

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Automatisierte Generierung von Montagesequenzen und -zeiten
aus implizitem Wissen (AGASTIK)



in der Fördermaßnahme

„Zukunft der Arbeit: Mittelstand – innovativ und sozial“

Autor

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
Campus Boulevard 30, 52074 Aachen
G.Schuh@wzl.rwth-aachen.de

Projektlaufzeit: 01.07.2021 – 30.11.2024

Erstellungsdatum: 15.02.2025

Projektpartner

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen (WZL)
Lehrstuhl für International Production Engineering and Management der Universität Siegen (IPEM)
Wilhelm Vogel GmbH Antriebstechnik (WV)
Medenus Gas-Druckregeltechnik GmbH (MED)
Mobile Software AG (MS)
Lorenz Software GmbH (LS)
Weber Maschinenbau GmbH Breidenbach (WM) (assoziiertes Partner)

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

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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.....	5
II.1	Motivation und Aufgabenstellung	5
II.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	5
II.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
II.3.1	Geleistete Projektarbeiten	6
II.3.1.1	Arbeitspaket 1: Datenaufnahme und Erstellung des Montagedatensatzes .	7
II.3.1.2	Arbeitspaket 2: Datenaufbereitung und KI-Training	10
II.3.1.3	Arbeitspaket 3: Iteratives Testen des KI-Algorithmus anhand unbekannter Montageprozesse	13
II.3.1.4	Arbeitspaket 4: KI-Implementierung zur automatisierten Generierung von Montageplanungsdaten	13
II.3.1.5	Arbeitspaket 5: Anwendung und Validierung	15
II.3.1.6	Arbeitspaket 6: Projektmanagement, -controlling und Dokumentation	18
II.3.2	Planabweichungen	18
II.3.3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	19
II.4	Erzielte Ergebnisse	19
II.5	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	20
II.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	21
II.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	21
II.8	Veröffentlichungen	22
II.9	Literaturverzeichnis	23

I. Teil I: Kurzfassung

Die folgende Kurzfassung ist für alle Projektpartner identisch.

I.1 Aufgabenstellung

Die **Motivation** des Vorhabens war, Herausforderungen für die Montage und deren Planung in KMUs mit neuartigen digitalen Lösungen zu begegnen, die die Mitarbeitenden entlasten. Die adressierten Herausforderungen sind einerseits der hohe manuelle Aufwand der Montageplanung insb. in Produktionsanläufen sowie andererseits der durch den demografischen Wandel steigende Bedarf, neue Mitarbeitende anzulernen. Mitarbeitende in KMUs, die Kleinserien produzieren, sind besonders von diesen Herausforderungen betroffen und standen daher im Fokus des Projekts.

Das **Ziel** aufgrund dieser Motivation war, ein menschenzentriertes Software-System zu entwickeln, das in der Montageplanung den manuellen Aufwand senkt und die Planungsqualität erhöht sowie in der Montage die Dokumentations- und Anlernaufwände verringert. Dazu gab es folgende Unterziele. Die zu entwickelnde benutzerfreundliche Software sollte Mitarbeitende insb. in der Einzel- und Kleinserienmontage von KMUs entlasten. Sie sollte einmalig aufgenommene Prozesse aufwandsarm mittels künstlicher Intelligenz (KI) auswerten und implizites Wissen der Mitarbeitenden explizieren. Dieses Wissens sollte sie für Mitarbeitende benutzungsfreundlich als Montageanweisung nutzbar machen.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Der **Stand der Wissenschaft und Technik** zu Beginn des Vorhabens war, dass die Erstellung von Montageablaufplänen oft der aufwändigste Schritt der Montageplanung war und primär auf implizitem Erfahrungswissen der Montageplanenden aufbaute, obwohl die meisten Unternehmen eine Arbeitsplanungssoftware einsetzten. Vor allem in KMUs existierten daher in der Montage kaum explizite, montagegerechte Prozessanleitungen. Die Forschungslücke war, dass zum Zeitpunkt der Antragstellung weder in der Industrie noch in der Forschung eine Lösung existierte, die eine ganzheitliche, automatisierte Prozessaufnahme, -analyse und -aufbereitung für die Montageplanung ermöglichte.

Der **Ablauf** umfasste sechs Arbeitspakete zwischen 2021 und 2024: 1. Datenaufnahme und Erstellung des Montagedatensatzes, 2. Datenaufbereitung und KI-Training, 3. Iteratives Testen des KI-Algorithmus anhand unbekannter Montageprozesse, 4. KI-Implementierung zur automatisierten Generierung von Montageplanungsdaten, 5. Anwendung und Validierung und 6. Projektmanagement, -controlling und Dokumentation.

Umplanungen aufgrund unerwartet großer Herausforderungen gab es insbesondere in Arbeitspaket 1 während der Datenaufnahme, in Arbeitspaket 2 während der Datenaufbereitung und dem KI-Training sowie in Arbeitspaket 3 während des iterativen Testens des KI-Algorithmus. Die Datenaufnahme verzögerte sich aufgrund einer Anpassung des Sensorkonzepts und aufgrund eingeschränkter Lieferzeiten von Time-of-Flight-Kameras. Die Entwicklung und Optimierung der KI-Modelle verzögerte sich aufgrund der Komplexität bei der Erkennung im Montageumfeld. Es gab keine Umplanungen aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse. Die Ziele wurden trotz der Umplanung erreicht.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Das **wesentliche Ergebnis** des Vorhabens ist eine benutzungsfreundliche Software-Anwendung zur Entlastung der Mitarbeitenden in Montageplanung und Montage, insb. in KMUs mit Einzel- und Kleinserienmontage. Sie senkt den manuellen Aufwand und erhöht die Planungsqualität der Montageplanung, verringert Dokumentations- und Anlernaufwände und sichert Kernkompetenzen. Dazu analysiert sie einmalig aufgenommene Montageprozesse aufwandsarm mittels künstlicher Intelligenz (KI), expliziert das darin erkennbare implizite Wissen der Mitarbeitenden und stellt es diesen in einer benutzungsfreundlichen Oberfläche als Montageanweisung zur Verfügung. Die Software-

Systemarchitektur umfasst drei wesentliche Teile: 1. Einmalige Aufnahme von Montageprozessen, 2. Automatisierte Analyse mittels künstlicher Intelligenz und 3. Darstellung der Montageanweisung. Diese wurde wie folgt in den sechs zuvor beschriebenen Arbeitspaketen entwickelt.

Arbeitspaket eins, Datenaufnahme und Erstellung des Montagedatensatzes, betrifft insbesondere den ersten Teil der Systemarchitektur, die einmalige Aufnahme der Montageprozesse. Dazu wurden insb. Referenzprodukte und Sensoren ausgewählt, Prozesse aufgenommen und Trainingsdaten erzeugt.

Arbeitspaket zwei, Datenaufbereitung und KI-Training, sowie **Arbeitspaket drei**, Iteratives Testen des KI-Algorithmus anhand unbekannter Montageprozesse, zählten insbesondere auf den zweiten Teil der Systemarchitektur ein, die automatisierte Analyse mittels künstlicher Intelligenz. Dazu wurden insb. Deep-Learning-Modelle zur Erkennung von Bauteilen, Werkzeugen, Händen und Handbewegungen, weiterverarbeitende Modelle zur Erkennung von Kollisionen und Bewegungen und ein Prozessmodellierer zum Integrieren der ermittelten Daten in ein Prozessmodell entwickelt.

Arbeitspaket vier, KI-Implementierung zur automatisierten Generierung von Montageplanungsdaten, zahlte insbesondere auf den zweiten Teil der Systemarchitektur, die automatisierte Analyse mittels künstlicher Intelligenz, und auf den dritten Teil, die Darstellung der Montageanweisung, ein. Dazu wurden die zuvor entwickelten Modelle im Backend implementiert und ein benutzungsfreundliches Frontend entwickelt. **Arbeitspaket fünf**, Anwendung und Validierung, hat den Projekterfolg sowie Optimierungs- und Forschungspotenziale aufgezeigt. Im Rahmen von **Arbeitspaket sechs**, Projektmanagement, -controlling und Dokumentation, wurden unter anderem die Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, bspw. über Veröffentlichungen und Veranstaltungen.

Somit wurden die folgenden **Förderziele** im Schwerpunkt „Zukunft der Arbeit: Mittelstand – innovativ und sozial“ des Programms „Zukunft der Arbeit“ adressiert. Das Ziel „Arbeiten im Datennetz – digitale Arbeitswelt gestalten“ wurde adressiert durch das entwickelte digitale Assistenzsystem für die Planung und Durchführung der Montage inklusive KI-basierter Auswertung von Montageprozessen und Produktdaten. Das Ziel „Kompetenzen im Arbeitsprozess entwickeln“ wurde adressiert durch die ermöglichte intuitive Erlernung der Montage anhand multimedial veranschaulichten Montageanweisungen inklusive ansonsten implizit vorhandenen Wissens. Das Ziel „Mensch-Maschine-Interaktion für das neue digitale Miteinander“ wurde adressiert durch die entwickelte digitale Benutzeroberfläche für WerkerInnen und PlanerInnen zur Nutzung und Planung von Montageanweisungen. Das Ziel „Zukunft der Arbeit durch Nachhaltigkeit sichern – ökonomisch, ökologisch, sozial“ wurde adressiert durch die ermöglichte nachhaltige Wissenssicherung durch digitale Speicherung und Anpassung von Wissen jenseits etablierter Montageanweisungen. Das Ziel „Potenziale der Flexibilisierung für Beschäftigte und Unternehmen erschließen“ wurde adressiert durch die erreichte Flexibilisierung des Mitarbeiterereinsatzes durch reduzierten Personalaufwand bei teilautomatisierter Prozessdokumentation und bei Software-gestütztem Anlernen von Mitarbeitern.

Folgende **Institutionen** waren am Projekt beteiligt: Die zwei Forschungsinstitute WZL der RWTH Aachen University und IPEM der Universität Siegen, drei KMUs mit Einzel- und Kleinserienmontage (Wilhelm Vogel GmbH Antriebstechnik, MEDENUS Gas-Druckregeltechnik GmbH und als assoziierter Partner Weber Food Technology SE & Co. KG) als Anwendungspartner sowie die beiden Softwarepartner Lorenz Software GmbH und Mobile Software AG. Zudem wurde sowohl im Rahmen der Konzeptionierung des Systems als auch bei der Validierung die Wirtschaftspsychologin Sarah Janböcke im Schnittstellenbereich zu den Mitarbeitenden eingebunden.

II. Teil II: Eingehende Darstellung

Die folgende eingehende Darstellung umfasst alle im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten. Dabei wurde die Vorhabensbeschreibung wie geplant umgesetzt. Sie ist für alle Projektpartner identisch bis auf Partner-spezifische Stellen in Kapitel II.3 und II.6.

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die **Motivation** des Vorhabens war, Herausforderungen für die Montage und deren Planung in KMUs mit neuartigen digitalen Lösungen zu begegnen, die die Mitarbeitenden entlasten. Die adressierten Herausforderungen sind einerseits der hohe manuelle Aufwand der Montageplanung insb. in Produktionsanläufen sowie andererseits der durch den demografischen Wandel steigende Bedarf, neue Mitarbeitende anzulernen. Mitarbeitende in KMUs, die Kleinserien produzieren, sind besonders von diesen Herausforderungen betroffen und standen daher im Fokus des Projekts.

Das **Ziel** aufgrund dieser Motivation war, ein menschenzentriertes Software-System zu entwickeln, das in der Montageplanung den manuellen Aufwand senkt und die Planungsqualität erhöht sowie in der Montage die Dokumentations- und Anlernaufwände verringert. Dazu habe es folgende Unterziele. Die zu entwickelnde benutzerfreundliche Software sollte Mitarbeitende insb. in der Einzel- und Kleinserienmontage von KMU entlasten. Sie sollte einmalig aufgenommene Prozesse aufwandsarm mittels künstlicher Intelligenz (KI) auswerten und implizites Wissen der Mitarbeitenden explizieren. Dieses Wissens sollte sie für Mitarbeitenden benutzungsfreundlich als Montageanweisung nutzbar machen.

Folgende **Institutionen** waren am Projekt beteiligt: Die zwei Forschungsinstitute WZL der RWTH Aachen University und IPEM der Universität Siegen haben die Forschung koordiniert. Relevante Vorarbeiten der zwei Forschungsinstitute umfassten insbesondere Forschung bezüglich Montageplanung, Wissensvermittlung mittels virtueller Montageanweisung, Sensorkonzepte, künstliche Intelligenz insb. zur Bilderkennung, technologische Befähigung des Mittelstandes und Datenverarbeitung. Die drei KMUs Wilhelm Vogel GmbH Antriebstechnik, MEDENUS Gas-Druckregeltechnik GmbH und als assoziierter Partner Weber Food Technology SE & Co. KG waren Anwendungspartner mit viel Erfahrung in Vorbereitung und Durchführung von Einzel- und Kleinserienmontage. Die beiden Softwarepartner Lorenz Software GmbH und Mobile Software AG haben Backend und Frontend der Softwarelösung entwickelt und implementiert. Zudem wurde sowohl im Rahmen der Konzeptionierung des Systems als auch bei der Validierung die Wirtschaftspsychologin Sarah Janböcke im Schnittstellenbereich zu den Anwendern eingebunden.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Trotz des in der Industrie weit verbreiteten Einsatzes von Arbeitsplanungssoftware ist die Erstellung von Montageablaufplänen oft mit großem manuellen Aufwand verbunden [SCHU17, MOLI19]. Bei einer Studie mit produzierenden Unternehmen in Deutschland zum aktuellen Vorgehen und erwarteten Entwicklungen in der Arbeitsplanung gaben 52 % der Teilnehmenden an, dass der Aufwand für die Erstellung von Arbeitsplänen hoch oder zu hoch sei. Demnach dauert bei 27 % der befragten Unternehmen deren Erstellung im Durchschnitt länger als vier Stunden [SCHU17]. Dieser hohe Aufwand entsteht vor allem durch Iterationen, welche durch Informationsdefizite im Prototypenstadium verursacht werden und bei der initialen Erstellung der Ablaufpläne komplexer Montageprozesse auftreten. PlanerInnen können oft nicht direkt auf wichtiges implizites Expertenwissen der WerkerInnen zurückgreifen. Teilweise wird ohne Planung nur basierend auf implizitem Wissen montiert. In der Praxis erworbene Erfahrungswerte, die für die Montageplanung von zentraler Bedeutung sind, bleiben ungenutzt. Aus den Wissenslücken resultieren unzureichende Planungsergebnisse [SCHU17b]. Diese bedürfen aufwändiger, manueller Korrektur- und Optimierungsschleifen. Montageprozesse werden traditionell, basierend auf eigenem Fachwissen und Erfahrungen, manuell geplant [SCHU17b, XU11]. So werden Kosten- und Zeitziele der Anlaufphase gefährdet, wohingegen die langfristige Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen gerade von der Beschleunigung der Anlaufphase

abhängt [BERT17]. Die Montageplanung ist komplex und auf hohe Qualität des für PlanerInnen verfügbaren Wissens angewiesen. Trotzdem wird implizites, praxisbezogenes Expertenwissen beteiligter WerkerInnen bei der Planung vernachlässigt oder in nur geringem Maße eingebracht. Dies liegt unter anderem daran, dass implizites Wissen mit herkömmlichen Mitteln nur schwierig oder unter hohem Aufwand extrahiert und dokumentiert werden kann [KATE11].

In Vorarbeiten zur automatisierten Generierung von Montageanweisungen war bislang das herzustellende Produkt Startpunkt für das Erstellen des Dokuments. Mok et al. leiten dazu aus den geometrischen und topologischen Informationen des CAD-Modells die nötigen Montageschritte ab [MOK01]. Bhattacharya erstellt Montageanweisungen auf Basis einer Expertendemonstration. Hierzu werden eine Augmented Reality-Brille und eine Stereokamera verwendet. Das Verfahren analysiert nicht die Tätigkeit der MitarbeiterInnen, sondern lediglich Änderungen am Produkt. Prozessschritte, die aus der Pose und der Bewegung der Mitarbeiter hervorgehen, werden nicht erkannt [BHAT16]. Zur automatisierten Dokumentation impliziten Mitarbeiterwissens kann der Montageprozess mithilfe von Videokameras aufgenommen werden. Bei der Erkennung und Analyse von Montageprozessen in Videoaufnahmen handelt es sich algorithmisch um die in der Bildverarbeitung bekannte Problemstellung der Aktivitätserkennung (Activity Recognition, ARC). Dabei werden menschliche Aktivitäten auf verschiedenen Ebenen der Granularität identifiziert. Durch die Verfügbarkeit großer Datenmengen und allgemeine Fortschritte im maschinellen Lernen hat sich die Erkennungsleistung von ARC-Algorithmen in den letzten Jahren verbessert [MANN18, ABDA19]. In einigen Forschungsarbeiten wird ARC durch Methoden zur Identifizierung menschlicher Posen in Videos realisiert. Posen sind ein wichtiges Indiz für die Erkennung von Handlungen. Das Projekt PoTion nutzt diese Posendynamik, indem es sich auf die Bewegung menschlicher Gelenke konzentriert [CHOU18]. Durch die Aggregation von Posen über mehrere Einzelbilder sagt ein neuronales Netz die Wahrscheinlichkeit für die Klasse der im Video abgebildeten Aktion voraus. Abweichend zu PoTion stellt der Algorithmus PA3D menschliche Posen über die drei Modalitäten Gelenke, Teil-Affinitätsfelder und Faltungsmerkmale dar, statt nur über eine [YAN19]. Die Zusammenführung der Vorhersagewerte der verschiedenen Posenmodalitäten erhöht die Robustheit der Erkennung.

Eine große Herausforderung bei der Entwicklung künstlicher neuronaler Netze für ARC besteht in der genauen Darstellung der zu erkennenden Aktivitäten in einem Video. Dies erfordert eine hohe Qualität und präzise zeitliche Annotation in den Videos gezeigter Aktivitäten. In anderen Anwendungen existieren Ansätze im Bereich der ARC: Yan et al. präsentieren einen Ansatz zur automatisierten Generierung verbaler Kommentare für Tennisspiele [YAN16]. Der Algorithmus wurde anhand eines Datensatzes mit 633 kommentierten Videos trainiert. Ge et al. befassen sich mit der Frage der Sturzerkennung aus Videos für ältere und beeinträchtigte Menschen im betreuten Wohnen [GE18]. Granada et al. verwenden den kontextbasierten Gestenerkennungsdatsatz KSCGR zur Erkennung menschlicher Handlungen beim Kochen [GRAN17]. Trotz eines signifikanten Anstiegs der Datensätze zur Erkennung menschlicher Aktivitäten in den letzten zwanzig Jahren gibt es keinen öffentlich zugänglichen Datensatz, der Aktivitäten im industriellen Umfeld abbildet und auch keine standardisierte Struktur für verschiedene Datensätze. Zudem enthalten die Beschreibungen der Datensätze selten Informationen über die Annotation.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

II.3.1 Geleistete Projektarbeiten

Das Verbundprojekt AGASTIK umfasste sechs Arbeitspakete. Diese wurden interdisziplinär unter Einbindung verschiedener Partner bearbeitet, sodass alle benötigten Expertisen einfließen konnten. Die Arbeitspakete sind in der folgenden Abbildung dargestellt und werden in den nachfolgenden Unterkapiteln detailliert dargestellt.

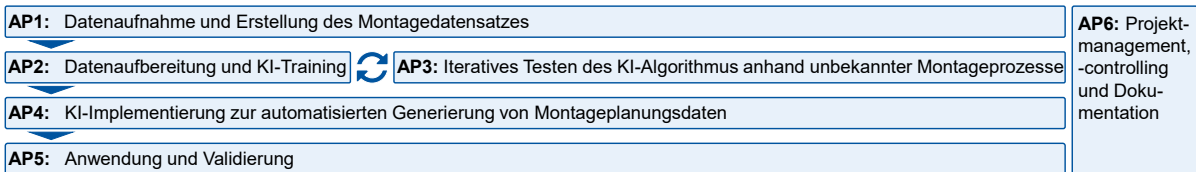


Abbildung 1: Sechs Arbeitspakete

II.3.1.1 Arbeitspaket 1: Datenaufnahme und Erstellung des Montagedatensatzes

Zur Umsetzung des Lösungskonzepts zahlte Arbeitspaket 1 betrifft insb. den ersten, linken Teil des Lösungskonzepts, das in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Das Arbeitspaket umfasste dazu die Unterarbeitspakete 1.1 Identifikation relevanter Prozesse und Arbeitsschritte, 1.2 Definition aufzunehmender Daten, 1.3 Erarbeitung und Umsetzung des Sensorkonzepts, Datenaufnahme und Anonymisierung sowie 1.4 Erstellen eines annotierten Datensatzes. Die Federführung lag beim WZL.

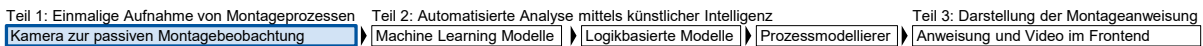


Abbildung 2: Teil 1 im Gesamtkonzept: Einmalige Aufnahme von Montageprozessen

In Unterarbeitspaket 1.1 erfolgte die Identifikation relevanter Prozesse und Arbeitsschritte. Die Anwendungspartner verbindet eine hohe **Produkt- und Prozessvarianz**, welche operativ durch einen hohen Grad an implizitem Expertenwissen der WerkerInnen kompensiert wird.

Wilhelm Vogel GmbH Antriebstechnik	Medenus Gas-Druckregeltechnik GmbH	Weber Maschinenbau GmbH Breidenbach
Produkte Planeten-/Kegelradgetriebe 	Produkte Gasregler 	Produkte Anlagen für Aufschneitanwendungen 
Varianz & Individualisierungsgrad Hoher Individualisierungsgrad mit 70% Sonderanfertigungen Teile pro Stück 100 - 150 Einzelteile 	Varianz & Individualisierungsgrad Hohe Anzahl an Produktvarianten mit verschiedensten Spezifikationen Teile pro Stück 120 - 150 Einzelteile 	Varianz & Individualisierungsgrad Produkt mit enormer Komplexität und hoher Variantenanzahl Teile pro Stück > 1.000 Einzelteile (Gesamtanlage) 

Abbildung 3: Produkte und Varianz der Anwendungspartner

Für die Entwicklung des Systems wurden im Rahmen von Produktionsbegehungen gemeinsam mit den drei Anwendungspartnern **Referenzprodukte** identifiziert, die bisher auf Basis von Erfahrungswissen montiert werden. Die gewählten Referenzprodukte spiegeln typische Montageprozesse der Anwenderunternehmen wider und besitzen aufgrund ihrer Komplexität sowie der bisher wenig ausführlichen Arbeitspläne zugleich ein hohes Potenzial zur Sicherung des impliziten Wissens. Zusätzlich zu der Identifikation der Referenzprodukte wurden die für die Aufnahmen relevanten Prozessschritte und Rahmenbedingungen für die Erstellung des nachfolgend beschriebenen Sensorik Konzepts analysiert.

In Unterarbeitspaket 1.2 erfolgten die Definition aufzunehmender Daten, die Datenaufnahme und die Anonymisierung. Neben der Identifikation der relevanten Prozessschritte, wurde in Workshops durch das gesamte Konsortium ein **gemeinsames Zielbild** der zu entwickelnden Softwarelösung in Form von Use-Cases definiert. Dies diente gemeinsam mit den zuvor abgeleiteten Rahmenbedingungen für die Aufnahme der unternehmensspezifischen Prozessschritte als Basis für die Auswahl der aufzunehmenden Daten und des Sensorkonzepts sowie der zu entwickelnden KI-Module in Arbeitspaket 2. Die Use-Cases reichen von der Montageprozessaufnahme bis zum automatisierten Transfer auf unbekannte Prozesse über einen modularen Prozessbaukasten.

In Unterarbeitspaket 1.3 erfolgte die Erarbeitung und Umsetzung des Sensorkonzepts. Für die technische Umsetzung der Datenaufnahme entsprechend dem entwickelten Hierarchiemodell wurden bei der Entwicklung des **Sensorkonzepts** verschiedene Technologien betrachtet.

Entsprechend des erarbeiteten Sensorkonzepts wurde bei jedem Anwendungspartner zur Erstellung der Trainings- und Validierungsvideos jeweils ein **Montagearbeitsplatz mit der benötigten Hardware** ausgestattet. Um eine hohe Technologieakzeptanz bei den Mitarbeitenden zu erreichen, wurde bei der Ausstattung der Arbeitsplätze lediglich ein geringer Eingriff in den Arbeitsbereich vorgenommen, sodass Montageprozesse ungehindert durchgeführt werden können. Die entsprechende Hardware umfasste insbesondere eine einzelne Kamera, die ungefähr 80 cm über dem Arbeitsplatz befestigt wurde und diesen von oben beobachtete, sowie einen Computer. Wie auf der linken Abbildung dargestellt, konnte damit der gesamte Montagetisch und ein Stück des Oberkörpers und insbesondere die Hände der WerkerInnen erfasst werden. Zusätzlich zu den Arbeitsplätzen bei den Anwenderunternehmen wurde, wie auf der rechten Abbildung dargestellt, ein Laborarbeitsplatz am WZL eingerichtet, um das Hardwaresetup, die Datenaufnahme und die resultierende Anwendung testweise durchführen und demonstrieren zu können.

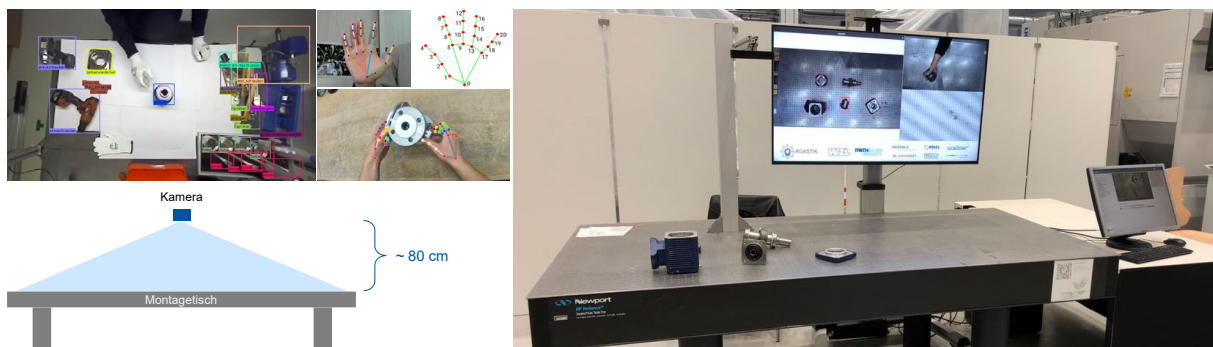


Abbildung 4: Laborarbeitsplatz am WZL mit einer einzelnen Kamera

Um den **Mitarbeiterfokus und Technologieakzeptanz** nicht nur im Versuchsaufbau, sondern über das gesamte Projekt und die zu entwickelnde Anwendung hinweg sicherzustellen, wurden von Beginn des Projekts an vielseitige Maßnahmen zur Gewährleistung von Mitarbeiterakzeptanz und Datenschutz getroffen. Insbesondere wurde dieser Aspekt durch die Einbindung einer Wirtschaftspsychologin frühzeitig in den Fokus gestellt. Hierzu erfolgte 2021 eine initiale Analyse durch Vorgespräche der WerkerInnen der Anwenderunternehmen mit der im Forschungsprojekt beauftragten Wirtschaftspsychologin. Dabei wurden mögliche Hürden und Herausforderungen durch den Einsatz andersartiger Messmittel und Überwachungstechnologien aufgenommen. In den Gesprächen zeigten sich die WerkerInnen offen gegenüber der entwickelten Lösung und bereit für erste Tests. Anfang 2022 erfolgte darüber hinaus eine qualitative Vignettenstudie, bei der Interaktionsbeziehung und Akzeptanzfaktoren zur Entwicklung konkreter Gestaltungshinweise analysiert wurden. Die folgenden Arbeiten fanden teils während anderer Arbeitspakete statt, sind jedoch aufgrund der thematischen Ähnlichkeit hier aufgeführt. Ende 2022 folgte die Einbindung der Ergebnisse der Vignettenstudie in einem Workshop. Dabei wurden konkrete Gestaltungshinweise bzw. pragmatische Umsetzungshilfen im Forschungsprozess erarbeitet. 2024 erfolgte die Evaluierung in Interviews. Dabei wurden der Erfolg kontrolliert, Hinweise für die weitere Entwicklung, zukünftige Nutzung und Etablierung des Systems erarbeitet sowie Ergänzungen der wissenschaftlichen Veröffentlichung vorgenommen. Die wesentlichen Ergebnisse durch die wirtschaftspsychologische Untersuchung waren folgende fünf Gestaltungsparadigmen. 1. Kompetenzwahrnehmung: Einschränkungen in der Nutzung der individuellen Kompetenz resultiert in Reaktanz und möglichen Workarounds oder Problemumgehungen. Kompetenzerweiterung durch technologische Arbeitsartefakte erhöht die Akzeptanz und das subjektive Wohlbefinden. 2. Mensch-Maschine-Teamwork: Individuelle Autonomiesicherung begünstigt die Technologieakzeptanz. Menschliche Beteiligung am Arbeitsergebnis erhöht die subjektive Zufriedenheit und allgemeine Identifikation mit dem Job. 3. Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine: Partizipation sichert effiziente Kollaboration. Wahlmöglichkeiten im Operationsmodus sichern das Wohlbefinden und die Akzeptanz, regen zur Nutzung an. 4. Individuelle Bedeutung der Arbeit: Bei Aufgabenerfüllung muss eine eindeutige und ehrliche Rückmeldung an den Nutzer erfolgen, die beschreibt, wie die eigentliche Aufgabe gemeinsam erledigt wird bzw. Zusammenhänge müssen inhaltlich dargestellt werden. Authentische Arbeitsteilung und Information dazu sichern die

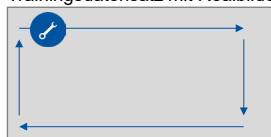
Bedeutungsebene. 5. Technologieakzeptanz: Technologietransparenz sichert Akzeptanz und Vertrauen. Internes Training sichert Akzeptanz und umgeht den Prüfungsschritt einer externen Lösung.

Um die Technologieakzeptanz auch in Relation zu der Verarbeitung persönlicher Daten zu steigern, wurden Gespräche über **Datenschutz und die Anonymisierung** der Daten geführt. Durch die gewählte Sensortechnologie wurden im Rahmen des Projekts und der entwickelten Anwendung Videodaten der WerkerInnen und ihres Arbeitsprozesses aufgenommen, aus denen Rückschlüsse über die Identität und persönliche Daten möglich sind. Im Austausch mit der Wirtschaftspsychologin und den Anwenderunternehmen wurde die Idee der Anonymisierung verworfen, da diese mit einem unverhältnismäßigen Aufwand einhergeht, während durch gängige Anonymisierungsmethoden gleichzeitig nicht sichergestellt werden kann, dass persönliche Daten tatsächlich irreversibel entfernt wurden. Stattdessen konnten WerkerInnen basierend auf fundierten Informationen über die Datenaufnahme und damit einhergehenden Konsequenzen, insb. Rückverfolgbarkeit persönlicher Daten, informiert in die Teilnahme einwilligen. So wurde sowohl das Recht auf Datensouveränität gewährt als auch eine technologisch akzeptierte und effektiv umzusetzende Anwendung entwickelt.

In Unterarbeitspaket 1.4 erfolgte das Erstellen eines annotierten Datensatzes. Nach Fertigstellung des Versuchsaufbaus und Einwilligung der WerkerInnen wurden bei den drei Anwendungspartner die **Aufnahme und Annotation der Montageprozesse** vorgenommen. Alle Partner haben die folgenden aufwändigen Aufnahmen und Annotationen tatkräftig unterstützt. Dazu wurden zunächst Videos der relevanten Werkzeuge aufgenommen, bei denen die Objekte linear vor der Arbeitsoberfläche bewegt wurden. Durch diese Vorgehensweise wurden umfangreiche Daten erzeugt, die für das Training der in Arbeitspaket 2 beschriebenen Module genutzt werden konnten. Der Trainingsdatensatz für Werkzeuge umfasste mehr als 50.000 Bilder für 11 verschiedene Werkzeugklassen. Um die Label bzw. Markierungen der Objekte zu erstellen, die für das Anlernen der KI-Algorithmen mit Supervised Learning notwendig sind, wurden die Daten konvertiert und mit dem Software Tool Matlab verarbeitet. Durch die linearen Bewegungen wurden digitale Boxen semi-automatisiert mittels Interpolation um zu erkennende Objekte gelegt. Neben einzelnen Objekte wurden bei den Anwendern vollständige Montageprozesse aufgenommen. Die Aufnahmen wurden zum Testen der KI-Algorithmen im Rahmen des Arbeitspakets 3 benötigt. Für die Aufnahmen des Gesamtprozesses wurden Label für die Werkzeuge, Bauteile, Hände, Handaktivitäten, Bewegungen der Objekte und Kollisionen der Objekte erstellt, um alle Module validieren zu können. Bei allen Aufnahmen wurden die Datenschutzbestimmungen eingehalten.

Neben diesen auf Realdaten basierenden Datensätzen wurde in Unterarbeitspaket 1.4 zudem ein **Trainingsdatensatz aus synthetischen Bildern** für die Bauteilerkennung generiert. Dadurch wird ein aufwandsarmes Anpassen der Bauteilerkennung an prozessindividuelle Bauteile ermöglicht. Dieser Ansatz wurde gewählt, da für Objekte mit praktisch unbegrenzter Varianz, wie es bei den Bauteilen von Industrieunternehmen gegeben ist, das Erstellen eines endlichen Datensatz mit realen Bildern und insbesondere den entsprechenden Annotationen unverhältnismäßig ist. Um synthetische Daten der Bauteile zu erzeugen, wurden die CAD-Modelle als Basis genutzt. Die Herausforderung dabei war die sogenannte „Reality Gap“, also die Unterschiede zwischen der realen und künstlichen Datendistribution, die entstehen, weil die synthetischen Daten Eigenschaften der realen Welt, wie beispielsweise Farben und Texturen, nicht ausreichend realitätsgetreu und mit genügend Varianz darstellen. Zur Begegnung dieser Herausforderung hat sich im Projekt Domain Randomization bewährt, also die zufällige Veränderung der im Trainingsdatensatz dargestellten Objekteigenschaften [EGGE24].

Trainingsdatensatz mit Realbildern



Systematisches Bewegen des Objekts über der Tischebene



Ein oder mehrere Werkzeuge je Bild

Trainingsdatensatz mit synthetischen Bildern



CAD-Modell des Produkts



Aus CAD-Modellen wurden synthetische Bilder generiert

Abbildung 5: Erstellte Trainingsdatensätze

II.3.1.2 Arbeitspaket 2: Datenaufbereitung und KI-Training

Das Ziel des Arbeitspakets 2 war die explorative Analyse des in Arbeitspaket 1 erstellten Datensatzes und die Entwicklung der Erkennungs- und Logikmodule, mittels derer die Videoaufnahmen der Montageprozesse für die in Arbeitspaket 4 entwickelte Prozessmodellierung vorverarbeitet werden. Arbeitspaket 2 zahlte also auf den zweiten, mittleren Teil des Lösungskonzepts ein. Das Arbeitspaket umfasste dazu die Unterarbeitspakete 2.1 Explorative Analyse anonymisierter Daten, 2.2 Anlernen einfacher Detektionsalgorithmen, 2.3 Umsetzung von Algorithmen zur Klassifizierung und 2.4 Testbasierte Optimierung des KI-Algorithmus. Die Federführung lag bei dem WZL. Die nachfolgenden Absätze erläutern zunächst die **Machine Learning Module**, deren Rolle im Lösungskonzept folgende Abbildung zeigt.

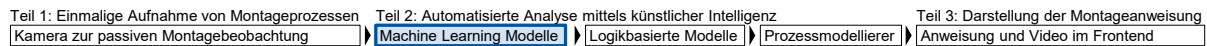


Abbildung 6: Machine Learning Module in Teil 2 im Gesamtkonzept: Automatisierte Analyse mittels KI

Dabei wurde die Vorverarbeitung in insgesamt sechs Objekterkennungs- und Nachverarbeitungsmodulen aufgeteilt, in denen am Prozessschritt beteiligte Objekte, Aktivitäten der Hände und Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten mittels Deep Learning Algorithmen extrahiert wurden. Der modulare Aufbau wurde gewählt, um eine Unabhängigkeit zwischen der Erkennung von prozessunabhängigen Komponenten wie Werkzeugen und Handbewegungen und der Erkennung von prozessspezifischen Bauteilen zu schaffen. Jedes Modul ermittelt dabei eine relevante Information, aus denen nachgehend im Prozessmodellierer der Montageschritt konstruiert werden kann.

In Unterarbeitspaket 2.1 erfolgte die explorative Analyse anonymisierter Daten. Als Basis für das Anlernen der einzelnen KI-Modelle dienten die in Arbeitspaket 1 erstellten Datensätze, wie auch öffentlich zugängliche Datensätze. Zu Beginn wurden die existierenden Datensätze aus Arbeitspaket 1 anhand einer **explorativen Datenanalyse** untersucht und für das Training strukturiert. Im Falle der Werkzeugerkennung wurde der Datensatz analysiert und anhand der identifizierten Merkmale in die Klassen unterteilt und zusammengefasst, welche von der KI erkannt werden sollten. Beim Bilden der Klassen für das KI-Training handelte es sich um einen iterativen Prozess, bei dem die Klassen im Verlauf des Anlernens immer wieder angepasst wurden. Zusätzlich wurde der Datensatz hinsichtlich der quantitativen Ausgeglichenheit bewertet, wie nachfolgend in der Beschreibung der Werkzeugerkennung weiter detailliert. Für das Training der Bauteilerkennung war nach der Generierung der synthetischen Daten in Arbeitspaket 1 keine weitere Datenvorverarbeitung notwendig, da Anforderungen an die Daten direkt während der künstlichen Erzeugung umgesetzt werden konnten. Die Handerkennung erforderte keine gesonderten Daten, da in diesem Fall auf ein vortrainiertes Modell der Google Media Pipe gesetzt wurde, welches größtenteils in der iterativen Optimierungsschleife von Arbeitspaket 2 und 3 auf den Videodaten der gesamten Montageprozesse angewendet wurde. Für die Entwicklung der Handaktivitätserkennung waren im Gegensatz dazu einige Vorverarbeitungsschritte notwendig, da in diesem Fall auf öffentliche Daten zurückgegriffen wurde, die auf den spezifischen Anwendungsfall und die Daten des Projekts abgestimmt werden mussten. Genutzt wurde der öffentliche Datensatz „Assembly101“, der Videoaufnahmen der Demontage von 101 verschiedenen Spielzeugen enthält und insgesamt 24 Feinaktivitäten darstellt. Um den Datensatz für die Klassifizierung von industriellen Montageaktionen im Kontext des Projekts nutzbar zu machen, wurden die Tätigkeitsklassen der öffentlichen Daten auf die fünf Aktivitäten reduziert, die zuvor in Arbeitspaket 1 für die Identifizierung der Montageschritte festgelegt worden waren. Nachdem die explorative Analyse und die initiale Vorverarbeitung der Datensätze abgeschlossen war, wurden darauf basierend die Erkennungsmodule entwickelt und mittels weiterer Datenverarbeitungsschritte optimiert, wie nachfolgend beschrieben.

In Unterarbeitspaket 2.2 erfolgte das Anlernen einfacher Detektionsalgorithmen. Die **Detektion der Bauteile** und ihrer Position auf dem Montagetisch ist maßgeblich für die Ableitung der Montageanweisungen, beispielsweise um die Verbauereihenfolge zu ermitteln. Um die praktische Anwendbarkeit der Bildverarbeitungspipeline sicherzustellen, bestand bei der Bauteilerkennung die

Herausforderung, eine robuste Erkennungsleistung für Bauteile zu gewährleisten, für die aufgrund der individuellen Prozessbezogenheit in realistischen industriellen Szenarien in der Regel keine realen Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde hier auf den synthetischen Datensatz zurückgegriffen, der in Arbeitspaket 1 erzeugt wurde. Anhand der generierten Daten wurde nachfolgend ein RetinaNet Modell trainiert, das Bauteile basierend auf ihrer synthetischen Repräsentation identifizieren kann. Als Teil der Optimierungsschleife in Arbeitspaket 2 und 3 wurde das Modul auf den Realdaten der Anwenderunternehmen, die in Arbeitspaket 1 gesammelt wurden, evaluiert und schrittweise optimiert.



Abbildung 7: Generierung von synthetischen Daten (links) und Erkennung von realen Bauteilen (rechts)

Ähnlich wie die Erkennung der Bauteile ist auch die **Detektion der Werkzeuge** essenziell, um den Montageschritt und die entsprechende Anweisung zu extrahieren. Anders als die Bauteile sind die Werkzeuge jedoch nicht prozessgebunden, so dass hier direkt mit den realen Daten der Anwendungspartner aus Arbeitspaket 1 gearbeitet wurde. Um die Werkzeugererkennung umzusetzen, wurden die Schritte Datenvorverarbeitung, Training des KI-Modells und Validierung mit anschließend iterativer Optimierung (Arbeitspaket 3) durchlaufen. In der Phase der Datenvorverarbeitung wurde der Datensatz nach einer explorativen Analyse hinsichtlich der Werkzeugklassen bewertet. Aus der Analyse ging hervor, dass eine unausgeglichene Verteilung der Daten über die 11 Werkzeugklassen vorliegt. Um negativen Auswirkungen auf die Modellperformanz vorzubeugen, wurden die Daten der dominanten Werkzeugklassen initial auf jeweils 7.000 Instanzen begrenzt, während die Daten aus unterrepräsentierten Klassen durch transformative Methoden zur Datenerweiterung künstlich vermehrt wurden. Der finale, balancierte Datensatz bestand aus je 10.661 Instanzen pro Werkzeugklasse, von welchem 80 Prozent der Daten zum Training des KI-Modells verwendet wurden und 20 Prozent zur Validierung. Als Modell für die Werkzeugererkennung wurde das Objekterkennungsmodell YOLOv8m ausgewählt, da sich dieses durch Robustheit, Vielseitigkeit und flexible Funktionalität für die Datenverarbeitung auszeichnet. Das Training folgte einem iterativen Ansatz, während dem kontinuierlich unterschiedliche Modellkonfigurationen und Hyperparameter durchlaufen und evaluiert wurden, um die Performanz und Robustheit der Werkzeugererkennung zu optimieren. Getestet und evaluiert wurde das Modell kontinuierlich auf Testdaten (Montagevideos) der Industriepartner, welche genutzt wurden, um den iterativen Trainingsansatz (Arbeitspaket 3) umzusetzen. Durch dieses Vorgehen wurde eine zufriedenstellende Performanz des Werkzeugererkennungsmoduls erreicht [RIES24].

Das Modul zur **Detektion der Hände** gibt in Verbindung mit der Kollisions- und Bewegungserkennung Auskunft darüber, welche Objekte am aktuellen Montageschritt beteiligt sind. Im Gegensatz zu den Objekterkennungsmodulen wurde für das Handerkennungsmodul ein vortrainiertes Modell von Google MediaPipe, MediaPipe Hands, verwendet. Aufgrund der umfangreichen Trainingsdaten, auf denen das Modell basiert, ist es hochgradig robust in der Anwendung und erfordert keinen separaten Finetuning-Prozess auf den Montagedaten. Allerdings zeigte sich bei der Anwendung des Modells auf den projektspezifischen Daten, dass das Tragen von Handschuhen während der Montage die Detektionsfähigkeiten des Modells negativ beeinflusst. In diesem Fall können die Hände nicht mehr konstant detektiert werden und eine ausreichende Performanz des Erkennungsmoduls für die Extraktion der Montageanweisungen kann nicht mehr sichergestellt werden. Aus diesem Grund wurden als Lösung für dieses Problem ausschließlich Daten verwendet, auf denen während der Montage keine Handschuhe getragen werden. Für die weitere Industrialisierung des Systems sollte ein Erkennungsmodul eingesetzt werden, welches mit Handschuhen einsetzbar ist.

Neben der Positionierung der Hände ist insbesondere die **Klassifizierung der Handaktivität** in vordefinierte Tätigkeitsklassen entscheidend für das Ableiten des korrekten Montageschritts im Prozessmodellierungsmodul (siehe Arbeitspaket 4) und wurde in einem separaten Modul implementiert. Um die Aktivitätserkennung umzusetzen, wurde eine zweiteilige Verarbeitungspipeline aufgebaut, die zunächst Merkmalsvektoren konstruiert und diese zur Klassifizierung der Aktivität nutzt [MORI24]. Wie oben beschrieben, wurde das Training des KI-Modells der öffentliche Datensatz „Assembly101“ genutzt. Um die Daten nach der initialen Präparation weiter zu verarbeiten, wurden zunächst mithilfe des MediaPipe Frameworks Handskelettdaten (Merkmalsvektoren) extrahiert, die für je 21 Gelenke pro Hand die jeweiligen x-, y-, und z-Koordinaten enthalten (siehe Abbildung 9).

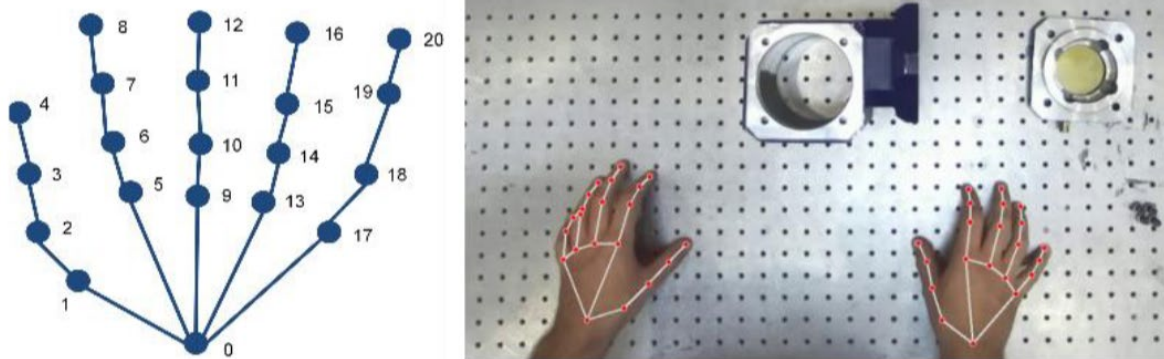


Abbildung 8: Durch den MediaPipe Framework generierte Handskelettdaten

In Unterarbeitspaket 2.3 erfolgte die Umsetzung von Algorithmen zur Klassifizierung. Mittels dieser Merkmalsvektoren wurde im zweiten Schritt ein Graph Convolutional Network (exakt: Multi-stream, attention-enhanced Adaptive Graph Convolutional Network (MS-AAGCN)) trainiert, das als Teil des Arbeitspakets 3 auf den industriellen Montagedaten der Anwenderunternehmen getestet und nachtrainiert wurde.

Arbeitspaket 2 zählte im zweiten, mittleren Teil des Lösungskonzepts auch auf **Logikbasierte Module** ein, deren Rolle im Lösungskonzept folgende Abbildung zeigt und die in den nachfolgenden Absätzen erläutert werden. Obwohl die Detektion der Bauteile, Werkzeuge und Hände sowie die Klassifizierung der Handaktivität maßgeblich zu der Erkennung des Montageschritts beitragen, sind insbesondere die Interaktionen zwischen den Elementen kritisch für die korrekte Interpretation der Videodaten. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Detektionsmodule weiterverarbeitet durch die beiden Logikbasierten Module, bevor sie final durch den Prozessmodellierer interpretiert werden. Um Interaktionen zwischen Objekten zu erkennen, werden dabei Überlappungen, nachfolgend Kollisionen genannt, und Bewegungen von Objekten analysiert.



Abbildung 9: Logikbasierte Module in Teil 2 im Gesamtkonzept: Automatisierte Analyse mittels KI

Für die **Bewegungserkennung** wurden verschiedene Algorithmen einzeln und in Kombination getestet, die auf der Pixelebene die An- oder Abwesenheit von Bewegung klassifizieren. Zusammen mit den Objektdetektionen wurde dadurch eine Aussage darüber möglich, welche der zuvor erkannten Objekte sich in Bewegung befinden und folglich mit hoher Wahrscheinlichkeit am aktuellen Montageschritt beteiligt sind [BURG25]. Durch den Einsatz des Dense Optical Flow Algorithmus für die pixelbasierte Bewegungserkennung konnte mit dieser Methode ein robustes Bewegungserkennungsmodul im industriellen Montagekontext umgesetzt werden.

Die **Kollisionserkennung** wurde umgesetzt, indem die Schnittmenge zwischen den Bounding Boxes der erkannten Objekte berechnet werden [RIES24]. Dazu wurden zunächst Kombinationen aus Objekttypen definiert, deren Überschneidung Rückschlüsse auf die abgebildete Montagetätigkeit zulässt. Als informativ wurden die Paare Bauteil-Werkzeug, Werkzeug-Hand und Bauteil-Hand bewertet, im Gegensatz beispielsweise zu der Überschneidung von zwei Werkzeugen (Werkzeug-

Werkzeug) oder Bauteilen (Bauteil-Bauteil). Für die Überschneidung wurde durch eine Exploration verschiedener Werte ein geeigneter Schwellenwert festgelegt, ab dem eine Schnittmenge zwischen den definierten Objektpaaren als Kollision registriert wird. Durch diese Methodik konnten Informationen darüber generiert werden, welche Objekte miteinander interagieren und dementsprechend am aktuellen Prozessschritt beteiligt sind.

In Unterarbeitspaket 2.4 erfolgte die testbasierte Optimierung des KI-Algorithmus. Die entsprechenden Tests waren Teil von Arbeitspaket 3 und werden nachfolgend beschrieben.

II.3.1.3 Arbeitspaket 3: Iteratives Testen des KI-Algorithmus anhand unbekannter Montageprozesse

Das Ziel von Arbeitspaket 3 ist, wie bereits im Absatz zu Arbeitspaket 2 kurz beschrieben wurde, die Validierung und Optimierung der entwickelten KI-Module mit Realdaten der Montageprozesse. Dazu wurde eine Systematik zur Generierung von Montageplanungsdaten entwickelt. Diese Tests erfolgten parallel zum vorherigen Arbeitspaket 2, um in Arbeitspaket 2.4 die iterative Optimierung der KI-Algorithmen zu ermöglichen. Die Federführung lag bei dem WZL.

II.3.1.4 Arbeitspaket 4: KI-Implementierung zur automatisierten Generierung von Montageplanungsdaten

Arbeitspaket 4 umfasste die Unterarbeitspakete 4.1 Systematik zur Generierung von Montageplanungsdaten, 4.2 Implementierung des KI-Algorithmus als Software-Tool und 4.3 Implementierung des Tools als mobile Applikation. Die Federführung lag bei Mobile Software AG und Lorenz Software GmbH. Das Arbeitspaket zahlte unter anderem auf den **Prozessmodellierer** im zweiten, mittleren Teil des Lösungskonzepts ein, wie die folgende Abbildung zeigt. Dieser wurde im Unterarbeitspaket 4.1 entwickelt und wird in den nachfolgenden Absätzen erläutert.



Abbildung 10: Prozessmodellierer in Teil 2 im Gesamtkonzept: Automatisierte Analyse mittels KI

Im **Prozessmodellierer** werden alle Ergebnisse der Erkennungsmodule zu einem gemeinsamen Prozessmodell verknüpft [BURG24]. Dazu war geplant, dass der Prozessmodellierer zwei Aufgaben erfüllt, erstens die Tätigkeitssegmentierung und zweitens die Tätigkeitsklassifizierung.

Die **Tätigkeitssegmentierung** als erste Aufgabe des Prozessmodellierers sollte das gesamte aufgenommene Video in unmittelbar aufeinanderfolgende Montageabschnitte und -schritte unterteilen. Bei dieser Aufgabe wurde auf eine automatisierte Lösung verzichtet, da die untersuchten Lösungen basierend auf Handbewegungs- oder Baugruppenerkennung keine ausreichende Robustheit aufgewiesen haben. Stattdessen wurde ein Taster verwendet, mit dem die Montagemitarbeitenden bei Prozessaufnahmen manuell das Ende der Montageschritte markierten. Während diese Lösung zum einen aufwandsarm während der Videoaufnahme erfolgen kann, wird zudem das implizite Wissen der WerkerInnen bzgl. der optimalen Tätigkeitssegmentierung direkt aufgenommen.

Die regelbasierte **Tätigkeitsklassifizierung** als zweite Aufgabe des Prozessmodellierers ordnet sequenziell jedem Montageschritt beteiligte Werkzeuge, Bauteile und durchgeführte Montagetätigkeit zu.

Erforderliche Indikatoren sind insbesondere die Kollisions- und die Handbewegungserkennung aus den vorhergehenden Erkennungsmodulen. Im ersten Schritt der Tätigkeitsklassifizierung werden Werkzeuge und Bauteile den Montagetätigkeiten regelbasiert anhand von Interaktionserkennung zugeordnet. Objekte wurden als aktiv angenommen, wenn sie entweder mindestens in 50 Frames oder in mindestens 30 % des Segments als in Bewegung erkannt wurden. Im zweiten Schritt der Tätigkeitsklassifizierung werden Montagetätigkeiten regelbasiert anhand von genutzten Bauteilen oder getätigten Bewegungskombinationen klassifiziert. Das folgende Beispiel veranschaulicht die **Regeln zur Klassifizierung von Montagetätigkeiten**. So wurde beispielsweise geprüft, ob in der Handbewegungserkennung mehr als 70% der Frames als Rotate bzw. Rotation und Tilt bzw. Neigung

erkannt wurden und in über 45 Frames ein aktives Schraubwerkzeug erkannt wurde. Wenn die Bedingungen des vorherigen Prüfschritts nicht erfüllt waren, wurde geprüft, ob in über 45 Frames ein aktives Schraubwerkzeug erkannt wurden. Wenn die Bedingungen der beiden vorherigen Prüfschritte nicht erfüllt waren, wurde geprüft, ob in der Handbewegungserkennung mehr als 70% der Frames als Rotate und Tilt erkannt wurden. Wenn die Bedingungen eines dieser Prüfschritte erfüllt waren, handelte es sich um die Tätigkeit Schrauben. Die Prüfschritte wurden in der Reihenfolge abnehmender Zuverlässigkeit der Erkennung durchlaufen, um eine maximale Qualität der Erkennung zu gewährleisten.

Arbeitspaket 4 zahlte außerdem auf die **Darstellung der Montageanweisung** im dritten, rechten Teil des Lösungskonzepts ein, wie die folgende Abbildung zeigt. Diese wurde in den Unterarbeitspaketen 4.2 Implementierung des KI-Algorithmus als Software-Tool und AP 4.3 Implementierung des Tools als mobile Applikation entwickelt und wird in den nachfolgenden Absätzen erläutert.

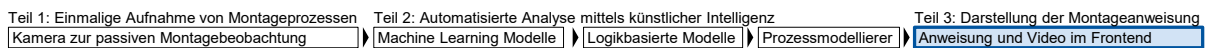


Abbildung 11: Teil 3 im Gesamtkonzept: Darstellung der Montageanweisung

Bei der Entwicklung des Frontends stand neben der intuitiven und übersichtlichen Bedienung eine menschenzentrierte Gestaltung im Fokus. Im **Login Screen** wurde in Abstimmung mit der Wirtschaftspsychologin Frau Janböcke auf großflächige Teambilder inkl. Kernelementen der initial durchgeführten Interviews gesetzt, um die Mitarbeitenden anzusprechen. Neben diesen Bildern kann man sich unter dem Logo der Anwendung mit dem persönlichen Nutzungsprofil anmelden. Der Login Screen und die Bilder sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

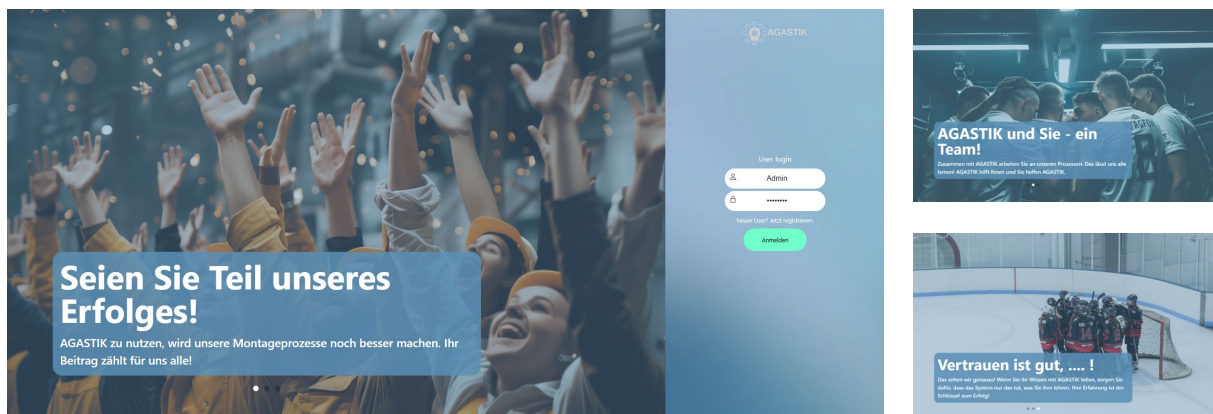


Abbildung 12: Login Screen im Frontend

Auf der **Startseite** wurde vor allem Wert auf eine übersichtliche Darstellung der einzelnen Projekte bzw. Montageanweisungen und deren Status gelegt. Zudem wurden erneut Kernaussagen der initial durchgeführten Interviews eingebunden. Die Startseite besteht am oberen Bildschirmrand aus einer blauen Leiste, die links das Logo der AGASTIK-Anwendung zeigt, in der Mitte eine Eingabefeld zur Suche nach Projekten und rechts eine Schaltfläche zum persönlichen Nutzungsprofil. Wesentlicher Inhalt der Startseite ist eine Liste aller für das jeweilige Nutzungsprofil freigeschalteten Projekte bzw. der darin enthaltenen Montageanweisungen. Für jedes Projekt werden ein Name, das Datum der letzten Änderung, der Status und die Freigabe angezeigt. Der Status beschreibt, ob das Projekt bereits bereit für die Nutzung als Montageanweisung ist oder ob es noch in Bearbeitung bspw. durch die Arbeitsvorbereitung ist. Mit dem blauen Plus-Symbol kann ein neues Projekt mit einer neuen Montageanweisung angelegt werden. Rechts von der Projektliste zeigen Bilder aus der Montage mit Kernaussagen aus den durchgeführten Interviews den Fokus der Software auf die Mitarbeitenden. Die Startseite ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

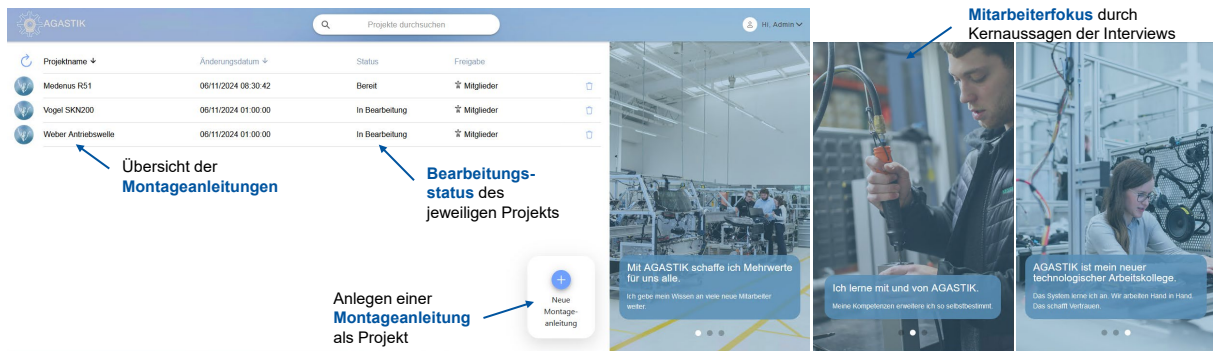


Abbildung 13: Startseite im Frontend

Die **Montageanweisungen** wurden durch die Software automatisch benutzerfreundlich dargestellt. Neue Mitarbeitende können das dokumentierte Expertenwissen als videounterstützte Montageanweisungen im Anlernprozess oder als Absicherung bei Unsicherheiten nutzen.

Am linken Bildschirmrand ist eine Übersicht der Montageabschnitte und -schritte zu sehen. Oben mittig ist eine in Montageabschnitte gegliederte Videoaufnahme aus der Vogelperspektive zu sehen. Dieses Video kann mit den eingeblendeten Pfeiltasten sowie über die Tastatur intuitiv und ohne Anlernaufwand bedient werden. Unter dem Video sind Montageschritte von oben nach unten chronologisch aufgelistet. Sie umfassen jeweils auf weißem Hintergrund von links nach rechts ein kleines Symbol der Tätigkeit, eine Nummerierung, eine Montagetätigkeit sowie Start- und Endzeit. Sie umfassen auf blauem Hintergrund genutzte Bauteile mit genauer Bezeichnung. Sie umfassen auf grünem Hintergrund benutzte Werkzeuge. Sie umfassen außerdem auf gelbem Hintergrund manuell ergänzbare Anmerkungen oder Hinweise. Die beschriebene Montageanweisung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

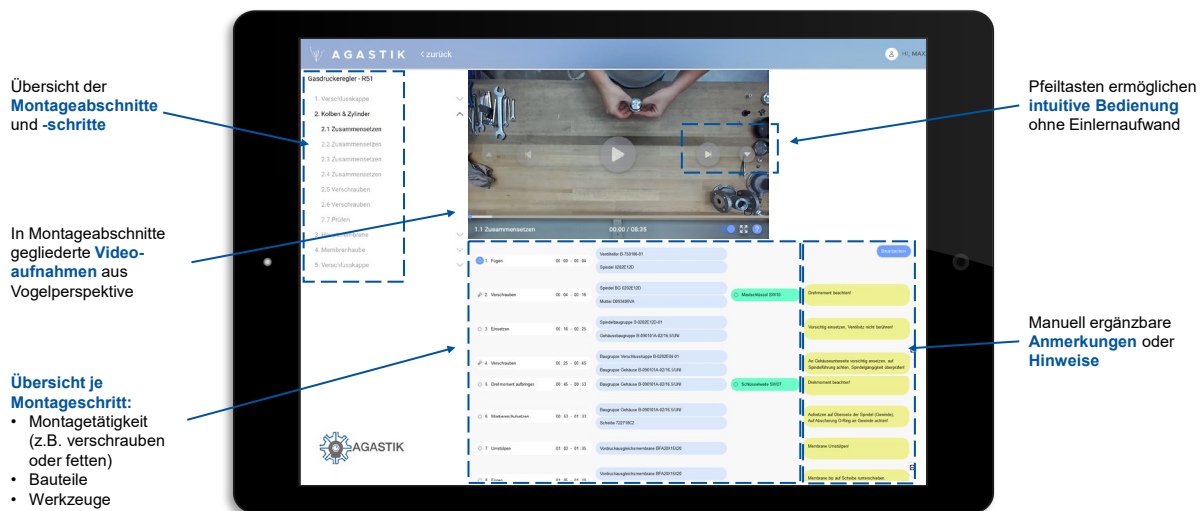


Abbildung 14: Montageanweisung im Frontend

II.3.1.5 Arbeitspaket 5: Anwendung und Validierung

Das **Validierungsvorgehen** berücksichtigte technische, organisatorische und vor allem menschliche Perspektiven. Die Federführung lag bei Wilhelm Vogel GmbH Antriebstechnik und bei dem WZL der RWTH Aachen. Die Validierung bewertete erstens die Systemgenauigkeit, zweitens den Nutzen in der Montageplanung, drittens den Nutzen in der Montage, viertens die wahrgenommene Unterstützung und fünftens das Forschungspotential. Das Vorgehen zur Auswertung der **Systemgenauigkeit** war, quantitativ auszuwerten, welcher Anteil an Bauteilen, Werkzeugen und Tätigkeiten in Videos aller Anwendungspartnern erkannt wurden. Das Vorgehen zur Bewertung des **Nutzens in der Montageplanung** war, dass Montageplanende mit dem System automatisiert erstellte Anweisungen

manuell ergänzt haben, wobei die Dauer gemessen wurde und wonach sie befragt wurden. Das Vorgehen zur Bewertung des **Nutzens in der Montage** war, dass Montagemitarbeitende anhand der Anweisungen des Systems Bauteile montiert haben, wonach sie befragt wurden. Das Vorgehen zur Bewertung der wahrgenommenen **Unterstützung** waren Interviews mit den Mitarbeitenden, die das System angewendet hatten. Das Vorgehen zur Identifikation der **Forschungspotentiale** umfasste Workshops, in denen die Teilnehmenden einerseits Optimierungspotentiale bestehender Funktionen und andererseits Erweiterungspotentiale um noch nicht bestehende Funktionen entlang der folgenden vier Anwendungsschritte identifizierten: Erstens Videoaufnahme der Montage durch WerkerInnen, zweitens Erstellung der Montageanweisung durch künstliche Intelligenz, drittens Nacharbeit der Montageanweisung durch PlanerInnen oder WerkerInnen und viertens Anwendung der Montageanweisung durch WerkerInnen.

Drei **Ergebnisse bzgl. Systemgenauigkeit** sind maßgeblich. Erstens funktionierte die Bauteilerkennung noch nicht robust, denn das Training mit synthetischen Daten ist ein aktives Forschungsgebiet, in dem es noch keine Standardlösungen gibt, das aber gegenüber dem für die Werkzeuge verwendeten Training mit realen Daten enormes Potenzial bietet, das Training perspektivisch aufwandsarm für KMU zu ermöglichen. Derzeit ist es aufgrund der erforderlichen Kompetenzen und Rechenleistung durch KMU nicht umsetzbar. Die Erkennung mittels des Modells Yolov8 bei Vogel hat deutlich bessere Ergebnisse erzielt als das RetinaNet. Zweitens lieferte die Werkzeugerkennung liefert bereits Mehrwert für die PlanerInnen, insbesondere durch wenige falsche Erkennungen. Drittens wurden Montagetätigkeiten bereits sehr gut erkannt. Die Erkenntnis daraus ist, dass bereits eine sehr gute Zeitersparnis und Entlastung von Planenden erzielt wird, dass aber das Training mit virtuellen Daten für KMU ermöglicht werden muss. Die folgende Abbildung zeigt die diesen Interpretationen zugrundeliegende quantitative Auswertung der Erkennungspräzision des Gesamtsystems.

	Bauteile (erkennbar)	Bauteile (gesamt)	Werkzeuge (erkennbar)	Werkzeuge (gesamt)	Tätigkeiten (erkennbar)	Tätigkeiten (gesamt)
Weber	3%	2%	42%	34%	67%	67%
Video 1	11%	8%	86%	55%	17%	17%
Video 2	0%	0%	0%	0%	100%	100%
Video 3	0%	0%	50%	50%	100%	100%
Video 4	0%	0%	33%	33%	50%	50%
Medenus	0%	0%	68%	67%	100%	29%
Vogel	30%	15%	94%	82%	93%	83%
Video 1	26%	17%	88%	64%	86%	86%
Video 2	33%	13%	100%	100%	100%	80%

Abbildung 15: Auswertung der Erkennungspräzision des Gesamtsystems

Die **Ergebnisse bzgl. Nutzen in der Montageplanung** zeigen großen wahrgenommenen Mehrwert des AGASTIK-Systems und 20 % Zeitersparnis bei der Erstellung von Montageanweisungen. Die nachfolgend verwendete Skala bewertet mit 1,0 sehr positiv, mit 2,0 positiv, mit 3,0 neutral, mit 4,0 teils verbesserungswürdig und mit 5,0 verbesserungswürdig. Der Nutzen der App wurde im Durchschnitt mit 2,43 bzw. positiv bewertet. Einfließende Einzelbewertungen waren positiver Funktionsumfang, teils verbesserungswürdige Aufbereitung der aufbereiteten Montagedaten, positive Möglichkeit zur Fehlervermeidung im Montageprozess, positive Möglichkeit zur Reduzierung von Such- und Orientierungszeiten, teils verbesserungswürdige Integration in den Arbeitsalltag und positive Eignung zum Anlernen neuer Mitarbeitender. Die Bedienbarkeit der App wurde im Durchschnitt mit 1,83 bzw. positiv bewertet. Einfließende Einzelbewertungen waren sehr positive visuelle Gestaltung, positive Übersichtlichkeit, positive Darstellung der Montageschritte und positive Bedienbarkeit des Videos. Die Sicherheit und Stabilität wurden mit Durchschnitt mit 1,50 bzw. sehr positiv bewertet. Einfließende Einzelbewertungen waren sehr positiver Datenschutz und positive technische Stabilität. **Positives**

Feedback umfasste insbesondere die sehr simple Bedienung und die hilfreiche Bezeichnung von Bauteilen und Werkzeugen. **Optimierungspotential** betraf hauptsächlich die zu optimierende Robustheit der Bauteilerkennung sowie zu ergänzende Drop-Down-Menüs, einzublendende Stücklisten, herzustellende Funktionsfähigkeit bei Montage mit Handschuhen, zu vereinfachendes Einfügen der Zeitstempel und zu ergänzende Drag-and-drop-Funktionen.

Die **Ergebnisse bzgl. Nutzen in der Montage** zeigen großen wahrgenommenen Mehrwert des AGASTIK-Systems. Der Nutzen der App wurde im Durchschnitt mit 1,62 bzw. positiv bewertet. Einfließende Einzelbewertungen waren positiver Funktionsumfang, positive Aufbereitung der aufbereiteten Montagedaten, sehr positive Möglichkeit zur Fehlervermeidung im Montageprozess, positive Möglichkeit zur Reduzierung von Such- und Orientierungszeiten, sehr positive Integration in den Arbeitsalltag und sehr positive Eignung zum Anlernen neuer Mitarbeitender. Die Bedienbarkeit der App wurde im Durchschnitt mit 1,44 bzw. sehr positiv bewertet. Einfließende Einzelbewertungen waren positive visuelle Gestaltung, positive Übersichtlichkeit, positive Darstellung der Montageschritte und sehr positive Bedienbarkeit des Videos. Die Sicherheit und Stabilität wurden mit Durchschnitt mit 1,23 bzw. sehr positiv bewertet. Einfließende Einzelbewertungen waren sehr positiver Datenschutz und sehr positive technische Stabilität. **Positiv** bewertet wurden durchweg die intuitive Bedienbarkeit, die Potenziale zur Fehlervermeidung und zur Verringerung von Such- und Orientierungszeiten sowie die Nutzung zum Anlernen neuer Mitarbeitender. Positives Feedback umfasste insbesondere die hilfreiche schrittweise Anzeige der Daten, die sinnvollen Hinweise, die sehr gute Einbindung des Videos, der große Nutzen für die ersten Durchführungen einer lange nicht mehr durchgeführten Montage und die Einarbeit neuer Mitarbeitender. **Optimierungspotential** betraf hauptsächlich die Oberfläche der Software. Feedback zum Optimierungspotential umfasste automatisches Weiterlaufen der Videos nach definierter Zeit auch ohne manuelles Fortsetzen, Anzeige des vorherigen Schritts, Vergrößerung der Videos bspw. mit einer Zoom-Funktion und bildliche Darstellung der Bauteile als CAD-Datei oder Zeichnung.

	Optimierungspotentiale aus Workshops mit Konsortialpartnern	Erweiterungspotentiale aus Workshops mit Konsortialpartnern
1. Videoaufnahme der Montage durch Werker	<ul style="list-style-type: none"> - Systemstart mit exe-Datei - Mobiles Setup in Form eines Aufnahmekoffers 1 - Bessere Videos für bessere Erkennbarkeit der Objekte 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufnahme alternativer Kameraperspektiven - Sprachsteuerung für die Aufnahme 3
2. Erstellung der Montageanweisung durch künstliche Intelligenz	<ul style="list-style-type: none"> - Zuverlässigere Objekterkennung - Abfrage von Montagehinweisen, bspw. Drehmoment, Art des Fetts etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung der Montageschritte durch Fließtext 3 - Erkennung exotischer Bauteile durch 3D-Daten und Stücklisten - Selbstständiges, lokales KI-Training unabhängig von Externen 2 - Schnelle Erstellung für Nacharbeit direkt nach Aufzeichnung - CAD-Upload als einziger manueller Schritt für KI-Training 2
3. Nacharbeit der Montageanweisung durch Planer oder Werker	<ul style="list-style-type: none"> - Abfrage vor Abschluss, ob Schritte abseits des Videos fehlen - Priorisierung kritischer Hinweise - Status auch „nachbearbeitet“ etc., nicht nur „bereit“ - Hervorhebung letzter Änderungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschriftungen für „Aktivität“, „Bauteil“, „Werkzeug“ und „Notiz“ - Integrierte Bedienungsanleitung - Pausierung des Videos noch im selben statt im nächsten Schritt - Größeres Video für besser erkennbare Bauteile ggf. mit Lupe - Größere Bedienelemente - Besser Lesbarkeit bspw. im Video oder bei langen Werkzeugnamen - Schaltfläche zum Spiegeln des Videos - Schritte ohne Mindestdauer
4. Anwendung der Montageanweisung durch Werker	<ul style="list-style-type: none"> - Mobile-App für Tablets - Quittierung von Schritten 	<ul style="list-style-type: none"> - Hinterlegen von Dateien, bspw. Stücklisten und Zeichnungen - Bauteilbenennung durch Dropdown oder Drag-and-drop aus Stückliste - Drag and Drop zwischen Schritten - Zeitstempel über eine grafische Benutzeroberfläche importieren - Autokorrektur-Vorschläge typischer Bezeichnungen - Sprachsteuerung für Korrektur der Anweisung während der Montage 3 - Beschreibung der Montageschritte durch Audioausgabe des Fließtexts - Echtzeitverfolgung, Anleitung und Fehlererkennung der Montage - Alternative Kameraperspektiven - Produktvarianten mit alternativen Videos und Schritten - Checkliste am Ende der Montage - Sprachsteuerung für Rückfragen während der Montage 3

Abbildung 16: Drei Forschungspotentiale: 1 Mobilität, 2 Skalierbarkeit und 3 Sprachverarbeitung

Das **Ergebnis bzgl. Forschungspotentialen** umfasst drei Potentiale: Erstens Mobilität, zweitens Skalierbarkeit und drittens Sprachverarbeitung. Das erste Potential, die **Mobilität**, ist ein Optimierungspotential bestehender Funktionen. Diesbezüglich wurde gefordert, dass ein mobiles Setup in Form eines Aufnahmekoffers entwickelt werden sollte, um Montage unabhängig von an Arbeitsplätze stationär gebundenen Aufnahmesystemen machen zu können. Das zweite Potential, die **Skalierbarkeit**, ist ein Erweiterungspotential um noch nicht bestehende Funktionen. Diesbezüglich wurde gefordert, dass eine Methode zum selbstständigen, lokalen KI-Training unabhängig von Externen entwickelt werden sollte und dass eine Weiterentwicklung der Software das KI-Training durch Upload einer CAD-Datei ohne weitere manuelle Schritt ermöglicht. Das dritte Potential, die **Sprachverarbeitung**, ist ebenfalls ein Erweiterungspotential um noch nicht bestehende Funktionen. Diesbezüglich wurde gefordert, dass eine Sprachsteuerung die Aufnahme ohne manuelle Bedienung erleichtert, dass Montageschritte durch automatisch erzeugten Fließtext beschrieben werden, dass eine

abgeschlossen statt planmäßig Ende Q1 2023. Aufgrund von Parallelisierung konnte das AP4 dennoch größtenteils abgeschlossen werden. Die Systematik aus AP4.1 und das Frontend wurden fertig entwickelt. Frontend und Backend wurden aneinander angebunden. Lediglich die Anbindung der in Container implementierten KI-Modelle an das Backend stand noch aus. Meilenstein 2 verzögerte sich somit auf Q1 2024 statt planmäßig Ende Q4 2023.

Die **Planabweichung 2024 in Arbeitspaketen 4 und 5** werden nachfolgend erläutert. Die Anbindung der in Container implementierten KI-Modelle an das Backend in Arbeitspaket 4 verzögerte sich aufgrund unvorhergesehener Anpassungsbedarfe durch das WZL in der Programmierung für die robuste Funktion der Software. Nach Funktionstests der gesamten Software wurde deren Funktion signifikant verbessert, indem Parameter der Bewegungserkennung und der Prozessmodellierung angepasst wurden. Die Anwendung und Validierung in Arbeitspaket 5 wurden in der planmäßig vorgesehen Dauer abgeschlossen. Der Projektabschluss verzögerte sich somit auf Q4 2024 statt planmäßig Q2 2023.

II.3.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Mittelverwendung entsprach weitestgehend den geplanten und bereitgestellten Mitteln gemäß Gesamtfinanzierungsplan. Die wichtigste Position des WZL war 0824 für wissenschaftliche Mitarbeitender mit Entgeltgruppe E13 sowie wissenschaftlicher Hilfskräfte. Weitere geringere Positionen des WZL waren 0846, Reisen, zusammengesetzt aus 0844, Reisen Inland, für Konsortialtreffen, Arbeitstermine, Validierungstreffen und Projektabschlussstreffen und 0845, Reisen Ausland, für Konferenzreisen sowie 0850 für Gegenstände und andere Investitionen inkl. Sensoren zur Prozessaufnahme und Computer zum KI-Training.

II.4 Erzielte Ergebnisse

Das **wesentliche Ergebnis** des Vorhabens ist eine benutzungsfreundliche, mobile Software-Anwendung zur Entlastung der Mitarbeitenden in Montageplanung und Montage, insb. in KMUs mit Einzel- und Kleinserienmontage, durch die automatisierte Erstellung von Montageanweisungen inkl. Vorgabezeiten. Die Anwendung senkt den manuellen Aufwand und erhöht die Planungsqualität der Montageplanung, verringert Dokumentations- und Anlernaufwände, sichert Kernkompetenzen und hilft daher insb. bei Produktionsanläufen. Dazu analysiert sie einmalig aufgenommene Montageprozesse aufwandsarm mittels künstlicher Intelligenz (KI), expliziert das darin erkennbare implizite Wissen der Mitarbeitenden und stellt es für Planung und Montage als Montageanweisung zur Verfügung. Die folgende Abbildung zeigt das wesentliche Ergebnis und die nachfolgend beschriebenen drei wesentlichen Teilergebnisse.

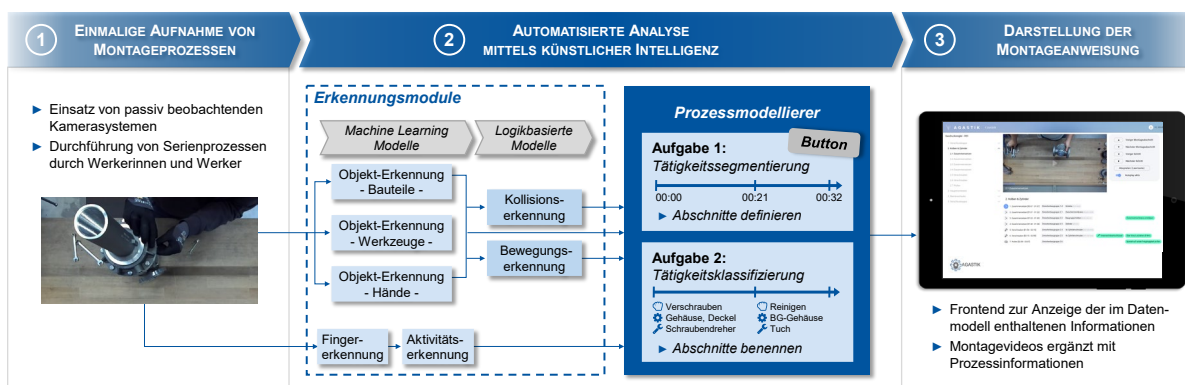


Abbildung 18: Erzieltes Ergebnis des Forschungsprojekts AGASTIK

Der **Entwicklungserfolg** wurde mit Mitarbeitenden der Montage und der Arbeitsvorbereitung validiert. Der Aufwand für die Erstellung von Montageanweisungen wurde stark reduziert. Mitarbeitende der Montage gaben eine hohe Zufriedenheit an, denn sie erleben eine signifikante Entlastung im Anlernprozess und bei seltenen Produktvarianten sowie einen Wissenserhalt, wenn Mitarbeitende das Unternehmen verlassen. Die quantitative Validierung zeigte, dass Erkennung von Werkzeugen und

Montagetätigkeiten sehr gut funktionierten und dass insbesondere die besonders herausfordernde Erkennung der montagespezifischen Bauteile Verbesserungspotential bietet. Die qualitative Validierung der Software zeigte, dass die Mitarbeitenden den Nutzen, die Bedienbarkeit, die Sicherheit und die Stabilität durchweg positiv und teils sehr positiv wahrnehmen. Die Mitarbeitenden bestätigten die erzielte Technologieakzeptanz und, dass die Software die Kompetenzerweiterung, die Arbeitsautonomie, das Anlernen neuer Mitarbeitender und die Einsatzbereitschaft der Mitarbeitenden unterstützt.

Teilergebnis 1 ist die Ermöglichung der einmaligen Aufnahme von Montageprozessen. Hierzu wurde ein funktionales Sensorkonzept entwickelt, das möglichst wenig Einfluss auf den Montageprozess nimmt. Eine an einem bestimmten Arbeitsplatz montierte Kamera beobachtet die Hände der Montagemitarbeitenden von oben aus der Vogelperspektive. Ein Taster am Montagearbeitsplatz ermöglicht Montagemitarbeitenden, dabei das Ende eines Montageschritts zu markieren. Für die Akzeptanz durch Mitarbeitende und den Fokus auf diese wurden in einer wirtschaftspsychologischen Studie Gestaltungsrichtlinien für eine Software zur Unterstützung der Montage und der Arbeitsvorbereitung entwickelt, die in den nachfolgend beschriebenen Teilergebnissen umgesetzt wurden.

Teilergebnis 2 ist die automatisierte Analyse der in Videos aufgenommenen Montageprozesse mittels künstlicher Intelligenz zur aufwandsarmen Erzeugung von Montageanweisungen, die das vormals implizite Wissen der Mitarbeitenden explizit nutzbar machen. Hierzu wurden eine Softwarearchitektur und die darin vorgesehenen Module der Datenverarbeitung entwickelt. Die entwickelten Erkennungsmodule umfassen Machine Learning Module, mit denen Bauteile, Werkzeuge, Hände und Handbewegungen erkannt wurden. Insbesondere für die Erkennung der Bauteile und Werkzeuge wurden neuartige KI-Modelle anhand eigens dazu erzeugter, umfangreicher Datensätze trainiert. Da dieses Training umfangreiche Bilddaten erfordert, deren Erzeugung für individuelle Produkte und Baugruppen unverhältnismäßig aufwändig wäre, wurde eine Methode entwickelt, die synthetische Bilddaten aus CAD-Dateien erzeugt.

Teilergebnis 3 ist die Darstellung der erzeugten Montageanweisungen in einer anwendungsfreundlichen Oberfläche bzw. einem Frontend, worin die Anweisungen bearbeitbar gemacht. Sie enthalten jeweils ein Video der Montage und die darin enthaltenen Montageabschnitte und Schritte. Die Schritte enthalten jeweils eine Nummerierung, eine Bezeichnung, die Dauer, die verwendeten Bauteile mit eindeutiger Bezeichnung, die verwendete Werkzeuge und Anmerkungen für die Durchführung.

Zur **Verwertung** der Ergebnisse wurden diese veröffentlicht und darauf aufbauende Forschungspotentiale identifiziert. Die Veröffentlichung umfasst diverse wissenschaftliche Publikationen, die auf internationalen Konferenzen mit einem Fachpublikum diskutiert wurden, die Ausstellung des entwickelten Demonstrators, u.a. auf dem Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium AWK2023 mit mehr als 1200 Besuchenden aus rund 360 Unternehmen, sowie eine Internetseite. Die Forschungspotentiale umfassen insb. Mobilität des Sensorkonzepts zur Aufnahme der Montageprozesse, Skalierbarkeit der Anwendung durch einfaches anwendungsspezifisches Training der KI-Module, und Sprachverarbeitung zur Bearbeitung und Anwendung der Montageanweisung.

Die **Erreichung der Ziele der Vorhabensbeschreibung** ist durch die somit beschriebenen Ergebnisse vollständig. Die Zielerreichung der Integration in bestehende Strukturen und Prozesse der beteiligten KMU mit Einzel- und Kleinserienmontage kann durch die identifizierten Optimierungs- und Erweiterungspotentiale verbessert werden. Die wichtigsten dieser Potentiale erfordern Forschung über den Umfang dieses Projekts hinaus und wurden daher zuvor als Forschungspotentiale aufgeführt.

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

Es sind keine neuen Forschungs- und Entwicklungsergebnisse mit Auswirkungen auf die Durchführung des Forschungsvorhabens bekannt geworden. Die inhaltliche Relevanz der Ziele des Projektes waren hierdurch stets weiterhin gegeben.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Bezüglich maßgeblicher Details der Verwertung sei an dieser Stelle auf die im Vergleich zur Vorhabensbeschreibung und zum letzten Zwischenbericht unveränderte Fortschreibung des Verwertungsplans in Teil III verwiesen. **Erfindungen oder Schutzrechte** sind keine veranlasst oder geplant.

Die **wirtschaftlichen Erfolgsaussichten** nach Projektende haben sich im Laufe des Forschungsprojekts nicht verändert. Für das WZL fokussieren sich diese auf die Möglichkeit, kurz und mittelfristig Industrieunternehmen Beratungsdienstleistungen im Kontext der Projektarbeit anzubieten und diese durchzuführen sowie ggf. langfristig entsprechende Unternehmen auszugründen. Dabei kann das erarbeitete Wissen zu den Anforderungen und Besonderheiten des Einsatzes von KI in der Montageplanung zur Weiterentwicklung der Technologie genutzt werden. Zu den Beratungsdienstleistungen zählen insb. Industrieprojekte, in denen Unternehmen mit manueller Montage zu Möglichkeiten der Forschung und Entwicklung beraten werden. Darüber hinaus wurden bereits Unterlagen erstellt, um bestehende Seminare und Schulungen wie bspw. die Aachener Montagetagung um Vorträge zum Einsatz von KI in der Montageplanung zu ergänzen. Hierdurch soll zukünftig die Attraktivität der Gesamtveranstaltung gesteigert werden.

Die **wissenschaftlichen/technischen Erfolgsaussichten** nach Projektende haben sich im Laufe des Forschungsprojekts ebenfalls nicht verändert. Zusätzlich zu wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die bereits innerhalb der Projektlaufzeit publiziert wurden, sind bereits weitere Veröffentlichungen geplant. An dieser Stelle sei auf Abschnitt II.8 verwiesen. Daneben ist die Aufnahme und Weiterentwicklung der Projektergebnisse in Lehrveranstaltungen des WZL geplant. Hierzu zählen insb. die Veranstaltungen Fabrikplanung und Produktionsmanagement, wo Studierenden die Potentiale und Hindernisse digitaler Technologien in manuellen Abläufen erläutert werden. Bezüglich der Verwendung in Lehrveranstaltungen und Seminaren, Schulungen oder Vorträgen wurde bereits Material erstellt und verwendet. Zudem soll insb. anknüpfende Forschungsprojekte angestoßen werden, um die Technologie weiterzuentwickeln.

Im Kontext der **wissenschaftlichen/wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit** ist kurzfristig die Vertiefung der Forschung bzgl. der automatisierten Generierung vollständiger Arbeitsanweisungen sowie die Ausweitung hinsichtlich der Erstellung und Nutzung synthetischer Daten vorgesehen. Daneben soll mittel- bis langfristig das erzeugte Wissen in weiteren Forschungsprojekten oder Lehrveranstaltungen weiterentwickelt werden. Kurzfristig sind die Nutzung und Integration des entwickelten AGASTIK-Systems in der industriellen Praxis eingeplant. Darauf aufbauend sollen auch seitens der Unternehmen innovatorische Schritte eingeleitet werden, um die Weiterentwicklung in der Praxis zu ermöglichen.

Die **AGASTIK-Website** macht das Projekt darüber hinaus öffentlich zugänglich. Sie veranschaulicht das Ziel, den Projektablauf, die Ergebnisse, die beteiligten Partner, die Kontakte und die Veröffentlichungen unter folgender Adresse: <https://www.agastik.rwth-aachen.de/cms/~biduvs/agastik/>

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Zur Erreichung einer größtmöglichen Akzeptanz des AGASTIK-Systems wurde mit Frau Janböcke eine Wirtschaftspsychologin frühzeitig in das Projekt eingebunden. In Zusammenarbeit mit Frau Janböcke wurde in einzelnen Gesprächen mit den Anwenderunternehmen die jeweiligen Aufnahmesituationen analysiert und bewertet, Gestaltungshinweise für das AGASTIK-System als Ergebnis einer Vignettenstudie abgeleitet sowie die Technologie im Rahmen der Validierung wirtschaftspsychologisch evaluiert. Während der Zusammenarbeit fand ein kontinuierlicher Erfahrungsaustausch zwischen den Konsortialpartnern und Frau Janböcke statt.

Das Verbundprojekt war zudem auf mehreren Vernetzungstreffen „Innovative Arbeitswelten im Mittelstand“ des Projektträgers vertreten. Im Jahr 2022 nahm das WZL und im Jahr 2023 der IPEM-Lehrstuhl teil. Die beiden Forschungspartner wurden jeweils von der Wilhelm Vogel GmbH Antriebstechnik begleitet. Im Rahmen der Vernetzungstreffen wurde das Projekt und der aktuelle Status in einem kurzen Impulsvortrag vorgestellt und innerhalb einer Postersession vertieft. Die Treffen

konnten dementsprechend für einen Erfahrungsaustausch mit anderen Projekten genutzt werden. Insbesondere hat auf dem Vernetzungstreffen im Jahr 2022 ein vertiefender Austausch mit dem Projekt „KI_eeper“ stattgefunden. Hierdurch konnten Impulse aus einem parallellaufenden Forschungsprojekt mit ähnlichem Fokus in das Verbundvorhaben eingebracht werden.

Mit Blick auf die Verwertbarkeit der Ergebnisse haben darüber hinaus zum Abschlusstreffen des Projekts auch Stellen außerhalb des Verbundprojekts teilgenommen. Hierzu wurden Forschungseinrichtungen und Unternehmen, die in derselben Bekanntmachung gefördert werden, sowie potenzielle Anwenderunternehmen eingeladen. Dadurch konnte zum einen wertvolles Feedback für die Weiterentwicklung des Systems gesammelt werden. Zum anderen konnten die Erkenntnisse in diesem Zuge an weitere Unternehmen transferiert werden.

II.8 Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projektes wurden durch das WZL gemeinsam mit dem IPEM in fünf Veröffentlichungen publiziert und auf den dazugehörigen Konferenzen präsentiert. Daneben wurden das Projekt auf dem Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium AWK, das von mehr als 1.200 Fach- und Führungskräften aus rund 360 Unternehmen besucht wird, sowie auf dem SDFS Impulsforum einem Fachpublikum aus Industrie und Forschung vorgestellt. Für mehrere Vernetzungstreffen der Bekanntmachung "Innovative Arbeitswelten im Mittelstand" wurden eine Kurzvorstellung sowie ein Poster vorbereitet. Eine Veröffentlichung der Projektergebnisse sowie der Validierungsergebnisse mit Fokus auf die arbeitspsychologischen Auswirkungen ist zudem noch geplant. Nachfolgend findet sich eine Übersicht der Veröffentlichungen bzw. Projektvorstellungen.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen		
Jahr	Inhalt / AP	Details
2024	Gesamtprojekt	Peter Burggraef, Tobias Adlon, Fabian Steinberg, Florian Broehl, Alexander Moriz, Carsten Engeln, Maximilian Schütz, Felix Jaworek, Automatic Generation of Assembly Instructions by Analyzing Process Recordings – A Concept Overview, Procedia CIRP, Volume 126, Pages 775-780, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.343 .
2024	AP2 & AP3	Eggert, M., Schade, M., Bröhl, F., Moriz, A., Generating Synthetic LiDAR Point Cloud Data for Object Detection Using the Unreal Game Engine, in: Mandviwalla, M., Söllner, M., Tuunanen, T. (eds) Design Science Research for a Resilient Future, DESRIST 2024, Lecture Notes in Computer Science, vol 14621. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61175-9_20
2024	AP2 & AP3	Alexander Moriz, Florian Bröhl, Maximilian Buxel, Dominik Wolfschläger, Esben Schukat, Michael Riesener, Robert H. Schmitt, Recognition of Hand Activities for Automatic Generation of Assembly Instructions, Procedia CIRP, Volume 127, Pages 141-146, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.025
2024	AP2 & AP3	Michael Riesener, Esben Schukat, Luis A. Curiel-Ramirez, Florian Bröhl, Nelvin R. Paul-Jayaraj, Tool and Interactivity Detection for Automatic Assembly Instruction Generation, Procedia CIRP, Volume 130, Pages 611-618, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.137 .
2025	AP2 & AP3	Peter Burggräf, Carl René Sauer, Maximilian Schütz, Tjorven Weber, Luis A. Curiel-Ramirez, Florian Bröhl, Optimization of Movement Detection Using Optical Flow for Automatic Assembly Instruction Generation, WGP-Jahreskongress (noch nicht veröffentlicht)
2025	AP5	Geplante Veröffentlichung zu den Validierungsergebnissen: Influence of AI Systems on Worker's Psychosocial Factors in Shop Floor Applications
2025	Gesamtprojekt	Geplante Veröffentlichung zu den Projektergebnissen
2026	Weiterentwickl.	Geplante Veröffentlichung folgender Dissertation durch Florian Bröhl: Automatisierte Erstellung von Montageplänen aus implizitem Wissen
Vorträge, Messeauftritte & Netzwerkveranstaltungen		
Jahr	Inhalt / AP	Veranstaltung
2022	Gesamtprojekt	Vernetzungstreffen „Innovative Arbeitswelten im Mittelstand“

2023	Gesamtprojekt	CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME)
2023	Gesamtprojekt	Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium
2023	Gesamtprojekt	Vernetzungstreffen „Innovative Arbeitswelten im Mittelstand“
2024	AP2 & AP3	CIRP Conference on Assembly Technology and Systems (CATS)
2024	AP2 & AP3	CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS)
2024	AP2 & AP3	Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology (DESRIST)
2024	Gesamtprojekt	SDFS Impulsforum
2024	AP2 & AP3	WGP-Jahreskongress
Sonstige Veröffentlichungen		
Jahr	Inhalt / AP	Details
2021	Gesamtprojekt	Institutswebsite

II.9 Literaturverzeichnis

- [ABDA19] Abdallah, Z. S.; Garber, M. M.; Srinivasan, B.; Krishnaswamy, S. (2018) Activity recognition with evolving data streams: A review. In: ACM Computing Surveys (CSUR) 51, Nr. 4, S. 1-36.
- [BERT17] Bertram, S.; Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Kreiskröther, K. (2017) Agile Low-Cost Montage. In: Internet of Production für agile Unternehmen S. 231-259
- [BHAT16] Bhattacharya, B. (2016) Automatic generation of augmented reality guided assembly instructions using expert demonstration. Dissertation, Iowa State University.
- [BURG24] Peter Burggraef, Tobias Adlon, Fabian Steinberg, Florian Broehl, Alexander Moriz, Carsten Engel, Maximilian Schütz, Felix Jaworek, Automatic Generation of Assembly Instructions by Analyzing Process Recordings – A Concept Overview, Procedia CIRP, Volume 126, Pages 775-780, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.343>.
- [BURG25] Peter Burggräf, Carl René Sauer, Maximilian Schütz, Tjorven Weber, Luis A. Curiel-Ramirez, Florian Bröhl, Optimization of Movement Detection Using Optical Flow for Automatic Assembly Instruction Generation, WGP-Jahreskongress (noch nicht veröffentlicht)
- [CHOU18] Choutas, V.; Weinzaepfel, P.; Revaud, J.; Schmid, C. (2018) Potion: Pose motion representation for action recognition. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 7024-7033.
- [EGGE24] Eggert, M., Schade, M., Bröhl, F., Moriz, A., Generating Synthetic LiDAR Point Cloud Data for Object Detection Using the Unreal Game Engine, in: Mandvi-walla, M., Söllner, M., Tuunanen, T. (eds) Design Science Research for a Resilient Future, DESRIST 2024, Lecture Notes in Computer Science, vol 14621. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61175-9_20
- [GE18] Ge, C.; Gu, I.G.; Yang, J. (2018) Co-Saliency-Enhanced Deep Recurrent Convolutional Networks for Human Fall Detection in E-Healthcare. In: Proceedings of 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), S. 1572-1575.
- [GRAN17] Granada, R.; Monteiro, J.; Barros, R.; Meneguzzi, F. R. (2017) A deep neural architecture for kitchen activity recognition. In: Proceedings of the 30th International Flairs Conference, S. 56-61.
- [KATE11] Katenkamp, O. (2011) Implizites Wissen in Organisationen: Konzepte, Methoden und Ansätze im Wissensmanagement. Springer-Verlag 2011.

- [MANN18] Mannhardt, F.; Bovo, R.; Oliveira, M. F.; Julier, S. (2018) A taxonomy for combining activity recognition and process discovery in industrial environments. In: Proceedings of the International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning, S. 84-93.
- [MOK01] Mok, S.M.; Ong, K.; Wu, C.-H. (2001): Automatic generation of assembly instructions using STEP; In: Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE. S. 313-318.
- [MOLI19] Molitor, M. (2019) Generative Montageablaufplanung in der hochiterativen Produktentwicklung. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Apprimus.
- [MORI24] Alexander Moriz, Florian Bröhl, Maximilian Buxel, Dominik Wolfschläger, Esben Schukat, Michael Riesener, Robert H. Schmitt, Recognition of Hand Activities for Automatic Generation of Assembly Instructions, Procedia CIRP, Volume 127, Pages 141-146, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.025>
- [SCHU17] Schuh, G.; Prote, J.-P.; Luckert, M.; Hünnekes, P. (2017) Automatisierung in der Arbeitsplanung, Automatisierung in der Arbeitsplanung. Ergebnisse einer Studie. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 12, 112. Jg., 2017, S. 827-830.
- [SCHU17b] Schuh, G.; Prote, J. P.; Luckert, M.; Hünnekes, P. (2017) Knowledge discovery approach for automated process planning. In: Procedia CIRP 63, Nr. 1, S. 539-544.
- [RIES24] Michael Riesener, Esben Schukat, Luis A. Curiel-Ramirez, Florian Bröhl, Nelvin R. Paul-Jayaraj, Tool and Interactivity Detection for Automatic Assembly In-struction Generation, Procedia CIRP, Volume 130, Pages 611-618, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.137>.
- [XU11] Xu, X.; Wang, L.; Newman, S. T. (2011) Computer-aided process planning—A critical review of recent developments and future trends. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 24, Nr. 1, S. 1-31.
- [YAN16] Yan, F.; Mikolajczyk, K.; Kittler, J. (2016) Generating commentaries for tennis videos. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), S. 2658-2663.
- [YAN19] Yan, A.; Wang, Y.; Li, Z.; Qiao, Y. (2019) PA3D: Pose-action 3D machine for video recognition. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 7922-7931.