meiner Arbeit auf.“) lag der Mittelwert bei 3,75 (SD = 1,55). Insgesamt sind diese Werte als positiv zu bewerten und deuten auf ein gutes bis hohes Arbeitsengagement der befragten Mitarbeitenden hin.

Der Kurzfragebogen zur Arbeitsanalyse erfasst elf Dimensionen zu Arbeitsinhalten, Ressourcen, Stressoren und dem Organisationsklima. In mehreren Bereichen zeigte sich Verbesserungspotential. So wiesen die Ergebnisse beim Handlungsspielraum auf Optimierungsbedarf hin (MW = 2,79; SD = 1,14; 5-stufige Likert-Skala). Die befragten Mitarbeitenden gaben an, nur begrenzt das Gefühl zu haben, die Reihenfolge ihrer Arbeitsschritte selbst bestimmen oder Einfluss auf die Zuteilung von Aufgaben nehmen zu können. Auch in der Dimension betrieblicher Leistungen zeigte sich ein Bedarf zur Verbesserung (MW = 2,74; SD = 0,99; 5-stufige Likert-Skala). Zudem wurde unter anderem auf der Dimension Arbeitsunterbrechungen ebenfalls Verbesserungspotenzial festgestellt (MW = 3,21; SD = 1,12; 5-stufige Likert-Skala). In welchem Umfang die im Projekt entwickelten Assistenzsysteme zu Verbesserungen in diesen Dimensionen beitragen konnten, wurde im Rahmen der abschließenden Evaluation (Arbeitspaket E) überprüft.

Für die systemseitige Grobkonzeption von Modul A wurden folgend durch Visometry in mehreren Vor-Ort-Analysen bei den Anwendungspartnern die Montageprozesse untersucht. Die Analyse beinhaltet Arbeitsanweisungen, wie sie im aktuellen Produktionsablauf genutzt wurden, und Checklisten, die zur Absicherung von Montageprozessen eingesetzt werden. Darauf aufbauend wurde eine AR-Assistenz zur Unterstützung der Montagemitarbeitenden konzipiert. Der erste Teil dieser Grobkonzeption umfasst Mock-Ups zur Modellierung der Bauzustände auf Grundlage der CAD-Daten für Konstrukteure (siehe Abbildung 5). In diesem Zusammenhang wurden die Anforderungen an Ausprägung und Qualität der CAD-Daten bei den Anwendungspartnern als spätere Grundlage für die AR-Assistenz definiert. Dies führte bei den Anwendungspartnern zu Aufbereitungsaufwand hinsichtlich der CAD-Daten.

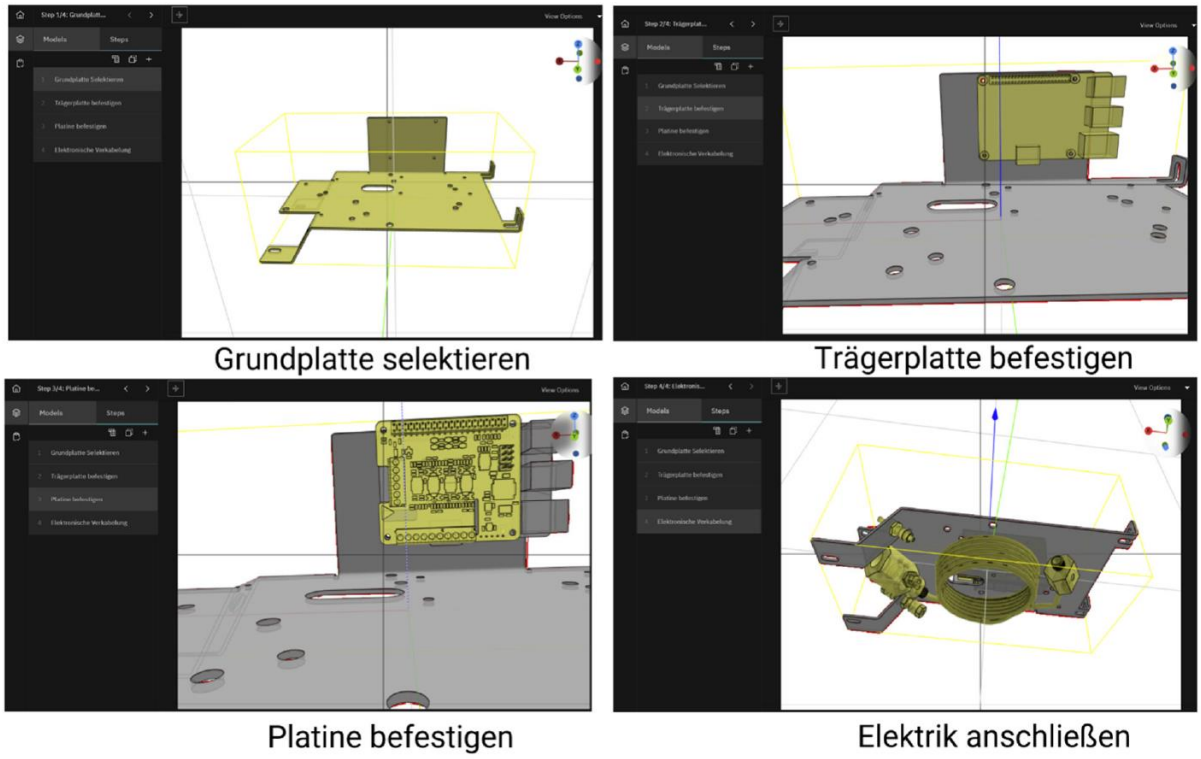

Abbildung 5: Exemplarische Mock-Ups zu Grobkonzept für Modul A – Modellierung der Bauzustände

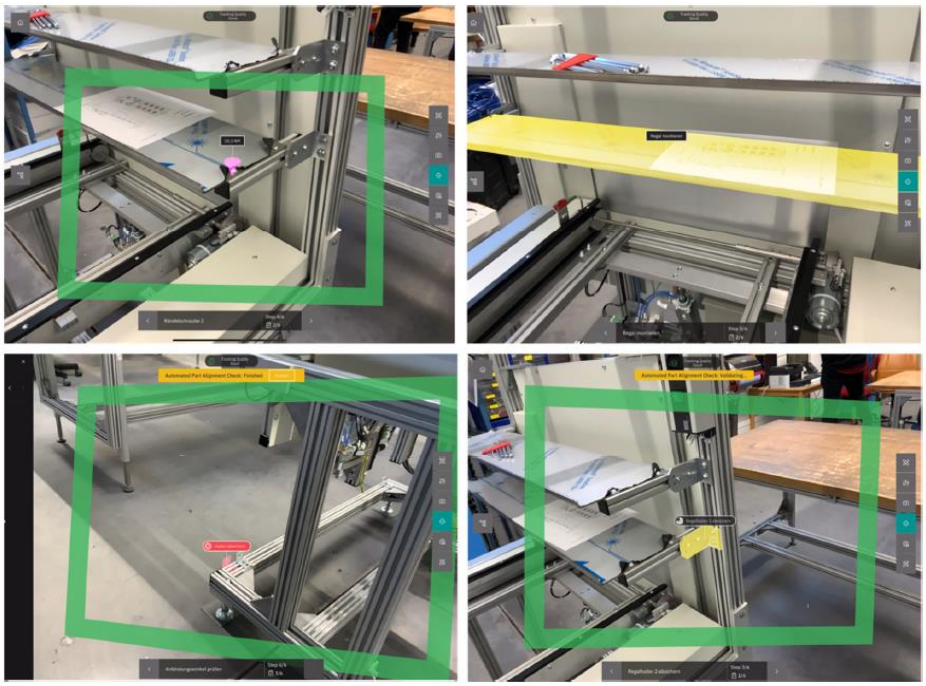

Abbildung 6: Exemplarische Mock-Ups zu Grobkonzept für Modul A – AR-Assistenz für die Monteure

Der zweite Teil der Grobkonzeption umfasst die AR-Assistenz für die Montagemitarbeitenden. Dabei wurden die technischen Anforderungen für zwei unterschiedliche Szenarien spezifiziert. Im mobilen Szenario werden die AR-Überlagerungen auf dem Tablet angezeigt. Im stationären Szenario wird eine Kamera über den Arbeitstisch befestigt, das Kamerabild wird mit den AR-Instruktionen überlagert und auf einem Monitor dargestellt. Die Softwarearchitektur für das Zusammenspiel von PCs, Tablets und externen Kameras wurde konzipiert. Weiter wurde die Ausprägung möglicher Hardwarekomponenten für die Demonstratoren ermittelt. Dabei wurden die technischen Hardware-Anforderungen für die zwei

unterschiedlichen Demonstratoren spezifiziert. Beide Aspekte flossen in das Lastenheft ein. Die erstellten Grobkonzepte (siehe Abbildung 6) wurden in mehreren Stufen den Nutzern bei den Anwendungspartnern vorgestellt, diskutiert und optimiert. Schnittstellen zum Modul B wurden festgelegt. Ebenso wurde mit den Anwendungspartnern untersucht, wie unterschiedliche Daten in das System einfließen können. So wurde eine Möglichkeit konzipiert, wie Arbeitsschritte, die in Excel-Listen beschrieben werden, in das System eingelesen werden und mit den CAD-Daten verknüpft werden können.

Für die systemseitige Grobkonzeption von Modul B wurde folgend durch das Fraunhofer IPA auf Basis der Anforderungsanalyse ein Konzept für die drei Apps entwickelt (siehe Abbildung 7). In diesem Kontext wurden sowohl die Hauptfunktionen der Apps als auch die Softwarearchitektur definiert, inklusive der Schnittstellen zu Modul A.

Abbildung 7: Grobkonzept Modul 2 - Modulbeschreibung

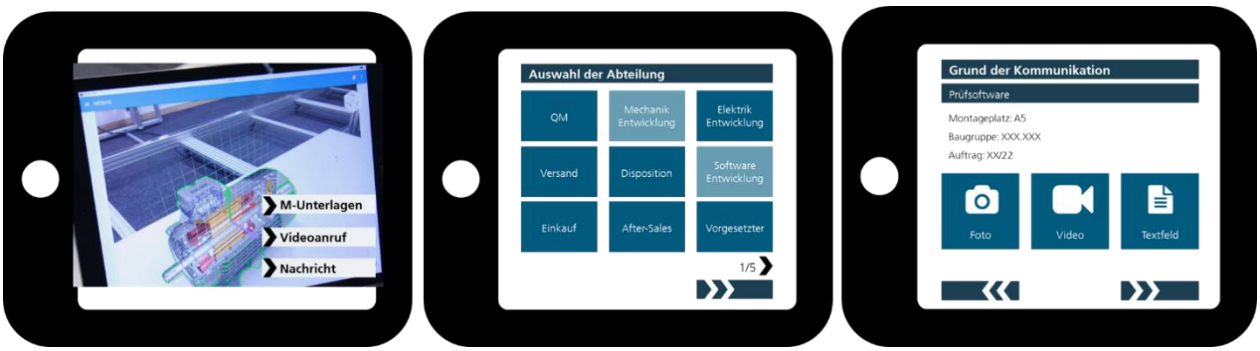

Abbildung 8: Exemplarische Mock-Ups zu Grobkonzept für Modul B

Abbildung 8 zeigt einen Auszug aus den resultierenden Wireframes zur Visualisierung des Grobkonzepts. Dieses wurde den Anwendungspartnern, Nutzern, vorgestellt, diskutiert, Feedback aggregiert und optimiert. Zudem wurde das Lastenheft um Anforderungen an die IT-Infrastruktur bei den Anwendungspartnern erweitert.

Arbeitspaket B: Verfahren zur Erfassung von Montagevorgängen (Modul 1)
In Modul 1 wurde durch Visometry, in enger Zusammenarbeit mit den Anwendungspartnern DILO und SEHO, eine AR-basierte Montageassistenz zur Visualisierung von Montageschritten und zur Erkennung von Montagefehlern erforscht und iterativ umgesetzt. Im Nachstehenden sind vornehmlich die Umsetzungsschritte und (Zwischen-)Ergebnisse aufgeführt. Die Umsetzung erfolgte dabei in eng verzahnter Einbindung der beiden Anwendungspartner und der Nutzer durch z.B. Arbeitsanalysen, Anwenderschulungen und iterative und teils fortlaufende Testphasen von Demonstrator-Iterationen. Hierbei wurden Demonstrator-Iterationen von Montagemitarbeitenden getestet, Feedback strukturiert gesammelt, gemeinschaftlich analysiert und Maßnahmen abgeleitet. Zudem entstand im Verlauf des Arbeitspakets ein signifikanter Aufwand hinsichtlich der Strukturierung, Detaillierung und Aufbereitung von CAD-Modellen als Basis für die AR-Assistenz, um eine Funktionsfähigkeit zu ermöglichen und sicherzustellen.

In der Anforderungsanalyse (Arbeitspaket A) wurde durch Visometry in Zusammenarbeit mit den Anwendungspartnern SEHO und DILO analysiert, wie die Montageprozesse aktuell durchgeführt werden. Dabei wurden bisher die Informationen aus zwei unterschiedlichen Quellen abgeleitet:

- Zum einen wurden Montageprozesse auf Basis der CAD-Daten modelliert (2D-Bauanleitungen oder Explosionszeichnungen)
- Zum anderen werden Bilder und Videos von Montageprozessen an einem Musterbauteil von einem erfahrenen Mitarbeitenden durchgeführt und in eine PowerPoint-Anweisung überführt.

In der AR-Assistenz sollten diese beiden Quellen zur Montageanleitung zusammengeführt werden. Dabei wurden die technischen Anforderungen für zwei unterschiedliche Demonstratoren spezifiziert:

- Im mobilen Szenario nutzt der Anwender ein Tablet-System und wird von diesem durch die Arbeitsanleitungen geführt.
- Im stationären Szenario wird eine Kamera über den Arbeitstisch befestigt, das Kamerabild wird mit den AR-Instruktionen überlagert und auf einem Monitor dargestellt, der über dem Arbeitstisch befestigt ist. Dazu wurden Technologien entwickelt, um Montagevorgänge der Monteure über eine festmontierte Kamera zu erfassen. Die Kamera ist mit dem iPad verbunden, das über einen Monitorhalter am Arbeitsplatz befestigt werden kann (siehe Abbildung 9).

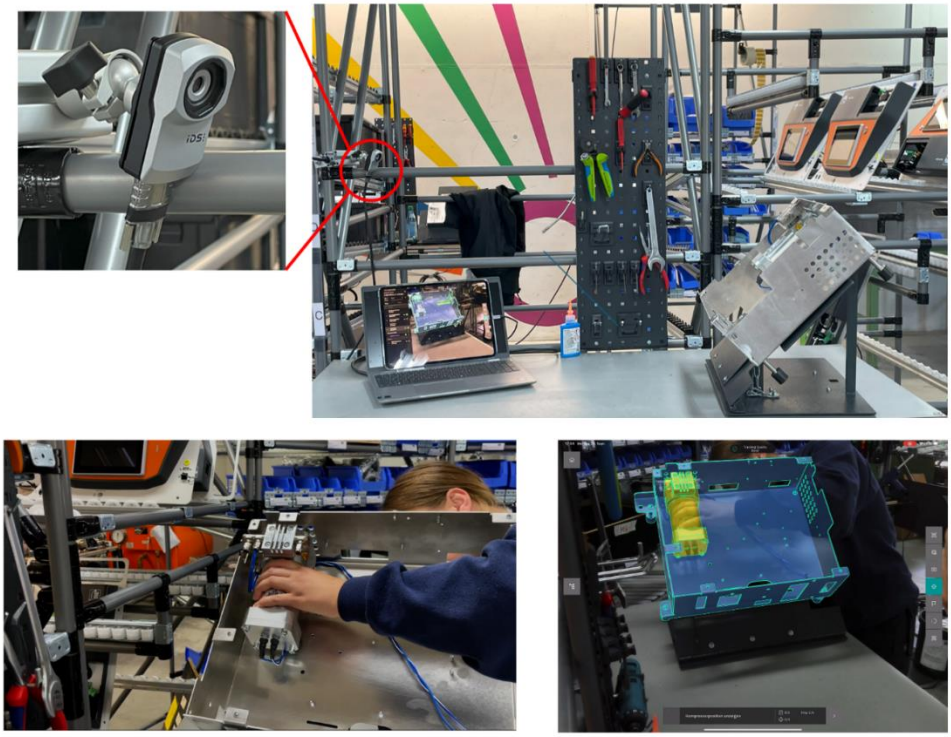

Abbildung 9: Demonstrator „stationäres Assistenzsystem“ mit festinstallierter Kamera und externem Monitor zur Montage des Prüfsystems bei der Firma DILO:

Somit können großräumig durchgeführte Montageschritte (das iPad wird als mobiles System genutzt) und Montageschritte am Montagetisch (das iPad wird als Steuerelement genutzt und mit der externen Kamera verbunden) unterstützt werden. Hier können während der Montage Objekte, die installiert werden, abgesichert werden, indem sie in Relation zum Gehäuse des Prüfgeräts getrackt werden und mit Falschfarben markiert werden (rot: Objekt fehlt, gelb: Objekt ist verschoben, grün: Objekt ist richtig montiert (siehe Abbildung 9 unten). Hierfür wurden zunächst Verfahren entwickelt, über die mit Hilfe eines Tablet-Systems Kamerabilder reproduzierbar für KI-Verfahren erfasst werden können. Dazu wird eine Kamerapose in Relation zur montierten Baugruppe festgelegt. Der Nutzer wird in diese Kamerapose geführt. Um die Kamerapose kann ein Konvergenzbereich festgelegt werden. Dem Nutzer wird angezeigt, ob sich die Kamera in diesem Konvergenzbereich befindet und somit für das KI-Training geeignete

Kameraposen erfasst werden, oder ob sich die Kamera außerhalb des Konvergenzbereichs bewegt. Eine Schnittstelle wurde entwickelt, über die die so erfassten Kamerabilder in Relation zur Kamerapose gespeichert und an das KI-Trainingsverfahren weitergeleitet werden können. Zusätzlich dazu wurden die Datenstrukturen entwickelt, die für die automatisierte „in Ordnung“/“nicht in Ordnung“-Klassifizierung notwendig sind.

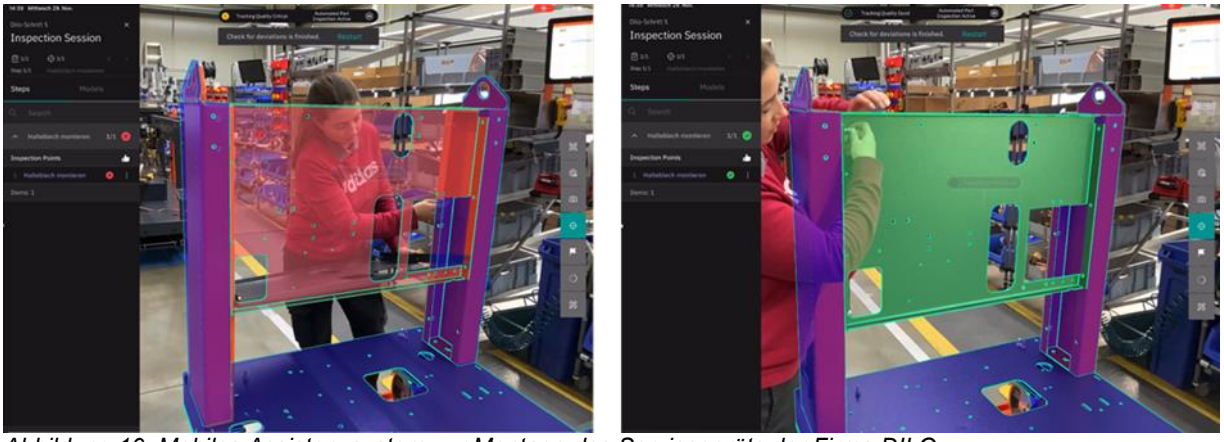

Abbildung 10: Mobiles Assistenzsystem zur Montage des Servicegeräts der Firma DILO

Eine weitere technische Anforderung bestand darin, dass ausgehend von den CAD-Modellen die Bauzustände des Montageprozesses schrittweise modelliert werden können, damit diese Bauzustände durch die Verfahren der KI bzw. der Computer Vision erkannt und mit dem Sollzustand verglichen werden können. Somit können Montagefehler sofort zurückgemeldet werden. Die Verfahren zur schrittweisen Modellierung der Bauzustände wurden konzipiert und in einer ersten Demonstratorstufe entwickelt. Ebenso wurden Verfahren entwickelt, um synchronisierte Sensorsequenzen aufzuzeichnen, die zu bestimmten Montagevorgängen korreliert werden können.

Ausgehend von der Systemarchitektur und den erfassten Anforderungen wurden immer wieder inkrementelle Demonstratoren des Montageassistenzsystems entwickelt, die von den Endanwendern fortlaufend getestet wurden (siehe Abbildung 10). Hier wurden zunächst die modellierten Montageschritte direkt mit den CAD-Daten verknüpft. In den Nutzertests hat sich jedoch gezeigt, dass häufig Revisionen der CAD-Daten durchgeführt werden, in denen z.B. nur wenige Zuliefererteile ausgetauscht wurden. Bei der Nutzung der modifizierten CAD-Daten mussten allerdings alle Montageschritte vom neuen Modell modelliert werden. Dementsprechend wurde das Konzept zur Modellierung der Montageschritte überarbeitet und implementiert. Ebenso wurde im anfangs erstellten Konzept streng getrennt zwischen dem Konfigurationssystem (Modellierung von Montageschritten) und der AR-Assistenz (Visualisierung von Montageschritten). Diese strikte Trennung hat sich in den Nutzertests nicht bewährt. Insbesondere konnten Kameraposen, die im Konfigurationssystem festgelegt wurden, häufig nicht eingenommen werden, weil die Kameraposen in einer ungeeigneten Höhe festgelegt wurden oder weil die Kameraposen durch Störobjekte in der Umgebung nicht erreichbar waren. Zudem verändert sich durch den Autofokus der Tablet-Kamera fortwährend die Kameraintrinsik, sodass das im Konfigurator geplante und gerenderte Bild nicht zum realen Kamerabild passt. Deswegen wurde das Konzept so verändert, dass sowohl die Inhalte der Montageschritte als auch die Kameraposen im Konfigurator festgelegt werden können. Dadurch können Posen gewählt werden, aus denen eine Baugruppe optimal getrackt werden kann und aus denen die Montageanleitung optimal visualisiert werden kann.

Auch die Modellierung der Bauzustände wurde überarbeitet: So wurden Verfahren entwickelt, durch die Montagelisten, die in den PDM-Daten enthalten sind und die Reihenfolge der zu montierenden Bauteile beschreiben, in Arbeitsschritte der AR-Assistenz überführt werden können. Diese Listen können etwa als Excel-Sheets an das Montagekonfigurationssystem übergeben werden. In der Montagekonfiguration werden nicht nur automatisiert die Bauzustände aus den Montagelisten abgeleitet, sondern auch die Kameraposen abgeleitet, zu denen der Monteur für die Visualisierung der nächsten Arbeitsanleitungen navigiert wird. Dabei werden Posen berechnet, aus denen möglichst viele Arbeitsschritte in einem Mon-

tageschritt der Arbeitsanleitung zusammengefasst werden. Wenn z.B. Blindnieten gesetzt werden müssen, ist es nicht sinnvoll, einen Arbeitsschritt für jede einzelne zu setzende Niete zu errechnen, vielmehr werden alle zu montierenden Nieten, die aus einer Kamerapose gut erfasst werden können, in einem Anleitungsschritt zusammengefasst. In diesem Zusammenhang wurde auch die Weitwinkeloptik genutzt, die z.B. in den iPad-Systemen zur Verfügung stand. Die Verwendung der Weitwinkeloptik ist auch für die einfache Initialisierung des Trackings wesentlich, insbesondere dann, wenn der Montageplatz verbaut ist und man das Tracking aus einer geringen Entfernung zur Baugruppe initialisieren muss. Durch Verwendung der Weitwinkeloptik muss eine andere Kameraintrinsik in dem Algorithmus für das Tracking berücksichtigt werden. Dazu wurde eine Schnittstelle entwickelt, über die die Weitwinkelintrinsik ausgelesen und berücksichtigt werden kann.

Zur automatisierten Detektion von Montagefehlern können größere Bauteile, die in einem Montageschritt befestigt werden, sehr gut in Relation zu den bereits montierten Teilen getrackt und dadurch abgesichert werden (siehe Abbildung 10). Schwieriger ist es allerdings z.B. zu setzende Bohrlöcher oder Blindnieten abzusichern, zum einen, weil es schwierig ist, die kleinen Objekte im Kamerabild zu erkennen, zum anderen, weil (z.B. bei einer Durchbohrung) die Geometrien nicht als Subkonten aus den CAD-Strukturen der Baugruppe abgeleitet werden können. Um die Zuverlässigkeit dieser Computer-Vision-basierten Prüfung zu verbessern, kann das Objekt unter der Kamera bewegt werden, sodass die Klassifizierung aus unterschiedlichen Kameraperspektiven akkumuliert wird („Motion-based Multi-View Verfahren“).

In den großen Anlagen von SEHO (ca. 12 m lang, 6 m breit) war es mit den bisherigen Verfahren kontinuierlich und stabil schwierig, wenn man sich schnell bewegt hat. Deswegen wurden die Trackingverfahren so modifiziert, dass unterschieden wird zwischen.

- „Tracking bewegter (kleinerer) Objekte“
  Montageassistenzverfahren von Objekten, die während der Montage bewegt werden (DILO-szenarien mit Prüfkoffermontage)
- „Tracking unbewegter (großer) Objekte“
  Montageassistenzverfahren von Anlagen, die während der Montage nicht bewegt werden, sondern eher um Komponenten ergänzt werden.

Für das Tracking unbewegter Objekte wurden die modellbasierten Trackingverfahren mit Verfahren fusioniert, die während der Laufzeit des Trackings eine Feature-Rekonstruktion in der Umgebung durchführen („SLAM-Verfahren“). Diese Verfahren wurden über Kalman-Filter mit den Verfahren zum modellbasierten Tracking integriert. Diese Sensorfusion wurde umfangreich evaluiert und sie hat sich als sehr stabil erwiesen.

Deswegen wurden hier zwei unterschiedliche Ansätze zur Registrierung von Montagefehlern implementiert.

- **Verwendung von Hilfsgeometrien:** Um z.B. zu überprüfen, ob ein Schweißpunkt, eine Blindniete oder eine Durchbohrung gesetzt ist, werden aus dem PDM-System die Mittelpunkte und die Radien ausgelesen und an die automatisierte Projektgenerierung übergeben. In der automatisierten Projektgenerierung werden aus den Koordinaten Hilfsgeometrien (z.B. Kugeln, Scheiben, Ringe) generiert, die gut getrackt werden können und durch die der Mittelpunkt einer Durchbohrung bestimmt werden kann. Mit Hilfe des Multi-Model-Trackings werden die Hilfsgeometrien in Relation und in Synchronisation zu den CAD-Geometrien getrackt. Der getrackte Mittelpunkt der Hilfsgeometrie wird mit dem der Soll-Position verglichen.
- **Akkumulation von rekonstruierten 3D-Kanten**, die nicht zum Bauzustand passen, der aus den CAD-Daten abgeleitet wird. In diesem Ansatz sollen Differenzen zwischen CAD-Geometrien und real verbauten Geometrien detektiert werden können, ohne dass Referenz- und Prüfgeometrien in Vorbereitung der Absicherung ausgezeichnet werden müssen. Deswegen werden hier Kantenmodelle aus den CAD-Modellen abgeleitet. Auf diesen Kantenmodellen werden nun wiederum Featurepunkte gesampelt. Wenn diese Featurepunkte zu einer Objektkante im Kamerabild korreliert werden können, werden sie grün eingefärbt, andernfalls rot. Die Einfärbung der Kantenpunkt wird

über mehrere hundert Frames akkumuliert, um den Einfluss von Bildartefakten auf die Einfärbung der Differenzen zu minimieren (siehe Abbildung 11)

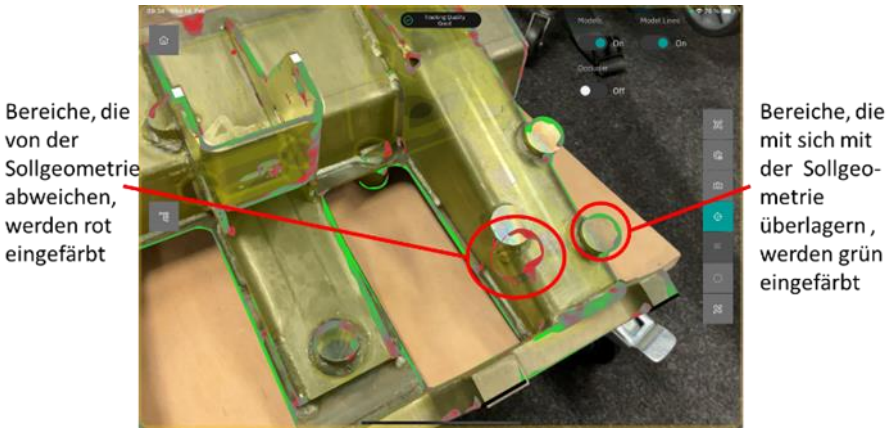

Abbildung 11: Bereiche, in denen die Modellkanten gut zu den detektierten Bildkanten korreliert werden, werden grün eingefärbt, nicht korrelierte Kanten werden rot eingefärbt. So kann der Monteur auf Differenzen zwischen Modell und Zusammenbau hingewiesen werden

Wesentlich für die durchgängige Nutzbarkeit des Systems ist es, dass auch Prozesse unterstützt werden, die nicht durch das Tracken von CAD-Geometrien dargestellt werden können. So müssen z.B. die richtigen Sicherheitsaufkleber aufgeklebt werden oder für einen Montageprozess müssen die richtigen Werkzeuge gewählt werden. Deswegen muss es auch möglich sein, Montagevorgänge im Montageprozess aufzuzeichnen und im CAD-Modell zu verorten oder Bilder an einem Musterteil zu erfassen, um diese mit der CAD-Geometrie zusammenzuführen. Deswegen wurden die Multimedia-Annotationen in die AR-Assistenz integriert. Diese Multimediaannotationen zeigen etwa die Position von Sicherheitsaufklebern. Die Multimediaannotationen sind im 3D-Modell verortet, sodass der Monteur zu der entsprechenden Stelle am Objekt navigiert. Die korrekte Durchführung der Arbeiten muss interaktiv bestätigt werden.

Auch die Verfahren zur automatisierten Detektion von Differenzen zwischen CAD-Objekten und montierten Baugruppen konnten wesentlich verbessert werden. Dazu wurden die Kantenzüge „Line-Sets“ aus den CAD-Daten extrahiert. Kantenzüge dieser extrahierten Kanten werden rot gefärbt, wenn sie mit den im Kamerabild erkannten Kantern assoziiert werden können, andernfalls werden sie grün eingefärbt. Auch diese Einfärbung wird über mehrere Frames akkumuliert. Diese Verfahren geben einen Hinweis auf Bereiche, in denen eine Abweichung von CAD-Daten zu montierter Baugruppe auftritt. „Assisted Deviation Detection“).

Zu den entwickelten Verfahren wurde eine Schulung für SEHO und DILO durchgeführt. Somit können Mitarbeitende nun eigenständig neue Montageprozesse in der AR-Assistenz aufsetzen.

Arbeitspaket C: Kommunikation und Interaktion (Modul 2)
In Modul 2 wurde durch das Fraunhofer IPA, in enger Zusammenarbeit mit den Anwendungspartnern DILO und SEHO und unterstützt durch das KIT ifab, in der nutzerbezogenen Auslegung, ein multimodales Assistenzsystem zur Verschlankung der unternehmensinternen Kommunikation und Dokumentation in Form von drei Tablet-Apps umgesetzt. Dies umfasste die demonstratorische Umsetzung der Softwareanwendungen für Videoanrufe (AP C.1, SAM-KI-Video), Kurznachrichten (AP C.2, SAM-KI-Nachricht) und Montageunterlagen (AP C.3, SAM-KI-Check). Im Nachstehenden sind vornehmlich die Umsetzungsschritte und (Zwischen-)Ergebnisse aufgeführt. Die Umsetzung erfolgte jedoch in eng verzahnter Einbindung der beiden Anwendungspartner durch z.B. Arbeitsanalysen, Anwenderschulungen und iterative und teils fortlaufende Testphasen von Demonstrator-Iterationen. Hierbei wurden die Apps jeweils und nacheinander in einer ersten Demonstrator-Iteration bei den Anwendungspartnern mit begleitenden Anwenderschulungen eingeführt. Für jede App wurde in den Iterationen Nutzerfeedback ge-

sammelt und dieses umgesetzt. Die finale arbeitswissenschaftliche Evaluation sowie Gegenüberstellung zu den gestellten Anforderungen und der Optimierung wurden mit dem Gesamtsystem im Arbeitspaket E vorgenommen.

Die Apps sollten möglichst einfach in bestehende IT-Infrastruktur integrierbar sein. Abbildung 12 zeigt den erarbeiteten Systemaufbau am Beispiel von SAM-KI-Check. Hierfür wurden bei beiden Anwendungspartnern systemseitige Voraussetzungen beschrieben und eine Architektur unter Verwendung einer virtuellen Maschine (VM) umgesetzt. Entsprechend wurde von den Anwendungspartnern je ein Server implementiert, wodurch über WLAN die Kommunikation über HTTP-Anfragen zwischen Apps und Datenbasis erfolgt.

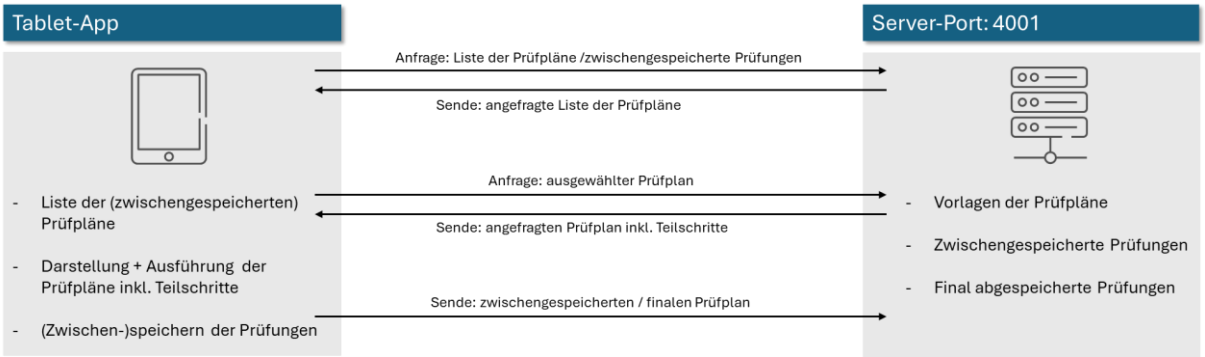

Abbildung 12: Darstellung des Systemaufbaus und der Datenkommunikation beispielhaft für SAM-KI-Check

Die App SAM-KI-Nachricht wurde zuerst umgesetzt und ausgerollt. Sie hat den Zweck, einen Fehlerzustand schnell, digital, mit Bildern und Fehlerbeschreibungen, einfach an prozessbeteiligte Kollegen standardisiert zu kommunizieren (siehe Abbildung 13).

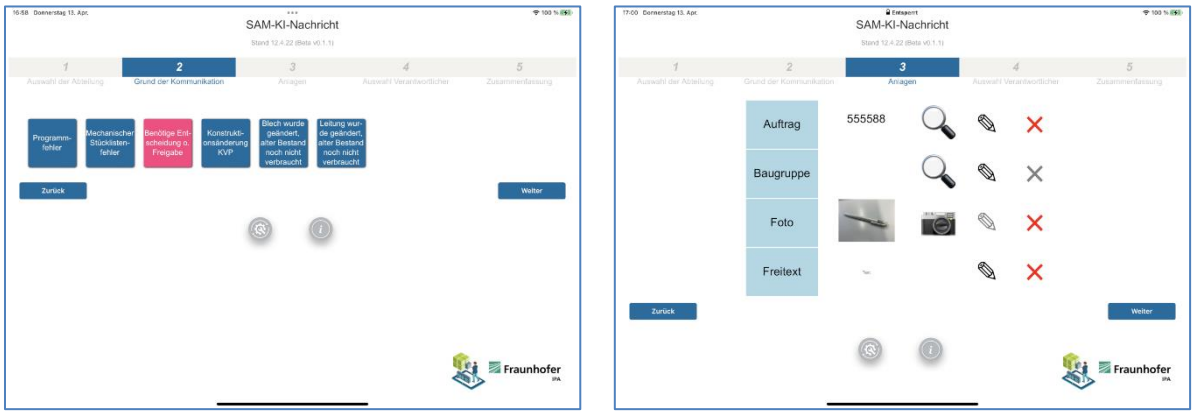

Abbildung 13: Beispielhafte Ansichten innerhalb der Anwendung SAM-KI-Nachricht

Die App wurde als Web-Multi-Page-Formular umgesetzt. Grundlage für die inhaltliche Ausgestaltung der App war die Anforderungs- und Prozessanalyse bei den Anwendungsunternehmen. Zudem wurden mit jedem Anwendungspartner die Kommunikations- und Interaktionswege zwischen Montagemitarbeitenden und relevanten Ansprechpartnern modelliert. Auf dieser Basis wurde ein übertragbarer Kommunikations-/Interaktionsworkflow aggregiert und das Interaktionsdesign der App konzipiert. Wichtig waren hierbei Konfigurationsmöglichkeiten in der Anwendung, um z.B. neue Abläufe (Fehlerursachen, Ansprechpartner, etc.) einzubetten. Der allgemeine Ablauf basiert zunächst auf einer Auswahl der Abteilung, um mögliche Kommunikationsgründe einzugrenzen. Diese Kommunikationsgründe referenzieren den vorliegenden Fehlerzustand und werden im zweiten Schritt ausgewählt, bevor im dritten Schritt die Anlagen hinzugefügt werden können. In der Folge wird der Verantwortliche ausgewählt. Zum Abschluss wird eine Zusammenfassung dargestellt, bevor der Fehlzustand an die prozessbeteiligten Kollegen übermittelt wird. Das App-Konzept wurde mit den Anwendungspartnern diskutiert, unternehmensintern qualitatives Nutzerfeedback gesammelt, optimiert und anschließend mittels Vue.js umgesetzt. Die App

wurde in einer ersten funktionsfähigen Iterationsstufe in den Unternehmen ausgerollt, in Verbindung mit einer Anwenderschulung. Dies gab den Nutzern frühzeitig die Möglichkeit, die Anwendung zu testen und anonymes Praxisfeedback zu aggregieren, das sukzessive in mehrere Iterationen eingearbeitet wurde (siehe AP E). Die SAM-KI-App wurde von Nutzern von Beginn an sehr gut angenommen, was sich über den Projektverlauf beibehielt. In einem Zeitraum von drei Wochen nach der Einführung wurden bei DILO 47- und bei SEHO 30-mal Fehlerbilder über die App kommuniziert und bearbeitet (mit Beschreibung und Bildmaterial durch Tablet-Kamera), während jeweils zu Beginn nur zwei Tablets im Einsatz waren.

Die App SAM-KI-Video wurde als zweite umgesetzt und eingeführt. Diese ermöglicht einen Videoanruf an prozessbeteiligte Kollegen (siehe Abbildung 14). Die Vorgehensweise für die Konzeption, Evaluation, Umsetzung und Testphase war analog zu SAM-KI-Nachricht. Die Besonderheit ist, dass direkt mehrere prozessbeteiligte Kollegen für diese Konferenz ausgewählt werden können, um komplexere Fehlerbilder bzw. Kommunikationsgründe zu eruieren.

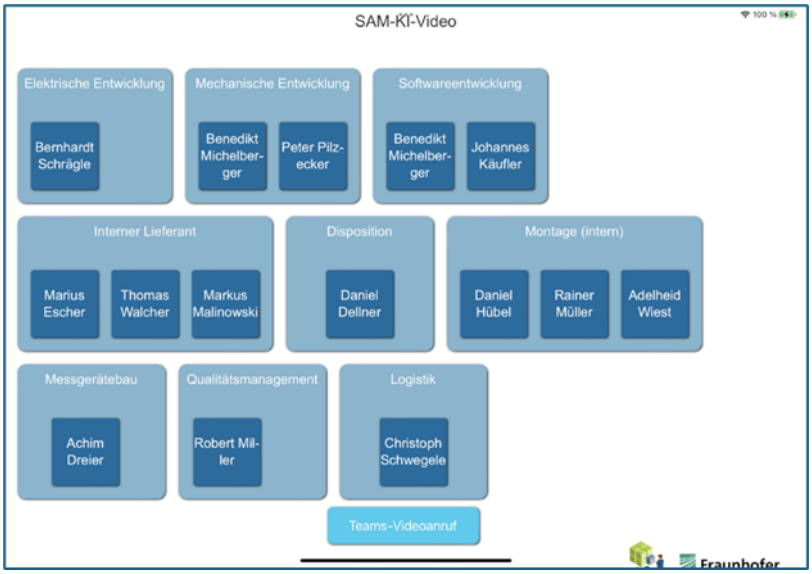

Abbildung 14: Beispielhafte Ansicht in SAM-KI-Video zur Auswahl der Kollegen für eine Video-Rücksprache

SAM-KI-Video wurde nach der Einführung im Vergleich zu SAM-KI-Nachricht weniger häufig bei den Unternehmen genutzt (ca. 1–2-mal pro Woche). Die videobasierte Kommunikation stellte sich für besonders komplizierte Problemstellungen als hilfreich heraus, insbesondere in Fällen, bei denen zuerst die richtige Vorgehensweise im Umgang mit dem spezifischen Fall gefunden werden musste. Unter den Montagemitarbeitenden wurde SAM-KI-Nachricht bei weniger komplexen Problemstellungen als komfortabler und zeiteffizienter wahrgenommen, wohingegen der Nutzen von SAM-KI-Video bei komplexen Problemstellungen zum Tragen kommt.

Die App SAM-KI-Check wurde an dritter Stelle umgesetzt und eingeführt. Ziel war die Visualisierung und mobile Bereitstellung relevanter Montageunterlagen. Nach einer gemeinsamen Analyse der dokumentbezogenen Arbeitsabläufe, Unterlagen, Formulare und Listen erfolgte eine Abstimmung mit den Anwendungspartnern. Der Mehrwert einer einfachen, mobilen Bereitstellung vieler Montageunterlagen wurde als gering bewertet, da die Unternehmen hierfür bereits bestehende Desktop-Systeme in der Montage nutzen und eine mobile Bereitstellung nur geringe Zeiteinsparungen bringt. Die Entscheidung war auch dadurch beeinflusst, dass in Modul 1 relevante Montageinformationen als Annotationen in der AR-Assistenz beigefügt werden können. So bietet eine einfache mobile Bereitstellung von Montageunterlagen zwar geringen Mehrwert, allerdings können spezifische dokumentations- und papierintensive Prozesse viel mehr von einer mobilen Bereitstellung mit integrierter Bearbeitung profitieren. Daher wurde der SAM-KI-Check auf die Dokumentation in Prüfprozessen fokussiert und sollte so die Erstellung von Prüfprotokollen vereinfachen, variantenspezifisch gestalten und digitalisieren. SAM-KI-Check sollte so Montagemitarbeitende bei der Prüfung und Dokumentation digital begleiten und anleiten sowie in

Integration mit der AR-Assistenz, SAM-KI-Nachricht und -Video die Spezifizierung und Kommunikation von Fehlzuständen unterstützen. Prüfprotokolle waren bisher in den Unternehmen rein papierbasiert und es gab jeweils einige wenige Standardprotokolle, die von mehreren Bearbeitern handschriftlich bearbeitet wurden. Variantenspezifische Prüfschritte mussten ebenfalls handschriftlich ergänzt werden. Nach einer Aufbereitung und Analyse der Prüfunterlagen der beiden Anwendungspartner wurde ein App-Konzept für den SAM-KI-Check entwickelt. Das Konzept umfasste ein übertragbares App-Konzept, bei dem variantenspezifische Prüfprotokolle in der Arbeitsvorbereitung erstellt werden können und auf dem Server abgelegt werden. Neue Protokolle können auf Basis alter Protokolle durch Anpassung der Besonderheiten mit geringem Zeitaufwand erstellt werden. Hierfür wurden JSON-Dateien erstellt, die pro Prüfschritt demselben Schema folgen. Die Auswahl des Prüftyps (z.B. Bild, Checkbox) in der JSON entscheidet über die Darstellung innerhalb der App. Auch die Anzahl der Prüfschritte kann flexibel angepasst werden, da sich die App dynamisch aus der vorliegenden JSON des Prüfprotokolls zusammenstellt. Jeder Prüfschritt erhält einen Namen, eine Beschreibung des Schritts, einen Prüftyp und ggf. die Option, dass es ein Pflichtschritt ist (siehe Abbildung 15).

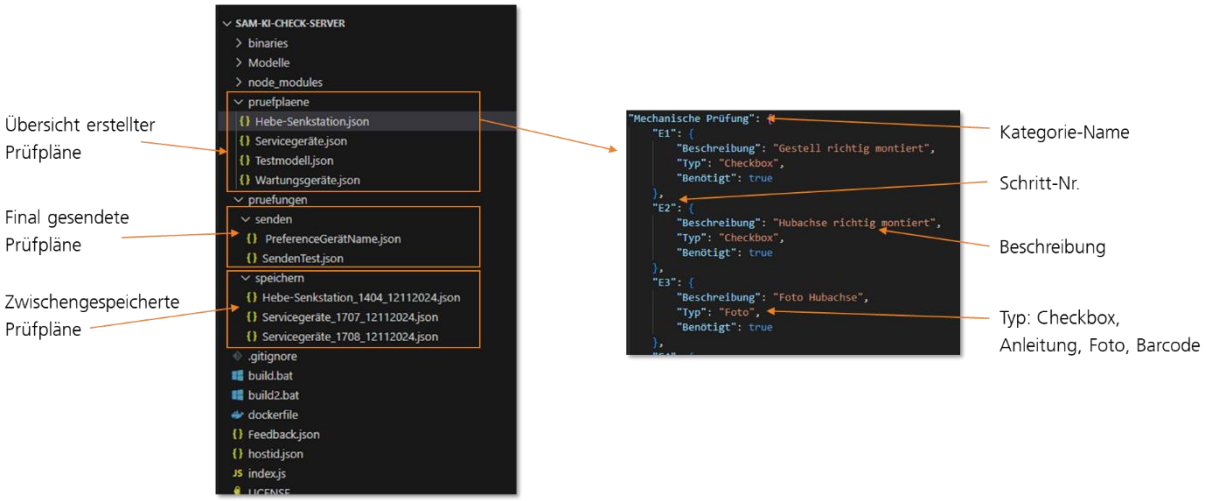

Abbildung 15: Ansicht der Ordnerstruktur im Backend, aufgeteilt in Prüfplanvorlagen und (zwischen-)gespeicherte Prüfungen

Die textbasierten Protokolle auf dem Server werden von der App aufgerufen und in eine funktionale Visualisierung überführt. Montagemitarbeitende können in der App einen Auftrag und das Prüfprotokoll auswählen, die angezeigten Schritte durchführen, ggf. Probleme mit SAM-KI-Nachricht melden und so den kompletten Prüfprozess mit Checkboxen, Eingabefeldern, Aufnahme von Fotos und Scannen von Barcodes digital abwickeln. Ein abgeschlossenes Prüfprotokoll wird abschließend mit den dokumentierten Informationen zentral auf dem Server abgespeichert und archiviert.

Das App-Konzept wurde in ein Interaktionsdesign überführt und mit Mitarbeitenden aus der Montage und Verantwortlichen bei den Anwendungspartnern evaluiert und optimiert. Die App wurde nachfolgend mittels Vue.js umgesetzt und in einer ersten funktionsfähigen Iterationsstufe in den Unternehmen ausgerollt (siehe Abbildung 16), in Verbindung mit einer Anwenderschulung. Die Mitarbeitenden konnten die App testen und Verbesserungspotenziale formulieren, die entsprechend übernommen wurden. Mit SAM-KI-Check konnte der bisher papierbasierte Prozess zur Erstellung von Prüfprotokollen vollständig digitalisiert und damit alle Nachteile einer papierbasierten Dokumentation eliminiert werden.

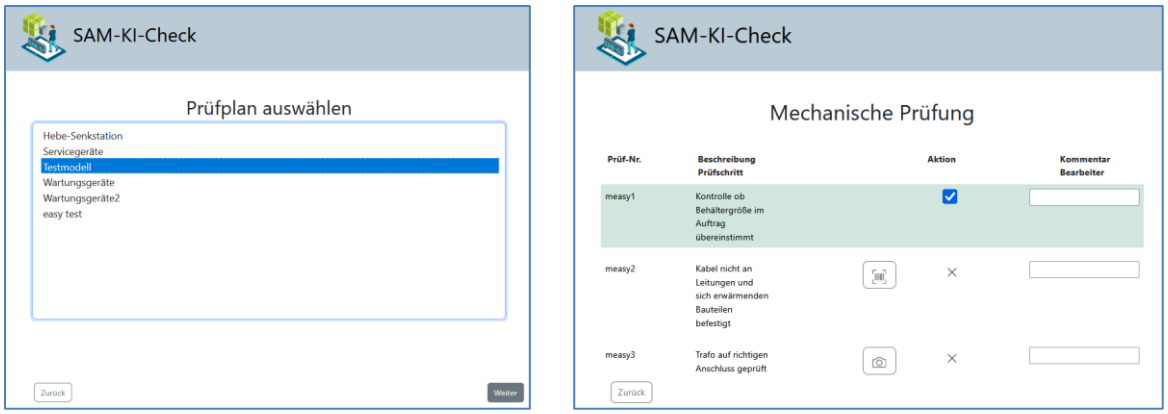

Abbildung 16: Beispielhafte Ansichten innerhalb der Anwendung SAM-KI-Check – Auswahl des Prüfplans (links) und Übersicht der Prüfschritte (rechts)

Arbeitspaket D: Mensch-Maschine-Schnittstellengestaltung (Modul 3)
In Modul 1 wurde federführend durch das KIT ifab und unterstützt durch die Projektpartner die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle der Module 1 und 2 fokussiert. Innerhalb dieses Arbeitspakets wurde zum einen das Front-End-Design für eine praxistaugliche, nutzerzentrierte und aufgabenorientierte Gestaltung von Modul 2 konzipiert. Zum anderen wurde ein Konzept zur systematischen Auseinandersetzung mit dem Thema Adaptivität entwickelt.

Das nutzerzentrierte Front-End-Design des SAM-KI-Assistenzsystems stand in enger Verbindung zu den Modulen 1 und 2 und insbesondere zu den Multi-Page-Anwendungen SAM-KI-Nachricht, -Video und -Check. Auf Basis der Nutzeranforderungen wurden in der Konzeptionsphase der Apps (siehe Modul 2) jeweils mehrere Design-Konzepte erarbeitet (siehe Abbildung 17), mittels heuristischer Evaluation evaluiert und vorselektiert. Anschließend wurde eine begrenzte Auswahl an Alternativen, in Form von Design- und Klick-Prototypen, mit Montagemitarbeitenden und Verantwortlichen bei den Anwendungspartnern DILO und SEHO evaluiert. Bei SAM-KI-Nachricht und -Check setze sich die Frontend-Konzeptionen durch, die einem aufgabenbasierten Ansicht-für-Ansicht bzw. Teilaufgabe-für-Teilaufgabe-Prinzip folgten. Dabei waren die in einzelnen Ansichten angezeigten Informationen und erforderlichen Eingaben auf eine monolithische Teilaufgabe fokussiert. Dieses Design-Prinzip stellte sich im Projektverlauf als vorteilhaft heraus.

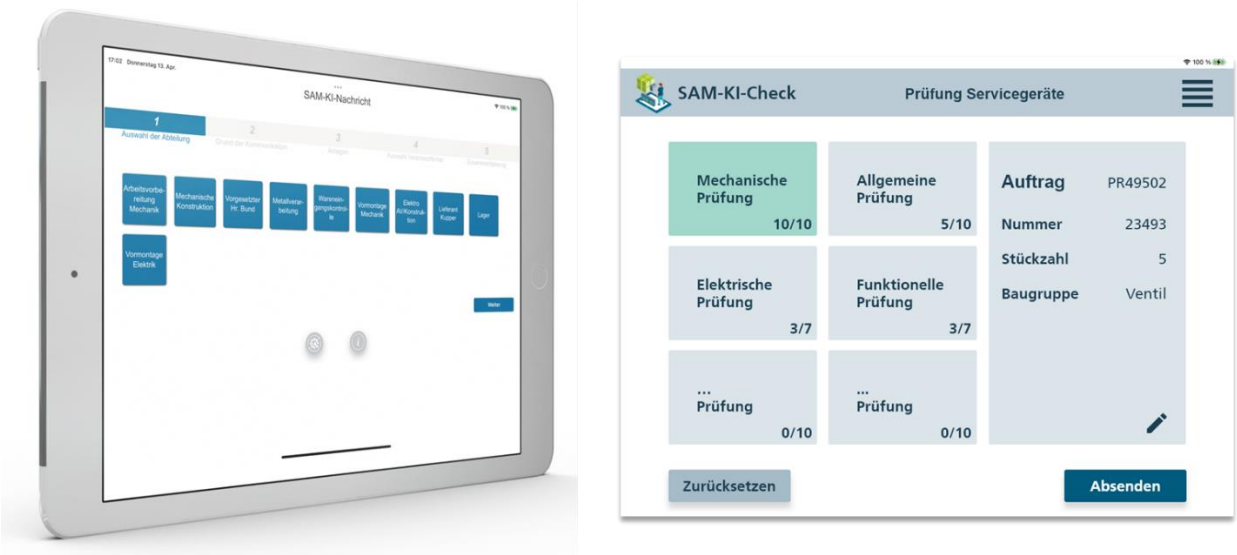

Abbildung 17: Beispiel-Wireframes SAM-KI-Nachricht (links) und -Check (rechts)

Im Zuge der Einführung der funktionsfähigen Assistenzsysteme wurden begleitende Schulungsmaßnahmen konzipiert und durchgeführt, um die Mitarbeitenden bei der Implementierung gezielt zu

unterstützen. Dabei wurden sämtliche Funktionen des Systems niedrigschwellig vermittelt, sodass potenzielle Hemmschwelen im Umgang mit der neuen Technologie gemeinsam abgebaut werden konnten. Unmittelbar nach der erstmaligen Einführung der ersten App (SAM-KI-Nachricht) zeigten sich direkt nach der Einführung eine hohe Motivation und Souveränität in der Nutzung (siehe Modul 2).

Die Adaptivität in der Frontend-Gestaltung wurde im Projektverlauf nicht nur im Kontext der konkreten Anwendungsfälle betrachtet, sondern auch eine übergreifende Perspektive eingenommen, um allgemeine Gestaltungsprinzipien adaptiver Unterstützungs- und Lernumgebungen für verschiedene Nutzergruppen abzuleiten. Diese Erkenntnisse sollten so in die Frontend-Gestaltung von SAM-KI einfließen und zugleich eine Übertragbarkeit auf zukünftige Assistenzsysteme sicherstellen. Im Rahmen einer Laborstudie wurde hierfür untersucht, inwiefern eine Anpassung der Darstellungsform an die individuelle Arbeitsgedächtniskapazität der Nutzenden sinnvoll ist. Dies wurde mit der hohen Heterogenität der Nutzenden begründet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte eine Validierung bei den Anwendungspartnern mit Montagemitarbeitenden. Hierfür wurde das Assistenzsystem als interaktives Software-Mock-Up mittels Axure prototypisch umgesetzt, um die Eignung unterschiedlicher Darstellungsformen für heterogene Nutzergruppen systematisch zu überprüfen.

Ziel der Laborstudie war es, der Forschungsfrage nachzugehen, ob die Anpassung eines digitalen Lernkurses an die individuelle Arbeitsgedächtniskapazität der Lernenden zu einer Verbesserung a) des Verständnisses, b) der intrinsischen Motivation, c) der empfundenen kognitiven Beanspruchung sowie d) der technologischen Akzeptanz führt. Das Arbeitsgedächtnis bezeichnet die Fähigkeit, kürzlich aufgenommene Informationen vorübergehend zu speichern, zu verarbeiten und bei Bedarf abzurufen [8]. Es ist sowohl hinsichtlich seiner Speicherkapazität als auch seiner zeitlichen Dauer begrenzt [9]. Eine effiziente Nutzung des Arbeitsgedächtnisses gilt als zentraler Faktor für erfolgreiche Lernprozesse, da sie unmittelbare Auswirkungen auf die Lerneffizienz, den Wissenserhalt und den späteren Wissensabruf hat [10]. Die individuelle Arbeitsgedächtniskapazität beeinflusst darüber hinaus die Präferenz für bestimmte Lernmodalitäten – also etwa die Darstellungsform von Inhalten –, die Tendenz zur sequenziellen oder nicht-linearen Informationsverarbeitung sowie die Nutzung plattformspezifischer Hinweise zur Navigation und Informationsaufnahme [11], [12]. Werden die Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis zu hoch und überschreiten die individuelle Kapazitätsgrenze, kann es zu einer kognitiven Überlastung (cognitive overload) kommen, die den Lernprozess deutlich beeinträchtigt [12]. In der bestehenden Literatur fanden sich bereits Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Arbeitsgedächtniskapazität und der bevorzugten Darstellungsform von Lerninhalten: Lernende mit hoher Kapazität tendieren demnach zu einer linearen, sequenziellen Darstellung, während Lernende mit niedriger Kapazität eine nicht-lineare, globale Struktur bevorzugen [12], [13], [14].

An der Studie nahmen 77 Berufsschüler teil (11,69 % weiblich; Alter: M = 19,39 Jahre, SD = 2,97), die sich in technischen Ausbildungsberufen befanden. Die Teilnehmenden stammten aus dem ersten (44,16 %), zweiten (40,26 %) und dritten (15,58 %) Ausbildungsjahr. Die häufigsten Ausbildungsberufe waren Mechatronik (50,65 %), Industriemechanik (19,48 %) und Kfz-Mechatronik (12,98 %).

Im Rahmen der Studie wurden die Auszubildenden mithilfe eines digitalen Lernkurses in die Steuerung eines Roboterarms eingeführt. Der interaktive Kurs ermöglichte eine selbstständige Navigation durch die Inhalte und wurde in zwei unterschiedlichen Versionen umgesetzt. In der linearen Variante waren die Kapitel in einer festen Reihenfolge angeordnet; auch innerhalb der Kapitel erfolgte die Darstellung der Inhalte sequenziell, sodass die Bearbeitungsabfolge klar vorgegeben war. In der globalen Variante wurde den Lernenden hingegen eine fortlaufende, überblicksartige Darstellung sämtlicher Kursinhalte geboten. Die Reihenfolge der Bearbeitung konnte hier selbst bestimmt werden. Auch innerhalb der Kapitel wurden die Inhalte global dargestellt, sodass jederzeit ersichtlich war, welche Inhalte bereits bearbeitet wurden und welche noch zur Verfügung standen oder erneut aufgerufen werden konnten.

Abbildung 18: Arbeitsplatz der Auszubildenden mit dem Roboterarm (rechts im Bild), dem digitalen Lernkurs (mittig im Bild) und der Programmieroberfläche (links im Bild).

Der Lernkurs wurde während der Studie auf einem externen Bildschirm dargestellt (siehe Abbildung 18). In der zugehörigen Programmieroberfläche hatten die Auszubildenden die Möglichkeit, die Inhalte unmittelbar praktisch umzusetzen und den Roboter die entsprechenden Bewegungen ausführen zu lassen.

Das Studiendesign folgt einem Between-Subjects-Ansatz mit insgesamt vier Versuchsgruppen. Zu Beginn absolvieren alle Teilnehmenden einen etwa zehnminütigen Test zur Erfassung der individuellen Arbeitsgedächtniskapazität. Auf Basis der Testergebnisse erfolgt eine Zuordnung zu einer von zwei Gruppen: Gruppe A mit hoher und Gruppe B mit niedriger Arbeitsgedächtniskapazität. Innerhalb dieser Gruppen erhalten die Teilnehmenden jeweils entweder eine an ihre kognitive Kapazität angepasste Version des digitalen Lernkurses (hoch: lineare Darstellung; niedrig: globale Darstellung) oder eine nicht angepasste Version. Somit ergeben sich vier Versuchsbedingungen im 2x2-Design (Arbeitsgedächtniskapazität: hoch/niedrig × Kursdarstellung: angepasst/nicht angepasst).

Nach Abschluss des Lernkurses beantworten die Teilnehmenden einen Online-Fragebogen, der Angaben zur intrinsischen Motivation, zur wahrgenommenen kognitiven Belastung, zur technologischen Akzeptanz sowie zu demografischen Merkmalen erfasst. Zudem wird ein Wissenstest durchgeführt, um den individuellen Lernfortschritt zu erheben. Insgesamt berichteten die Teilnehmenden von einer hohen intrinsischen Motivation während des Lernens (M = 6,11; SD = 1,12; 7-stufige Skala). Die Teilnahme an der Studie erfolgte freiwillig im Rahmen des Unterrichts. Die Motivation war über alle Versuchsgruppen hinweg gleichbleibend hoch. Auch die wahrgenommene kognitive Belastung wurde insgesamt als gering eingeschätzt (M = 2,03; SD = 1,03; 6-stufige Skala), was darauf hindeutet, dass beide Versionen des Lernkurses verständlich und lernförderlich gestaltet waren. Die technologische Akzeptanz des Lernkurses wurde in allen Gruppen ebenfalls als hoch bewertet (M = 4,80; SD = 0,94; 6-stufige Skala). Hinsichtlich der subjektiven Maße – Motivation, kognitive Belastung und technologische Akzeptanz – ergaben sich weder signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen mit angepasster (Match) und nicht angepasster (Mismatch) Kursversion noch zwischen Teilnehmenden mit hoher bzw. niedriger Arbeitsgedächtniskapazität. Ein signifikanter Unterschied zeigte sich jedoch im objektiven Maß des Verständnisses: Die Auswertung des Wissenstests ergab einen signifikanten Effekt ($t(75) = -2{,}484$; $p = .018$). Entgegen der ursprünglichen Hypothese erzielten Teilnehmende mit niedriger Arbeitsgedächtniskapazität bessere Ergebnisse in der linearen Kursversion, während Teilnehmende mit hoher Kapazität im globalen Kurs besser abschnitten. Dieses Muster widerspricht den theoretisch erwarteten Annahmen

hinsichtlich der optimalen Passung zwischen Darstellung und kognitiver Kapazität. Die Analyse der Korrelationen zwischen den erhobenen Variablen zeigte erwartungskonforme Zusammenhänge (Auswahl): Eine höhere wahrgenommene kognitive Belastung war mit einem geringeren Lernerfolg assoziiert ($\rho = -.494$, $p < .001$). Eine höhere technologische Akzeptanz ging mit einem besseren Lernerfolg einher ($\rho = .508$, $p < .001$). Zudem zeigte sich beispielsweise, dass ein höheres Vorwissen im Bereich Programmierung positiv mit dem Lernerfolg korrelierte ($\rho = .337$, $p < .001$).

Im Anschluss an die experimentelle Studie wurde eine Validierung der Ergebnisse im Unternehmenskontext bei den Anwendungspartnern DILO und SEHO durchgeführt. Hierzu wurde die App *SAM-KI-Nachricht* in einer zusätzlichen globalen Version als Software-Mockup mit Axure umgesetzt. Im Rahmen der Evaluation wurde zunächst die Arbeitsgedächtniskapazität der Teilnehmenden erfasst. Anschließend wurden die globale und die serielle Version der App im direkten Vergleich getestet.

Beide Versionen wurden von den Mitarbeitenden als übersichtlich und benutzerfreundlich bewertet. Die globale Darstellung, die eine zusätzliche Übersicht über alle Inhalte bietet, wurde insgesamt ebenfalls als hilfreich und strukturiert wahrgenommen. Dennoch äußerten die Mitarbeitenden der beteiligten Unternehmen die Einschätzung, dass eine solche zusätzliche Darstellungsoption bei einer niederschwelligen Assistenzlösung dieser Art nicht zwingend notwendig sei. Das Assistenzsystem bestehe bereits aus wenigen Schritten und ist intuitiv verständlich in der Handhabung. Diese Einschätzung war unabhängig von der Arbeitsgedächtniskapazität und zeigte sich über alle Teilnehmenden hinweg weitgehend einheitlich.

Aufgrund dieser geringen Varianz in der Bewertung konnte kein statistisch belastbarer Zusammenhang zwischen der Arbeitsgedächtniskapazität und der bevorzugten Darstellungsform festgestellt werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine adaptive Gestaltung in Abhängigkeit von der Arbeitsgedächtniskapazität insbesondere dann sinnvoll erscheint, wenn die Benutzeroberfläche eine erhöhte inhaltliche und strukturelle Komplexität aufweist. Die Untersuchung bestätigte hingegen die Vorteilhaftigkeit eines aufgabenorientierten Interaktions- und Navigationskonzepts für Nutzer mit einem breiten Spektrum an demografischen Merkmalen. Auf Basis dieser Erkenntnis, unter der Verwendung von SAM-KI-Nachricht als Test-Frontend, wurden bei SAM-KI-Check einzelne Ansichten unterteilt, was in der späteren Evaluation (AP E) von Testpersonen positiv wahrgenommen wurde.

Arbeitspaket E: Evaluation des Assistenzsystems
Sowohl projektbegleitend (formativ) als auch abschließend (summativ) wurden die Module und das Gesamtprojekt durch das Konsortium praxisnah evaluiert.

Projektbegleitend erfolgte eine kontinuierliche Evaluation von Modul 1. Es wurden frühzeitig funktionsfähige Demonstratoren bei den Anwendungspartnern ausgerollt und konnten fortlaufend durch die Mitarbeitenden getestet werden. Sowohl die vorgesehenen Entwicklungen als auch das Nutzerfeedback führten zu stetiger Weiterentwicklung der AR-Assistenz. Weiterentwicklungen wurden bei den Anwendungspartnern iterativ implementiert, zur Nutzung freigegeben, Feedback unternehmensintern gesammelt und in Vor-Ort-Terminen diskutiert. Diese Vorgehensweise führt zu einer kontinuierlichen Validierung erzielter Zwischenergebnisse und fand bei den Nutzern hohe Zustimmung, da gewünschte Optimierungen zeitnah erfolgten.

Projektbegleitend wurden zu den jeweiligen Roll-Outs der Apps aus Modul 2 Fragebögen an die Mitarbeitenden, die mit den Assistenzsystemen arbeiteten, verteilt. Die Mitarbeitenden erhielten mit dem Roll-Out eine Systemeinführung. Danach durften sie die Systeme verwenden und sollten innerhalb der Fragebögen vermerken, wenn Interaktionen fehlten oder technische Probleme auftraten. Die Fragebögen wurden nach einem Monat der Verwendung eingesammelt und ausgewertet. Die Änderungswünsche wurden daraufhin im System umgesetzt und die Apps wurden zeitnah in einer neuen überarbeiteten Version zur Verfügung gestellt. Daraufhin konnten die Mitarbeitenden wieder mit den Fragebögen etwaige Probleme festhalten. So wurde die Verbesserung des Systems iterativ und basierend auf den Anforderungen der Nutzer sichergestellt, wie auch bei Modul 1 erfolgt.

Zum Projektende wurden umfangreiche Nutzerstudien zur Evaluation des Gesamtsystems bei SEHO und DILO durchgeführt. Hierbei wurden jeweils fünf Teilnehmende von unterschiedlichen Arbeitsplätzen

im Rahmen von Eyetracking-gestützten Usability-Tests beobachtet (siehe Abbildung 19). Die Teilnehmenden führten für die Anwendungen aus Modul 1 und Modul 2 jeweils Testaufgaben aus und berichteten mithilfe von Think-Aloud ihre Wahrnehmung der Bedienung. Im Anschluss an die Tests evaluierten die Teilnehmenden die Systeme im Rahmen des ISONORM 9241/110-Fragebogens hinsichtlich der Usability. Zusätzlich füllten die Teilnehmenden die Fragebögen aus, die in AP A zur Analyse des Ist-Zustands erhoben wurden, um Rückschlüsse auf Veränderungen in der Arbeit durch die Einführung der Assistenzsysteme zu erhalten.

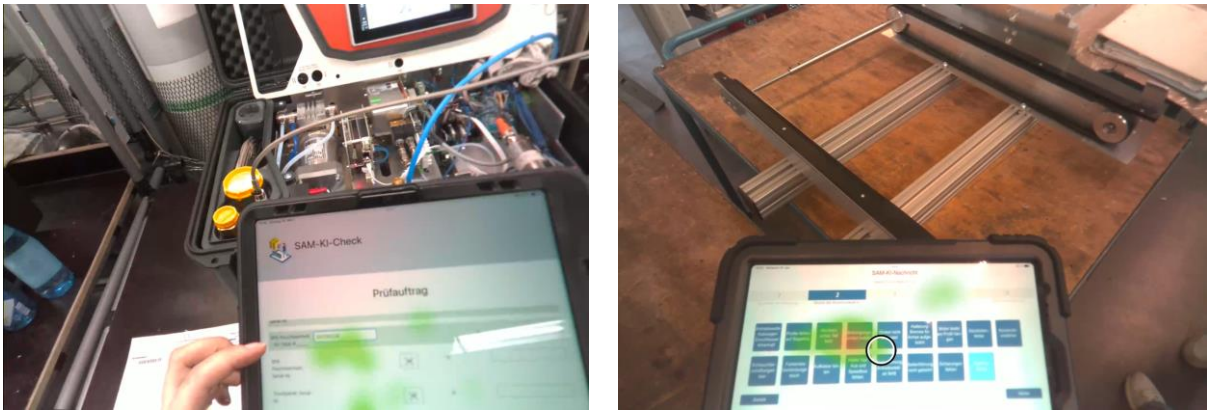

Abbildung 19: Ausschnitt aus den Eyetracking-Aufnahmen innerhalb der Evaluation

Die Auswertung umfasste die Analyse der Think-Aloud-Protokolle und der Eyetracking-Aufnahmen. Einige Schwachstellen konnten hierbei identifiziert werden, wie beispielsweise, dass das große Tablet für kleine Bauteile als ungeeignet wahrgenommen wird oder dass manche Prozesse schnelleres Handeln erfolgen, wodurch man sich nicht allein auf das Assistenzsystem verlassen kann. Zudem wurden die Übersichtlichkeit, Geschwindigkeit und "Spaß“ im Vergleich zu den bisherigen, meist papierbasierten Vorgehensweisen hervorgehoben.

Auch die Fragebögen wurden im Anschluss ausgewertet. Hier zeigte sich für den ISONORM 9241/110, dass die entwickelten Assistenzsysteme unternehmensübergreifend eine Bewertung von über 1 in fast allen Interaktionsprinzipien erhielten, was auf gute Usability hindeutet. Leider liegt der Aspekt Individualisierbarkeit mit 0,9 unter der Referenz von 1 und sollte daher verbessert werden (siehe Abbildung 20).

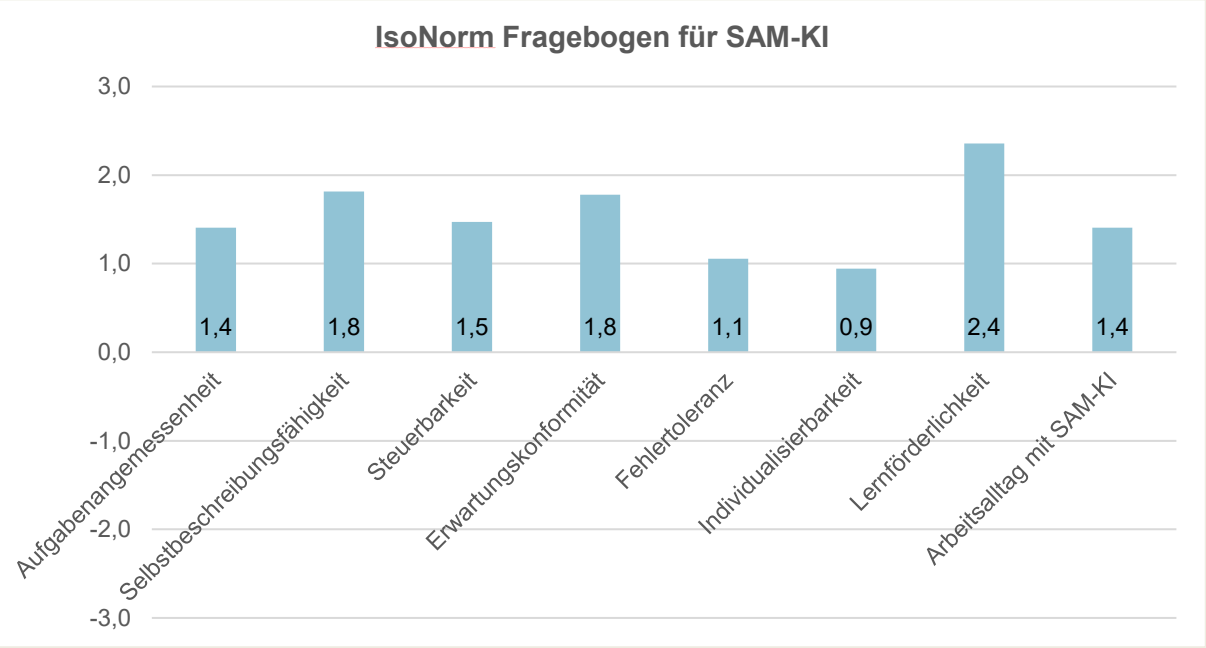

Abbildung 20: Auswertung des ISONORM 9241/110 Fragebogens für das Assistenzsystem SAM-KI (beide Unternehmen).

Auch in den Fragebögen KFZA, Digitalkompetenz und UWES zeigte sich bei beiden Unternehmen eine positive Entwicklung verglichen mit den Ergebnissen zum Projektstart. Für die Utrecht Work Engagement Scale (UWES) zeigt sich im Projektverlauf über alle drei Dimensionen eine Verbesserung (siehe Abbildung 21).

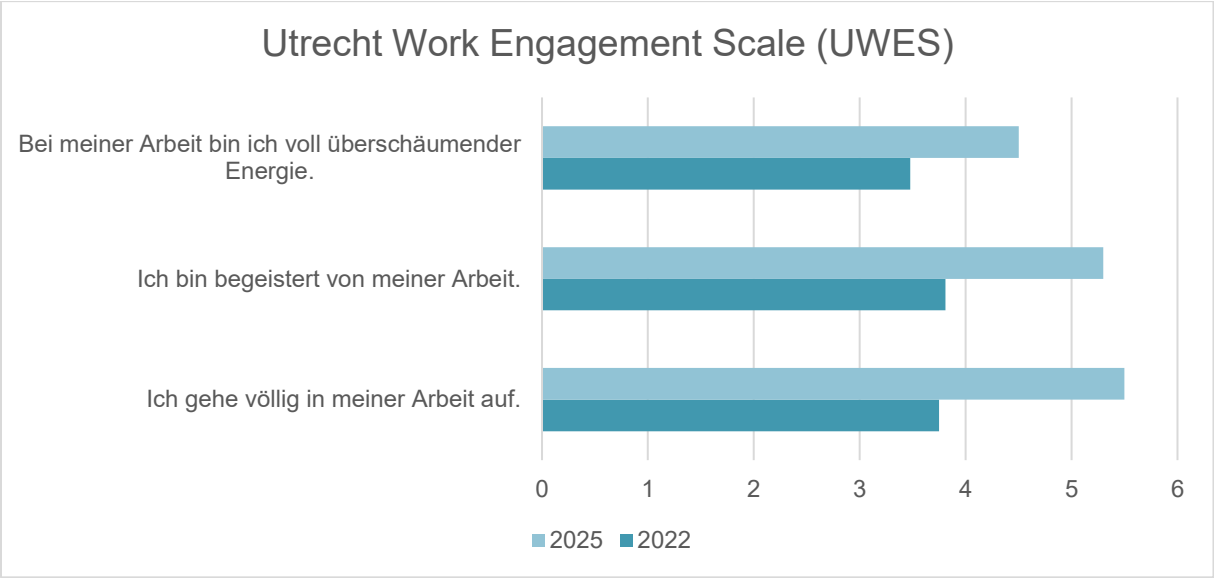

Abbildung 21: Darstellung der Mittelwerte der Utrecht Work Engagement Scale im Projektverlauf SAM-KI (beide Unternehmen).

Der Kurzfragebogen zur Arbeitsanalyse wurde im Rahmen der Evaluation erneut von den Nutzern ausgefüllt. Über alle Dimensionen hinweg zeigten sich bei beiden Anwendungspartnern positive Entwicklungen über den Projektverlauf. Der Handlungsspielraum wurde beispielsweise nach Einführung der Assistenzsysteme höher eingeschätzt (MW = 3,17; SD = 1,12; 5-stufige Likert-Skala). Auch die Dimension, welche die betrieblichen Leistungen abfragt, wurde im Vergleich zum Projektbeginn positiver bewertet (MW = 3,35; SD = 1,23; 5-stufige Likert-Skala). Die Einschätzung der Arbeitsunterbrechungen entwickelte sich ebenfalls positiv (MW = 3,6; SD = 1,14; 5-stufige Likert-Skala). Die Entwicklung aller Dimensionen des Kurzfragebogens zur Arbeitsanalyse ist in Abbildung 22 dargestellt.

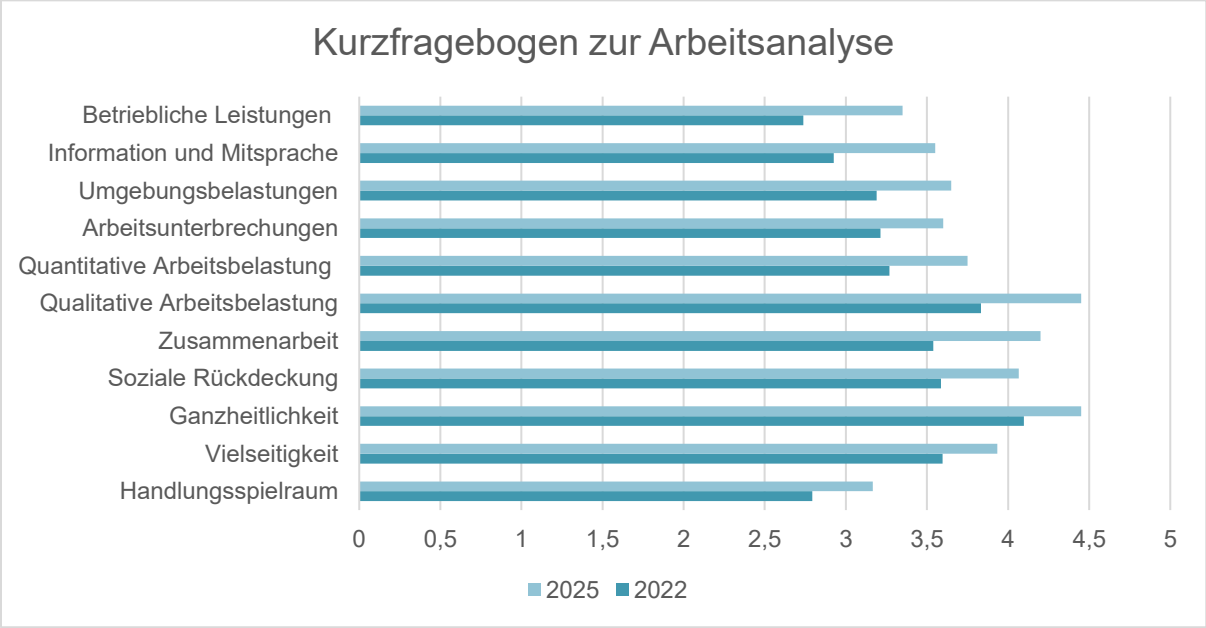

Abbildung 22: Darstellung der Mittelwerte des Kurzfragebogens zur Arbeitsanalyse im Projektverlauf SAM-KI (beide Unternehmen).

Abschließend füllten die Nutzer im Rahmen der Evaluation Fragebögen zu ihren Fähigkeiten in digitaler Kommunikation und digitaler Kollaboration aus. Diese Erhebungen wurden bereits zu Beginn des Projekts durchgeführt und zum Projektende erneut wiederholt. Da die entsprechenden Kompetenzen im Verlauf des Projekts gezielt geschult wurden, stuften die Teilnehmenden ihre Fähigkeiten in beiden Bereichen zum Projektabschluss deutlich höher ein (siehe Abbildung 23).

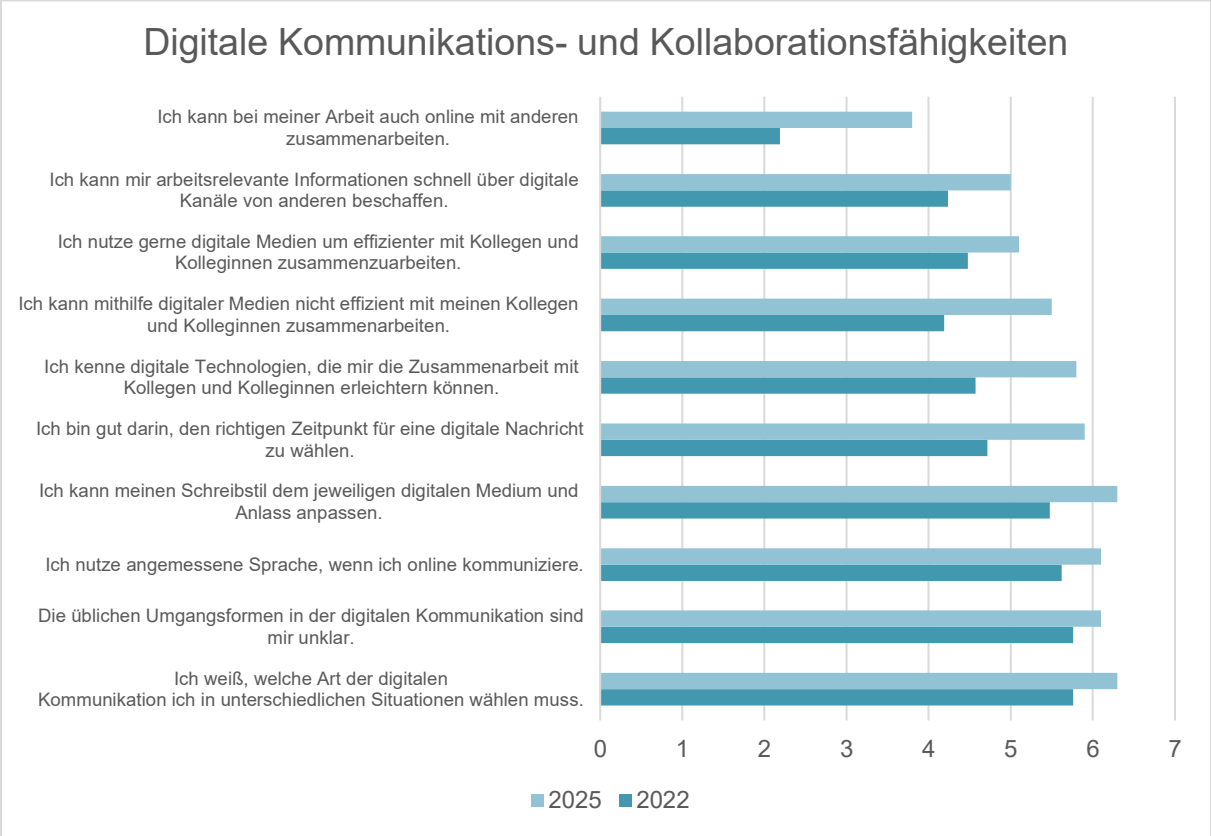

Abbildung 23: Darstellung der Mittelwerte der digitalen Kommunikations- und Kollaborationsfähigkeiten im Projektverlauf SAM-KI (beide Unternehmen).

In welchem Ausmaß die Veränderungen ausschließlich auf SAM-KI zurückzuführen sind, lässt sich nicht mit eindeutiger Gewissheit sagen. Dennoch sprechen die Verbesserungen über alle Dimensionen hinweg für eine erfolgreiche und humanorientierte Einführung des SAM-KI-Assistenzsystems im Rahmen des Projekts.

Arbeitspaket F: Projektleitung, Dissemination und Verwertung

In monatlichen Jour Fixes mit dem Konsortium wurde die Einhaltung des Arbeitsplans kontinuierlich sichergestellt. Aktuelle Themen aus den Modulen und von den Anwendungspartnern wurden regelmäßig diskutiert und das weitere Vorgehen festgelegt. Innerhalb einzelner Arbeitspakete fand, je nach Bedarf, eine kurzzyklischere Absprache zwischen den jeweils beteiligten Projektmitarbeitenden statt. Zudem fand jährlich ein Konsortialtreffen bei einem der Konsortialpartner vor Ort statt, bei dem der Projektstand ausführlich diskutiert und die Anwendungsfälle präsentiert wurden.

Es wurden drei wissenschaftliche Veröffentlichungen innerhalb der Laufzeit erstellt und veröffentlicht. Zu zwei der Veröffentlichungen fand ein Fachvortrag statt. Die Veröffentlichungen sind in Kapitel II.8 aufgelistet.

Außerdem fand die Präsentation des Projekts und der Demonstratoren auf der Vision Messe 2024 in Stuttgart statt. Hierbei konnten Gespräche mit interessierten Messebesuchern geführt und die Ergebnisse einem breiten Publikum präsentiert werden.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zu Beginn des Projektes wurde diskutiert, ob anstelle eines Tablets oder Smartphones als Hardware-Plattform auch eine AR-Brille, anstatt eines Tablets, eingesetzt werden kann. Der Vorteil der Brille liegt darin, dass die Hände frei bleiben, während Zusatzinformationen in Überlagerung zur getrackten Umgebung ins Sichtfeld eingeblendet werden. Aufgrund der durch eine AR-Brille eingeschränkten Wahrnehmung, die in industriellen Umgebungen gefährlich sein kann, wurde jedoch auf die Verwendung einer AR-Brille verzichtet. Das System HoloLens von Microsoft, die bislang erfolgreichste Ar-Brille, wurde mittlerweile wieder abgekündigt, sodass sich die Fokussierung auf Tablet-Systeme als eine gute Entscheidung erwiesen hat. Zudem wären für die Adaption der AR-Assistenz für eine AR-Brille umfangreiche, hardwarespezifische Entwicklungen notwendig gewesen.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Verbundprojekt SAM-KI ermöglicht es, die verfügbaren Verfahren zum modellbasierten Tracking und die Technologien zur Augmented-Reality-gestützten Qualitätsinspektion in neue Anwendungsfelder zu bringen und damit eine neue Klasse von Montageassistenzsystemen zu generieren. Der Markt für Montageassistenzsysteme bietet großes Wachstumspotential, da diese Systeme viele Möglichkeiten einer breiten Skalierung und den Vorteil einer einfachen Inbetriebnahme haben. Das in diesem Projekt entwickelte Assistenzsystem verspricht durch die Integration innovativer Computer-Vision-Technologie, künstlicher Intelligenz und modellbasierten Trackings eine deutliche Alleinstellung im Bereich der systematischen Unterstützung und Prozessführung für das nutzende Montagepersonal. Durch die autonome Lösung wird die Flexibilisierung hinsichtlich möglicher Einsatzgebiete deutlich erhöht. Somit kann eine steilere Anlaufkurve bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktqualität erreicht werden. Darüber hinaus wurde das Projekt so konzipiert und durchgeführt, dass eine Verwertung in anderen Unternehmen bzw. Montageszenarien sind möglich. Dies gilt für das gesamte Assistenzsystem in Form der AR-Assistenz und der Tablet-Apps. Beide Module sind auf unterschiedliche Montageszenarien konfigurierbar, insbesondere in Anwendungsfällen mit hoher Variantenvielfalt. Auch die Verwertbarkeit im Bereich der Smart Maintenance ist gegeben. Investitionen in Smart-Maintenance-Lösungen sind deshalb sehr plausibel, weil durch die Reduktion von Fehlern, durch verbesserte Montagequalität und durch die Optimierung von Service- und Wartungsabläufen Folgekosten vermieden werden, die die Investitionen in Smart-Maintenance-Systeme um ein Vielfaches übersteigen.

Aufbauend auf diesem Trend sollen im Rahmen dieses Projektes die Projektergebnisse der **Visometry GmbH** dadurch verwertet werden, um Arbeitsprozesse abzusichern und eine selbstgesteuerte Vollständigkeitskontrolle von Arbeitsschritten durchzuführen. Neben der Generierung von lizenzierbaren Softwaretechnologien wird das Know-how, das im Rahmen des Projekts aufgebaut wurde, auch in kundenspezifischen Anschlussprojekten ausgewertet, die als Dienstleistungsprojekte für die Kunden durchgeführt werden. In diesen aufbauenden Dienstleistungsprojekten wird untersucht, wie die erforschten Technologien an die kundenspezifischen Problemstellungen adaptiert werden können. Die Kombination von Dienstleistungen und lizenzierbaren Technologien ist für die Visometry GmbH wesentlich, um eine nachhaltige Kooperation mit den Kunden aufzubauen und um die entwickelten Technologien tief in der individuellen Infrastruktur des Kunden zu verankern. Die im Rahmen des Projektes SAM-KI entwickelten Technologien werden in die Produkte der Visometry GmbH integriert. Während die verfügbaren Twyn-Technologien vor allen Dingen zur Wareneingangskontrolle von Schweißbaugruppen eingesetzt werden, soll die AR-Montageassistenz eine produktionsbegleitende und intuitive Anleitung zu spezifischen Produktionsschritten erlauben.

Für **DILO Armaturen und Anlagen GmbH** lassen sich die Projektergebnisse verwerten, indem sie mit dem Assistenzsystem schneller neue Mitarbeitende für anspruchsvolle Montagetätigkeiten befähigen und zugleich erfahrene Mitarbeitende kognitiv während der Tätigkeit entlasten können. Gerade bei der großen Varianz der zu fertigenden Ausstattungsvarianten sowie der Berücksichtigung von Qualitätsregelkreisen mit Feldrückmeldungen ist eine höhere First-Time-Quality ein wichtiges Ergebnis, um „Made in Germany“ weiterhin konkurrenzfähig zu halten. Außerdem können mithilfe des Assistenzsystems die

sehr hohen Qualitätsanforderungen für Messgeräte sichergestellt und zudem die Montageprozesse effizienter sowie für den Menschen entlastender gestaltet werden. Eine verbesserte Wirtschaftlichkeit ergibt sich auch durch eine digitalisierte Kommunikation und Interaktion des Monteurs mit anderen Abteilungen. Die Wege sind somit kürzer und eine gezielte Kommunikation und Interaktion kann von nun an auch dezentral z. B. mit Mitarbeitenden im Homeoffice erfolgen. Zusätzliche Potenziale ergeben sich durch die effizientere Reaktionsmöglichkeit auf Schwankungen der Auftragslage. Auch Auftragsspitzen können mit geringqualifiziertem Personal bearbeitet werden, ohne dass Aufträge an internationale Wettbewerber verloren werden.

Die **SEHO Systems GmbH** wird die Projektergebnisse verwerten, um Montagemitarbeitende mittels SAM-KI schneller für anspruchsvolle Montagetätigkeiten zu befähigen. Zugleich ermöglicht das Montageassistenzsystem gerade bei älteren Mitarbeitenden eine kognitive Entlastung während ihrer Montagetätigkeit. Außerdem können mithilfe des Assistenzsystems die sehr hohen Qualitätsanforderungen für die Anlagentechnik sichergestellt werden und zudem die Montageprozesse effizienter und für den Menschen entlastender gestaltet werden. Eine verbesserte Wirtschaftlichkeit ergibt sich ferner durch eine digitalisierte Kommunikation und Interaktion des Monteurs mit anderen Abteilungen. Die Wege sind somit kürzer und eine gezielte Kommunikation und Interaktion kann auch dezentral z. B. mit Mitarbeitenden im Homeoffice reibungslos erfolgen. Durch eine unternehmensweite Einführung können auch die Kommunikation und Fehlerbehebung zwischen Montage und Fertigung sowie mit den weiteren Kollegen gebündelter ablaufen. Daraus können weitere Effizienzgewinne umgesetzt und zugleich die Mitarbeitendenzufriedenheit verbessert werden. Gleichzeitig kann SEHO als Multiplikator wirken, indem bei SEHO-Kunden – bei denen üblicherweise eine Vielzahl an Montagetätigkeiten durchgeführt werden – das Assistenzsystem demonstriert wird.

Die Beteiligung der Forschungspartner **Fraunhofer IPA** und **IFAB (KIT)** sicherte die optimale Ausnutzung der wissenschaftlichen Kompetenz in den Bereichen Produktionstechnik und Arbeitswissenschaft. Gleichzeitig konnten die Forschungseinrichtungen ihre Kompetenz auf den Gebieten der Computer-Vision-Technologie, der AR-Projektionen sowie der intuitiven Systemgestaltung ausbauen. Den beteiligten Instituten wurde im Projekt SAM-KI ermöglicht, in enger Vernetzung mit der Industrie zu arbeiten und die Anwendbarkeit der Forschung aufzuzeigen.

Das **FhG-IPA** wird die Projektergebnisse dazu nutzen, das eigene Know-how-Portfolio zu erweitern und es in andere Forschungs- und Beratungsprojekte zu integrieren. Hierbei soll insbesondere der Themenschwerpunkt der multimodalen Kommunikation und Interaktion vertieft und die Erkenntnisse und Werkzeuge nach Projektabschluss in den Mittelstand transferiert werden. Kurz nach Projektende konnten bereits weitere FuE-Projekte zur Weiterentwicklung von Modul 2 angestoßen werden. Des Weiteren wurden und werden die Projektergebnisse der wissenschaftlichen Community auf internationalen Konferenzen und durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften gemeinsam mit dem KIT ifab präsentiert.

Das **KIT ifab** konnte durch das Projekt SAM-KI seine Kompetenzen in den Bereichen adaptive Assistenz und intuitive Systemgestaltung ausbauen. Durch die dazugewonnenen Kompetenzen im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle will das ifab seinen Bekanntheitsgrad in nichtwissenschaftlichen Bereichen verbessern und dadurch zukünftige Projektpartner für weitere Forschungsabsichten gewinnen. Das ifab erhofft sich durch die aufgebauten Kompetenzen sowie deren Anwendungsnähe, Kontakte zu Unternehmen für mögliche Beratungsprojekte im Drittmittelbereich aufzubauen. Weiterhin nutzt das ifab die Ergebnisse des Projekts, um diese z.B. in die Lehre zu transferieren. Studierende erhielten im Rahmen des Projektvorhabens die Möglichkeit, Bachelor- und Masterarbeiten, sowie Promotionsvorhaben durchzuführen.

Zusammenfassend lässt sich das Verbundprojekt SAM-KI als Erfolg bewerten. Die inhaltlichen Projektziele wurden erreicht. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass ein praxistaugliches, verwertbares Assistenzsystem für variantenreiche Montagebereiche erarbeitet und unter stetiger Nutzereinbindung umgesetzt und positiv evaluiert wurde. Das SAM-KI-Assistenzsystem soll zu einem marktfähigen System weiterentwickelt werden und bei den Anwendungspartnern in Zukunft zum dauerhaften Einsatz kommen. Weitere Interessenten sind bereits bekannt. Neben den wirtschaftlichen Faktoren ist auch mehrheitlich das abschließende positive Feedback von Montagemitarbeitenden aus AP E zu bemerken.

Aussagen wie „[…] mehr Spaß bei der Arbeit.“ oder „[…] eine wirkliche Unterstützung […]“ zeigen den Mehrwert von SAM-KI und einer engen sowie partizipativen Nutzereinbindung im Projektverlauf. An dieser Stelle möchten die Verbundpartner ihren Dank allen Mitarbeitenden der Anwendungspartner aussprechen, die im Projektverlauf die verschiedenen Iterationen begleitet, geduldig getestet, Feedback erarbeitet, ihr Prozesswissen zur Verfügung gestellt und damit maßgeblich zum Erfolg beigetragen haben.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Beim Vernetzungstreffen des PTKA 2023 „Innovative Arbeitswelten im Mittelstand“, das im Mai 2023 stattfand, kamen die Projektbeteiligten für zwei Tage zusammen, um sich über Fortschritte, Ergebnisse und Synergien auszutauschen. Am ersten Veranstaltungstag stellten sich zunächst alle beteiligten Projekte in Kurzpräsentationen vor. In einer anschließenden Poster-Runde wurden die Vorhaben und bisherigen Ergebnisse diskutiert und potenzielle Anknüpfungspunkte zwischen den Projekten identifiziert. Der zweite Tag stand im Zeichen der wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Projektergebnisse. In den thematischen Team-Workshops wurden gemeinsam Ansätze für potenzielle Verwertungsszenarien erarbeitet. Frau Prof. Robra-Bissantz unterstützte mit interaktiven Methoden und Impulsen zu den Themen „Value in Use“ und Service-Ökosysteme.

Das Vernetzungstreffen im November 2023 legte den thematischen Schwerpunkt auf Mitarbeiterpartizipation und -akzeptanz. Nach einer kurzen Vorstellung der beteiligten Projekte hatten die Teilnehmenden Gelegenheit, sich praxisnah über ihre Erfahrungen im Umgang mit Mitarbeiterakzeptanz auszutauschen. Der Austausch ermöglichte es, zentrale Erkenntnisse und Good Practices aus anderen Projekten aufzunehmen und über die eigene Arbeit zu reflektieren.

Die Visometry engagiert sich im VDC Fellbach („Kompetenznetzwerk für Virtuelles Engineering“) und steht über dieses Netzwerk im regelmäßigen Austausch mit Anbietern und Nutzern von AR-Technologien. Im Rahmen der Netzwerkveranstaltung (z.B. XR Week 2024, XR Week 2025) wurden Ergebnisse mit potenziellen Kunden und Kooperationspartnern diskutiert. Die Technologien zur Bauzustandsmodellierung werden darauf basierend z.B. in Kooperation mit der Firma Threedy weiterentwickelt, mit der ein Kooperationsvertrag geschlossen wurde.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Im Vorhabenverlauf wurden verschiedene Maßnahmen zur Wissenschaftskommunikation und Präsentation der Vorhabensergebnisse unternommen. Hierzu zählten Vorträge bei Fachtagungen, wissenschaftliche Veröffentlichungen und ein gemeinsamer Messestand zur Vorstellung des Forschungsprojekts auf der Vision Messe 2024. Nachstehend sind die konkreten Aktivitäten aufgeführt:

- Vortrag und Veröffentlichung: Hanebeck, J., Käppler, M., Lorenz, M., Mößner, P. u. Deml, B.: Entwicklung einer adaptiven Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Unterstützung in der manuellen Montage. Smarte Technologien und Augmented Reality in der Arbeitswelt. 2023 [15]
- Vortrag und Veröffentlichung: Hanebeck, J. u. Deml, B.: Adaptive Lernsysteme in der technischen Berufsausbildung: Adaptation an die Arbeitsgedächtniskapazität und der Einfluss auf das Lernerlebnis. Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit. 2025 [16]
- Veröffentlichung: Eiler, L., Hanebeck, J., Klöpfer, K., Hägle, R., Brander, T. u. Breunig, D.: Digitale Assistenz für Montagetätigkeiten in KMU. Entwicklung und Evaluation eines digitalen Assistenzsystems für heterogene Montagetätigkeiten. wt (wt Werkstattstechnik online). 2025 [17]
- Messeauftritt: Messestand auf der Vision Messe 2024, Vorstellung des Projekts für interessierte BesucherInnen

II.9 Literaturverzeichnis

[1] D. Berndt und R. Warnemünde, *Werkerassistenz und Qualitätsprüfung für manuelle Montageprozesse*, 2015.

[2] S. Nördlinger. "So funktioniert Montage 4.0: Digitalisierung." Zugriff am: 15. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.produktion.de/trends-innovationen/so-funktioniert-montage-4-0-351.html

[3] E. Westkämper, H.-J. Bullinger, P. Horváth und E. Zahn, *Montageplanung - effizient und marktgerecht*. Berlin: Springer, 2013.

[4] J. Henke, *Eine Methodik zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage komplexer Systeme*, 2015.

[5] K. Feldmann, *Montage strategisch ausrichten: Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*. Berlin: Springer, 2004.

[6] M. Oberländer und T. Bipp, "Do digital competencies and social support boost work engagement during the COVID-19 pandemic?," *Computers in human behavior*, Jg. 130, 2022.

[7] J. Prümper, K. Hartmannsgruber und M. Frese, "KFZA – Kurzfragebogen zur Arbeitsanalyse," *Zeitschrift für Arbeits-und Organisationspsychologie*, Nr. 39, S. 125–131, 1995. [Online]. Verfügbar unter: https://people.f3.htw-berlin.de/Professoren/Pruemper/instrumente/KFZA-Skalenkonstruktion.pdf

[8] A. Baddeley, "Recent developments in working memory," *Current Opinion in Neurobiology*, Jg. 8, Nr. 2, S. 234–238, 1998, doi: 10.1016/s0959-4388(98)80145-1.

[9] A. Baddeley, "Working memory: theories, models, and controversies," *Annual Review of Psychology*, Early Access. doi: 10.1146/annurev-psych-120710-100422.

[10] A. Siddique, Q. S. Durrani und H. A. Naqvi, "Developing Adaptive E-Learning Environment Using Cognitive and Noncognitive Parameters," *Journal of Educational Computing Research*, Jg. 57, Nr. 4, S. 811–845, 2019, doi: 10.1177/0735633118769433.

[11] M. Murtaza, Y. Ahmed, J. Shamsi, F. Sherwani und M. Usman, "AI-based personalized e-learning systems: Issues, challenges, and solutions," *IEEE Access*, Nr. 10, S. 81323–81342, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193938. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9840390

[12] D. Fellman, A. Lincke, E. Berge und B. Jonsson, "Predicting Visuospatial and Verbal Working Memory by Individual Differences in E-Learning Activities," *Front. Educ.*, Jg. 5, 2020, Art. Nr. 22. doi: 10.3389/feduc.2020.00022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2020.00022/full

[13] T.-W. Chang, J. Kurcz, M. M. El-Bishouty, Kinshuk und S. Graf, "Adaptive and Personalized Learning Based on Students' Cognitive Characteristics," *Ubiquitous Learning Environments and Technologies*, S. 77–97, 2015. doi: 10.1007/978-3-662-44659-1_5. [Online]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44659-1_5

[14] W. Lestari, D. Nurjanah und N. Selviandro, "Adaptive presentation based on learning style and working memory capacity in adaptive learning system," *CSEDU 2017 – Proceedings of the 9th International Conference on Computer Supported Education*, Nr. 1, S. 363–370, 2017.

[15] J. Hanebeck, M. Käppler, M. Lorenz, P. Mößner und B. Deml, "Entwicklung einer adaptiven Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Unterstützung in der manuellen Montage," *Smarte Technologien und Augmented Reality in der Arbeitswelt*, S. 19–21, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://d-nb.info/1340489392/34#page=20

[16] J. Hanebeck und B. Deml, "Adaptive Lernsysteme in der technischen Berufsausbildung: Adaptation an die Arbeitsgedächtniskapazität und der Einfluss auf das Lernerlebnis," in *Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit*, 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000181867

[17] L. Eiler, K. Klöpfer, R. Hägle, T. Brander, D. Breunig und J. Hanebeck, "Digitale Assistenz für Montagetätigkeiten in KMU/Digital assistance for assembly work in SMEs – Development and evaluation of a digital assistance system for heterogeneous assembly tasks," *wt*, Jg. 115, 07-08, S. 624–631, 2025, doi: 10.37544/1436-4980-2025-07-08-94.