

# Kooperierender Autonomer Roboter in der Montage

Ulrike THOMAS, Robert ANDRE, Oliver LORENZ

*Professur für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion  
Technische Universität Chemnitz, D-09126 Chemnitz*

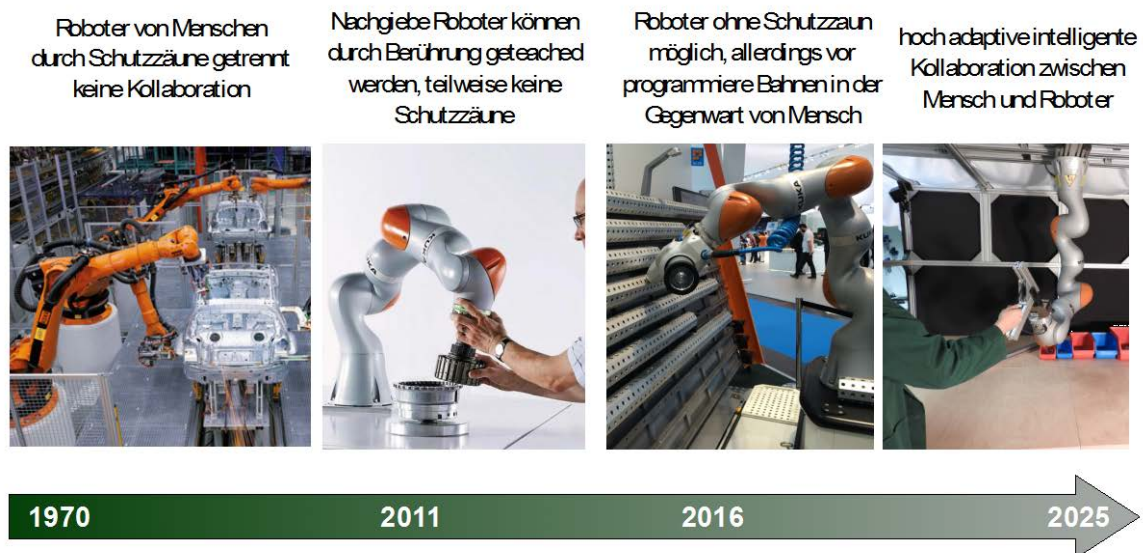
**Kurzfassung:** In diesem Artikel wird ein System zur Mensch-Roboter-Kollaboration in der Montage beschrieben. Es beinhaltet ein automatisches Montageplanungssystem, welches die Montageaufgaben für interaktive kooperierende Robotersysteme berechnet. Dabei werden auf Basis der beschriebenen Geometrien von zu montierenden Bauteilen verschiedene Fügereihenfolgen analysiert. Das System berechnet automatisch Lösungen und bewertet diese. Anschließend findet eine Klassifikation der Aufgaben statt, so dass ein Planungssystem die Anweisungen in Form von Skills automatisch auf ein Robotersystem bringen kann. Neben dem Generieren von automatischen Montageprogrammen ist ein Erzeugen von geeigneten Arbeitsschritten für kooperierende Systeme wichtig. Die einzelnen Arbeitsschritte sollen an die Fähigkeiten von Maschine und Mensch angepasst werden. Nachdem die Aufgaben analysiert und zugewiesen sind, muss ein Kollege Roboter, ständig die Situation erkennen und richtige Handlungsanweisungen präzisieren. Dafür müssen der Mensch und die Situation kontinuierlich und sicher erkannt werden. Menschen können mittels Gesten, Blickrichtung, Mimik mit dem Roboter kommunizieren. Damit sich der Kollege Roboter so verhält, wie ein Kollege Mensch, wird ein situatives Bewusstsein für den Roboter entwickelt. Mit Hilfe eines solchen Bewusstseins, kann der Roboter geeignete Aktionen auswählen und so den Menschen in kollaborativen Montageaufgaben optimal unterstützen.

**Schlüsselwörter:** Mensch-Roboter-Kooperation, Intelligente Robotik, Montagetechnik, Montageplanung, Menscherkennung

## 1. Einleitung

Die Anforderungen an die Montage in vielen Branchen wie beispielsweise dem Fahrzeugbau nehmen kontinuierlich zu. Insbesondere sich schneller ändernde Märkte erfordern eine höhere Flexibilität an Montageprozessen. War in der Vergangenheit eine Montagelinie installiert, so wurde diese eine Linie unverändert für große Losgrößen genutzt. Der Trend geht hin zu immer kleineren Losgrößen. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die Flexibilität von Montagelinien. Das Installieren von neuen Montagelinien und das Umprogrammieren von Robotern sind immer noch sehr zeit- und kostenintensiv. Daher sind neue Methoden zur automatischen Programmierung von Robotern sehr wichtig. Ein weiterer Kostenanteil in der Montage wird durch hohe manuelle Arbeit erzeugt. Die manuelle Arbeit ist notwendig, weil Roboter noch immer nicht die Geschicklichkeit und Flexibilität von Menschen besitzen. Dabei könnten zukünftige Montagelinien von einer gut funktionierenden Mensch-Roboter-Kooperation profitieren. Die Abb. 1 beschreibt die Evolution der Kooperation zwischen Mensch und Roboter in der Montage. Ideal wäre

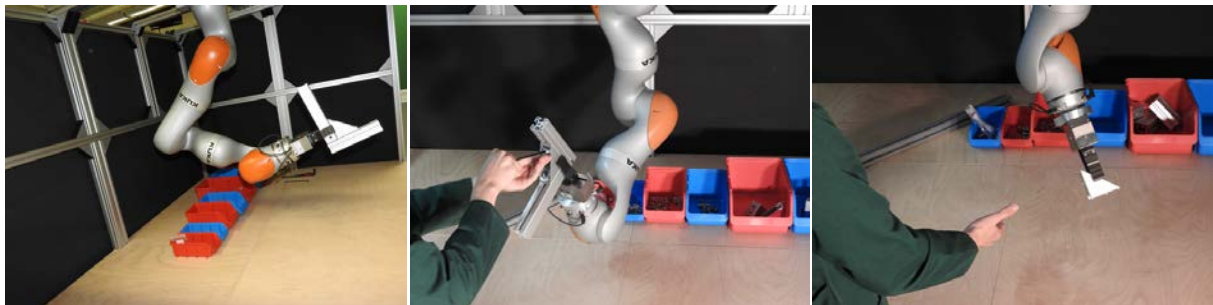
es, wenn kognitive autonome Roboter mit Menschen intuitiv und hoch adaptiv zusammenarbeiten können. Insgesamt sollen dabei Mensch und Roboter so kooperieren, dass der Mensch entlastet wird und dennoch die Produktivität gesteigert werden kann, aber auch die Flexibilität der Montagelinie erhalten bleibt oder zunimmt.



**Abbildung 1:** Evolution der Mensch-Roboter-Kooperation

Voraussetzungen für die Kooperation zwischen Menschen und Robotern sind geeignete für die Interaktion zugelassene Robotersysteme. Diese besitzen meistens eine nachgiebige auf Drehmomenten Sensorik basierende Regelung, so dass auf Schutzzäune verzichtet werden kann. Beispiele hierfür sind der DLR-KUKA Leichtbauarm IWA oder die Roboter der Firma Universal. Eine Mensch-Roboter-Kooperation mit direktem Kontakt zwischen Mensch und Maschine wird dabei möglich. Für einen optimalen Arbeitsplatz sind Aufgaben ideal zwischen Roboter und Menschen aufzuteilen. Wobei es verschiedene Arten der Kooperation gibt. Die Abb. 2 zeigt eine kooperierende Aufgabe, bei der der Roboter als „dritte“ Hand fungiert und beim Verschrauben gegenhält (Abb. 2 links). Der Roboter kann außerdem Bauteile zureichen (Abb. 2 Mitte), oder selbständig etwas montieren (Abb. 2 rechts). Ein idealer „Co-Worker“ muss seine Aufgaben auf den Menschen abstimmen. Hierfür ist eine situative Erkennung des Menschen unabdingbar. Er muss die Bewegung des Menschen beobachten, aber auch die Intension erkennen. Mit Hilfe von Sprache, Gesten, Berührungen und weiteren Kommunikationsmitteln kann die Information zwischen Mensch und Maschine ausgetauscht werden. Für eine effiziente Montage sollte jeder Kooperationspartner also sowohl der Mensch als auch der Roboter Aufgabenpläne erhalten. Diese Pläne können mit geeigneten Algorithmen automatisch erzeugt werden und eine optimale Aufgabenverteilung vorschlagen. Hierfür benötigt man nicht nur eine automatische Montageplanung, so wie in (Thomas et al. 2003, Thomas 2009) beschrieben, sondern auch eine automatische Zerlegung in so genannte robotische Skills (Nottensteiner et al. 2016) und eine automatische Zuordnung der Aufgaben zum Mensch oder zum Roboter. Dabei ist u.a. die Geschicklichkeit zu berücksichtigen. Aufgaben, die besser der Mensch erledigen kann, müssen dem Menschen übertragen werden und Aufgaben, die für einen Roboter geeignet sind, sollen vom Roboter durchgeführt werden. Dabei kann

eine automatische Bewertungsfunktion den Schwierigkeitsgrad und die Durchführbarkeit der Montageaufgabe beurteilen. Ausgehend von diesen Bewertungen ist dann die Arbeitseinteilung automatisch zu erstellen. Es gibt bereits einige wenige Algorithmen für eine automatische Montageplanung (Kaufmann 1995, Thomas 2009, Thomas 2016) und wenige Verfahren, die basierend auf Montagebäumen Arbeitsanweisungen für kollaborative Aufgaben erzeugen (Johannsmeier 2017). Ein solches Verfahren wird hier vorgestellt, wobei zunächst die Reihenfolge der Montage automatisch geplant wird und anschließend werden die Aufgaben hinsichtlich ihrer Komplexität für den Roboter bewertet, siehe Abs. 2. Zusätzlich benötigt man für einen autonomen kooperierenden Kollegen Roboter weitere Fähigkeiten, vgl. Abs. 3, wie eine Erkennung von verschiedenen Aufgabensituationen oder auch einen automatischen Griff in die Kiste, um beispielsweise Bauteile zuzureichen. Schließlich soll ein intelligenter autonomer helfender Kollege für Montageaufgaben entstehen. Abs. 5 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick.



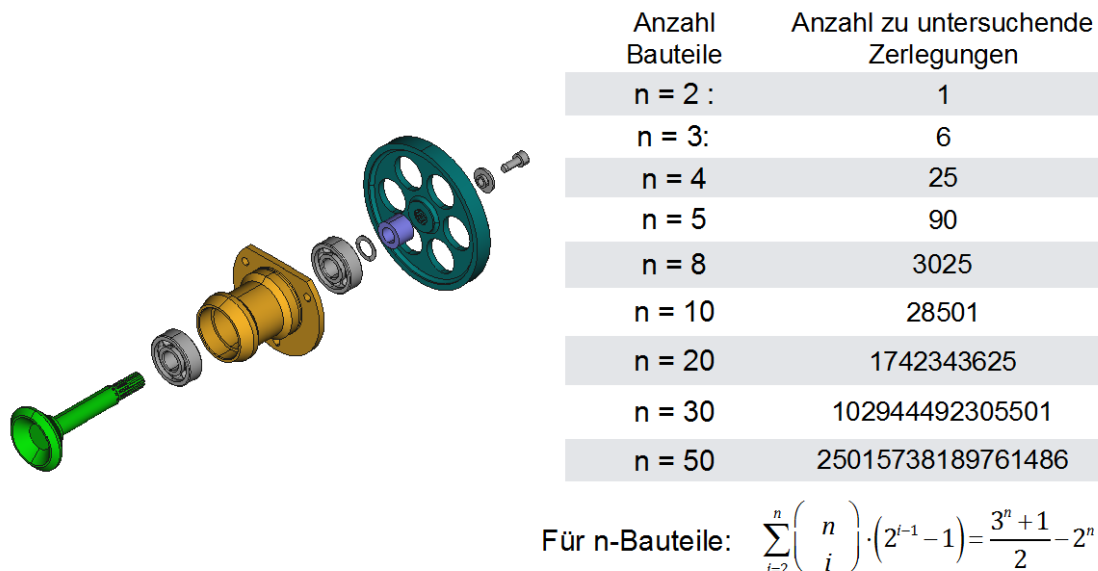
**Abbildung 2:** *Verschiedene Möglichkeiten der Mensch-Roboter-Kooperation. Links: Roboter und Mensch arbeiten unabhängig; Mitte: der Roboter hält gegen und hilft beim Verschrauben; rechts: der Roboter reicht Bauteile zu*

## 2. Automatische Arbeitsplanung in der Montage

Für den intelligenten autonomen Kollegen als auch für den Menschen sollen aus der Aufgabe automatisch Montagepläne und Arbeitseinweisungen generiert werden. Dabei sind verschiedene mögliche Montagesequenzen zu betrachten. Ausgehend von den geometrischen und physikalischen Beschreibungen der Bauteile können zunächst gültige Sequenzen generiert werden. Dafür existiert ein Montageplanungssystem, welches ausgehend von der zusammengesetzten Baugruppe mittels simulierter Demontage die verschiedenen Montagereihenfolgen generiert und in einem Montagebaum ausgibt. Ein solcher Montagebaum kann als Anleitung verstanden werden. Jede Teilaufgabe in dem Montagebaum kann entweder einem Menschen oder einem Roboter zugewiesen werden oder auch beiden. In diesem Fall, muss die Interaktion näher spezifiziert werden. Zunächst wird mit einer Montageplanung eine möglichst optimale Montagereihenfolge berechnet. Das Montageplanungssystem aus (Thomas et. al. 2015 und Andre und Thomas 2017) wird im Folgenden näher beschrieben (Abs. 2.1) und ist in der Lage die Planung automatisch vor zu nehmen. Eine Analyse der Montageaufgabe und ein erstes mögliches Verfahren zum Zuweisen der Aufgabe für Mensch und Roboter sind in (Abs. 2.2) beschrieben.

## 2.1 Montageplanung

Die Bestimmung gültiger Montagesequenzen folgt dem Ansatz der Montage durch Demontage, dabei werden von der zusammengesetzten Baugruppe ausgehend einzelne Bauteile oder ganze Bauteilgruppen aus der Gruppe geometrisch entfernt. Für eine Bauteilgruppe bestehend aus  $m$  Bauteilen müssen  $2^{n-1}-1$  Bauteilkombination untersucht werden, damit ist leicht ersichtlich, dass es sich um ein exponentielles Problem handelt. Abb. 3 zeigt die Anzahl der zu betrachtenden Zerlegungen bei  $n$ -Bauteilen.

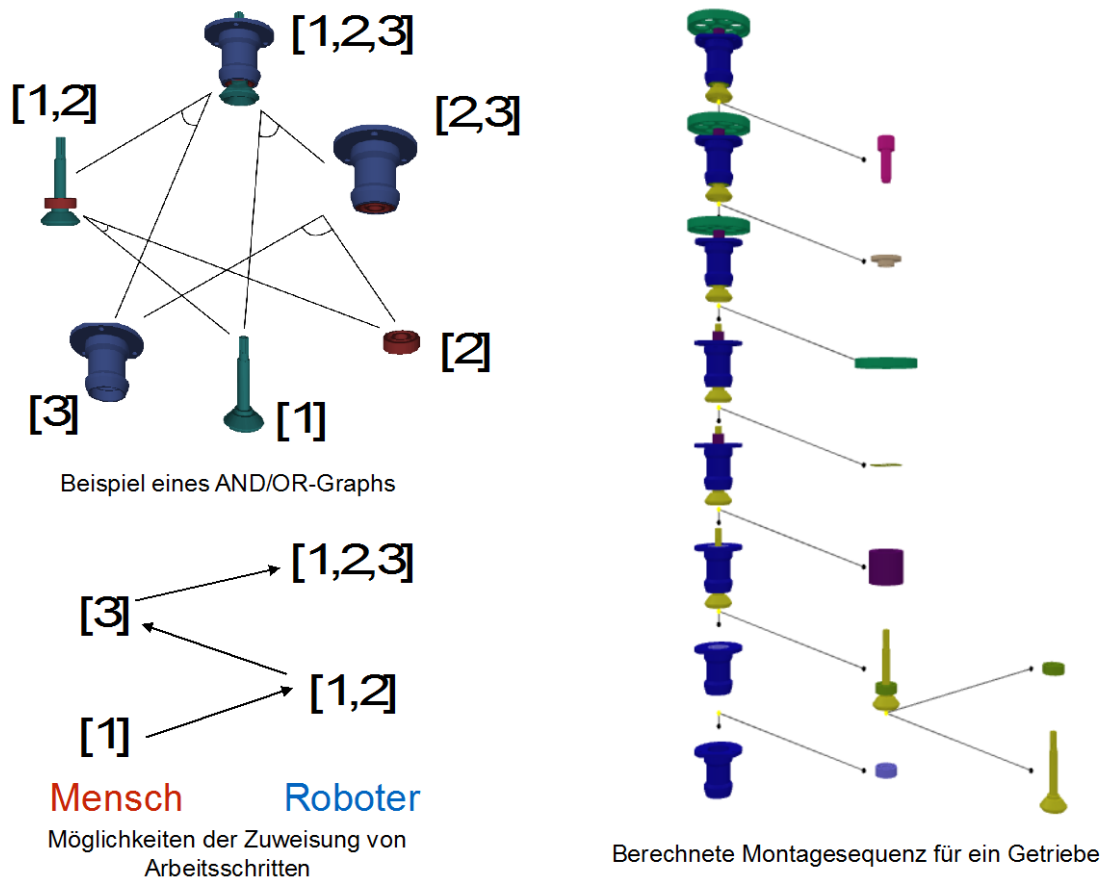


**Abbildung 3:** Explosionszeichnung einer Baugruppe und rechts Anzahl der zu untersuchenden Montagesequenzen in Abhängigkeit von der Anzahl der Bauteile

Um mit dem exponentiellen Problem annähernd umgehen zu können, benötigt man ein hoch effizientes Verfahren zum Testen der geometrischen Separierbarkeit, welches wir aus (Thomas et. al. 2003) entnommen haben. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden mögliche Fügevektoren in einer 2.5D Distanzkarte gespeichert. Jeder Wert entspricht einem Vektor, der eine Demontagerichtung im Raum darstellt. Für die Karten werden systematisch viele Raumrichtungen generiert und getestet. Der eingetragene Wert entspricht dann der Strecke, die das Objekt aus der Montagegruppe herausgezogen werden kann, bis es auf Kollision stößt. Solche Karten lassen sich für jede Bauteilkombination berechnen und während der Demontageplanung immer wieder verwenden. Dadurch ist es gelungen, ein sehr leistungsfähiges und effizientes Montageplanungssystem zu entwickeln (Thomas et. al. 2015). Die Abb. 3 zeigt eine Baugruppe und die mögliche Anzahl von Zerlegungsbäumen rechts.

Sämtliche mögliche Zerlegungen und Kombinationen lassen sich dann in einem AND/OR-Graphen (Home de Mello 1990) speichern, Abb. 4 links. Eine A\*-Suche durch den AND/OR Graphen ermöglicht die Berechnung einer optimalen Montagesequenz. Des Weiteren lässt sich der AND/OR-Graph verwenden, um die Verteilung der Aufgabe zwischen Mensch und Roboter vorzunehmen. Hierbei müssen auch die Montageschritte hinsichtlich der Schwierigkeit der Ausführung bewertet werden. Schließlich ist die Ausgabe ein Montagebaum, wie er in Abb. 4 rechts zu sehen ist. Der hier entwickelte Optimierungsansatz folgt einem Anytime-Optimalen Ansatz, der bedeutet, dass bei steigender Laufzeit nur noch Kosten

optimalere Lösungen gefunden werden, aber keine schlechteren Lösungen erzeugt werden können. Darüber hinaus kann eine flexible Anpassung der Bewertungsfunktion für die Optimierung und die Randbedingungen hinsichtlich der Ausführung der Montage zur Laufzeit erfolgen (Andre und Thomas, 2016).



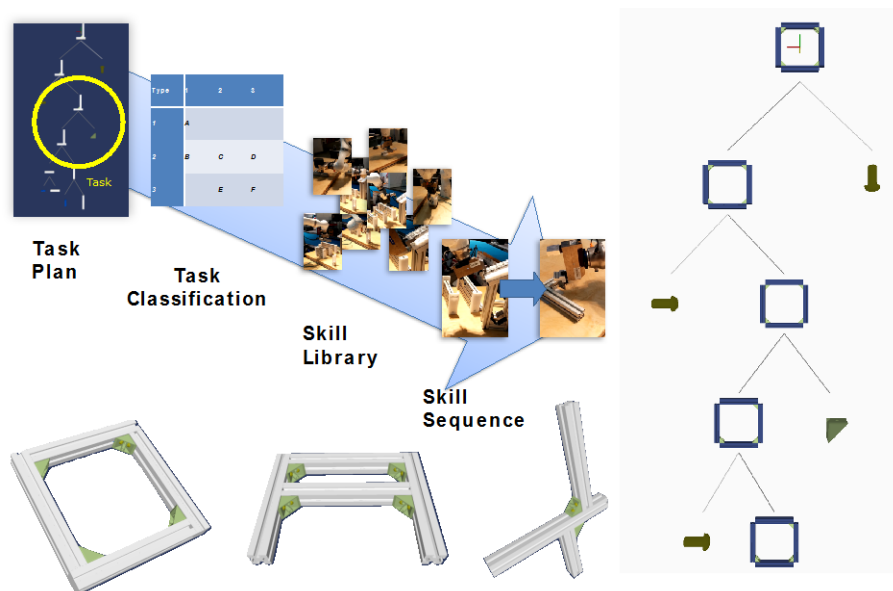
**Abbildung 4:** Darstellung der Montagemöglichkeiten im AND/OR-Graph und ausgerechneter Montageplan

Eine Herausforderung für die Planungssoftware stellen inkonsistente und mit Toleranzen modellierte Bauteile dar. Berühren sich die Bauteile nicht nur, sondern überlagern sie sich auf Grund von Toleranzen leicht, so sind viele geometrische Algorithmen nicht mehr geeignet, die Aufgabe zu lösen. Daher haben wir ein neues haptisches Rendering Model entwickelt, um bei der Demontageplanung Toleranzen zu erlauben und auch deformierbare Bauteile zu berücksichtigen. Dabei erfolgt die Kollisionserkennung nicht wie bisher unter Verwendung von starren Dreiecksnetzen der CAD Modelle, sondern durch eine Darstellung als Voxel-Point-Model. Das ruhende Objekt wird als Voxel basierte Karte gespeichert – das Voxel in 3D ist in Analogie zum Pixel in 2D zu verstehen – und das bewegte Objekt wird als Punktwolke verteilt über die Oberfläche des Objektes modelliert. Wird das Objekt bewegt, so dringen eventuell Punkte in die Voxel des ruhenden Objekts ein und es kann so die Eindringtiefe berechnet werden. Damit können Deformationen simuliert werden und erstmals auch deformierbare Objekte in der Montageplanung berücksichtigt werden (Andre, Thomas 2017). Die in Abb. 4 erzielten Ergebnisse sind mit dem neuen Kollisionsmodell berechnet.



## 2.2 Klassifikation von Aufgaben

Die Montageaufgaben im Montagebaum müssen sodann auf ausführbare Roboteraktionen übertragen werden. Hierbei hat sich eine Einteilung in Tasks und Skills bewährt. Eine robotische Aufgabe (engl. Task) stellt einen Zweig im Montagebaum dar, der durch vorprogrammierte und definierte robotische Aktionen bzw. Fertigkeiten (engl. Skills) ausgeführt wird. Abb. 5 beschreibt eine automatische Klassifikation von robotischen Tasks für eine vor definierte Menge von Aufgaben, die sich aus den Kombinationen von Profilbauteilen ergeben. Anhand der beteiligten Bauteile und des aktiven zu bewegenden Objekts lässt sich die Aufgabe so klassifizieren, dass die geeigneten Skills selektiert werden. Für jeden Montage-Skill gibt es ein hinterlegtes Roboterprogramm. Damit konnten durch den Roboter autonom beliebige Bauteilkombinationen zusammengebaut werden. Eine manuelle Planung ist nur noch beim Definieren von Fixiereinrichtungen nötig. Die Ausführung und die Programmierung sind somit voll automatisiert.



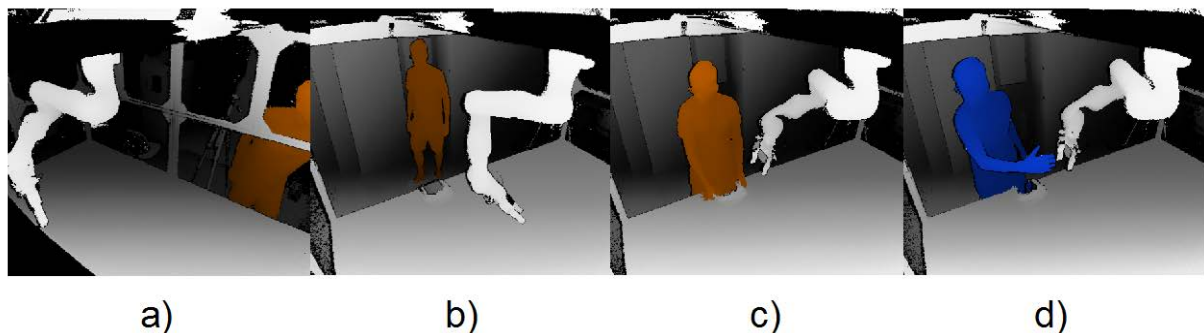
**Abbildung 5:** Klassifikation von Montageaufgaben anhand Bauteilkombinationen und Generieren von Roboterprogrammen durch Selektieren von Montage-Skills

Für Mensch-Roboter-Arbeitszellen muss für jede Montageaufgabe zunächst definiert werden, welche Aufgabe der Roboter übernimmt und welche Aufgabe die Maschine übernehmen soll. Hierfür wird jeder Zweig im Baum mit drei möglichen Klassen (autonom Mensch, autonom Roboter, oder kooperierend) markiert. Für die kooperierende Aufgabe, wird festgelegt, ob der Roboter als dritte Hand dienen soll, etwas zureicht oder ob gemeinsam montiert werden soll. Die entsprechenden Anweisungen sind dann an den Roboter zu senden, hier eignen sich ebenfalls vorprogrammierte sensorische robotische Skills.

Des Weiteren sollte der kooperierende Kollege Roboter, ständig die Situation analysieren, um auch ad hoc als hilfsbereiter Kollege dienen zu können. So kann er beispielsweise eine herausgefallene Schraube erkennen, diese aufgreifen und erneut zugreifen. Auch die Bewegung des Roboters sollte möglichst der von Menschen ähnlich sein, so dass das System für den Menschen ausrechenbar wird. Im nachfolgenden Abschnitt wird das situative Bewusstsein und dessen Implementierung des autonomen Kollegen Roboter beschrieben.

### 3. Menscherkennung und Intensionserkennung

Menschen können untereinander mit intuitiven auch nonverbalen Verhalten wie beispielsweise der Körperhaltung kommunizieren. Eine Mensch- und Intensionserkennung mit idealer Mensch-Technik-Schnittstelle nutzt diese Signale zur bidirektionalen Kommunikation, sowohl um situative Handlungsvorschläge (Interaktionen) zu erteilen, als auch um Handlungsanweisungen und Bestätigungen entgegenzunehmen. Unter der Annahme, dass autonom-kooperierende Roboter in vielen industriellen und wirtschaftlichen Bereichen zukünftig gemeinsam mit Menschen komplexe Montageaufgaben (Abs. 2.1) in verschiedenen Arbeitsumgebungen durchführen werden, ist eine zuverlässige Erkennung des Menschen einschließlich situativer und intuitiver Verhaltensmodelle (Abb. 6) unabdingbar.



**Abbildung 6:** 4-Stufiges Verhaltensmodell: a) Koexistenz; b) Existenz; c) Kooperation; d) Kollaboration

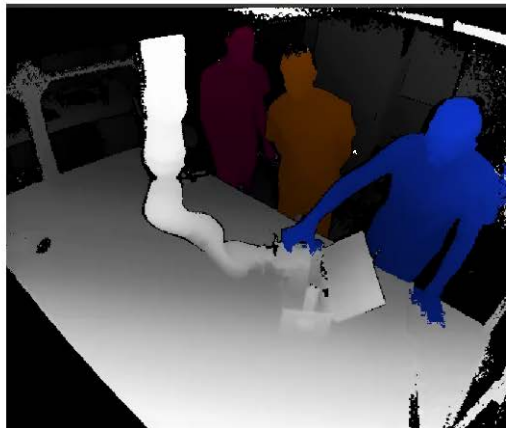
Für eine kooperative Durchführung verschiedener Montagesequenzen ist eine situative Wahrnehmung menschlicher Aktionen einschließlich jeweiliger Intensionen wichtig, um sichere und kontrollierbare Interaktions- und Steuerungsanweisungen ableiten zu können. Roboterseitige Verfahren zur Planung von angemessene bzw. unangemessene Handlungsweisen (gegenseitige Interaktionen) in Arbeitsbereichen müssen daher die Pose von Menschen, Objekten und Roboter situativ erkennen, in Echtzeit verfolgen, und prädikieren, wo bzw. wann welche Art von Interaktion benötigt wird. Wichtig ist ein adaptives Antizipieren von menschlichen Bewegungsabläufen und Verhalten.

#### 3.1. Menscherkennung

Bei der Menscherkennung wird die Pose (Arbeitsraumposition und Orientierung) des Menschen kontinuierlich und in Echtzeit mittels optischer Sensoren (fusionierte RGB-D Sensoren) erfasst und deren unmittelbar folgender Verlauf vorhergesagt, siehe Abb. 7. Die Haltung des Menschen in Form menschlicher Eigenschaften (Orts- und Geometrieabhängigkeiten anatomischer Gelenke) und die Lagebeziehung zu bestimmten Objekten (z.B. Montagebauteilen und Roboter) beschreibt die kooperierende Aufgabe (Abs. 5) und erkennt die aktuelle Intension des Menschen in der Montagesequenz.

Sämtliche sichtbaren Gelenke des menschlichen Körpers werden als *globale Gelenkmenge* (Inklusionskette) repräsentiert. Verschiedene Teilmengen der globalen Gelenkmenge können anatomische Körperregionen oder Extremitäten (linker/rechter Arm, Schultern und Kopf) charakterisieren. Die Regionen-basierten Gelenkmengen des Menschen deuten in verschiedenen kooperierenden Aufgaben auf unter-

schiedliche Interaktionen hin, die durch die beteiligten Körperregionen gezielt erkannt werden können.



Erkannte Menschen  
im Arbeitsraum



Sichtfeld der Kameras und  
Überwachung des Arbeitsraums

**Abbildung 7:** Überwachter Arbeitsraum durch mehrere Tiefensensoren (rechts) und erkannte Menschen (links)

Um Menschen direkt zu erkennen bzw. prädiktiv zu verfolgen, müssen alle Gelenkrepräsentationen zu skelettbasierter Gelenktrajektorien fusioniert werden. Ein globaler Merkmalsvektor aus fusionierten Gelenkmengen wird konstruiert. Ein Gelenk setzt sich aus 3D-Gelenkekoordinaten zusammen. Zur Reduzierung der Komplexität und Steigerung der Adaptabilität wird anstatt einer festen Gelenkzahl (Kar et.al. und Han et. al. 2017), hier eine variable Anpassung der Gelenkmenge in Abhängigkeit fusionierter Gelenkansichten und beteiligter Körperregionen/Extremitäten verwendet. Der Ansatz verbessert die Erkennung des Menschen dahingehend, dass nur bestimmte Extremitäten sichtbar sein müssen, um den Menschen in seinem intuitiven Verhalten zu lokalisieren. Zusätzlich wird auch die unstetige Wiedererkennung des Menschen bei Koexistenz aus dem optischen Sichtfeld des Sensors eliminiert.

Ein voxelbasiertes Verschiebungsfeld (SfM) des optischen Flusses (Schwarz et. al. 2012 und Schubert et. al. 2015) bestimmt die 3D-Gelenkkoordinaten und die geodätischen Distanzen (Schwarz et. al. 2015) verbinden alle 3D-Gelenkkoordinaten einer Teilmenge zu Gelenktrajektorien. Durch den Einsatz mehrerer globaler Merkmalsvektoren können beliebig viele Menschen als Personengruppen (Abb. 7) registriert werden. Die gebildeten Gelenktrajektorien können in Subvektoren je Körperregion zusammengefasst und in der Gesamtheit den globalen Merkmalsvektor bilden. Durch die Orts- und Geometrieabhängigkeit der Körpergelenke zu den Körperregionen werden mittels einer Support Vector Machine (SVM) die Subvektoren klassifiziert. Die klassifizierten Subvektoren werden in der Intensionserkennung integriert, um angemessene und ungemessene Handlungsweisen (Aktionen) durch gewichtete Gelenkkorrelation zu beschreiben und situative Aktionsklassen zu bilden.

### 3.2 Intensionserkennung und Prädiktion

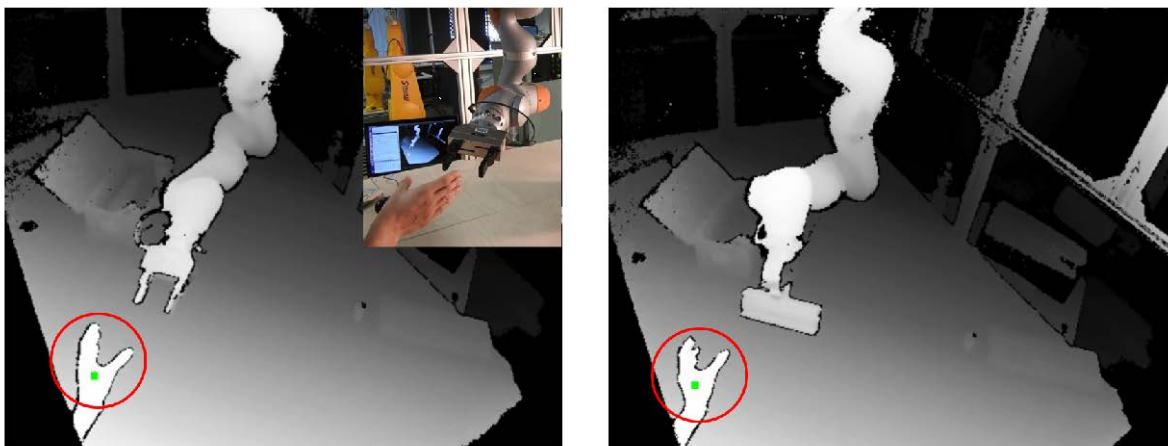
Um menschliche Intensionen situativ zu präzisieren, wird eine neue Methode der intuitiven Blickrichtungserkennung in industriellen Arbeitszellen vorgeschlagen. Ein



besonderer Schwerpunkt liegt auf der Kommunikation mit situativen Blickbewegungen, da diese vom Menschen intuitiv verwendet und auf Gesten übertragen werden. Die Blickrichtung eines Menschen bietet dem Gegenüber einen Reiz zur Ausrichtung der eigenen Aufmerksamkeit, der nur schwer ignoriert werden kann (Friesen und Kingstone 1998). Der hier gewählte Ansatz basiert auf kognitiven Fähigkeiten, dass Menschen angemessene Aktionen immer in Blickrichtung der Augen ausführen, um die Kontrolle und Reaktionsvermögen zu behalten. Während der Menschenerkennung bzw. -verfolgung kann multimodal unterschieden werden, ob eine angemessene oder unangemessene Aktion vorliegt.

Im Anwendungsszenario der kooperativen Montage kommt eine Blickrichtungssynchronisation zwischen Mensch und Roboter für eine effiziente und intuitive Kommunikation zum Einsatz:

- Der Roboter signalisiert dem Menschen, er soll die Aufmerksamkeit auf ein spezifisches Bauteil richten, um es zu bearbeiten.
- Der Mensch signalisiert dem Roboter, er soll einen robotergestützten Arbeitsschritt an einem Bauteil ausführen.
- Der Mensch zeigt dem Roboter durch Blickkontakt den Abschluss eines Arbeitsschrittes an.



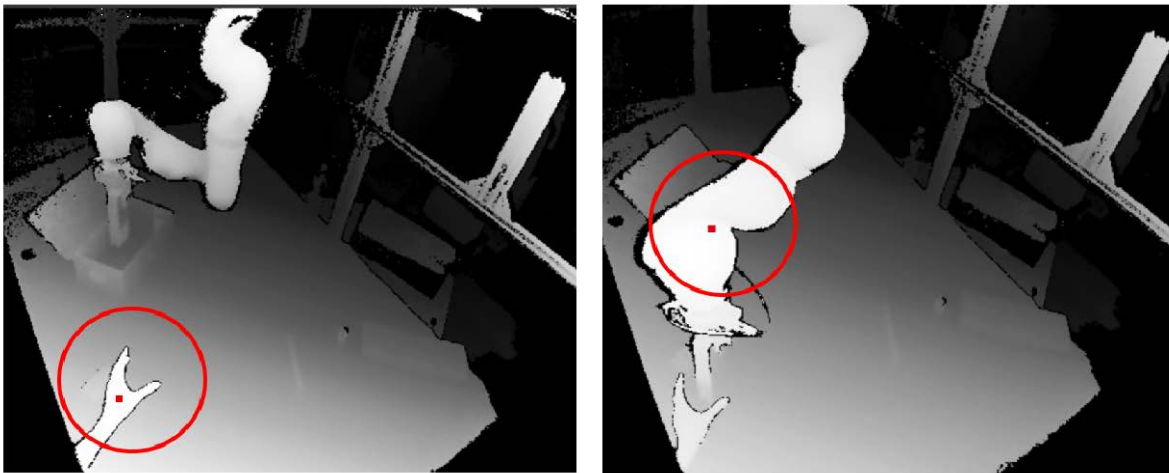
**Abbildung 8:** Blicksynchronisation (grüne Markierung) aktiv; Mensch lenkt den Blick zum Roboter und kann zugereichte Bauteile übernehmen

Die Erfassung der Blickbewegung des Menschen ermitteln kognitive und physiologische Informationen, die zum Erfolg der Kommunikation beitragen. Zum Beispiel wird ermittelt, wie lange der Blickkontakt aufrechterhalten werden muss, um eine robuste Kommunikation sicherzustellen. Außerdem können essentielle Erkenntnisse zu interindividuellen Unterschieden in der Präferenz blickbasierter Kommunikation (z.B. in Abhängigkeit von Alter oder Montageerfahrung) abgeleitet werden. Insbesondere müssen Blickbewegungen, die der Durchführung eines geplanten Montageschrittes (Abs. 2) dienen, von Blickbewegungen zur Kommunikation unterschieden werden. Ein gemeinsames Gestenrepertoire verbessert die Effizienz und Akzeptanz der Kooperation zwischen Roboter und Mensch und stellt zugleich eine Möglichkeit dar, in sicherheitskritischen Fällen intuitive in das System einzugreifen (z.B. Stopp-Signal).

Blickrichtungsbestimmung relativ zu einem raumfesten Koordinatensystem stellt eine erhebliche technische Herausforderung dar (Pfeiffer et. al. 2014, Stoll et al. 2011, Craig et. al. 2016 und Paletta 2017). Daher wird ein Echtzeitsystem zur

robusten Erfassung der Blickrichtung während der autonom-kooperierender Montage benötigt. Dafür wird das menschliche Auge anhand anatomischer Eigenschaften als 3D-Modell (Pupillometrie) adaptiv beschrieben. Die dazugehörige dreidimensionale Blickrichtung in kopffesten Koordinaten wird bestimmt und in raumfeste Koordinaten transformiert. Eine virtuelle Achse wird als Blickrichtungsachse der Augen definiert. Da die Blickrichtungsachse und die optische Achse auf Grund des gekrümmten Limbus nicht identisch sind, wird ein Transformationswinkel eingeführt.

Die Blickrichtungsachse ist unbekannt und wird als zusätzlicher Parameter durch ein bayesisches Schätzverfahren bestimmt. Auf Basis der Radien von Limbus, Kornea und Sclera und den dazugehörigen Abständen zueinander wird die optische Achse berechnet. Eine Synchronisation zwischen linker und rechter Blickrichtungsachsen definiert das virtuelle Blickrichtungsfeld. Durch die stetige Bewegung der Augen und gleichbleibenden Anatomie des Auges kann die Blickrichtung einschließlich Blickrichtungsbereich detektiert und modellbasiert präzisiert werden, siehe Abb. 9.



**Abbildung 9:** Links: Blickrichtung und Bewegungsrichtung sind nicht eindeutig; rechts: Blickrichtung und Bewegungsrichtung sind eindeutig

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Automatische Montageplanungssysteme stellen seit Jahren eine Herausforderung dar und sind unabdingbar für eine kognitive kollaborative Ausführung von Montageprozessen in gemeinsamen Arbeitsumgebungen. Eine Voraussetzung für einen adaptiven Roboter-Kollegen in der Montage ist das Montageplanungssystem, das automatisch Handlungsanweisungen für den Roboter und den Menschen in kollaborativen Montageszenarien generiert. Das automatische Montageplanungssystem kann die Komplexität von Montageaufgaben abschätzen und Vorschläge für eine optimale Verteilung der Aufgaben vornehmen. Die Ausführung wird mittels Skills realisiert, wobei jede robotische Anwendung ein Skill ist. Roboterprogramme und Montagepläne werden somit voll automatisch erzeugt. Für eine intelligente und für den Menschen intuitive Kooperation muss ein robotisches System ein Situationsbewusstsein besitzen. Hierfür benötigt man die ständige visuelle Beobachtung und Interpretation der Szene. Außerdem müssen mögliche Aktionen präzisiert werden, um Handlungsanweisungen für den Roboter als auch den Menschen abzuleiten. Dabei kann der Roboter als so genannte dritte Hand agieren,

oder Bauteile zureichen oder auch Teilaufgaben autonom übernehmen. Wir planen den Einsatz dieses hier beschriebenen Systems zukünftig bei KMUs in und außerhalb Sachsens einzusetzen, um so das System stetig zu verbessern und zu erweitern. Damit man eine hohe Flexibilität in der Montage bei guter Entlastung der Arbeitskräfte zukünftig erreicht.

## 5. Literatur

- Andre R., Thomas, U. (2016) Anytime Optimal Assembly Sequence Planning. In 47th International Symposium on Robotics, München, Juni.
- Andre, R. Thomas, U. (2017) Error robust efficient assembly sequence planning with haptic rendering models for rigid and non-rigid assemblies. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Singapore, May 29 - June 3.
- Craig, TL, Nelson, CA, Li, S, Zhang, X (2016) Human gaze commands classification: A shape based approach to interfacing with robots. In 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), S. 1–6.
- Friesen CK, Kingstone, A (1998) The eyes have it! Reflexive orienting is triggered by nonpredictive gaze. In Psychon. Bull. Rev., Nr. 3, (5), S. 490–495.
- Johannsmeier, L., Haddadin, S. (2017) A Hierarchical Human-Robot Interaction-Planning Framework for Task Allocation in Collaborative Industrial Assembly Processes. In IEEE Robotics and Automation Letters, Vol 2, No. 1.
- Han, F, Reily, B, Hoff W, Zhang, H (2017) Space-time representation of people based on 3D skeletal data: A review. In Computer Vision Image Understanding 158, S. 85–105.
- Kar A, Amitabha A, Guha, MP (2010) Skeletal tracking using microsoft kinect. ResearchGate, url: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34607605/Skeletal\\_Tracking\\_Using\\_Microsoft\\_Kinect.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34607605/Skeletal_Tracking_Using_Microsoft_Kinect.pdf), 18.9.2017.
- Kaufman, A.G., Wilson, R. H., Jones R. E., Calton T.L., Ames, A.L. (1995) The Archimedes 2 mechanical assembly planning system. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, S. 3361-3368.
- Nottensteiner K., Bodenmüller, T., Kasseker, M., Roa, M., Seidel, D., Stemmer, A., Thomas, U. (2016) A Complete Automated Chain for Flexible Assembly using Recognition, Planning and Sensor-Based Execution. In 47st International Symposium on Robotics, München, S. 1-8.
- Paletta, L u. a. (2017) Towards Real-time Probabilistic Evaluation of Situation Awareness from Human Gaze in Human-Robot Interaction. In ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, New York, NY, USA, S. 247–248.
- Pfeiffer, T, Renner, P, Pfeiffer-Leßmann N (2014) Efficient analysis of gaze-behavior in 3D environments. In Cognitive Processing, Nr. 15, (1), S. 127–S129.
- Schwarz, LA, Mkhitarian, A, Mateus, D, Navab, N (2012) Human skeleton tracking from depth data using geodesic distances and optical flow. In Image Vis. Computation, Nr. 3, (30), S. 217–226.
- Schubert, T, Gkogkidis, A, Ball, T, Burgard, W (2015) Automatic initialization for skeleton tracking in optical motion capture. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 734–739.
- Stoll, J, Kohlbecher, S, Marx, S, Schneider, E, Einhäuser, W (2011) Mobile three dimensional gaze tracking. In Studies in Health Technology and Informatics, Nr. 163, S. 616–622.
- Thomas, U., Barrenscheen M., Wahl F.M. (2003) Efficient Assembly Sequence Planning Using Stereographical Projections of C-Space Obstacles. In IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Besancon, Frankreich.
- Thomas, U. (2009) Automatisierte Programmieren von Robotern für Montageaufgaben. In D. Wagner, editor, Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2008. GI-Edition.
- Thomas, U., Stouraitis T., Roa M.A. (2015) Flexible Assembly through Integrated Assembly Sequence Planning and Grasp Planning. In IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Gothenburgh, Sweden.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## **Fokus Mensch im Maschinen- und Fahrzeugbau 4.0**

Herbstkonferenz der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Institut für Betriebswissenschaften und  
Fabriksysteme / TU Chemnitz

ICM - Institut Chemnitzer Maschinen-  
und Anlagenbau e.V.

28. und 29. September 2017

---

**GfA Press**

---

**Dokumentation der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.  
vom 28. und 29. September 2017, Chemnitz**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.  
Dortmund: GfA-Press, 2017  
ISBN 978-3-936804-23-2

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Konferenzband

Als Manuskript zusammengestellt. Dieser Konferenzband ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.)  
erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**  
**Schriftleitung: Matthias Jäger**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet,  
den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren) zu vervielfältigen.

USB-Print: Isabell Grundmann

**Screendesign und Umsetzung**

© 2017 fröse multimedia, Frank Fröse

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)