

# Das hybride Team

**Ein Leitfaden zur systematischen Planung  
von assistierten, kollaborativen  
Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen in der Montage**



## Inhalt

### Leitartikel

EINLEITUNG	13
VORSTELLUNG DER TECHNOLOGIEN UND AUSWAHLHILFE	17
VORGEHEN BEIM AUFBAU HYBRIDER ARBEITSPLÄTZE MIT UMSETZUNGSBEISPIEL	33
DER INKOMO USE CASE	55
STAND DER WISSENSCHAFT	65
FAZIT UND AUSBLICK	67
LITERATURVERZEICHNIS	67

### *Short Facts*

*Projektlaufzeit:* 01.02.2020 – 31.07.2021  
*Förderträger:* Bayerische Forschungsstiftung  
*Förderkennzeichen:* AZ-1401-19



Bayerische  
Forschungsstiftung

## Einleitung

Im Zuge der fortschreitenden Globalisierung und zunehmenden Digitalisierung der Arbeitswelt, ergeben sich gerade für kleine und mittelständische Unternehmen Herausforderungen im Bereich der Produktion und insbesondere in der Montage. Steigende Komplexität der Produkte, kürzer werdende Produktlebenszyklen bei kleinen Losgrößen mit hoher Variantenvielfalt und großem Wettbewerbsdruck zwingen Unternehmen bereits vorhandene Montagestrategien zu überarbeiten. Gerade bei komplexeren Baugruppen ist eine Hochautomatisierung der Montage in der Serienfertigung aufgrund der Produktstruktur nur schwer realisierbar und oftmals nicht wirtschaftlich. In der industriellen Produktion ist ein klarer Trend von der Massenproduktion hin zur »Massenspezialanfertigung« zu erkennen. Die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den angewandten Produktionsverfahren, den eingesetzten Produktionsmitteln und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Aber auch das Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik trägt dazu bei Potenziale für den Erfolg eines Unternehmens auszuschöpfen. Aufgrund sich ständig ändernder Marktbedingungen und der kostengünstigen Herstellung von Produkten in Niedriglohnländern bei gleichzeitig steigendem Qualitätsniveau müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Die Montage ist im Vergleich zur klassischen Fertigung (wie z.B. Drehen, Fräsen oder Schleifen) ein eher niedrig automatisierter Bereich der industriellen Produktion, indem allerdings eine hohe Wertschöpfung am Produkt stattfindet. Die manuelle Montage ist daher auch zukünftig ein wichtiger Bestandteil der industriellen Produktion. Um am Markt bestehen zu können, müssen Unternehmen nach Möglichkeiten suchen, um manuelle Arbeit produktiver und damit kosteneffizienter zu gestalten ohne dabei Abstriche bei der Qualität hinzunehmen. Zur Unterstützung manueller Tätigkeiten sind in den vergangenen Jahren verschiedene Innovationen in den Fokus der Unternehmen gerückt. Das Ziel muss es sein, den (Montage-)Standort Deutschland durch innovative Konzepte wie kollaborative Mensch-Roboter-Arbeitsplätze zu sichern.

Zwei zukunftsweisende Ansätze sind die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) und assistierte Arbeitsplätze. Das Konzept der kollaborativen Zusammenarbeit von Mensch und Roboter soll die Kompetenzen beider Akteure gewinnbringend vereinen. Dabei werden die Mitarbeitenden entlastet und durch die Präzision, Wiederholgenauigkeit oder Kraft eines Roboters unterstützt. Diese sogenannte Cobots, welche für die kollaborative Zusammenarbeit mit einem Menschen konzipiert sind, weisen mittlerweile großes Potenzial bei der Montage auf. Ebenso wie die kollaborative Montage mit einem Cobot, zählt die Unterstützung des Menschen durch Assistenzsysteme zu diesen Innovationen. Assistenzsysteme sind technische Geräte, die Informationen aufnehmen und verarbeiten, um Beschäftigte bei der Durchführung von Montagearbeit ggf. multimodal zu unterstützen. Diese Systeme bieten die Chance bei richtiger Gestaltung des Systems einen positiven Beitrag zur digitalen Prozesskette zu leisten und auch bei komplexeren Montageaufgaben die Produktivität zu steigern. Nicht nur das Assistieren bei der Arbeit, sondern auch die automatisierte Überprüfung und Dokumentation von Arbeitsschritten sowie eine einfachere Einarbeitung von Mitarbeitenden können wesentlich zur Optimierung der Montage beitragen.

Ein neuartiger Ansatz bei der stetigen Verbesserung von Montageprozessen bietet die Kombination der Mensch-Roboter-Kollaboration mit einem Assistenzsystem. Dieses sogenannte hybride Team, bestehend aus Mensch, Cobot und Assistenzsystem, bildet einen intelligenten Montagearbeitsplatz. Bei entsprechender Konzeptionierung können sich durch das Zusammenspiel der Akteure die Vorteile der jeweiligen Technologien optimal ergänzen. Dies hat positive Auswirkungen auf Faktoren wie Zeit, Kosten und Qualität. Durch kontinuierliche Verbesserung

und Weiterentwicklung von Technologien sowie Skaleneffekte sind sowohl Cobots als auch Assistenzsysteme für kleinere Unternehmen erschwinglich und gebrauchstauglicher geworden. Hinsichtlich des aktuellen industriellen Wandels in Richtung Industrie 4.0 bietet der Einsatz intelligenter Arbeitsplätze durch »smarter« gestaltete Prozessketten großes Potenzial, mit dem globalen Wettbewerb Schritt halten zu können.

Auf dieser Ausgangslage fußt das Projekt InKoMo – Interaktive, kollaborative Montage komplexer Bauteile, gefördert von der Bayerischen Forschungstiftung (AZ-1401-19). Ein Ziel des Projektes war es, den hier vorliegenden Leitfaden zu entwickeln.

## ZENTRALE LEITFRAGEN FÜR DIE ERSTELLUNG SIND

### Was wird im Leitfaden behandelt?



Der Leitfaden soll ...

... eine Handlungsanweisung für die systematische Planung und Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen mit Assistenzsystemen darstellen,

... es erlauben, systematisch hybride Arbeitssequenzen aus bestehenden manuellen Montageschritten zu ermitteln, sowie

... eine Hilfestellung bei der Umwandlung von Montageprozessen ausgehend von manuellen in hybride Montagesysteme liefern.

### Was wird im Leitfaden nicht behandelt?



Der Leitfaden soll **nicht** ...

... Anleitung zur Risikobeurteilung von hybriden Arbeitsplätzen sein,

... für die technische Auswahl von MRK-Komponenten und -Assistenzsystemen dienen, sondern lediglich eine Orientierung für mögliche Systeme bieten. Dazu werden ausgewählte Assistenzsysteme vorgestellt, jedoch keine Anleitung zur technischen Auswahl geliefert, da dies in den meisten Fällen in hohem Maße applikationsspezifisch ist und stark vom Unternehmen bzw. dessen Strategie für die Umsetzung von Montageaufgaben und deren Randbedingungen ist,

... die möglichen Rückwirkungen durch die Teilautomatisierung von Abläufen auf das Produkt beleuchten. Die Schnittstelle zur Produktentwicklung (Konstruktion, Produktdesign, Design for Manufacturing) bleibt innerhalb dieses Leitfadens unberücksichtigt.

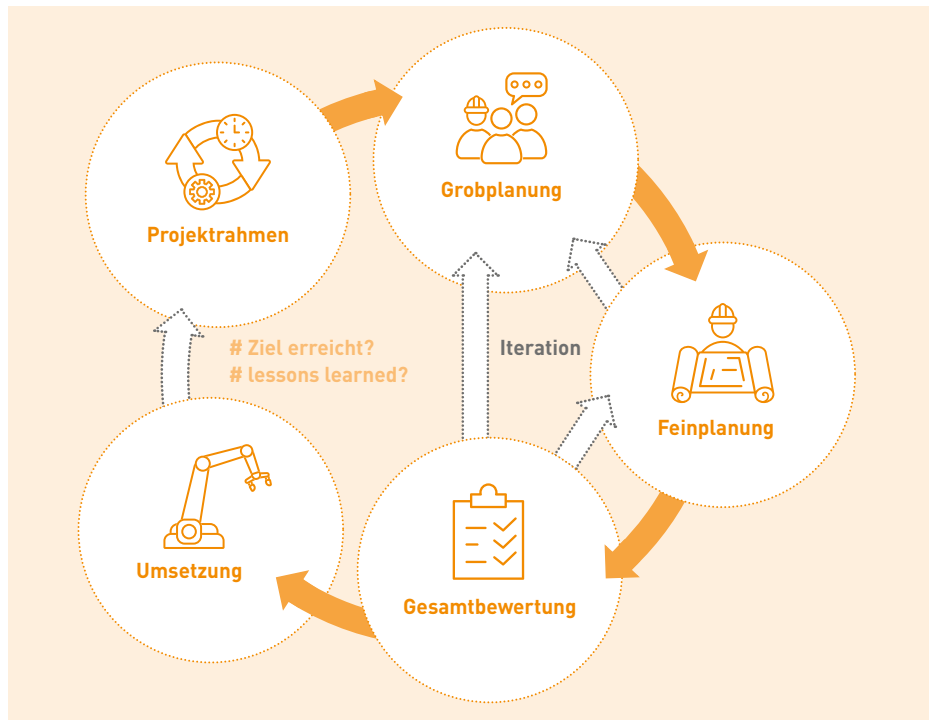
Aus diesen Prämissen ergibt sich die Zielgruppe für diesen Leitfaden. Er richtet sich an Produktionsplaner, die einen hybriden Arbeitsplatz einführen wollen, Anlagenoptimierer, bspw. aus der Instandhaltung, die Potenzial in der Produktion durch assistierte Mensch-Roboter-Arbeitsplätze ausschöpfen wollen.

Dieser Leitfaden ist nicht nach dem klassischen Muster einer wissenschaftlichen Arbeit gegliedert, also der systematischen Rezension des Stands der Wissenschaft, sondern beginnt mit der Vorstellung der einzelnen Technologien für ein hybrides Team. Dieses Wissen fließt dann in ein Vorgehensmodell zum Aufbau hybrider Arbeitsplätze ein, dessen Anwendung an einem Beispiel ausführlich illustriert wird. Erst am Ende wird der aktuelle Stand der Wissenschaft dargestellt, um den Leitfaden abzurunden.

## METHODIK

Die in diesem Leitfaden vorgeschlagene Methodik bedient sich einem iterativen Prozess, welcher die Prozessschritte Projektrahmen, Grobplanung, Feinplanung, Gesamtbewertung und Umsetzung durchläuft. Je nach Erreichung der im Projektrahmen festgelegten Projektzielen, können weitere Iterationen erfolgen. Eine Iteration kann in dem Prozessschritt starten, in welchem Optimierungen vorgenommen werden müssen.

Abbildung 1: Vorgeschlagene Methodik zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze



Beginnend wird der Projektrahmen definiert und der Projektumfang abgegrenzt. In diesem ersten Schritt wird die Ausgangssituation analysiert und Anforderungen definiert. Darauf folgt eine Potenzialanalyse der Komponenten und die Festlegung der Projektziele. Nachdem der Projektrahmen festgelegt ist, wird in den Prozessschritt Grobplanung gewechselt. Der bestehende Montageprozess wird in diesem Prozessschritt analysiert, die Interaktionsformen bestimmt und Gestaltungslösungen für die Umsetzung erarbeitet. Ist die Grobplanung abgeschlossen, wird im Abschnitt Feinplanung das Arbeitsplatzlayout erstellt, die hybride Montagesequenz ausgetaktet, sowie eine Bewertung der Sicherheit vorgenommen. Im Prozessschritt

Gesamtbewertung werden verschiedene Arbeitsplatzlayouts bewertet und miteinander verglichen. Anhand einer Nutzwertanalyse wird überprüft, ob das gewählte Layout den Anforderungen und Projektzielen entspricht. In der Umsetzung wird zunächst eine Machbarkeitsanalyse mit den Systemkomponenten durchgeführt. Anschließend wird die Sequenz implementiert und gegebenenfalls optimiert. Außerdem sollte hier ein Schulungskonzept für die Beteiligten erstellt werden.

## Vorstellung der Technologien und Auswahlhilfe

Wenn Sie bereits über die Grundlagen zu roboterbasierten Montagetechnologien und Assistenzsystemen verfügen, können Sie dieses Kapitel überspringen.

Was sind Montagesysteme?

Komplexe Bauteile bestehen in der Regel nicht aus einem Teil, sondern werden durch unterschiedliche Einzelteile, die zumeist aus verschiedenen Materialien bestehen, zusammengefügt. Diese Gruppierung und vor allem die Fügeprozesse, welche den Zusammenhalt einzelner Bauteile gewährleisten und somit eine komplexere Baugruppe bilden, wird Montage genannt [1]. Da die Dauer der Montage je nach Komplexität der Bauteile und Fügeprozesse zunimmt, können die für die Montage notwendigen Systeme in verschiedene Kategorien unterteilt werden.

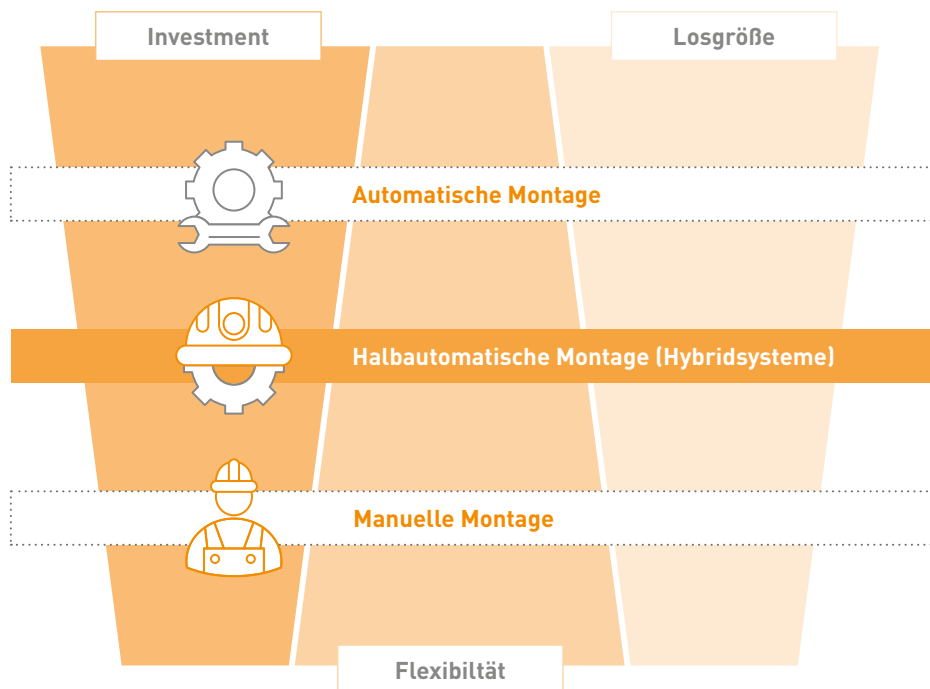


Abbildung 2: Einordnung der Montagesysteme [1]

Es ist zu erkennen, dass die manuelle Montage, insbesondere durch die sensorischen Fähigkeiten des Menschen, mehr Flexibilität erlaubt, wohingegen die automatische Montage hier nachteilig ist. Die halbautomatische Montage siedelt sich demnach im Mittelfeld an. Die automatische Montage wird bei sehr hohen Losgrößen eingesetzt und erfordert ein hohes Investment. Dadurch dass die Maschinen meist nur für ein gewisses Bauteil mit sehr hohen Losgrößen eingesetzt werden, ist die Flexibilität an dieser Stelle sehr gering. Dem gegenüber steht die manuelle Montage. Hier ist die Flexibilität maximal. Somit lassen sich mit einem solchen Montagesystem kleine Losgrößen mit einem geringen Investment fertigen. Die hybride Montage als Mischform zwischen manueller und automatisierter Montage mit Hilfe von Cobots erfordert zwar ein höheres Investment, kann jedoch mit den weitaus teureren automatischen Systemen mit vergleichbarer Montagekomplexität mithalten [1].

Und was genau ist hybride Montage?

In der Regel wird von hybriden Arbeitsplätzen gesprochen, wenn sich Mitarbeitende mit einem Roboter den Arbeitsplatz teilen und zusammen einzelne Bauteile zu Baugruppen montieren. Da sich die hybride Montage in der Mitte der beiden schon erwähnten Montagearten befindet, liegt ihre Stärke darin, den Zusammenbau von Baugruppen mit überschaubaren Stückzahlen zu gewährleisten und dabei ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit aufzuweisen. Wann von einer Stückzahl gesprochen wird, die für den Einsatz von Hybridsystemen interessant ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Zum einen spielt die Menge, die zu einem gewissen Zeitpunkt produziert werden soll, eine gravierende Rolle, jedoch wird auch die Komplexität der Fügeschritte und der Arbeitsinhalte in die Bewertung mit einbezogen. Da der Produktlebenszyklus immer weiter reduziert wird und die Vielfalt der unterschiedlichen Produkte steigt, gewinnen Montagesysteme wie die hybride Montage immer mehr Bedeutung in der industriellen Produktion [1]. Durch die technische Möglichkeit Mensch-Roboter-Interaktion (MRK) zu realisieren, wird dem Menschen ermöglicht dicht mit einem Roboter ohne Schutzzaun zusammenzuarbeiten. Dieses enge Agieren zwischen Mensch und Roboter ermöglicht es, strukturierte hybride Montagesysteme zu schaffen, die die Stärken von Mensch und Roboter nutzen [2].

## 1. COBOTS

### 1.1. Was ist ein Cobot?

Ein Cobot oder auch kollaborierender Roboter ist ein für die direkte Interaktion mit dem Menschen konstruierter Roboter. Mensch und Roboter arbeiten dabei als Team gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum. Die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter wird allgemein als Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) bezeichnet.

Das MRK-Team verbindet dabei die Flexibilität, kognitive Fähigkeiten und Feinmotorik des Menschen mit den Stärken des Roboters wie Ausdauer, Präzision und Wiederholgenauigkeit. Die Sicherheit des Menschen wird dabei durch eine Reihe von Sicherheitsprinzipien und einer Risikobewertung des Arbeitsplatzes gewährleistet.



Abbildung 3: (links) Roboter UR3 der Firma Universal Robots A/S [3],  
(mittig) Roboter LBR iiwa 14 R820 der KUKA AG [3],  
(rechts) Roboter APAS assistant der Robert Bosch GmbH [3]



## 1.2 Welche Interaktionsformen gibt es?

Die Interaktionsformen zwischen Cobot und Mensch lassen sich nach den jeweiligen Arbeitsräumen, der verrichteten Arbeit und den Berührungspunkten in folgende fünf Interaktionsszenarien unterteilen:

- **Zelle:** klassischer Schutzzaunbetrieb, keine Interaktionsmöglichkeit zwischen Mensch und Roboter.
- **Koexistenz:** Mensch und Roboter arbeiten ohne trennenden Schutzzaun nebeneinander, haben allerdings getrennte Arbeitsräume.
- **Synchronisiert:** Mensch und Roboter arbeiten im gleichen Arbeitsraum, allerdings nicht zur gleichen Zeit.
- **Kooperation:** Mensch und Roboter arbeiten gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum, jedoch nicht am selben Objekt.
- **Kollaboration:** Mensch und Roboter arbeiten gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum, am selben Objekt.

Derzeit liegt ein Großteil der implementierten industriellen Anwendungen in den Bereichen »Koexistenz« und »Synchronisiert«. Die Interaktionsformen »Kooperation« und »Kollaboration« bergen hohes Potenzial zur Produktionssteigerung, haben sich jedoch aus Gründen der Sicherheit und mangelnder Systemintelligenz noch nicht in der Industrie etabliert – hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. [4]

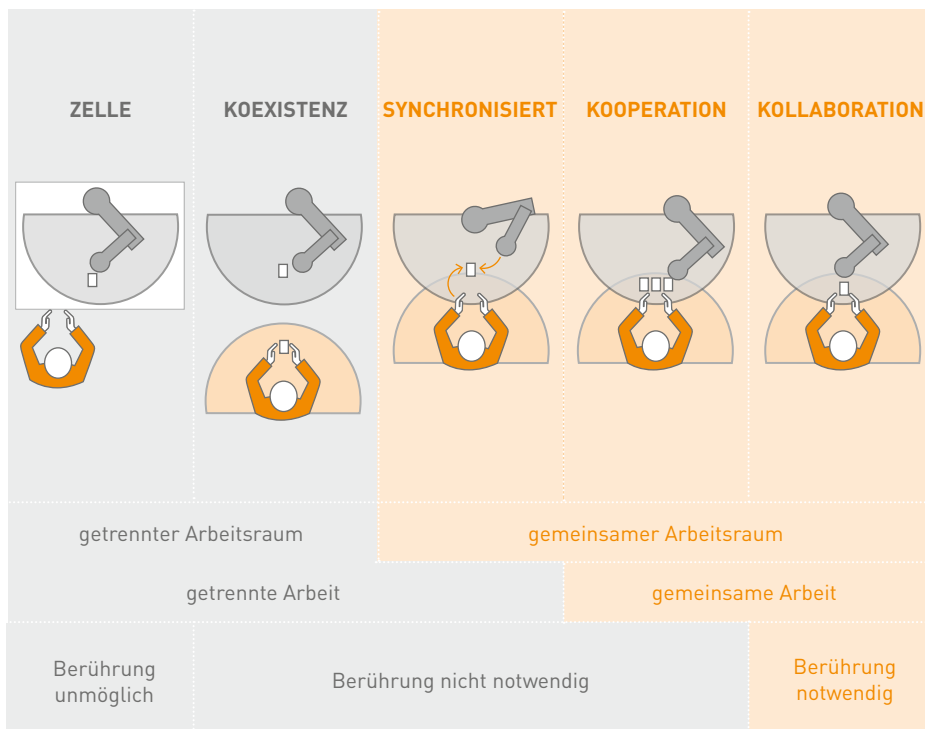


Abbildung 4: Verschiedene MRK-Interaktionsformen [4]

## 2. TECHNOLOGIEBESCHREIBUNG

### 2.1 Aufbau

Cobots bestehen, wie auch konventionelle Industrieroboter, aus Armen, die durch Gelenke miteinander verbunden sind. Sie werden über Servomotoren angetrieben. Innerhalb der Gelenke sind Sensoren verbaut, die Kraft, Momente und Geschwindigkeit regeln und durch Begrenzungen dieser für die Sicherheit des Arbeitenden sorgen. Am Flansch des Roboters wird ein Endeffektor angebracht, welcher die Bearbeitung am Werkstück vornimmt. Der Endeffektor unterscheidet sich je nach durchzuführender Tätigkeit und kann beispielsweise ein Greifer, ein Mess- oder ein anderes Werkzeug sein. Der Roboter besitzt eine eigene Steuerung, welche sich häufig über ein Bedienpanel bedienen lässt. Die klassischen Merkmale, nach denen ein Roboter ausgewählt wird, sind seine maximale Reichweite, die Wiederholgenauigkeit, das maximale Handhabungsgewicht, die maximale Ausführungs geschwindigkeit, sowie die Sensitivität der verbauten Kraft- und Momentensensorik. Bei Cobots nimmt außerdem die Bedienerfreundlichkeit und die Einfachheit der Programmierung und des Teachens einen wachsenden Stellenwert ein. Mitarbeitende sollen hierdurch in der Lage sein, Cobots ohne tiefe Vorkenntnisse und ohne Unterstützung durch Experten schnell in Betrieb zu nehmen und ebenso für neue Aufgaben anzupassen.

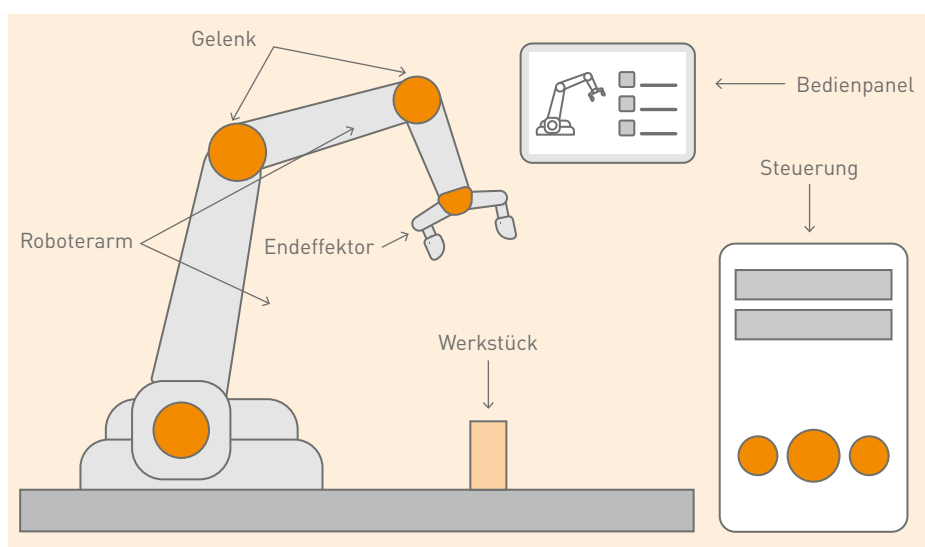


Abbildung 5: Komponenten eines Cobot-Systems – eigene Darstellung

### 2.2 Endeffektor

Endeffektoren zählen zur Peripherie für einen Cobot und bilden das Bindeglied zwischen dem Roboter und dem Werkstück. In der Industrie werden eine Vielzahl verschiedener Endeffektoren verwendet, am häufigsten sind das Greifer, welche beispielsweise in der Montage Teile bereitstellen, festhalten oder in Einzelfällen auch fügen können. Im Vergleich zu konventionellen Industrierobotern ergeben sich für Greifer im MRK-Einsatz einige Besonderheiten. Diese müssen für einen sicheren Halt des Werkstücks sorgen, sowie eine Abstands- und Geschwindigkeitsüberwachung haben. Außerdem sorgt eine Leistungs- und Kraftbegrenzung für eine sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen. MRK-Greifer sind zudem einfach zu programmieren und durch universelle Schnittstellen schnell in bestehende Montageprozesse einzubinden. Die Sicherheit des MRK-Greifers muss in der Risikobeurteilung des Gesamtsystems mit einbezogen werden. Hierbei helfen sowohl aktive als auch passive Sicherheitsmaßnahmen.

**Aktive Sicherheitsmaßnahmen:**

- Aktive Sensorik erkennt und verhindert Druckkräfte beim Schließen des Greifers, wenn Kontakt zu einem Menschen besteht
- Verringerte Geschwindigkeit beim Bewegen von Teilen
- Unkritische Trajektorienplanung z.B. wenn der Endeffektor stets abgewandt vom Mitarbeitenden ist
- Kapazitive Sensoren erkennen Annäherung von Menschen an die mechanische Struktur des Cobots frühzeitig

**Passive Sicherheitsmaßnahmen:**

- Verringerung der Masse der bewegten Teile
- Abrunden von Kanten und Ecken des Greifers
- Vergrößerung der potenziellen Kontaktflächen
- Verwendung von Polsterungen oder nachgiebigen Gelenken

**Arten von Endeffektoren**

Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in der Industrie gibt es neben den am häufigsten verwendeten Zwei- oder Dreibackten-Greifern viele weitere Endeffektoren, die je nach Einsatzzweck sinnvoll sein können. Die Greiffinger bzw. Greifbacken spielen eine wichtige Rolle bei der Wahl des richtigen Greifers, da diese häufig an die Bauteilform angepasst werden müssen. Manche Greifer bieten daher die Möglichkeit selbst entworfene Greiffinger anzubringen, z.B. 3D-gedruckte Greiffinger. Reicht ein einzelner Greifer nicht aus, besteht die Möglichkeit einen Dual-Gripper einzusetzen, also zwei Greifer an einem Roboter oder eine Greiferwechselsystem. Mit einem Greiferwechselsystem kann während des Prozesses vollautomatisiert zwischen mehreren Greifern gewechselt werden. In folgender Tabelle werden einige Greifarten nach dem physikalischen Wirkprinzip sowie Greifsystem und andere Endeffektoren gelistet:

Greifarten		Greifsysteme	
phys. Wirkprinzipien	Greifer		
 Mechanische Greifer	Parallelgreifer	Dualgripper	
	Gelenkfingergreifer		
 Pneumatische Greifer	Vakuumsauger	Greiferwechselsystem	
	Membrangreifer		
 Elektrische Greifer	Elektromagnetgreifer	<b>andere Endeffektoren</b>	
	Elektrostatische Greifer	Additiv gefertigte Greiferbacken	
 Adhäsive Greifer	Kapillargreifer	Schrauber	
	Klebstoffgreifer	Schweißsystem	

### 3. SICHERHEIT

Die Sicherheitstechnik für Cobots ist in der DIN ISO/TS 15066:2017-04 definiert und umfasst Themen für die Anforderungen bei der Leistungs- und Kraftbegrenzung, die inhärente Sicherheit durch angepasste Konstruktion und Steuerung sowie die Auswahl geeigneter Sicherheitstechnik für den Arbeitsplatz. Zusätzlich wurden nach DIN EN ISO 10218-1:2006-06 2006 weitere Sicherheitsprinzipien für die Mensch-Roboter-Kollaboration definiert.

#### Sicherheitsprinzipien:

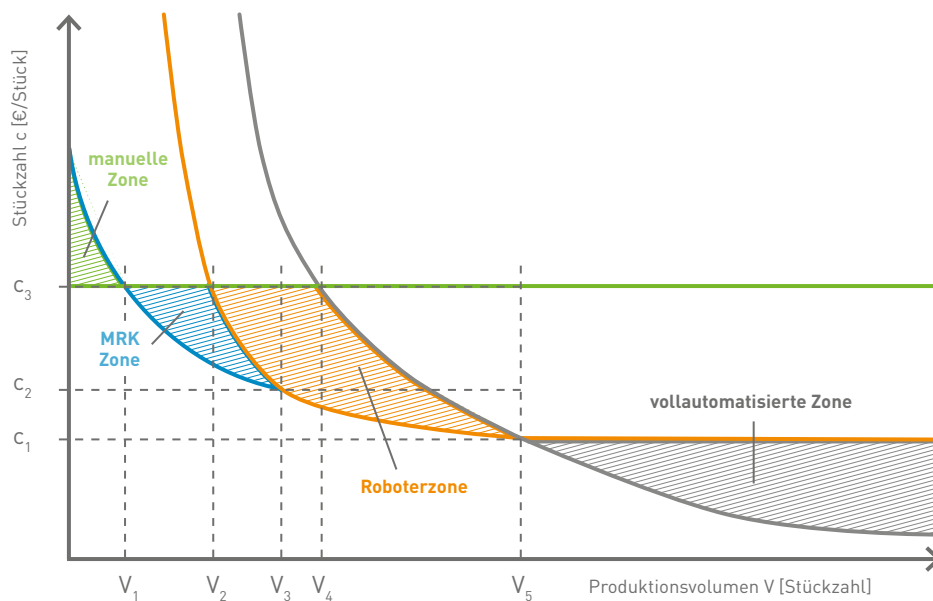
- **Stopp:** Sicherheitszone im Nahbereich des Roboters wird überwacht. Wenn der Mensch in den Sicherheitsbereich kommt, stoppt der Roboter. Wenn der Mensch die Zone verlässt, arbeitet er weiter.
- **Handführung:** Mensch führt den Roboter durch Anfassen am Werkzeug. Freigabe durch Zustimmungstaster.
- **Abstandsüberwachung:** Dynamische Sicherheitszone um den Roboter, die den relativen Abstand zwischen bewegten Roboterteilen und Mensch misst.
- **Kontaktregelung:** Kontakt mit dem Roboter ist durch Design oder Steuerungstechnik soweit abgeschwächt, dass er dem Menschen keinen Schaden zufügt. Die Kollisionskraft des Roboters wird dabei gegen einen Toleranzwert abgeglichen. Bei Überschreiten des Toleranzwertes greift eines der vorherigen Schutzprinzipien. [3]

Im Allgemeinen fallen Roboter ebenfalls unter die Zuständigkeit der EU-Richtlinie für grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Maschinenanlagen und benötigen deshalb eine Risikobeurteilung nach der DIN EN ISO 12100:2011-03 2011.

### 4. WARUM MRK?

Die MRK ist ein neues Automatisierungsparadigma, das sich in den letzten 10 Jahren aufgrund des wachsenden Trends von der Massenfertigung zur Massenspezialisierung entwickelt hat. Wie in folgender Abbildung qualitativ dargestellt, ist die MRK für kleinere Losgrößen (zwischen V1 und V3) eine wirtschaftliche Variante der Herstellung – es ergibt sich eine »Sweet Zone«. Für Unternehmen, die entweder Stückzahlschwankungen bei einem bestehenden Produkt beobachten oder ihre Montagesysteme für die zukünftigen Produkte planen ist MRK zielführend.

Daraus ergibt sich die Herausforderung, welche »Art und Tiefe« der Automatisierung in der Spannweite manueller bis vollständig autonomer Montage gewählt wird. Je nach Ausprägung ist einerseits der investive Initialaufwand hoch (Vollautomatisierung) und es drohen hohe Stückkosten bei nicht abgerufenen Produktionszahlen. Andererseits ist der Anteil der Lohnkosten bei einer rein manuellen Montage im Vergleich sehr hoch. Die MRK bietet hierbei die Möglichkeit der kostengünstigen Flexibilisierung im beschriebenen Stückzahl-dilemma.



**Gewinnschwellen**

- $V_1$ : MRK = manuell
- $V_2$ : Roboter = manuell
- $V_3$ : Roboter = MRK
- $V_4$ : vollautomatisiert = manuell
- $V_5$ : vollautomatisiert = Roboter

- manuelle Montage
- Mensch-Roboter-Kollaboration
- Roboterautomatisierung
- Vollautomatisierung

Abbildung 6: Die »Sweet Zone« der MRK als wirtschaftlichste Herstellungsmethode [5]

Im Vergleich zur Vollautomatisierung und der manuellen Montage ergeben sich diverse Vor- und Nachteile der MRK, die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst sind.

Tabelle: Vor- und Nachteile der MRK gegenüber der Vollautomatisierung und der manuellen Montage. [3]

	Vorteile von MRK	Nachteile von MRK
gegenüber manueller Montage	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ konstante Produktqualität</li> <li>+ Unabhängigkeit von Personal</li> <li>+ erhöhte Ergonomie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zusätzliche Investitionen für Roboter</li> <li>- Renditenforderungen (Ergonomie)</li> <li>- verschärftes Sicherheitskonzept</li> </ul>
gegenüber Vollautomatisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Nicht-Automatisierbarkeit von Teilprozessen</li> <li>+ keine aufwändige Zuführung</li> <li>+ reaktive Fähigkeiten des Menschen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lohnkosten für den Menschen</li> <li>- aufwändige Arbeitsablaufplanung</li> <li>- verschärftes Sicherheitskonzept</li> </ul>

## 5. WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

MRK stellt hinsichtlich des Verhältnisses von variablen und fixen Stückkosten einen Mittelweg im Vergleich zur rein manuellen und vollautomatischen Montage dar (Abbildung 7). Damit muss eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit von MRK auch immer im Vergleich zu diesen beiden Alternativen erfolgen. Durch den Einsatz des Roboters können, im Vergleich zur manuellen Montage, die variablen Kosten für den Werker gesenkt werden. Im Vergleich zur Vollautomatisierung sind die Fixkosten für die Automatisierungstechnik bei einer MRK geringer.

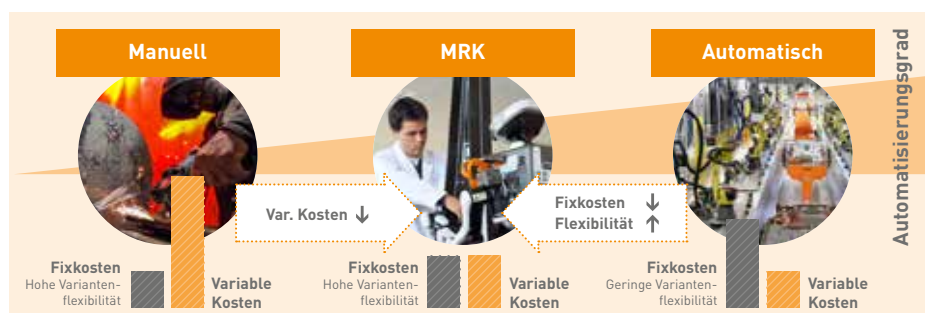


Abbildung 7: MRK als Mittelweg zwischen manueller Montage und Vollautomatisierung [3]

Das Grundproblem eines wirtschaftlichen Einsatzes von MRK stellt die Kombination aus Investitionen in Automatisierungstechnik in Verbindung mit zusätzlichen variablen Kosten für den Menschen dar. Die Gestaltung der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter ist daher die wichtigste Aufgabe bei der Planung von MRK-Arbeitsplätzen. Die Anwendung von MRK ist nur dann rentabel, wenn Mensch und Roboter einen Großteil ihrer Zeit wertschöpfend am Produkt arbeiten. [3]

### Wirtschaftliche Vorteile von MRK gegenüber Vollautomatisierung sind ...

- ... geringerer Flächenbedarf durch Wegfallen sonst notwendiger Sicherheitsabstände zu den Anlagen.
- ... erhöhte Ergonomie durch die Kombination der Stärken des Menschen und des Roboters.
- ... verbesserte Intuitivität, da kleinere Änderungen direkt durch den Menschen erfolgen können.
- ... verringerte Aufwände für Peripherie, da trennende Schutzeinrichtungen und vollautomatische Vereinzelungs- und Zuführtechnik wegfallen.
- ... vereinfachte Prozessabsicherung, da der Mensch als Problemlöser fungieren kann.

### 5.1 Lebenszyklusansatz

Um die Wirtschaftlichkeit einer Roboteranlage über seinen kompletten Lebenszyklus hinweg abzubilden, hat sich die Methode des Life-Cycle-Costing (LCC) etabliert. Beim LCC werden die Kosten einer Anlage in den einzelnen Phasen ihres Lebenszyklus transparent dargestellt (Abbildung 8). Anhand des Net Present Value (NPV) kann dadurch die Amortisationszeit einer Roboteranlage berechnet werden (Zeitspanne bis zu einem NPV von Null). Diese Amortisationszeit ist aufgrund der schwierigen Umrüstbarkeit von klassischen Roboteranlagen meist auf eine Zeitspanne von zwei bis drei Jahren festgesetzt. MRK-Anlagen werden deshalb bei der Lebenszyklusbetrachtung im Vergleich zu vollautomatisierten Anlagen häufig als zu negativ

dargestellt, da ihre hohe Universalität und deutlich längere Lebensdauer nicht mit in die Bewertung einfließen. [3]

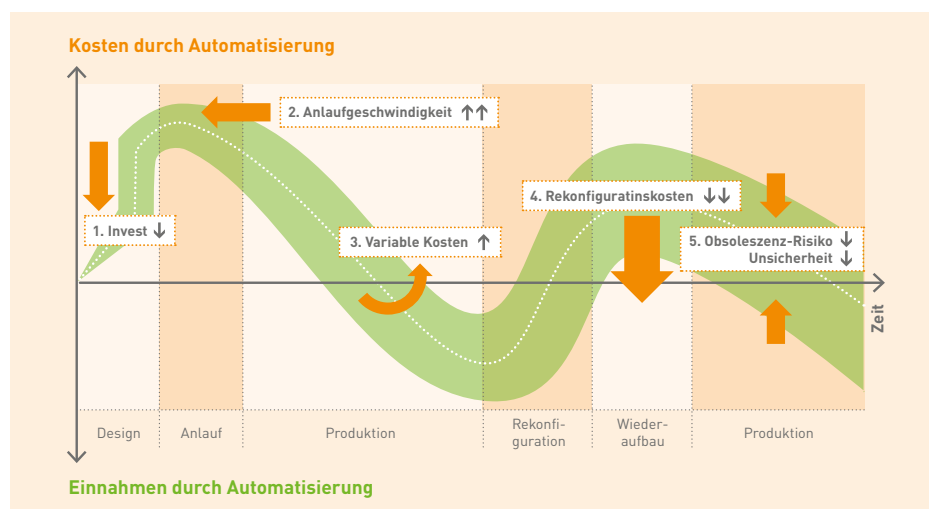


Abbildung 8: Entwicklung des Net Present Value (NPV) über den Lebenszyklus einer Roboteranlage und Potenziale durch MRK. [3]

Wirtschaftliche Vorteile von MRK entlang des Lebenszyklus der Roboteranlage sind ...

- ... kürzere Time-to-Market der Produkte, da die technische Gestaltung der Anlage einfacher ist als bei einer Vollautomatisierung.
- ... günstigere Umrüstung der Anlage auf neue oder geänderte Produkte.
- ... geringeres Obsoleszenz-Risiko der Anlage im Vergleich zur Vollautomatisierung.

Daraus abgeleitet werden Randbedingungen und Einsatzgrenzen von Cobots sichtbar:

### RANDBEDINGUNGEN UND EINSATZGRENZEN

#### Cobots eignen sich für:



... die (Teil-)Automatisierung von Montageprozessen.

... Montageprozesse mit hoher Variantenvielfalt.

... die Steigerung der Ergonomie in Montageprozessen.

#### Cobots eignen sich nicht für:



... Anleitung zur Risikobeurteilung von hybriden Arbeitsplätzen.

... das Aufbringen hoher Kräfte auf das Bauteil.

... hohe Geschwindigkeiten im Arbeitsraum des Menschen.

In diesem Leitfaden ist das hybride Team bestehend aus Mitarbeitenden, Cobot und Assistenzsystem Gegenstand der Betrachtung. Insbesondere »smarte« Assistenzsysteme wie z.B. die Nutzung von Datenbrillen oder Projektionssystemen (»Pick-by-Light«) erfreuen sich steigender Beliebtheit in der Produktion. Der nun folgende Abschnitt beleuchtet einzelne Technologien, grenzt sie voneinander ab und definiert Einsatzgebiete und Grenzen.

## 6. ASSISTENZSYSTEME

### 6.1 Was ist ein Assistenzsystem?

Assistenzsysteme können die Arbeit der Beschäftigten und die Prozesse in der Montage, aber auch deren angrenzende Bereiche nachhaltig verändern. Gerade im vierten industriellen Wandel gewinnen assistierende Systeme bei der manuellen Montage stetig an Bedeutung, um so die digitale Transformation eines Unternehmens voran zu bringen. Viele Technologien haben heute schon einen Fortschritt erreicht, der den Einsatz bei komplexen Montageaufgaben möglich macht, so werden z.B. Kamera- und Projektionssysteme für die Qualitätskontrolle eingesetzt. Das folgende Kapitel verschafft einen Überblick, um die Auswahl eines geeigneten Assistenzsystems zu erleichtern. Der Fokus liegt hierbei auf optischen Assistenzsystemen, welche den Menschen kognitiv unterstützen, um so die Handlung der Mitarbeitenden im Sinne der Produktionsoptimierung, Nutzung von Informationen positiv zu beeinflussen.

### 6.2 Klassifikation

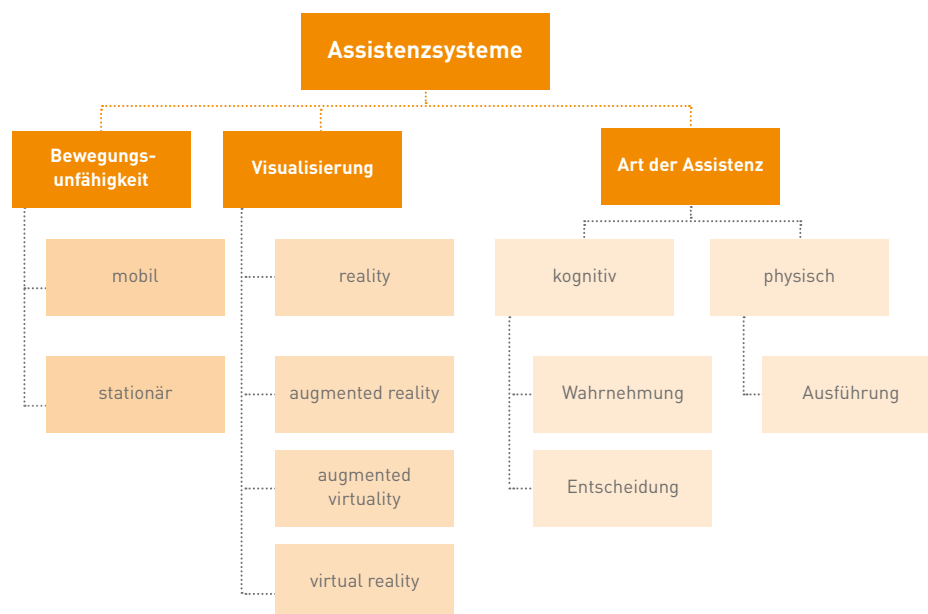


Abbildung 9: Klassifikation von Assistenzsystemen – eigene Darstellung

## 7. UNTERTEILUNG NACH MOBILEN UND STATIONÄREN SYSTEMEN

### 7.1 Mobile Systeme

Die ortsveränderliche Verwendung von Assistenzsystemen ist ein wichtiger Aspekt bezüglich Mobilität und Flexibilität. Mobile Assistenzsysteme bieten die Möglichkeit des Einsatzes ohne Aufbau bzw. zusätzlich Verkabelung und Infrastruktur. Wearables, am Körper getragene



Systeme wie z.B. Datenbrille oder Smartwatches, zählen u.a. zu mobilen Assistenzsystemen und sind speziell für Tätigkeiten ausgelegt, bei denen beide Hände der Mitarbeitenden für Primärtätigkeiten frei sind. Folgende Beispiele sind mobile Endgeräte, die im industriellen Kontext zum Einsatz kommen: [6]



Abbildung 10: Datenbrille als mobiles Assistenzsystem [7]

## 7.2 Stationäre Systeme

Bei stationären Assistenzsystemen handelt es sich um ortsfeste, in einen Arbeitsprozess integrierte Technologien, welche nur mit hohem Aufwand an einem anderen Ort nutzbar sind. [6]

Beispiele für stationäre Assistenzsysteme sind projektionsgestützte Assistenzsysteme, intelligente Bildverarbeitungssysteme oder Kamera-Projektionssysteme (eine Kombination aus beiden). Diese Systeme bieten bei stationären Montageplätzen eine Alternative zu mobilen Geräten, da sie die Bewegungsfreiheit und das Sichtfeld der Werkenden nicht beeinträchtigen. [8]

### Projektionsgestützte Assistenzsysteme

Individuell konfigurierbare Montageassistenzsysteme, die den Mitarbeitenden mit Pick-by-Light-Funktion, Markierungs- bzw. Positionierungsdarstellungen und Darstellungen von Text-, Bild- und Videoinhalten bei seiner Tätigkeit unterstützen. [9]



Abbildung 11: Projizierte Montageanweisungen, KLT (Kleinladungsträger)-Erkennung

### Intelligente Bildverarbeitungssysteme

- **Applikationsspezifische Bildverarbeitungssysteme:** Einsatzbereite Systeme, welche für einen spezifischen Anwendungsbereich konzipiert sind.
- **Konfigurierbare Bildverarbeitungssysteme:** Vielseitig einsetzbare Systeme, die häufig vom Anwendenden selbst über ein grafisches Benutzerinterface an die entsprechende Anwendung angepasst werden können.

- **Intelligente Kameras:** Bildverarbeitungssystem mit Auswerteeinheit, welche flexibel für verschiedene Aufgaben programmierbar sind.
- **Vision Sensoren:** Gesamtsystem, welches im Gegensatz zur intelligenten Kamera nur für eine bestimmte Applikation ausgelegt ist. [10]

#### Kamera-Projektionssysteme

- Individuell konfigurierbare Montageassistenzsysteme, die den Mitarbeitenden mit Pick-by-Light-Funktion, Markierungs- bzw. Positionierungsdarstellungen und Darstellungen von Text-, Bild- und Videoinhalten bei ihrer Tätigkeit unterstützen.
- Integriertes Kamerasystem zur Montagekontrolle und Objekterkennung.
- Mit Kamera und Projektor lassen sich virtuelle Buttons auf der Arbeitsfläche erzeugen und Feedback aus dem Prozess zu. [11]



Abbildung 12:  
Ein Kamera-Projektionssystem als stationäres Assistenzsystem [11]

#### 8. KERNBEREICH VIELER ASSISTENZSYSTEME IST DIE VISUALISIERUNG

Assistenzsysteme können in verschiedenen Bereichen des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums eingeordnet werden. Es stellt das gesamte Spektrum zwischen den beiden Endpunkten »Realität« und »Virtualität« sowie die dazwischenliegenden Übergänge dar. [12]

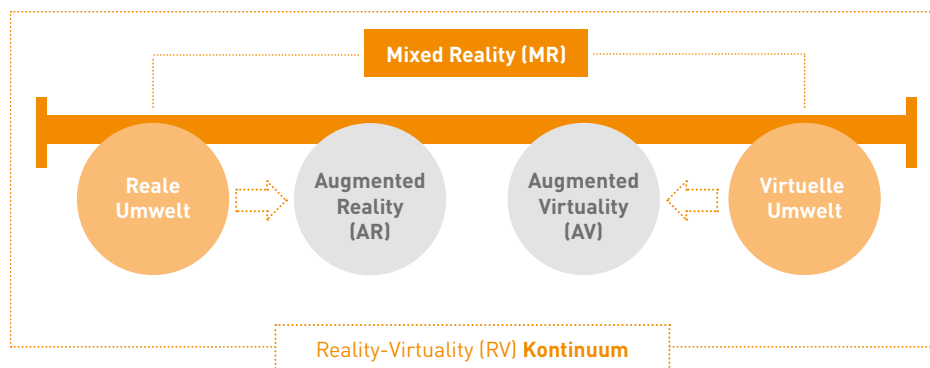


Abbildung 13: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram und Kishino (1994, 283). [12]

Mit dem Begriff Mixed-Reality wird ein Kontinuum bezeichnet, das zwischen virtueller und realer Welt verläuft. In einer Mixed-Reality-Umgebung werden virtuelle Informationen in eine physikalische Umgebung eingeblendet und die Trennung von realer und virtueller Welt aufgehoben. Ausgehend von der realen Welt nimmt der Grad der virtuell dargestellten Inhalte im Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach rechts hin zu, bis mit dem Begriff Virtual Reality eine rein virtuelle Welt definiert wird. [13]

Die Randbereiche reale und virtuelle Welt zählen jedoch nicht zur Mixed Reality. Die Ausprägungsformen AR und AV stellen im Kontinuum die beiden Mischbereiche dar. Unter Augmented Reality wird die Überlagerung der Realität mit virtuellen Inhalten in Form von Texten, Bildern, Videos bis hin zu komplexen, interaktiven 3D-Modellen verstanden. Dabei ist die Abgrenzung zu Augmented Virtuality fließend. Mit dem Begriff Augmented Virtuality wird das Einbinden realer Gegenstände in eine virtuelle Umgebung verstanden. [14]

### 8.1 Unterteilung nach Art der Assistenz

Kognitionsunterstützende Assistenzsysteme zur echtzeitnahen Informationsbereitstellung sind auf die funktionale Hilfe der Reaktions-, Denk-, Merk- und Schlussfolgerungsfähigkeit des Menschen ausgerichtet. Die Führung von Mitarbeitenden oder Kontrolle durch ein Assistenzsystem bietet bei einer variantenreichen und komplexen Montage die Möglichkeit einer Produktivitätssteigerung bei einer flexiblen Produktion und gleichbleibender Qualität. [9]

Je nach Baugruppe, Montageablauf und Anwendung können die Anforderungen an ein Assistenzsystem unterschiedlich ausfallen. Die Mitarbeitenden sollen bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten gezielt durch Verringerung der mentalen Belastung unterstützt werden. Assistenzsysteme für Montagezwecke in der Produktion lassen sich in Anlehnung an die menschliche Informationsverarbeitung in nachfolgender Darstellung kategorisieren. [15]

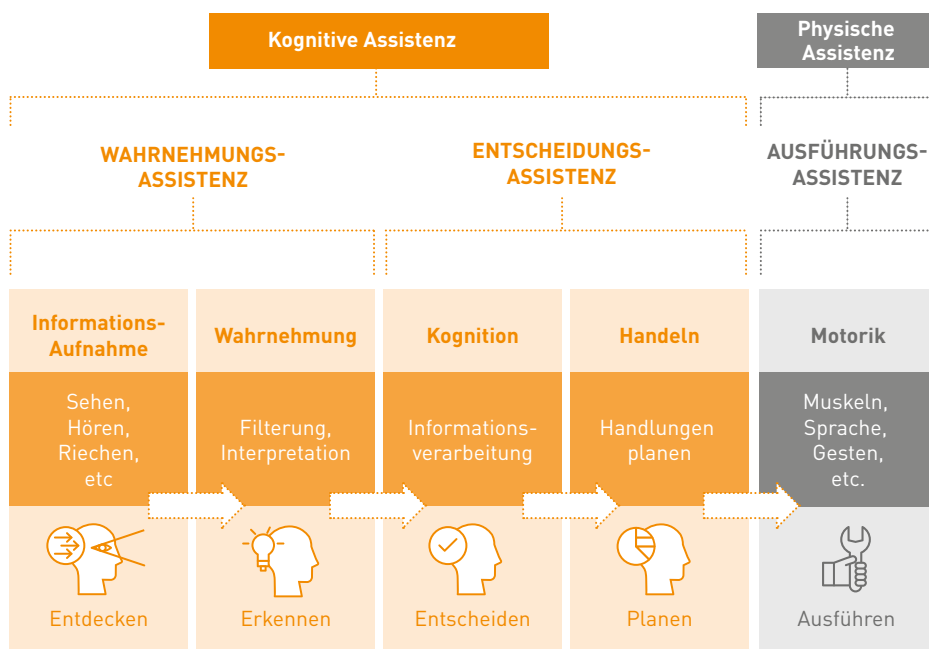


Abbildung 14: Kategorisierung von Assistenzsystemen in der Montage [15]

Bei der Kategorisierung aus Abbildung 14 wird grundsätzlich nach kognitiver und physischer Assistenz unterschieden. Eine spezifischere Abstufung der kognitiven Assistenz untergliedert

sich in **Wahrnehmungs- und Entscheidungsassistentz**, bei der physischen Assistenz in **Ausführungsassistentz**. Optische Assistenzsysteme sind in die Kategorie der kognitiven Assistenz einzuordnen [15].

#### Wahrnehmungsassistentz

Mit dieser Art der Assistenz werden die Werkenden bei der Aufnahme von Informationen und der Wahrnehmung, also Interpretation der Informationen, unterstützt. Relevant ist bei optischen Assistenzsystemen speziell die visuelle Wahrnehmung des Menschen. Durch gezielte Darstellung der Informationen können Kommissionier- oder Montagetätigkeiten optimiert werden, bei gleichzeitiger kognitiver Entlastung des Menschen. Die Informationsbereitstellung des Assistenzsystems kann durch direkte Projektion auf die Arbeitsfläche oder mittels Anzeige auf einem Display bzw. Monitor erfolgen. Dies kann in Form von Texten, Bildern, Videos etc. geschehen. Auch farbige Markierungen und Umrahmungen zur richtigen Platzierung oder Entnahme von Bauteilen sind möglich (Pick-by-Light). Gerade bei einer großen Variantenvielfalt eines Produktes kann durch ein derartiges Assistenzsystem ein großer Nutzen erzielt werden [15].

#### Entscheidungsassistentz

Diese Art von Assistenzsystem unterstützt gezielt die Lern- und Problemlösungsprozesse der Mitarbeitenden, also die kognitiven Fähigkeiten. Hierbei ist es wichtig, das richtige Maß an Informationen bereitzustellen, damit der Mensch entsprechend reagieren und Entscheidungen treffen kann. Es sollten nur so viele Informationen wie nötig bereitgestellt werden, da bei einer Informationsflut die Gefahr der Überforderung besteht. Durch diese Art der Unterstützung sind Prozessabläufe einfach nachvollziehbar und es kann flexibel auf Änderungen reagiert werden. Weiter bietet ein Assistenzsystem mit Entscheidungshilfe einen enormen Vorteil beim Einlernen neuer Mitarbeitenden oder Montagesequenzen, ohne zusätzliches Personal. Ein weiterer Vorteil ist eine einfache Anpassung des Montageablaufes aufgrund von Änderungen am Produkt oder am Montageprozess [15].

#### Ausführungsassistentz

Hierbei handelt es sich um die physische Unterstützung der Werkenden bei Montagetätigkeiten. Gezielt soll beim Ausführen von Tätigkeiten die Belastung des Menschen reduziert und eine körperliche Langzeitbelastung vermieden werden [15].

Weitere Assistenzsysteme, die eine physische Unterstützung bieten, wie bspw. Exo-Skelette zur Entlastung von Mitarbeitenden sind nicht Gegenstand dieses Leitfadens.

## 9. INTERAKTIVE, DIGITALE UND KOGNITIVE ASSISTENZSYSTEME

### 9.1. Was sind ...

#### ... interaktive Assistenzsysteme?

Unter interaktiven Assistenzsystemen (IAS) wird ein Endgerät oder ein Wearable-Computer (ein am Körper getragenes Computersystem) verstanden, der mit einer Rückkopplungseinheit an die Anwendenden angebunden ist. Die Rückkopplungseinheit dient zur Ausgabe von visuellen, akustischen und auch haptischen Informationen an die Anwendenden. Interaktive Assistenzsysteme gewährleisten eine Verarbeitung aller relevanten Daten in Echtzeit und wirken als Verstärker der menschlichen Fähigkeiten. Somit ist eine schnelle Entscheidungsfindung des Nutzenden möglich, sowie effiziente

Arbeitsabläufe trotz erhöhter Komplexität. Interaktive Assistenzsysteme müssen für eine schnelle Kommunikation im cyberphysischen System eingebunden sein. Sensoren bilden die Schnittstelle zwischen der virtuellen und realen Welt. [16]

#### ... digitale Assistenzsysteme?

Unter digitalen Assistenzsystemen wird eine interaktive Informations- und Kommunikationstechnologie verstanden, die bei bestimmten Tätigkeiten unterstützt. Sie geben arbeitsbezogene Informationen an den Anwendenden aus und können bei Bedarf relevante Daten von einer verbundenen Datenbank oder Maschine in Echtzeit abrufen, verarbeiten oder vermitteln. [6]

#### ... kognitive Assistenzsysteme?

Im Unterschied zum Abschnitt »Unterteilung nach Art der Assistenz« wird der Begriff »kognitiv« hier auf das Assistenzsystem selbst assoziiert. Kognitive Assistenzsysteme unterscheiden sich durch kognitive Kontrollmechanismen und Fähigkeiten von anderen technischen Systemen und sind mit künstlichen Sensoren und Aktoren ausgestattet. Diese Art von Assistenzsystemen ist in physischen Systemen integriert und agiert in der realen Umgebung. Kognitive Kontrollmechanismen lernen aus bestehenden Daten situative Verhaltensweisen zu adaptieren und können daher Fähigkeiten der Wahrnehmung, Schlussfolgerung und Planung übernehmen. [16]

#### Ein kognitives System ...

- ... kann Schlüsse ziehen.
- ... kann aus seinen Erfahrungen lernen.
- ... kann seine Aufgabe erlernen.
- ... ist sich seiner eigenen Fähigkeiten bewusst und kann diese im Rahmen seines Verhaltens beachten.
- ... kann robust auf unvorhergesehene Situationen reagieren. [16]

### RANDBEDINGUNGEN UND EINSATZGRENZEN

#### Assistenzsysteme eignen sich für:



... die kognitive Unterstützung von Beschäftigten.

... den Einsatz zum Einlernen neuer Montagesequenzen.

... Montageprozesse mit hoher Variantenvielfalt und komplexen Montageinhalten.

#### Assistenzsysteme eignen sich nicht für:



... die Verbesserung der Ergonomie.

... eine aktive Verbesserung der Arbeitssicherheit.

## 10. GEFAHREN UND RISIKEN

Abhängig von konkreten Tätigkeiten bei Montageprozessen sind Gefahren und Risiken noch unbekannt. Daher sind vor dem Einsatz von Assistenzsystemen die entwicklungsbegleitende Beobachtung und Dokumentation aller Risiken notwendig.

Einige bekannte Risiken beim Einsatz von Assistenzsystemen sind nachfolgend gelistet [6]:

- Fehlbeanspruchung der Augen
- Ergonomische Verwendung bei mobilen Assistenzsystemen zu einem Großteil vom Nutzungsverhalten abhängig
- Fehlhaltungen
- Eingeschränktes Sichtfeld
- Ablenkung
- Vermehrte Arbeitsunterbrechungen
- Subjektiv wahrgenommener, erhöhter Arbeitsstress
- Schlechtere selbstberichtete Gesundheit

## Vorgehen beim Aufbau hybrider Arbeitsplätze

Das nachfolgende Kapitel bietet eine Handlungsanweisung für die systematische Planung und Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen, bestehend aus Mensch, Roboter und Assistenzsystem. Dieses Vorgehen bietet Hilfestellung bei der Ermittlung hybrider Arbeitssequenzen aus bestehenden manuellen Montageschritten und bei der Neuplanung von hybriden Montageprozessen. Das Vorgehen ist als ein iterativer Prozess gestaltet, der nach Bedarf weitere Durchläufe erlaubt. Am Ende jedes Planungsschrittes kann anhand einer Checkliste überprüft werden, ob zusätzliche Iterationen nötig sind.

Das Vorgehen wird in diesem Leitfaden von relevanten Fragestellungen begleitet. Diese dienen der Orientierung und als Anreiz für weitere Denkanstöße. Im Anschluss an dieses Kapitel wird die vorgeschlagene Methodik anhand eines Umsetzungsbeispiels anschaulich dargestellt.

Die Bezeichnung »hybride Montage« wird meist im industriellen Umfeld für die Kombination aus Handarbeitsplätzen und Automatikstationen verwendet und strebt eine Teilautomatisierung an [1]. Der hier beschriebene Arbeitsplatz, an welchem Mensch, Roboter und Assistenzsystem gemeinsam während des Montageprozesses interagieren, führt ebenfalls zu einer Teilautomatisierung. Er wird daher in diesem Leitfaden als »hybrider Montagearbeitsplatz« bezeichnet.



Abbildung 15: Methodik zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze

### 1. PROJEKTRAHMEN

In der ersten Phase wird der Projektrahmen definiert, welcher dem Gesamtprozess einen roten Faden vorgibt. Hier wird die Ausgangssituation des zu betrachtenden manuellen Montageprozesses und der zu montierenden Baugruppen analysiert. Anschließend werden Anforderungen und Projektziele für den hybriden Montageprozess definiert.

## 1.1 Ausgangssituation analysieren und Anforderungen definieren

### Fragen:

Welche Anforderungen müssen die Systemkomponenten erfüllen?

Welche Anforderungen werden an den hybriden Arbeitsplatz gestellt?

Gibt es bereits vorhandene Lösungsansätze, die genutzt werden können?

### Antworten:

Welche Anforderungen müssen die Systemkomponenten erfüllen?

Die Vorüberlegungen dienen einer ersten Vorauswahl bezüglich Cobot, Assistenzsystem und weiteren Komponenten wie z.B. Montagehilfen und Transportsystemen. Bei einer Neuplanung des Arbeitsplatzes müssen neue Systemkomponenten beschafft werden, während bei einer Umwandlung eines vorhandenen Arbeitsplatzes die Möglichkeit besteht, Komponenten weiterzuverwenden oder anzupassen.

Die Anforderungen an den Cobot richten sich in erster Linie an die Reichweite, Traglast und Präzision. Aber auch Schnittstellen zu anderen Systemen sollten Berücksichtigung finden. Für die Entscheidung, welches Assistenzsystem gewählt wird, muss der Anwendungsbereich bzw. der erwartete Mehrwert festgelegt werden. Dies kann z.B. eine Mitarbeitendenführung durch den Montageprozess oder eine Montagekontrolle zur Minimierung der Fehlerquote und Qualitätssteigerung sein. Grundsätzlich müssen bei allen Systemkomponenten von vornherein die nötigen Sicherheitsvorschriften in Betracht gezogen werden, gerade im Hinblick auf eine Mensch-Roboter-Kollaboration. Eine ausreichende Energieversorgung und eine Netzwerkanbindung können weitere mögliche Anforderungen an die Arbeitsplatzumgebung sein.

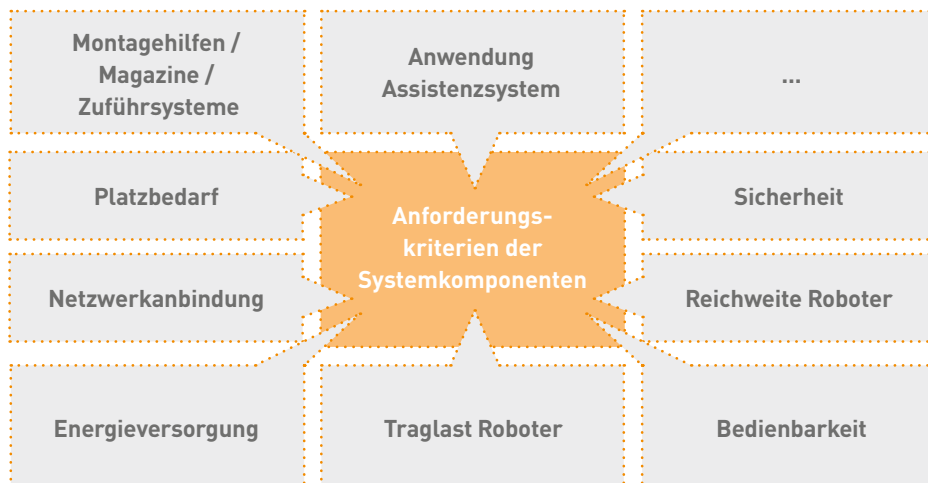


Abbildung 16: Mögliche Anforderungskriterien an die Systemkomponenten – eigene Darstellung

Welche Anforderungen werden an den hybriden Arbeitsplatz gestellt?

Sind die Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten definiert, erfolgt die Beschreibung allgemeiner Anforderungen an den hybriden Arbeitsplatz. Dies können beispielsweise die maximale Nutzungsdauer, der Automatisierungsgrad oder die Amortisationszeit des hybriden Montagesystems sein. Hierbei sollte bedacht werden, dass die maximale Nutzungsdauer eines hybriden Arbeitsplatzes aufgrund der Wiederverwendbarkeit der Systemkomponenten meist über die Produktlaufzeit einzelner Produkte hinausgeht (siehe S. 24 – Wirtschaft-



lichkeitsbetrachtung). Daher kann auch die Erhöhung des Automatisierungsgrades von bestehenden Montagearbeitsplätzen bei gleichzeitiger Erhaltung der Anpassungsfähigkeit des Arbeitsplatzes auf neue Produkte und Varianten durch einen hybriden Arbeitsplatz realisiert werden.

#### Gibt es bereits vorhandene Lösungsansätze, die genutzt werden können?

Eventuell können bereits teilautomatisierte Montagesequenzen oder vorhandene Systemkomponenten eingebunden werden. Dies kann die Einführung einer weiteren Komponente erleichtern, aber auch neue Herausforderungen für die Umsetzung eines hybriden Arbeitsplatzes mit sich bringen. Es bietet sich an, vor allem bestehende Magazine, Montagehilfen oder Zuführsysteme für eine mögliche Weiterverwendung zu überprüfen.

## 1.2 Potenzialanalyse

### Fragen:

Was ist hier mit einer Potenzialanalyse gemeint?

Ist das Gewicht des Bauteils für einen Cobot bzw. Greifer handhabbar?

Ergeben sich durch Bauteileigenschaften Gefahren für den Menschen?

Lässt die Formstabilität des Bauteils eine Automatisierung zu?

### Antworten:

Was ist hier mit einer Potenzialanalyse gemeint?

Die Potenzialanalyse zum Einsatz von Cobots in der Montage beschränkt sich an dieser Stelle auf einen pragmatischen Ablauf zur Potenzialabschätzung der zu montierenden Baugruppe. Die Integration von Cobots in der industriellen Montage ist insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Spezialisierung in Montageprozessen eine Herausforderung. Diese macht es gleichsam anspruchsvoll Handlungsempfehlungen einerseits abzuleiten und andererseits zu verallgemeinern. Im Gegensatz zur klassischen Fertigung, in der Cobots oftmals zur Maschinenbe- und -entschickung eingesetzt werden, sind die Montageeinhalte in Prozessketten und darin eingesetzte Technologien (wie z.B. Schrauben, Kleben, Messen etc.) deutlich komplexer sowie zeitlich und örtlich eng aufeinander abgestimmt.

Eine wirtschaftliche Potenzialabschätzung zur Auswahl eines für die Umrüstung auf MRK geeigneten Montagearbeitsplatzes findet hier nicht statt. Informationen zur wirtschaftlichen Bewertung von hybriden Montagearbeitsplätzen, beispielsweise mit der Methode des Life-Cycle-Costing (LCC), werden allerdings im Kapitel Cobot – Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (S. 24) bereitgestellt.

Eine gesamtheitliche Potenzialbewertung von möglichen MRK-Anwendungen bietet die stufenweise Auswahlstrategie des Fraunhofer Instituts für Industrial Engineering – »Schnelle Ermittlung sinnvoller MRK-Anwendungen«. [17]

Ist das Gewicht der Bauteile für einen Cobot bzw. Greifer handhabbar?

Die Traglast des Cobots und Endeffektors ist ausschlaggebend, ob ein Bauteil überhaupt gegriffen und platziert werden kann. Bei der Festlegung der Mindesttraglast eines Roboters ist das Eigengewicht des Endeffektors zu berücksichtigen, welches der Roboter zusätzlich bewegen muss. Des Weiteren ist die maximale Reichweite des Roboterarms zu beachten und bei der Bestimmung der Traglast mit einzubeziehen. Leichtbauroboter können eine Traglast von 3 kg bis 25 kg aufweisen. Die maximale Traglast ist jedoch nicht im gesamten Arbeitsraum gleich, sondern nimmt zumeist mit zunehmendem Radius ab. [18]

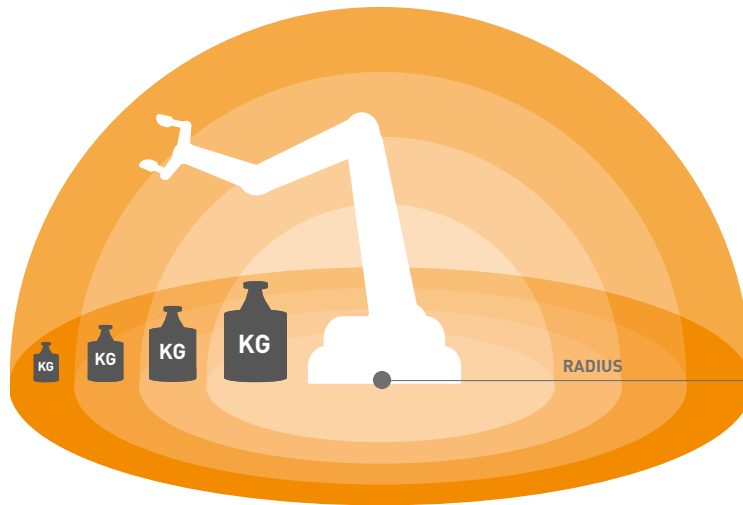


Abbildung 17: Arbeitsraum Roboter – eigene Darstellung

#### Ergeben sich durch Bauteileigenschaften Gefahren für den Menschen?

Gerade bei kollaborativen Arbeitsschritten muss eine Gefährdung des Menschen durch das Bauteil ausgeschlossen oder auf ein Minimum reduziert werden. Bei einer Kollision mit dem Menschen stellen scharfe Kanten oder spitze Ecken einer Komponente ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Eine ausführlichere Betrachtung der Sicherheit wird auf Seite 22 beschrieben. [19]

#### Lässt die Formstabilität des Bauteils eine Automatisierung zu?

Entscheidend für die Automatisierung einzelner Montageprozesse ist die Form und die Stabilität eines Bauteils. Formstabile Teile lassen sich meist besser von einem Roboter handhaben als formlabile (biegeschlaffe) Teile. Handelt es sich um formlabile Bauteile, wie z.B. Federn, Kabel oder Gummimembrane, ist der Aufwand einer Automatisierung wesentlich höher. Hierfür ist die Montage durch den Menschen weiterhin sinnvoll, während der Roboter parallel andere Tätigkeiten ausführt. [19]

Bei formstabilen Teilen muss eine ausreichende Fläche zum Greifen berücksichtigt werden. Zudem ist die Statik eines Bauteils entscheidend, um durch auftretende Kräfte beim Greifen keinen Schaden zu verursachen. [21]

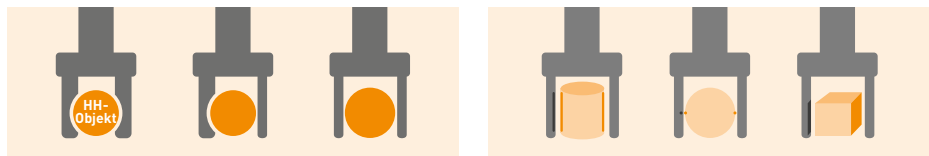


Abbildung 18: (links) Formschluss, Form-Kraftschluss, Kraftschluss, (rechts) Linienkontakt, Punktkontakt, Flächenkontakt

Je nach Greifer kann die Greifkraft variabel eingestellt oder durch individuell angefertigte Greifbacken angepasst werden. In Abhängigkeit der Greifart (Formschluss, Form-Kraftschluss, Kraftschluss) und Kontaktart (Linienkontakt, Punktkontakt, Flächenkontakt) lässt sich die Kraft pro Fläche beeinflussen [21].

### 1.3 Projektziele definieren

#### Fragen:

Was sind meine Projektziele und wie bewerte ich sie?

Gibt es ergänzende, konkurrierende oder neutrale Ziele?

#### Antworten:

Was sind meine Projektziele und wie bewerte ich sie?

Aus den zuvor definierten Anforderungen an den hybriden Arbeitsplatz werden hier konkrete Projektziele und Bewertungskriterien für die Umsetzung definiert. Für die Festlegung dieser Ziele bietet es sich an, einen Kriterienkatalog mit allen Projektzielen zu erstellen. Hierbei sollte eine Einteilung der Ziele nach Muss-, Kann- und Wunschkriterien, sowie nach bestimmten Zielarten (organisatorisch, technisch, wirtschaftlich, personell) erfolgen. [1]

Mögliche Projektziele sind:

- Erhöhung der Qualität
- Erhöhung der Produktivität
- Verbesserung der Ergonomie
- Erhöhung des Automatisierungsgrads
- Akzeptanz durch die Mitarbeitenden
- Verbesserte Wirtschaftlichkeit

Projektziel	Zielart	Verbindlichkeit
Senkung der variablen Kosten um 15 %	wirtschaftlich	muss
Steigerung der Taktzeit um 10 %	wirtschaftlich	muss
Automatisierungsgrad von 60 %	technisch	gewünscht
Steigerung der Ergonomie um 20 %	personell	kann

Abbildung 19: Beispiel Kriterienkatalog – eigene Darstellung

Gibt es ergänzende, konkurrierende oder neutrale Ziele?

Es ist sinnvoll, eigene Ziele nach komplementären, konkurrierenden und indifferenten Zielen zu unterscheiden. Ein Zielsystem, welches auf konkurrierenden Zielen aufgebaut wird, verfeinert durch den Prozess der Kompromissfindung die Kriterien für eine sinnvolle Zielpriorisierung und gibt erste Hinweise für Optimierungsaufgaben.

Ergänzende Ziele bei der Gestaltung von MRK-Arbeitsplätzen sind z.B. ...

... Verringerung der Fehlerquote – Senkung der Kosten

... höhere Akzeptanz durch den Menschen – kognitive Entlastung

Konkurrierende Ziele bei der Gestaltung von MRK-Arbeitsplätzen sind ...

... Verbesserung der Ergonomie – Senkung der Kosten

... hohe Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters – einfaches Sicherheitskonzept

Neutrale Ziele bei der Gestaltung von MRK-Arbeitsplätzen sind ...

- ... Verringerung der Fehlerquote – Verbesserung der Ergonomie
- ... Steigerung der Akzeptanz – Steigerung der Qualität

Nachdem die Anforderungen und Projektziele definiert, sowie eine erste Potenzialabschätzung durchgeführt ist, sollten nun erstmals alle beteiligten Betriebsparteien über den hybriden Arbeitsplatz informiert werden (siehe S.53 – Personalschulung durchführen). Es bietet sich an, operative Mitarbeitende und den Betriebsrat frühzeitig mit ins Boot zu holen, um sich deren Unterstützung zu sichern und die Akzeptanz für den hybriden Arbeitsplatz zu erhöhen.

## ITERATION NOTWENDIG?

### CHECKLISTE

- Anforderungen an hybriden Arbeitsplatz definiert
- Vorhandene Lösungsansätze / Teillösungen überprüft
- Montageprozess überprüft (neuer oder vorhandener Montageprozess)
- Baugruppe mit Cobot handhabbar
- Baugruppe für die Teilautomatisierung geeignet
- Mehrwert durch Assistenzsystem gegeben
- Kriterienkatalog mit Projektzielen erstellt

## 2. GROBPLANUNG

In der Grobplanungsphase wird der bestehende manuelle Montageprozess analysiert und ein Montageablauf für eine hybride Montagesequenz erarbeitet. Mit der Analyse des bestehenden Montageablaufs sollen mögliche Potenziale, aber auch Schwierigkeiten bei der Montage, am hybriden Arbeitsplatz erfasst werden. Aus den Ergebnissen der Analyse wird anschließend eine sinnvolle Aufteilung der Tätigkeiten zwischen Mensch, Assistenzsystem und Roboter erarbeitet. Dabei soll die Montagesequenz so getaktet sein, dass nach Möglichkeit für keinen der beiden Interaktionspartner Mensch und Roboter Wartezeiten entstehen.

### 2.2 Montageablauf analysieren

**Fragen:**

Wie lässt sich der Arbeitsablauf analysieren?

Wer übernimmt welchen Arbeitsschritt?

**Antworten:**

Wie lässt sich der Arbeitsablauf analysieren?

Als Methode der Reihenfolgeplanung und zur Ableitung einer hybriden Sequenz wird aus

der manuellen Montagesequenz eine Montagevorrangmatrix erstellt. Die Betrachtung der Vorrangbeziehungen der Komponenten kann für die Optimierung der Montagesequenz mit Robotereinsatz herangezogen werden. Möglicherweise ist eine Änderung der Montagereihenfolge sinnvoll und Arbeitsschritte können parallelisiert werden.

Die Montageprozesse werden bei der Darstellung der Vorrangbeziehung in der Kopfzeile und Kopfspalte der Vorrangmatrix gelistet. Bei bestehendem Vorrang des Zeilenelements ( $O_i$ ) gegenüber dem Spaltenelement ( $O_k$ ) enthält dieses eine »1«. Wird das Spaltenelement vorrangig dem Zeilenelement montiert, ist eine »-1« einzutragen. Spielt die Montagereihenfolge keine Rolle, so wird für die beiden Elemente eine »0« eingetragen. In der Spalte »Summe« werden die Einträge der Zeilen aufsummiert, wodurch sich letztlich die Reihenfolge der Montage in der Spalte »Rang« ergibt. [22]

$O_i \setminus O_k$	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$	$O_7$	Summe	Rang
$O_1$		0	1	1	0	0	0	2	2
$O_2$	0		0	1	0	1	1	3	1
$O_3$	-1	0		0	0	1	0	1	3
$O_4$	-1	-1	0		0	0	0	0	4
$O_5$	0	0	0	0					
$O_6$	0	1	1						

Abbildung 20: Beispiel Vorrangmatrix – eigene Darstellung

#### Wer übernimmt welchen Arbeitsschritt?

Hier geht es um die Frage, wie die Arbeitsschritte auf Mensch, Roboter und Assistenzsystem sinnvoll aufgeteilt werden können, wobei sowohl Mensch als auch Roboter möglichst wenig Wartezeiten haben sollten. Dazu wird eine Analyse der jeweiligen Prozessschritte aus der manuellen Montage durchgeführt, um eine mögliche Aufgabenteilung der Interaktionspartner abzuleiten. Dies kann in tabellarischer Form geschehen. Dabei werden die einzelnen Prozessschritte aufgeführt und mögliche Schwierigkeiten bei der Montage notiert. Die Prozessschritte werden einzeln betrachtet und hinsichtlich einer Aufteilung der Tätigkeiten von Mitarbeitenden, Assistenzsystem und Roboter bewertet. Zudem wird eine vorläufige Aufteilung sowie Montagekontrolle der auszuführenden Aktionen während der Montage erstellt.

Prozess	Schwierigkeit	Ausführung	Prüfung
Schritt 1	Biegeschlaffe Komponente	Mensch	Assistenzsystem
Schritt 2	Hohe Präzision	Roboter	Assistenzsystem
Schritt 3	Schrauben liegen als Haufwerk im KLT Handhabbarkeit durch geringe Größe	Mensch	Mensch
Schritt 4	Teile liegen als Haufwerk im KLT Auf richtige Beschriftung ist zu achten	Mensch	Assistenzsystem
Schritt 5	Klemmfahr der Teile im Magazin	Roboter	Assistenzsystem
Schritt 6	Schraubprozess		

Abbildung 21: Beispieltabelle zur Analyse der Prozessschritte – eigene Darstellung

Um während der Montage am Arbeitsplatz fortlaufend eine günstige ergonomische Situation zu erreichen, ist dafür eine menschenzentrierte Gestaltung wichtig. Die Automatisierung von Montageschritten kann zur Verbesserung der Ergonomie beitragen, beispielsweise durch Verlagerung körperlich anstrengender oder sich häufig wiederholender Tätigkeiten sowie langer Greifwege an den Roboter. [19]

## 2.2 Interaktionsformen planen

### Frage:

Welche Interaktionsformen ergeben sich aus dem Montageablauf?

### Antwort:

Aus der zuvor analysierten manuellen Montagesequenz wird nun in Anlehnung an die erarbeitete Vorrangmatrix eine hybride Montagesequenz abgeleitet. Im Vorfeld ist eine genaue zeitliche Abschätzung der zugeteilten Aufgaben der jeweiligen Interaktionspartner nicht möglich. Daher kann eine optimale Austaktung der Sequenz ohne Möglichkeit der praktischen Durchführung an dieser Stelle nur ungefähr bestimmt werden. Ebenso ist nur eine Abschätzung der Machbarkeit für die jeweiligen Roboterarbeiten möglich. Diese müssen mit dem vorhandenen Cobot am Montagearbeitsplatz in einer Machbarkeitsanalyse (siehe S. 51 – Machbarkeitsanalyse) überprüft werden und bestimmen maßgeblich die Arbeitsteilung und den Grad der Automatisierung.

Für den Entwurf einer hybriden Montagesequenz kann eine Tabelle erstellt werden, die je eine Spalte für Mensch, Roboter und Assistenzsystem enthält. Idealerweise sollte der Interaktionspartner, welcher die Funktion des »Leader« übernimmt in der mittleren Spalte stehen. Die jeweiligen Prozessschritte werden so den Interaktionspartnern zugeordnet. Die Kommunikation des hybriden Teams wird mit Pfeilen dargestellt.

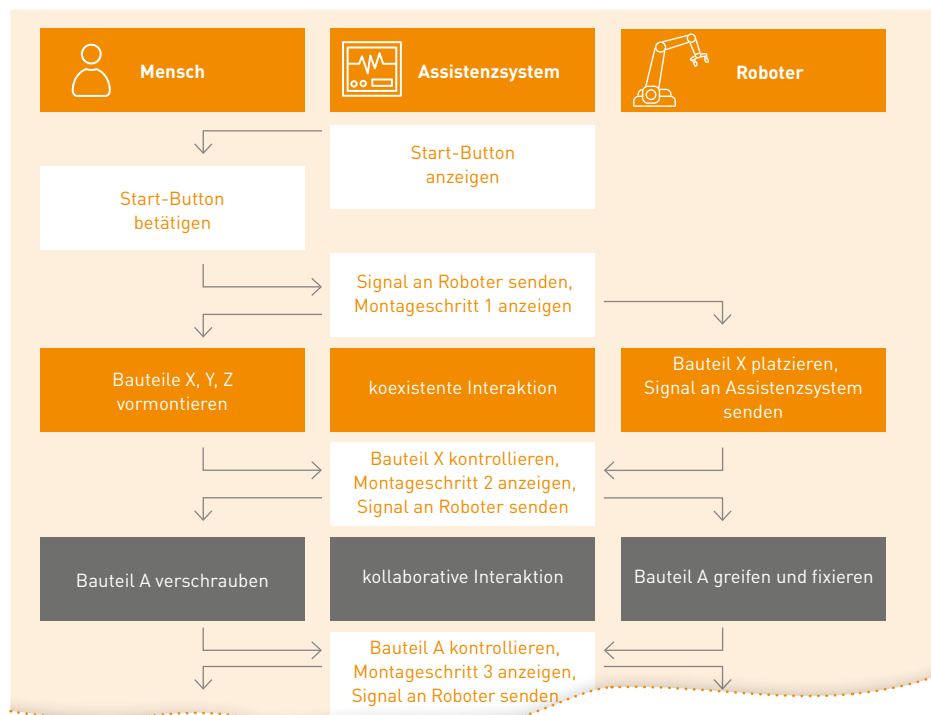


Abbildung 22: Beispielhafte Darstellungsform einer hybriden Montagesequenz

Als nächsten Schritt werden die Interaktionsformen für Mensch und Roboter während der gemeinsamen Montage erarbeitet. Dabei soll die Montagesequenz konkretisiert und verfeinert werden. Wie im Kapitel Cobots aufgeführt, sind mögliche MRK-Interaktionsformen Koexistenz, Synchronisation, Kooperation und Kollaboration. Die gewählten Interaktionsformen werden in die erarbeitete Tabelle eingetragen. Die Art der Interaktion zwischen Mensch und Roboter hat Auswirkungen auf die Sicherheitsbewertung des Arbeitsplatzes. Für eine Kollaboration gelten beispielsweise andere Sicherheitsvorschriften als bei einer synchronen Interaktion (siehe S.22 – Sicherheit). Eine Orientierung bei der Planung der Interaktionsformen können folgende Fragen geben:

#### Hilfreiche Fragen:

- Können Prozessschritte parallel ausgeführt werden? (Koexistenz, Kooperation)
- Gibt es Prozessschritte, bei denen der Roboter und der Mitarbeitende zur gleichen Zeit am gleichen Werkstück arbeiten? (Kollaboration)
- Sind vorbereitende Tätigkeiten durch den Menschen oder Roboter sinnvoll? (Koexistenz, Kooperation)
- Gibt es Prozessschritte bei denen Mensch und Roboter voneinander abhängig sind? (Synchronisiert)
- Gibt es Prozessschritte, welche für den Menschen gefährlich sein können?
- Gibt es Prozessschritte, die eine hohe Präzision oder Wiederholgenauigkeit erfordern?

#### 2.3 Gestaltungslösungen erarbeiten

##### Fragen:

Welche Technologien werden benötigt?

Welche zusätzlichen Einsatzmittel werden benötigt?

Ist ein bestehender Arbeitsplatz für die Umrüstung geeignet?

##### Antworten:

Welche Technologien werden benötigt?

Für die Auswahl der Systemkomponenten (Cobot, Endeffektor, Assistenzsystem) müssen deren technische Daten auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Diese beinhalten beispielsweise Traglast und Reichweite des Roboters sowie Hub und Traglast des Endeffektors. Für die Wahl eines Assistenzsystems muss je nach Anwendung ein geeignetes Ausgabemedium (optisch, akustisch, haptisch) für den Informationsaustausch mit dem Menschen gewählt werden. Genauere Informationen können in praxisorientierten Katalogen nachgeschlagen werden.

##### Cobot auswählen

Ausgangspunkt für die Auswahl eines passenden Cobots ist die Bauteil-, Prozess- und Arbeitsplatzanalyse und die im Projektrahmen definierten Anforderungen an die Systemkomponenten. Darauf aufbauend können nun spezifische Anforderungen an den Cobot festgelegt und ein passendes Modell ausgesucht werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Traglast des Cobots für die zu handhabenden Gewichte in seinem Arbeitsraum ausreicht (siehe S.35 – Potenzialanalyse). Wichtig bei der Bestimmung der Traglast ist hierbei, dass das Eigengewicht des Endeffektors mit zum Bauteilgewicht zugerechnet werden muss. Für sensible Aufgaben oder Montagetätigkeiten können zusätzlich Sensoren zur Kraft-Momenten-Messung eingesetzt werden.

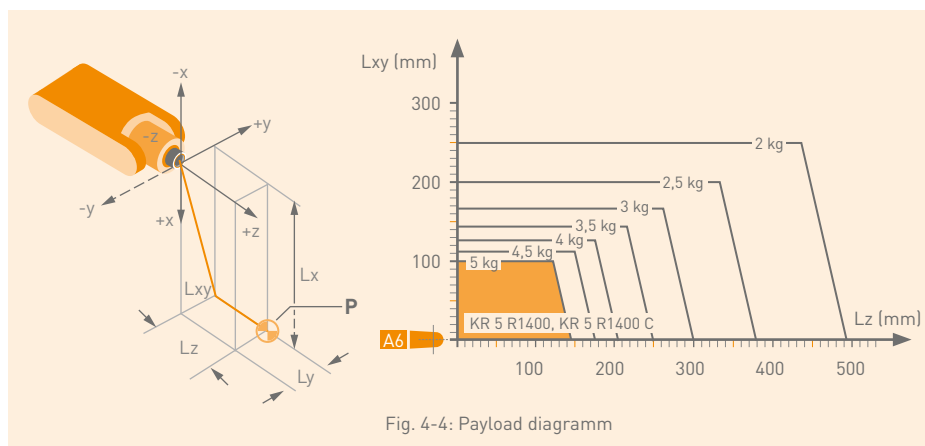


Fig. 4-4: Payload diagramm

Abbildung 23: Traglastdiagramm eines Roboters [18]

### Endeffektor planen

Als wesentlicher Teil einer Roboteranwendung gilt der Endeffektor. Dessen Wahl wird oft durch eine hohe Variantenvielfalt erschwert und kann ein Hemmnis für eine Automatisierung darstellen. Durch ein breites Produktspektrum gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Lösungen im Bereich der Endeffektoren. Zu diesen zählen beispielsweise Backengreifer für Handhabungsaufgaben, Schrauber, Vakuumgreifer oder flexible Greifer, welche sich an die Form des Bauteils anpassen. [19] Eine Übersicht verschiedener Endeffektoren ist im Kapitel Cobots – Technologiebeschreibung ab Seite 20 dargestellt.

Für MRK-Anwendungen sollte ein speziell für die Nähe am Menschen konzipiertes Greifsystem gewählt werden. Dieses erfüllt die Sicherheitsanforderung für kollaboratives Arbeiten, beispielsweise durch Kraftbegrenzung, spezielle Sensorik oder abgerundetes Design [24].

Der Einsatz elektrischer Greifer bietet den Vorteil, dass durch eine Kraft- oder Positionssteuerung verschieden große Objekte gegriffen werden können und eine Begrenzung der Greifkraft möglich ist. Weitere wichtige technische Daten auf die geachtet werden sollte, sind Hub, Greifkraft und Traglast des Greifers. [19]

### Assistenzsystem auswählen

Bei der Auswahl eines geeigneten Assistenzsystems muss vorweg der Anwendungszweck festgelegt sein. Dieser ist z.B. eine Werkerführung, eine Qualitätskontrolle oder die kognitive Entlastung der Mitarbeitenden. Je nach Assistenzsystem kommen unterschiedliche Interaktionsformen und Mensch-Maschine-Schnittstellen zum Einsatz. Die Schnittstelle kann ein Touch-/Display, eine Projektion, eine Kamera oder ein (virtueller) Button sein. Bei stationären Assistenzsystemen sollten die Möglichkeiten für die Montage am Arbeitsplatz berücksichtigt werden. Mobile Assistenzsysteme sind mit einem Akku ausgestattet und in ihrer Nutzungsdauer begrenzt. Für diese muss eine Lademöglichkeit eingeplant werden und eventuell ein Ersatzgerät zur Verfügung stehen. Für Tätigkeiten während des Montageprozesses ist es wichtig, dass diese nicht durch die Interaktion von Mensch und Assistenzsystem negativ beeinflusst werden. Damit sind beispielsweise ständige Unterbrechung der langen Bewegungen gemeint. Manche Assistenzsysteme können auch Einschränkungen der Mitarbeitenden mit sich bringen und zu ergonomischen Nachteilen führen. Beispiele hierfür sind ein eingeschränktes Sichtfeld bei Datenbrillen und häufig ungünstige Körperhaltungen bei Monitoren oder Projektionen. [8] [22]



#### Hinweis Schnittstellen:

Bei der Auswahl der Technologien sollte unbedingt auf die Kompatibilität der gewählten Systemkomponenten geachtet werden, um eine möglichst hohe Flexibilität in der Anwendungsgestaltung zu erreichen. Für die Schnittstelle zwischen Cobot und Endeffektor gibt es bereits viele standardisierte Lösungen, welche eine einfache und schnelle Installation ermöglichen. Die Verknüpfung von Cobot und Assistenzsystem ist stark von der Wahl des Assistenzsystems abhängig und kann über gängige Schnittstellen wie Netzwerkanschlüsse, digitale/analoge IO-Ports, WLAN oder Bluetooth realisiert werden. Ist eine direkte Kommunikation nicht möglich, kann ein zusätzlicher PC oder eine separate Programmierung der Schnittstelle notwendig sein.

#### Welche zusätzlichen Einsatzmittel werden benötigt?

An dieser Stelle werden konkrete Einsatzmittel für den hybriden Arbeitsplatz gewählt, die neben Cobot, Endeffektor und Assistenzsystem benötigt werden. Diese umfassen z.B. Montagehilfen, Kleinladungsträger (KLT), Magazine und Arbeitstisch. Gegebenenfalls sind bereits Arbeitstisch, Montagehilfe oder Magazine vorhanden. Hier muss überprüft werden, ob eine weitere Verwendung ggf. durch Anpassung möglich ist. Eventuell muss ein neues Magazinsystem für die Entnahme durch einen Roboter eingesetzt werden.

#### Ist ein bestehender Arbeitsplatz für die Umrüstung geeignet?

Ist bereits ein Arbeitsplatz vorhanden, so muss überprüft werden, ob die Anbringung eines Roboters und eventuell eines stationären Assistenzsystems möglich ist. Für die Materialzufuhr muss ein Konzept erarbeitet oder möglicherweise angepasst werden. Gleichfalls muss eine ausreichende Energieversorgung des Arbeitsplatzes sichergestellt sein und bei Bedarf eine Anbindung an das firmeninterne Netzwerk. Beispielsweise muss geprüft werden, ob ein vorhandenes Magazinsystem und ein angebundener interner Rutenzug zur Materialversorgung an die Linie weiterhin genutzt werden kann. Bei dem Ziel der Taktzeitreduzierung können so eventuell Engpässe in der Materialversorgung entstehen. Bei einer Umrüstung auf eine Mensch-Roboter-Kollaboration sind zuvor benötigte Sicherheitselemente wie Schutzzäune, Lichtschranken oder Abstandsregelungen nicht mehr nötig. Dadurch verringert sich eventuell der Flächenbedarf des Arbeitsplatzes.

#### Hilfreiche Fragen:

- Welche Werkzeuge, Montagehilfen, Sonstiges (KLTs, Magazine, Arbeitstisch) werden benötigt?
- Sind bereits Montagehilfen vorhanden? Können diese wiederverwendet oder müssen sie abgeändert werden?
- Sind bereits Magazine vorhanden?
- Welche Reichweite, Traglast und Kommunikationsschnittstellen muss der Roboter mindestens aufweisen?
- Welchen Hub und welche Traglast muss der Endeffektor mindestens aufweisen?
- Welche Aufgaben soll das Assistenzsystem übernehmen?

## ITERATION NOTWENDIG?

### CHECKLISTE

- Arbeitsablauf analysiert
- Vorrangmatrix erstellt
- Theoretische Montagesequenz erstellt
- MRK-Interaktionsformen bestimmt
- Systemkomponenten ausgewählt  
(Cobot, Endeffektor, Assistenzsystem, sonstige Einsatzmittel)
- Arbeitsplatz für Umrüstung geeignet

### 3. FEINPLANUNG

Ist die Grobplanung abgeschlossen, werden nun konkrete Inhalte für die Umsetzung des hybriden Montagearbeitsplatzes erarbeitet. Die Feinplanung beginnt mit der Layoutgestaltung, bei der die Positionierung der Interaktionspartner am Arbeitsplatz festgelegt wird. Darauf folgt die theoretische Erstellung und Austaktung der Sequenz. Für die Durchführung des Kapitels Feinplanung bietet es sich an, ein Simulationstool zu verwenden.

#### 3.1 Arbeitsplatzlayout erstellen

##### Fragen:

Wo können die Interaktionspartner am Arbeitsplatz positioniert werden?

Welche Layoutoptionen sind möglich?

##### Antworten:

Wo können die Interaktionspartner am Arbeitsplatz positioniert werden?

Ziel ist es, ein Layout zu erstellen, welches sowohl ergonomischen als auch wirtschaftlichen Ansprüchen gerecht wird. Dabei ist darauf zu achten, dass die Griffweiten kurz sind und Mensch und Roboter bezüglich ihrer Bewegungsbereiche sinnvoll platziert werden. Der Roboter sollte dabei nahe dem Menschen platziert werden, ohne ihn zu stören. Ebenfalls sollte das Material des Menschen und des Roboters getrennt voneinander platziert werden. Ist geplant, ein stationäres Assistenzsystem zu verwenden, muss dies in der Layoutplanung berücksichtigt werden.

Die restlichen Layoutmöglichkeiten ergeben sich dann aus den fünf Freiheitsgraden der Akteure:

- Position Roboter
- Position Mensch
- Art der Materialzuführung
- Position der KLTs/des Materials
- Raumanforderungen Assistenzsystem

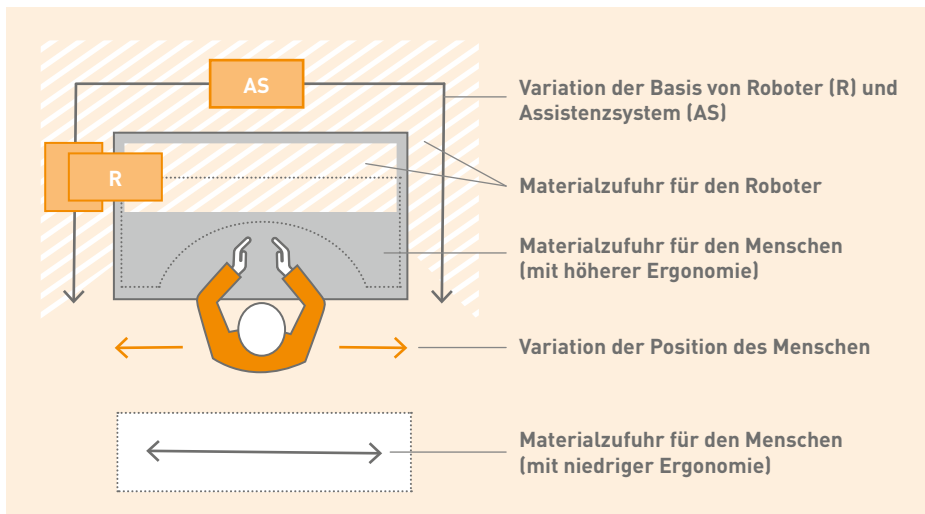


Abbildung 24: Variation der Positionen und der Materialzuführungsbereiche [26]

### Welche Layoutoptionen sind möglich?

Nachdem alle benötigten Komponenten für die Montage ausgewählt wurden, gilt es nun, diese sinnvoll am Arbeitsplatz zu platzieren. Hierfür werden verschiedene Arbeitsplatzlayouts erstellt und miteinander verglichen.

Die verschiedenen Arbeitsplatzlayouts werden basierend auf der jeweils durchzuführenden Montagetätigkeit erstellt. Dabei haben sich einige grundsätzliche Vorgehensweisen etabliert. Die Höhe der Roboterbasis sollte identisch mit der Arbeitsplatzhöhe sein, um die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen mit anderen Systemkomponenten zu verringern [23]. Bei der Verwendung eines höhenverstellbaren Tisches sollte daher darauf geachtet werden, dass der Roboter mit dem Tisch verfährt.

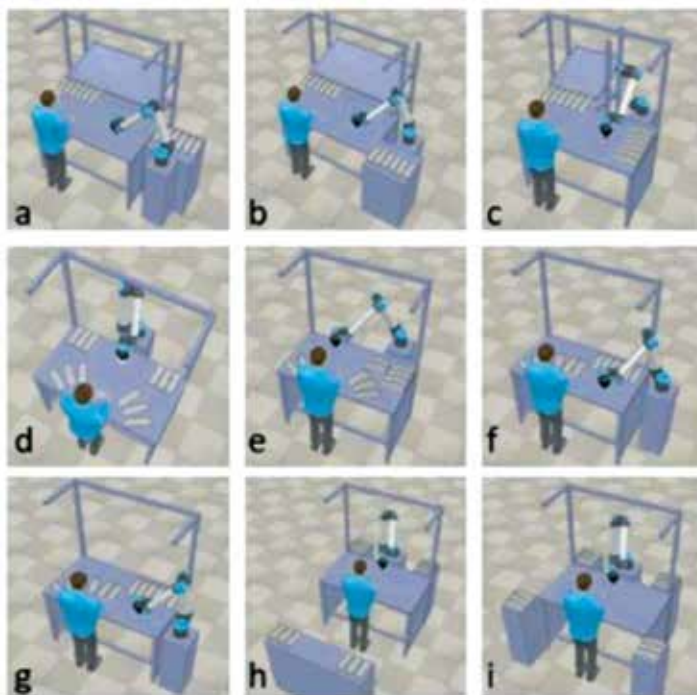


Abbildung 25:  
Verschiedene  
Layoutoptionen  
basierend auf den  
fünf Freiheitsgraden  
[23]

Ein weiterer wichtiger Punkt sind die jeweiligen Montagezentren der Agierenden. Die Montagezentren bezeichnen den Ort auf dem Arbeitsplatz, an dem jeweils die Montagetätigkeiten der Agierenden ausgeführt werden. Diese werden nach Montagezentrum Mensch (hca), Montagezentrum Roboter (rca) und kollaboratives Montagezentrum (cca) aufgeteilt. Je nach Montagetätigkeit können sich diese Zentren auch überschneiden. Je nach Platzierung der Montagezentren ergeben sich unterschiedliche Bereiche für die Projektion von Montageanweisungen, bzw. die Platzierung von Assistenzsystemen (Ablage Tablet, Smartphone, Bildschirm).

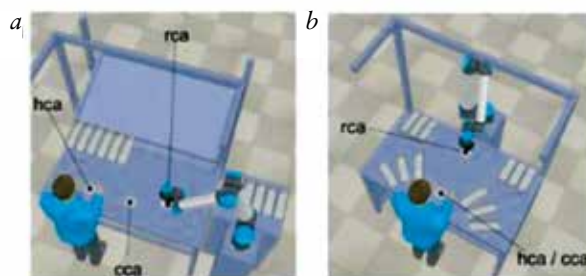


Abbildung 26:  
a) getrennte  
Montagezentren  
b) kombinierte  
Montagezentren [23]

### 3.2 Erstellung und Austaktung der Sequenz

#### Frage:

Welches Vorgehen beim Erstellen der Montagesequenz ist zu empfehlen?

#### Antwort:

##### Schritt 1: Robotersequenz planen

Es ist zu empfehlen als ersten Schritt die Sequenz des Roboters zu planen und ggf. mit Hilfe eines Simulationstools zu erstellen.

##### Schritt 2: Austaktung Mensch-Roboter

Ist der Ablauf des Roboters festgelegt, können nun die Arbeitsschritte des Menschen in die Robotersequenz eingefügt werden. An dieser Stelle werden dem Menschen konkrete Aufgaben zugeteilt. Da zunächst noch keine genauen Zeiten für die auszuführenden Arbeitsschritte vorliegen, müssen diese vorerst geschätzt werden.

##### Schritt 3: Kommunikationsmechanismen hinzufügen

Nun werden die Kommunikationsmechanismen des Assistenzsystems in die Mensch-Roboter-Sequenz eingebracht. Es wird in diesem Schritt nur der Signalfluss des hybriden Teams in der gemeinsamen Sequenz festgelegt.

##### Schritt 4: Montageanweisungen planen

Erst wenn die hybride Sequenz fertig geplant ist, empfiehlt es sich, die Montageanweisungen zu erstellen. Die konkrete Umsetzung wird im Kapitel Umsetzung – Implementierung (S.63) der Sequenz genauer erläutert.

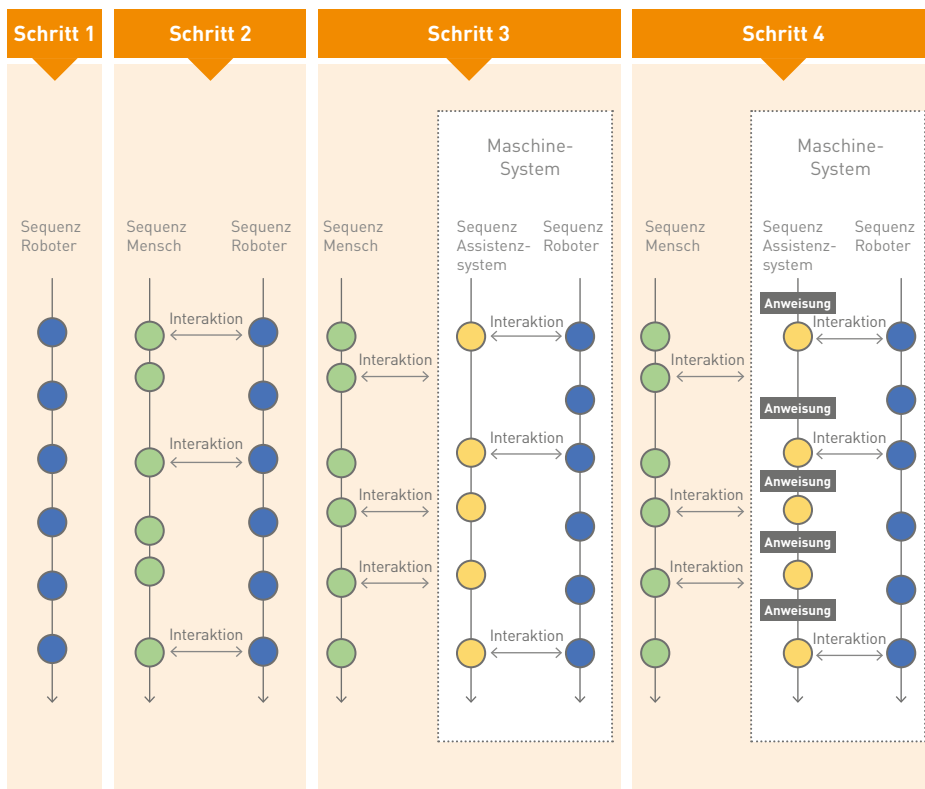


Abbildung 27: Vorgehen beim Erstellen einer hybriden Montagesequenz

ITERATION NOTWENDIG?

CHECKLISTE

- Layoutoptionen erstellt
- Arbeitsplatzlayout ausgewählt
- Montagesequenz ausgetaktet
- Arbeitsablauf simuliert (optional)

#### 4. GESAMTBEWERTUNG

Im Kapitel Gesamtbewertung werden die erstellten Layoutoptionen miteinander verglichen und bewertet. Für das gewählte Layout wird zudem ein Sicherheitskonzept erstellt. Die Nutzwertanalyse vereint anschließend alle zuvor durchgeführten Bewertungen und vergleicht sie mit den im Projektrahmen getroffenen Zielen.

#### 4.1 Layoutbewertung

##### Frage:

Wie können die Layoutoptionen bewertet werden?

Welche Vorteile bietet ein ergonomischer Arbeitsplatz?

##### Antworten:

Wie können die Layoutoptionen bewertet werden?

Die zuvor erstellten Layoutoptionen werden anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen. Entscheidend hierbei ist die Art der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (kooperativ, kollaborativ, koexistent, synchron), die Art der verrichteten Arbeit (Montage oder Handling) sowie die Aufteilung der Arbeitsschritte (Roboter, Mensch oder beide). Daher ist es sinnvoll die Bewertung der Layoutoptionen erst nach der Ausstattung der Arbeitssequenz vorzunehmen.

Um Layoutoptionen gegenüberzustellen und auszuwählen, haben sich die Evaluationskriterien nach Berg [23] als zielführend herausgestellt. Berg verwendet Bewertungskriterien u.a. des Methods-Time-Measurement (MTM). Die wichtigsten Kriterien für die MRK sind folgende:

- Bewegungslänge des Roboters (Distanz des Montagezentrums ( $r_{ca}$ ) zum Material des Roboters)
- Die relative Distanz, der Anfahrwinkel, sowie die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Roboters
- Der Intrusionswinkel während der Kollaboration (siehe Abbildung 28)
- Die Anordnung der Montagezentren ( $h_{ca}$  gleich  $c_{ca}$  ist meistens besser als  $h_{ca}$  ungleich  $c_{ca}$ )
- Das Kollisionspotenzial des Roboters (Distanz des Roboters zum nächsten Kollisionsobjekt)
- Erreichbarkeit aller Seiten des zu bearbeitenden Werkstücks durch den Roboter
- Ergonomie bei der Platzierung des Assistenzsystems (Ablageort Tablet/ Smartphone, Anbringungsort Bildschirm) oder der Projektionsfläche beachten

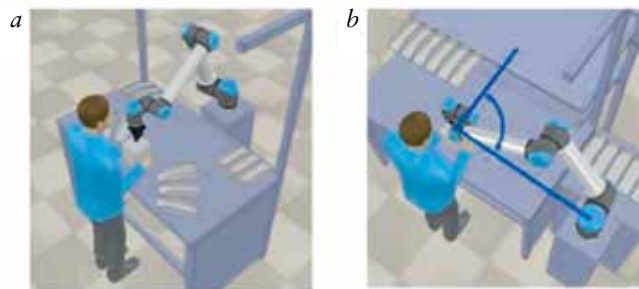


Abbildung 28:

a) kleiner

Intrusionswinkel

b) großer

Intrusionswinkel [23]

Welche Vorteile bietet ein ergonomischer Arbeitsplatz?

Bei der Bewertung von Layoutoptionen für hybride Arbeitsplätze sollte ein besonderes Augenmerk auf eine ergonomische Gestaltung geworfen werden. Eine sinnvolle Anordnung der Systemkomponenten am Arbeitsplatz und ein gezielter Einsatz des Cobots können die Ergonomie für den Menschen deutlich verbessern. Zum Beispiel kann der Cobot die Handhabung gefährlicher Materialien und heißer oder scharfkantiger Bauteile übernehmen um so potenzielle Gefahren für den Menschen zu reduzieren [19].

**Vorteile einer ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung sind ...**

- ... gesündere Mitarbeitende, die weniger Fehltag haben und weniger Fehler machen.
- ... positive Kosten-Nutzen-Effekte durch motivierte und produktivere Mitarbeitende.
- ... die Steigerung der Attraktivität der Arbeitgebenden und somit Vorteile in der Gewinnung und Bindung von qualifizierten Fachkräften. [24]

4.2 Sicherheitsbewertung



Abbildung 29: Sicherheitsmaßnahmen bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter [25]

**Frage:**

Wie muss ein Sicherheitskonzept aufgebaut werden?

**Antwort:**

Hybride Arbeitsplätze fallen grundsätzlich unter die EU-Richtlinie für grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Maschinenanlagen und benötigen deshalb eine Risikobewertung nach der DIN EN ISO 12100:2011-03 2011 [26]. Dabei sind die folgenden beiden Schritte iterativ durchzuführen, bis die entsprechenden Vorgaben erfüllt sind.

**Schritt 1: Risikoanalyse durchführen**

Dabei sollen alle potenziellen Gefahren identifiziert und mögliche Risiken eingeschätzt werden. In den vorherigen Kapiteln wurde bereits auf sicherheitsrelevante Themen hingewiesen, diese helfen die Risikoanalyse durchzuführen.

**Schritt 2: Risikobewertung vornehmen**

Hier sollen durch technische und organisatorische Schutzmaßnahmen Risiken minimiert werden. Cobots und Endeffektoren können bereits eine Zulassung für den direkten Kontakt mit dem Menschen haben (siehe S.22 – Sicherheit). Dies kann eine Risikobeurteilung erleichtern. Des Weiteren können passive Sicherheitsvorkehrungen durch optische oder kognitive Assistenzsysteme ergänzend zum Einsatz kommen.

#### 4.3 Nutzwertanalyse

##### Frage:

Wurden die zuvor definierten Ziele erreicht?

##### Antwort:

Bevor der hybride Arbeitsplatz in die Phase der Umsetzung geht, werden zunächst verschiedene Lösungsvarianten bezüglich der zuvor definierten Ziele bewertet. Mit der Nutzwertanalyse (siehe beispielhafte Abbildung 30) können diese qualitativ miteinander verglichen werden. Anhand der vorangegangenen Kapitel kann hier bereits die Taktzeit und das Sicherheitskonzept abgeschätzt und eine Ergonomiebewertung durchgeführt werden. Als Grundlage für die Bewertung wird der Kriterienkatalog aus dem Kapitel Projektrahmen – Projektziele definieren (S.37) verwendet.

##### Vorgehen Nutzwertanalyse:

1. Bewertungskriterien hierarchisch strukturieren (mit paarweisen Vergleich oder Gewichtungsfaktoren).
2. Erfüllungsgrad für jedes Bewertungskriterium festlegen (von 0 (nicht erfüllt) bis 10 (voll erfüllt)) und mit dem Gewichtungsfaktor multiplizieren – Teilnutzen.
3. Absoluten Nutzwert jeder Variante als Summe der Teilnutzen berechnen.
4. Relativen Nutzwert in Bezug zum Ausgangszustand (manuellem Montageplatz) oder der Variante mit dem niedrigsten absoluten Nutzwert berechnen.

Bewertungskriterium	Gewicht	Ist-zustand		Variante					
				1		2		3	
	G	E	E-G	E	E-G	E	E-G	E	E-G
Gefahr von Fehlteilen	0,14	2,0	0,3	7,0	1,0	8,7	1,2	9,3	1,3
Bestände im Arbeitssystem	0,13	2,3	0,3	6,7	0,9	7,0	0,9	8,3	1,1
Produktverantwortung	0,12	7,7	0,9	5,0	0,6	5,0	0,6	9,3	1,1
Durchlaufzeit	0,11	3,3	0,4	7,0	0,7	5,0	0,5	8,7	0,9
Ergonomie	0,11	1,7	0,2	7,3	0,8	7,3	0,8	9,0	1,0
Personalflexibilität	0,09	5,0	0,4	3,0	0,3	4,7	0,4	7,0	0,6
kurzfristige Flexibilität	0,09	6,0	0,5	3,7	0,3	5,3	0,5	8,0	0,6
Materialfluss-Steuerung	0,06	6,0	0,4	5,7	0,4	3,7	0,2	7,3	0,5
Überschaubarkeit des Auftragsfortschritts	0,05	2,0	0,1	6,0	0,3	8,0	0,4	5,7	0,3
Monotonie	0,05	8,0	0,4	5,0	0,3	4,3	0,2	9,3	0,5
Stückzahlflexibilität	0,03	4,0	0,1	5,3	0,2	6,7	0,2	8,3	0,3
Materialfluss-Schnittstellen	0,02	3,7	0,1	6,0	0,1	7,3	0,2	7,7	0,2
Typenflexibilität	0,01	4,0	0,0	8,0	0,1	9,0	0,1	4,7	0,0
<b>absoluter Nutzwert (Punkte)</b>		<b>4,1</b>		<b>5,8</b>		<b>6,2</b>		<b>8,3</b>	
<b>relativer Nutzwert [%]</b>		<b>100</b>		<b>142</b>		<b>151</b>		<b>203</b>	



Abbildung 30: Nutzwertanalyse zur qualitativen Bewertung verschiedener Lösungsvarianten [1]



## ITERATION NOTWENDIG?

### CHECKLISTE

- Layoutbewertung durchgeführt
- Ergonomie bewertet
- Sicherheitskonzept erarbeitet
- Nutzwertanalyse durchgeführt
- Ziele aus Kapitel Projektrahmen erreichbar

## 5. UMSETZUNG

Nachdem die Systemkomponenten beschafft sind, werden sie aufgebaut und am Arbeitsplatz installiert. Bei der Installation werden die Komponenten, wie in der Layoutplanung festgelegt, am Arbeitsplatz angebracht. Im weiteren Vorgehen dieses Prozessschrittes wird eine Machbarkeitsanalyse durchgeführt, um die geplanten Anwendungen von Roboter und Assistenzsystem zu prüfen. War diese erfolgreich, folgt die Implementierung der Sequenz. Außerdem wird ein Schulungskonzept zur Einarbeitung von Projektbeteiligten und operativen Mitarbeitenden vorgeschlagen.

### 5.1 Machbarkeitsanalyse

#### Fragen:

Können die Bauteile wie geplant mit dem Greifsystem gegriffen und platziert werden?

Können die Funktionen des Assistenzsystems wie geplant eingesetzt werden?

Funktioniert die Kommunikation am Arbeitsplatz wie geplant?

#### Antworten:

Können die Bauteile wie geplant mit dem Greifsystem gegriffen und platziert werden?

Nachdem die Systemkomponenten am Arbeitsplatz installiert sind, wird überprüft, ob die geplanten Bauteile mit dem bestehenden Robotersystem gegriffen werden können. Dies umfasst auch das Einsetzen der Komponenten in vorhandene Montagehilfen. So werden eventuelle Einschränkungen in Bezug auf das Einlegen in die Montagehilfe und das Greifen der Komponenten erkannt. Es ist zu empfehlen, die Robotersequenz in Teilsequenzen der jeweiligen Komponente abzugrenzen. Einerseits können dadurch Teilsequenzen für andere Produktvarianten wiederverwendet werden und andererseits wird so das Roboterprogramm übersichtlich gestaltet.

Können die Funktionen des Assistenzsystems wie geplant eingesetzt werden?

Ein weiterer Bestandteil der Machbarkeitsanalyse besteht darin, Funktionalitäten des Assistenzsystems wie z.B. Montagekontrolle oder Gestenerkennung zu testen. Dabei soll überprüft werden, ob die Funktionen wie geplant in die Montagesequenz eingebracht werden können.

Funktioniert die Kommunikation am Arbeitsplatz wie geplant?

Ist die Machbarkeitsanalyse für den Cobot und das Assistenzsystem durchgeführt, folgt die

Implementierung des Kommunikationskanals zwischen Cobot und Assistenzsystem. Beide Systeme werden miteinander über die geplante Schnittstelle verbunden und anschließend die Kommunikation beider Interaktionspartner überprüft.

## 5.2 Implementierung der Sequenz

Abschließend der Machbarkeitsanalyse folgt eine Beurteilung der Ergebnisse. Abhängig von diesen, können Änderungen bzw. Optimierungen vorgenommen werden oder die Umsetzung des Use Cases kann begonnen werden. Hier empfiehlt sich die Orientierung am Vorgehen aus dem Kapitel Erstellung und Austaktung der Sequenz (S. 46).

### Schritt 1: Robotersequenz implementieren

Die Teilsequenzen aus der Machbarkeitsanalyse können hier wiederverwendet werden, um die Robotersequenz zu implementieren.



Abbildung 31: Mitarbeiter mit Roboterbedienpanel

### Schritt 2: Austaktung Mensch-Roboter

Ist der Ablauf des Roboters implementiert, werden nun die Arbeitsschritte des Menschen und des Roboters ideal ausgetaktet. Bei Wartezeiten für einen der beiden Interaktionspartner kann eventuell die Robotergeschwindigkeit angepasst oder die Mensch-Roboter-Sequenz überarbeitet werden.

### Schritt 3: Kommunikationsmechanismen einbringen

Erst wenn die Mensch-Roboter-Sequenz optimal umgesetzt ist, empfiehlt es sich, das Assistenzsystem mit seinen Kommunikationsmechanismen in die Mensch-Roboter-Sequenz einzubringen. Es werden hier noch keine konkreten Inhalte wie z.B. Montageanleitung, Projektionen etc. eingebracht, sondern nur die Kommunikation von Assistenzsystem, Roboter und Mensch implementiert. Müssen Änderungen im Montageablauf vorgenommen werden, lassen sich diese in der Regel ohne großen Aufwand umsetzen.

### Schritt 4: Montageanweisungen erstellen

Funktionieren die Kommunikationsmechanismen am assistierten Montagearbeitsplatz wie geplant, werden abschließend Projektionen und Montageanweisungen erstellt oder Montagekontrollen eingelernt und in die hybride Sequenz eingepflegt. Dies ist dahingehend zu empfehlen, da bei einer Änderung im gesamten Ablauf eventuell Anweisungen und Projektionen ebenfalls geändert oder gelöscht werden müssen. Somit kann unnötige Arbeit vermieden und Zeit eingespart werden.

#### Fragen:

Wie sind Montageanweisungen zu gestalten?

Wie kann die hybride Sequenz optimiert werden?

#### Antworten:

Wie sind Montageanweisungen zu gestalten?

Die Schnittstelle von Mensch und Assistenzsystem sollte intuitiv gestaltet werden nach dem Motto: »So wenige Informationen wie möglich, so viele wie nötig« Bei der Anordnung von Texten, Bildern und Videos empfiehlt es sich, diese immer gleich zu platzieren und ein konsistentes Design zu wählen. Hilfreich können hier Schablonen bzw. im Voraus erstellte

Musteranweisungen sein. Textuelle Beschreibungen, Abbildungen und Videos in einem Anweisungsschritt sollten sich immer aufeinander beziehen und ergänzen. Die Anweisungen sind eindeutig zu gestalten und idealerweise zu nummerieren, sodass die Montagereihenfolge leichter eingehalten werden kann.

#### Wie kann die hybride Sequenz optimiert werden?

Erst nach der Implementierung der Montagesequenz und ersten Testläufen wird deutlich, ob die hybride Sequenz optimal getaktet ist. Eventuell wird an dieser Stelle Potenzial für Verbesserungen ersichtlich. Als Möglichkeiten zur Optimierung der hybriden Sequenz können folgende Tipps herangezogen werden:

- Vorbereitende Tätigkeiten für den Menschen einführen
- Arbeitsschritte von Mensch und Roboter tauschen
- Anordnung der Magazine ändern
- Robotergeschwindigkeit anpassen
- Montagehilfen einführen
- Zuführsystem anpassen

### 5.3 Personalschulung durchführen

#### Fragen:

Wer soll geschult werden?

Was soll geschult werden?

Welche Schulungsmethoden bieten sich an?

#### Antworten:

Wer soll geschult werden?

Geschult werden sollen ...

... alle direkten und indirekten operativen Mitarbeitenden für die Arbeit am hybriden Arbeitsplatz.

... alle Verantwortlichen (Projektleitenden, Produktionsplanenden, Führungskräfte) zur Potenzialabschätzung, Planung und mitarbeiterorientierten Anleitung an hybriden Arbeitsplätzen.

... der Betriebsrat zu den Grundlagen und der Motivation beim Aufbau hybrider Arbeitsplätze.

#### Was soll geschult werden? Welche Schulungsmethoden bieten sich an?

Da bei der Einführung und Planung eines hybriden Arbeitsplatzes verschiedene Betriebsparteien mit unterschiedlichen Interessen beteiligt sind, bietet es sich an ein modulares Schulungskonzept zu verwenden. Dabei hat sich ein Vorgehen in drei Schritten als zielführend herausgestellt [27]:

#### Schritt 1: Grundlagen- und Motivationsschulung

Bevor mit der eigentlichen Planung des hybriden Arbeitsplatzes begonnen wird, sollten alle beteiligten Betriebsparteien (direkte und indirekte Mitarbeitende, Verantwortliche, Betriebsrat) über die Motivation für dessen Einführung informiert und sensibilisiert werden. Dabei sollten Themen wie die Grundlagen von MRK und Assistenzsystemen, Arbeitssicherheit, Ergonomie sowie Wirtschaftlichkeit behandelt werden [27].

**Schulungsmethoden:** *Seminar, Informationsveranstaltung*

### Schritt 2: Schulung zur Potenzialanalyse und Planung

Anschließend werden Methoden zur Potenzialanalyse sowie zur Planung und Implementierung von hybriden Arbeitsplätzen geschult [28]. Die Schulung richtet sich an Produktionsplanende und Projektleitende sowie an operative Mitarbeitende mit Prozesswissen. Als Grundlage für diese Schulung kann die Vorgehensweise zum Aufbau hybrider Arbeitsplätze in diesem Leitfaden dienen.

**Schulungsmethoden:** *Fallstudie, Planspiel, Workshop, Blended Learning*

### Schritt 3: Spezielle Anwendungsschulungen

Hierunter fallen alle Schulungen, die im operativen Bereich für den Betrieb des hybriden Arbeitsplatzes benötigt werden. Dies können beispielsweise Schulungen zur Programmierung, Wartung und Sicherheit sowie dem Umgang mit den Systemkomponenten sein. Es bietet sich an, diese Schulungen schon vor dem eigentlichen Einsatz am hybriden Arbeitsplatz vorzunehmen, um die Akzeptanz und Motivation der Mitarbeitenden zu erhöhen und Berührungsängste mit dem hybriden System zu reduzieren. Hierbei kann ein Mix aus Simulationen (z.B. mit AR-Anwendungen) und realen Anwendungen für eine Schulung verwendet werden [27].


**Schulungsmethoden:** *Seminar, Workshop, Blended Learning, E-Learning, Training (on the job)*

ITERATION NOTWENDIG?

---

CHECKLISTE

- Machbarkeitsanalyse erfolgreich
- Sequenz implementiert
- Arbeitsanweisungen erstellt
- Schulungskonzept erstellt
- Personalschulungen durchgeführt



## Der InKoMo Use Case



### 1. PROJEKTRAHMEN

#### 1.1 Ausgangssituation analysieren

Zur Veranschaulichung eines Use Cases zur assistierten Mensch-Roboter-Kollaboration ist nachfolgend die Montage eines Modell-Pick-Up-Trucks gezeigt. Dieser besteht aus mindestens 17 Bauteilen und -gruppen und kann in mehreren Varianten konfiguriert werden. Es besteht die Möglichkeit die Größe der Kabinenhaube, der Ladefläche und die Anzahl der Radachsen zu wählen. Des Weiteren ist ein Chassis sowie Achshalterungen mit Schrauben für die Montage des Modell-Pick-Up-Trucks nötig.

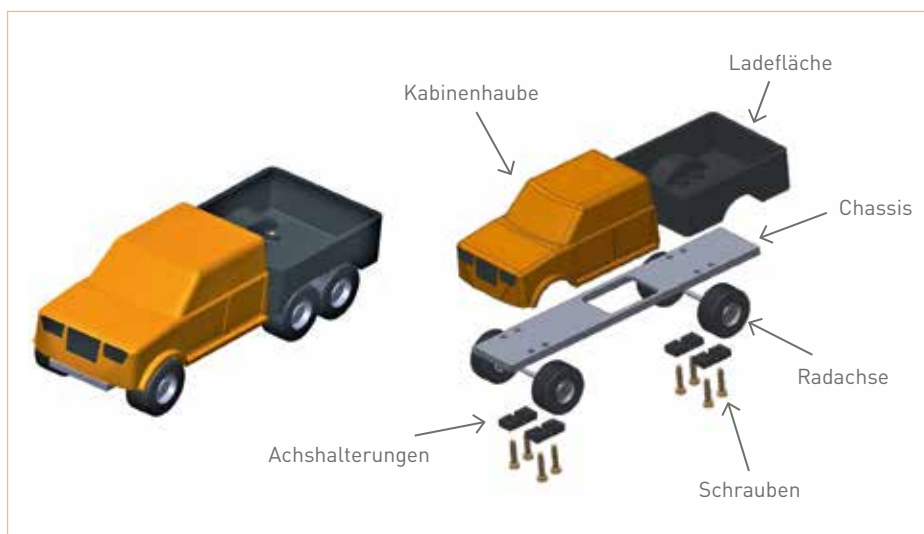


Abbildung 33: 3D-CAD Modell des Modell-Pick-Up-Trucks in der Variante mit drei Achsen (links) sowie als Explosionsansicht mit zwei Achsen (rechts)

Für die rein manuelle Montage des Modell-Pick-Up-Trucks wird aktuell eine Montagehilfe eingesetzt, welche zur Fixierung der Bauteile dient. In diese werden die Einzelteile eingelegt und anschließend mit einem Schraubendreher verschraubt. Die Bauteile sind als Haufwerk in Kleinladungsträgern (KLT) am Montageplatz magaziniert. Für den Einsatz eines Roboters ist diese Art von Magazinen ungeeignet und muss angepasst werden.

Der vorhandene höhenverstellbare Montagearbeitsplatz ist aus Aluminiumprofilen aufgebaut und kann für die Anbringung eines Roboters erweitert werden. Eine ausreichende Energieversorgung für die Systemkomponenten ist ebenfalls vorhanden. Nach einer ersten Abschätzung muss der Roboter eine Reichweite von ca. 600 mm aufweisen, um die mittig platzierte Montagehilfe sowie später angebrachte Magazine erreichen zu können. Zudem ist bereits ein Kamera-Projektionssystem vorhanden, welches auf seine Eignung als Assistenzsystem zur Unterstützung der Montage überprüft werden soll.

## 1.2 Potenzialanalyse

### **Bauteilgewicht**

Das Gesamtgewicht des Modell-Pick-Up-Trucks liegt bei 47 g, daher sind alle Einzelteile für einen Cobot und einen Greifer mit mehreren kg Traglast leicht handhabbar.

### **Verletzungsgefahr**

Da die Bauteile des Modell-Pick-Up-Trucks keine scharfen Kanten und spitzen Ecken sowie ein geringes Bauteilgewicht haben, besteht ein sehr geringes Verletzungsrisiko bei einer möglichen Kollision mit dem Menschen.

### **Formstabilität**

Die Bauteile weisen eine hohe Formstabilität auf und können mit einem Backengreifer gegriffen werden. Die Achshalterungen sowie die Schrauben sind für eine Automatisierung möglicherweise ungeeignet. Die Handhabung der Radachsen bringt die Schwierigkeit mit sich, dass sich beim Platzieren beide Räder außen auf der Achse befinden müssen.

### **Fazit**

Aufgrund des geringen Gewichts der jeweiligen Bauteile sowie einer hohen Formstabilität bietet der Anwendungsfall Potenzial für eine Teilautomatisierung durch einen Cobot. Zudem besteht kein Verletzungsrisiko für den Menschen bei einer möglichen Kollision.

## 1.3 Projektziele definieren

### **1. Anforderungsliste erstellen**

Die hybride Montage des Modell-Pick-Up-Trucks soll im Vergleich zur bisher manuellen Montage eine höhere Taktzeit haben, mit dem Ziel den Montageablauf insgesamt wirtschaftlicher zu gestalten. Zusätzlich soll durch den Einsatz des Cobots die Ergonomie für den Menschen verbessert werden. Mit dem Assistenzsystem soll die Fehlerquote reduziert sowie eine Steigerung der Akzeptanz des Werkenden erreicht werden.

### **2. Bewertungskriterien festlegen**

Aus den zuvor beschriebenen Anforderungen wird ein Katalog aus Bewertungskriterien für die Zielerreichung erstellt.

Tabelle: Projektziele

Projektziel	Zielart	Verbindlichkeit
Reduzierung der Taktzeit um 10 %	wirtschaftlich	muss
Steigerung der Ergonomie um 20 %	personell	muss
Reduzierung der Fehlerquote um 10 %	wirtschaftlich	kann
Automatisierungsgrad von 60 %	technisch	gewünscht

### 3. Kriterienkatalog auf komplementäre und konkurrierende Ziele überprüfen

Die Steigerung der Ergonomie des Arbeitsplatzes kann zur Akzeptanz durch den Menschen beitragen. Die beiden Ziele können daher als komplementär angesehen werden.

Die Steigerung des Automatisierungsgrades über ein für MRK-Arbeitsplätze wirtschaftlich sinnvolles Maß hinaus kann zu einer höheren Taktzeit führen. Da diese beiden Ziele daher konkurrierend sein könnten, wird das Ziel des höheren Automatisierungsgrades nur als Wunschziel in den Kriterienkatalog aufgenommen.

## 2. GROBPLANUNG

### 2.1 Montageablauf analysieren

Die Teile werden gemäß der Prioritätsmatrix in der nachfolgenden Tabelle montiert. Zur Vereinfachung werden die Achshalter und Schrauben als ein Element für die Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs betrachtet.

	Ladefläche	Kabinenhaube	Chassis	Vorderachse	Hinterachse	Achshalterung vorne	Achshalterung hinten	Schrauben Achse vorne	Schrauben Achse hinten	Summe	Rang
Ladefläche		1	1	1	1	1	1	1	1	8	1
Kabinenhaube	-1		1	1	1	1	1	1	1	7	2
Chassis	-1	-1		1	1	1	1	1	1	6	3
Vorderachse	-1	-1	-1		0	1	0	1	0	2	4
Hinterachse	-1	-1	-1	0		0	1	0	1	2	4
Achshalterung vorne	-1	-1	-1	-1	0		0	1	0	1	5
Achshalterung hinten	-1	-1	-1	0	-1	0		0	1	1	5
Schrauben Achse vorne	-1	-1	-1	-1	0	-1	0		0	0	6
Schrauben Achse hinten	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	0		0	6
<b>1</b>	Montage des Zeilenelements X <b>vor</b> Spaltenelement Y										
<b>0</b>	Die Montage ist egal										
<b>-1</b>	Montage des Zeilenelements X <b>nach</b> Spaltenelement Y										

Abbildung 34: Vorrangmatrix für den Modell-Pick-Up-Truck

Für die Montage des Modell-Pick-Up-Trucks müssen nacheinander die Ladefläche, die Kabinenhaube und das Chassis eingelegt werden, bevor die Vorderachse oder Hinterachse eingelegt werden kann. Anschließend können das Anbringen der Achsträger und das Anschrauben der Achsen erfolgen. Die Reihenfolge der Achsmontage ist hierbei beliebig. Die betrachteten Prozessschritte der manuellen Montage werden in der folgenden Tabelle analysiert, um eine mögliche Aufgabenteilung der Interaktionspartner abzuleiten.






Prozess	Schwierigkeit	Ausführung	Prüfung
<b>7. Platzierung Chassis</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richtige Lage an Endposition</li> <li>• Bohrungen von Chassis, Ladefläche und Kabinenhaube müssen übereinstimmen</li> <li>• Chassis ist sehr flach</li> </ul>	Roboter	Kamerasystem
<b>8. Entnahme und Vorbereitung Radachsen</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reifen können auf der Achse verschoben sein und müssen erst bis an die beiden Anschläge der Achse auseinandergezogen werden</li> </ul>	Mensch / Roboter	Mensch
<b>9. Platzierung Radachsen</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achse muss mittig zwischen den Bohrungen für die Achsträger platziert werden</li> <li>• Räder müssen sich im Radkasten befinden</li> </ul>	Mensch / Roboter	Mensch / Kamerasystem
<b>10. Entnahme Achsträger</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achsträger ist recht klein</li> <li>• Lage im Magazin</li> <li>• anschließende Platzierung recht schwierig</li> </ul>	Mensch	Kamerasystem
<b>11. Platzierung Achsträger</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achsträger muss mit der mittigen Aussparung auf die Achse gelegt werden</li> <li>• Bohrlöcher von Chassis, Ladefläche und Kabine übereinstimmen</li> </ul>	Mensch	Kamerasystem

Abbildung 35: Ausschnitt aus der Tabelle der Modell-Pick-Up-Truck-Analyse

## 2.2 Interaktionsformen planen

Aus der Vorrangmatrix und der Analyse der manuellen Montagesequenz wird nun eine hybride Montagesequenz abgeleitet, bei der die Austaktung sowie Machbarkeit der Systeme abgeschätzt werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die jeweiligen Aktionen der Interaktionspartner gelistet. Das Assistenzsystem soll als »Leader« eingesetzt werden und ist deshalb in der mittleren Spalte der Tabelle platziert. Die Kommunikation des hybriden Teams ist mit roten Pfeilen dargestellt. Die geplanten Interaktionsformen sind als farbige Kästen in die Tabelle mit eingebracht.



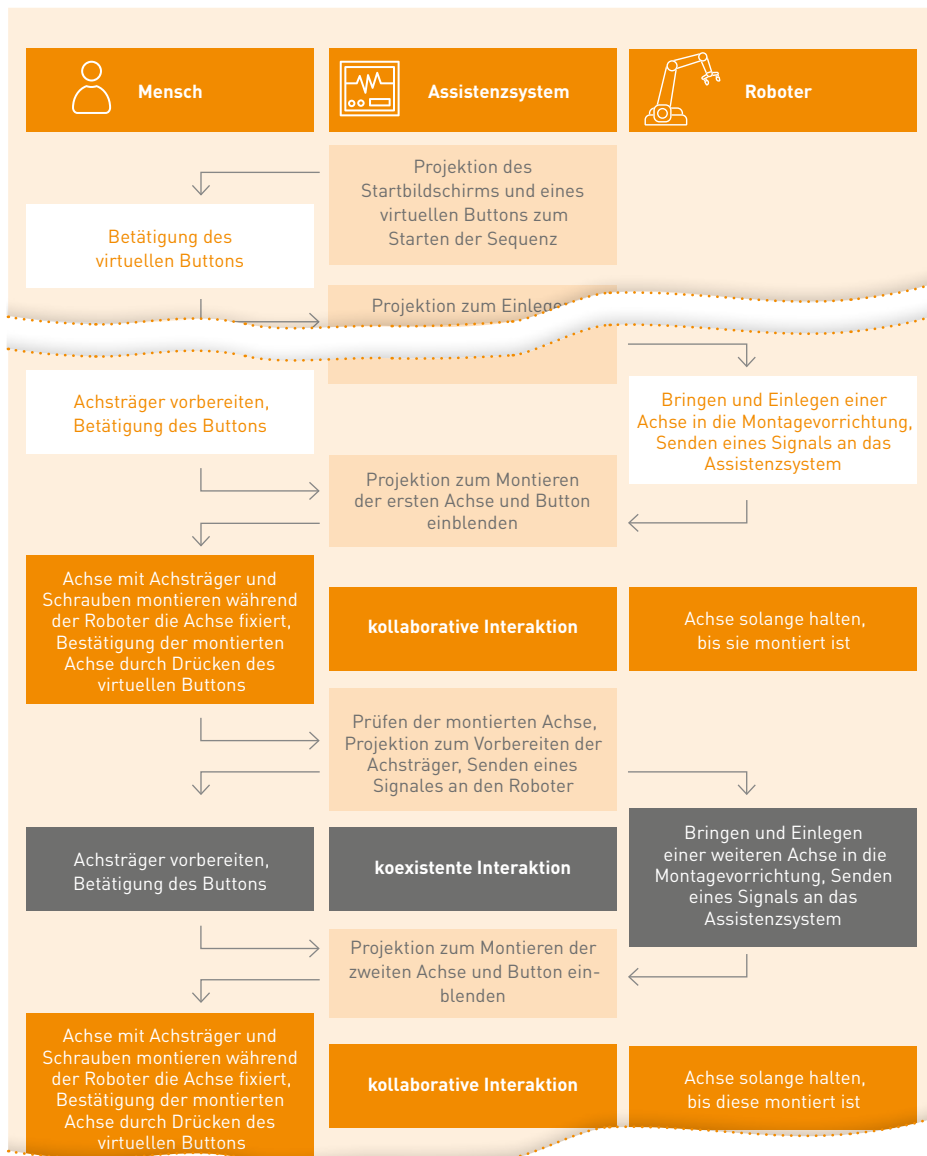


Abbildung 36: Auszug aus der geplanten hybriden Montagesequenz

Im Use Case sind zwei Mensch-Roboter-Interaktionstypen realisiert, die jeweils durch das Assistenzsystem unterstützt werden:

**1. Koexistenz:** Der Roboter holt die Ladefläche, die Kabinenhaube, das Chassis und die beiden Achsen aus ihren Magazinen, während Mitarbeitende die Achsträger und Schrauben vorbereiten.

**2. Kollaboration:** Nach dem Einsetzen der ersten Achse fixiert der Roboter diese, während der Mitarbeitende die Achshalter mit einem Elektroschrauber montiert. Der Roboter fungiert hier als »dritte Hand«, während das Assistenzsystem kamerabasiert eine Qualitätskontrolle durchführt. Für die Montage weiterer Achsen wird dieser Vorgang wiederholt.

### 2.3 Gestaltungslösungen erarbeiten

Nun werden konkrete Anforderungen an die geplanten Systemkomponenten Cobot, Endeffektor und Assistenzsystem gestellt sowie ein passender Cobot und Endeffektor ausgewählt.

Tabella: Anforderungen an die Systemkomponenten

Cobot	Endeffektor	Assistenzsystem
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traglast min. 3 kg</li> <li>• Reichweite min. 600 mm</li> <li>• Intuitive Programmierung</li> <li>• Kompatibel mit verschiedenen Greifsystemen</li> <li>• Verschiedene Kommunikationsschnittstellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hub von min. 120 mm</li> <li>• Greifkraft von max. 140 Nm</li> <li>• Traglast von min. 1 kg</li> <li>• Kompatibel zu gewähltem Cobot</li> <li>• Einstellbare Greifkraft</li> <li>• Für MRK geeignet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterstützung bei Werkerführung</li> <li>• Montagekontrolle</li> <li>• Schnittstelle für Kommunikation mit einem Cobot</li> <li>• Intuitive Interaktionsmöglichkeiten</li> </ul>

**COBOT**

Die Wahl des Cobots fällt auf den UR5e der Firma Universal Robots. Dieser weist eine Traglast von bis zu 5 kg bei einer Reichweite von maximal 850 mm auf. Als Schnittstelle zu anderen Systemen bietet der UR5e die Möglichkeit über digitale und analoge Ein- und Ausgänge sowie einen Ethernet-Schnittstelle zur Netzwerkkommunikation. [29]




Abbildung 37: Roboter UR5e [31]

**ENDEFFEKTOR**

Als geeigneter Endeffektor wird der Greifer 2F-140 von Robotiq ausgesucht. Dieser stellt eine passende Schnittstelle für den gewählten Cobot UR5e bereit. Mit einer maximalen Traglast von 2,5 kg und einem maximalen Hub von 140 mm ist es möglich, den Pick-Up-Truck als Ganzen zu greifen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Greifkraft individuell einzustellen. Mit seinem abgerundeten Design und einer maximalen Greifkraft von 125 N ist dieser Greifer für MRK-Anwendungen geeignet. [30]




Abbildung 38: Greifer 2F-140 Robotiq [32]

**ASSISTENZSYSTEM**

Der bereits vorhandene Assistent A600 verfügt über ein Multisensor-Kamerasystem, mit dem Montagekontrollen durchgeführt und KLT-Eingriffe erkannt werden können. Über ein integriertes Projektor-System besteht die Möglichkeit Montageanleitungen auf die Arbeitsfläche zu projizieren. Montageschritte können durch virtuelle Buttons auf der Arbeitsfläche bestätigt werden. Mit den vorhandenen I/O-Ports ist die Interaktion mit anderen Geräten möglich. [11]




Abbildung 39: Assistenzsystem Ulixes A600 [11]

### 3. FEINPLANUNG

#### 3.1 Arbeitsplatzlayout erstellen

Das gewählte Assistenzsystem erlaubt nur eine Anbringung über dem Arbeitsplatz und wird mit Aluminiumprofilen befestigt. Für die Platzierung des Roboters wird am Arbeitsplatz eine Erweiterung der Arbeitsfläche auf der rechten Seite vorgenommen (Layoutoption g, S.45). Die Montagehilfe wird mittig auf der Arbeitsfläche positioniert. Dort ist das kollaborative Montagezentrum (cca) und das des Roboters (rca), das Montagezentrum des Menschen (hca) liegt links davon.



Abbildung 40: CAD-Modell des hybriden Arbeitsplatzes

#### 3.2 Erstellung und Austaktung der Sequenz

Nachdem das Arbeitsplatzlayout geplant ist, wird der Arbeitsplatz in der Simulationssoftware emu erstellt und die zuvor erarbeitete hybride Montagesequenz eingepflegt. Darauf erfolgt die Simulation der hybriden Montage des Modell-Pick-Up-Trucks hinsichtlich Ergonomie und Ausstattung. Es werden vier verschiedene Szenarien simuliert und anschließend bewertet. Das Ergebnis der Simulationen fließt in die Gesamtbewertung des Arbeitsplatzes ein.



Abbildung 41: Simulation des hybriden Arbeitsplatzes

#### 3.3 Sicherheitskonzept erstellen

Der gewählte Roboter UR5e ist nach der Norm EN ISO 10218-1:2011 und EN ISO 13849-1:2015, Cat.3, PL d spezifiziert [29] und kann ohne weitere Sicherheitsvorkehrungen eingesetzt werden. Gleiches gilt für den Greifer 2F-140 von Robotiq, welcher nach der Norm NF EN ISO 14539 2000, NF EN ISO 12100 2010 und NF EN IEC 60204-1 für MRK-Anwendungen zugelassen ist [33]. Der Cobot wird nach dem Sicherheitsprinzip der Kontaktregelung betrieben, sodass eine Kollision durch Design oder Steuerungstechnik stark abgeschwächt wird. Zudem wird durch das sehr geringe Eigengewicht der Bauteile der Schaden eines ungewollten Zusammenstoßes erheblich reduziert.

Das Assistenzsystem A600 entspricht der EG-Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) und erfüllt die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen [11]. Darüber hinaus wird als weiter passive Sicherheitsvorkehrung der Arbeitsbereich von Mensch und Roboter auf die Arbeitsfläche projiziert (siehe Abbildung 42). Durch diese visuelle Abgrenzung der Arbeitsbereiche kann im Vorfeld die Wahrscheinlichkeit einer Kollision von Mensch und Cobot reduziert werden.

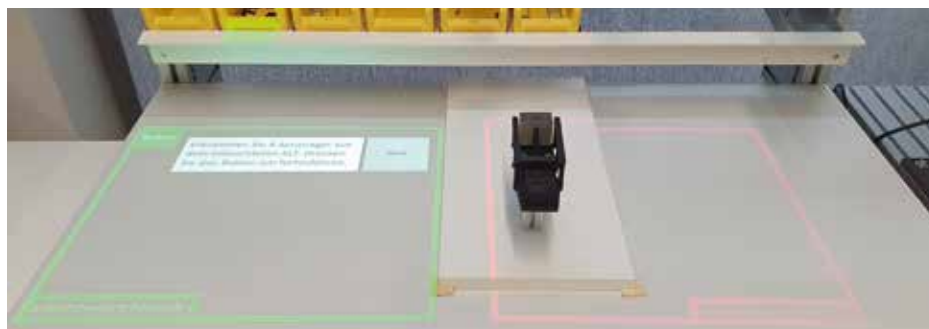


Abbildung 42: Projektion auf die Arbeitsfläche des hybriden Arbeitsplatzes

## 4. GESAMTBEWERTUNG

### 4.1 Bewertung des hybriden Arbeitsplatzes



Abbildung 43: (links oben) koexistente Interaktion, (rechts oben) kollaborative Interaktion, (links unten) Montagekontrolle durch das Assistenzsystem, (rechts unten) Teilemagazin des Cobots

#### **Taktzeit 10 %:**

Die Taktzeit der manuellen Montage beträgt 1:40 Minuten, die des hybriden Arbeitsplatzes 1:24 Minuten. Dadurch ergibt sich eine Verringerung der Taktzeit um 11,4% und erfüllt somit das zuvor gesetzte Ziel. Erreicht wurde das Ziel durch die Parallelisierung von Arbeitsschritten in der koexistenten Interaktionsform.

#### **Ergonomie 20 %:**

Im Vergleich zur manuellen Montage konnte mit Hilfe des hybriden Arbeitsplatzes eine Ergonomieverbesserung um 28,6% erreicht werden. Die Simulation ergab, dass in den Arbeitsschritten »Achshalter einlegen« und »Achsen verschrauben« eine verbesserte Ergonomie erreicht wurde. Dies sind die kollaborativen Arbeitsschritte in denen der Cobot als »dritte Hand« agiert.

#### **Fehlerquote:**

Da es sich bei diesem Anwendungsfall um einen Forschungsaufbau handelt, gibt es keine aussagekräftigen Vergleichswerte für die Messung der Fehlerquote. Während der Testläufe hat der Roboter keine Teile falsch eingelegt, zudem wird durch die Montagekontrolle des Assistenzsystems die korrekte Position jedes Teils überprüft. Daher kann angenommen werden, dass die Fehlerquote verringert wird.

#### **Automatisierungsgrad 60 %:**

Der Grad der Automatisierung berechnet sich aus dem Quotienten der Anzahl automatisierter Operationen und der Anzahl aller Operationen [16]. Es ergeben sich für diesen Use Case durch das Einlegen von Ladefläche, Kabinenhaube, Chassis, Vorder- und Hinterachse durch den Roboter fünf automatisierte Operationen. Die zwei manuell ausgeführten Operationen sind das Positionieren der Achsträger und das anschließende Eindrehen der Schrauben. Folglich ergibt sich ein Automatisierungsgrad für die hybride Montage des Pick-Up-Trucks von 71 %.

## 5. UMSETZUNG

### 5.1 Machbarkeitsanalyse

Nun wird überprüft, ob die Komponenten des Modell-Pick-Up-Trucks gegriffen und in die vorhandene Montagehilfe eingelegt werden können. Ebenso wird getestet, ob die Montagekontrolle des Assistenzsystems wie geplant eingesetzt werden kann.



Abbildung 44: (links) Platzieren des Chassis durch den Cobot, (rechts) Einlernen der Montagekontrolle

Die Machbarkeitsanalyse ergab, dass die Teile des Modell-Pick-Up-Trucks wie geplant gegriffen und platziert werden können. Um ein Verrutschen der Ladefläche durch den Roboter zu verhindern, wurde ein zusätzlicher Anschlag an der Montagehilfe angebracht. Somit sind fünf von sechs Freiheitsgraden der Ladefläche gesperrt.

### 5.2 Implementierung der Sequenz

Gemäß der im Leitfaden beschriebenen Methodik wird die hybride Montagesequenz am Arbeitsplatz umgesetzt.

#### Schritt 1: Robotersequenz implementieren

Um die Robotersequenz zu implementieren, werden die Teilsequenzen aus der Machbarkeitsanalyse wiederverwendet.

#### Schritt 2: Austaktung Mensch-Roboter

Die Austaktung der beiden Interaktionspartner wird hier erstmals am Arbeitsplatz überprüft und die Robotergeschwindigkeit angepasst.

#### Schritt 3: Kommunikationsmechanismen einbringen

Daraufhin wird der virtuelle Button sowie die Montagekontrolle und die KLT-Erkennung des Assistenzsystems in die Mensch-Roboter-Sequenz eingebracht.

#### Schritt 4: Montageanweisungen erstellen

Abschließend werden die projizierten Montageanweisungen mit Text und Bildern erstellt und an den entsprechenden Stellen in der hybriden Montagesequenz platziert.

Die nachfolgenden Bilder zeigen Ausschnitte der Montage des Pick-Up-Trucks durch das hybride Team. Das Assistenzsystem projiziert Arbeitsbereiche, sowie Montageanweisungen als Text und Bild zur Unterstützung des Menschen auf die Arbeitsfläche. Der Cobot arbeitet in der koexistenten oder kollaborativen Interaktionsform.

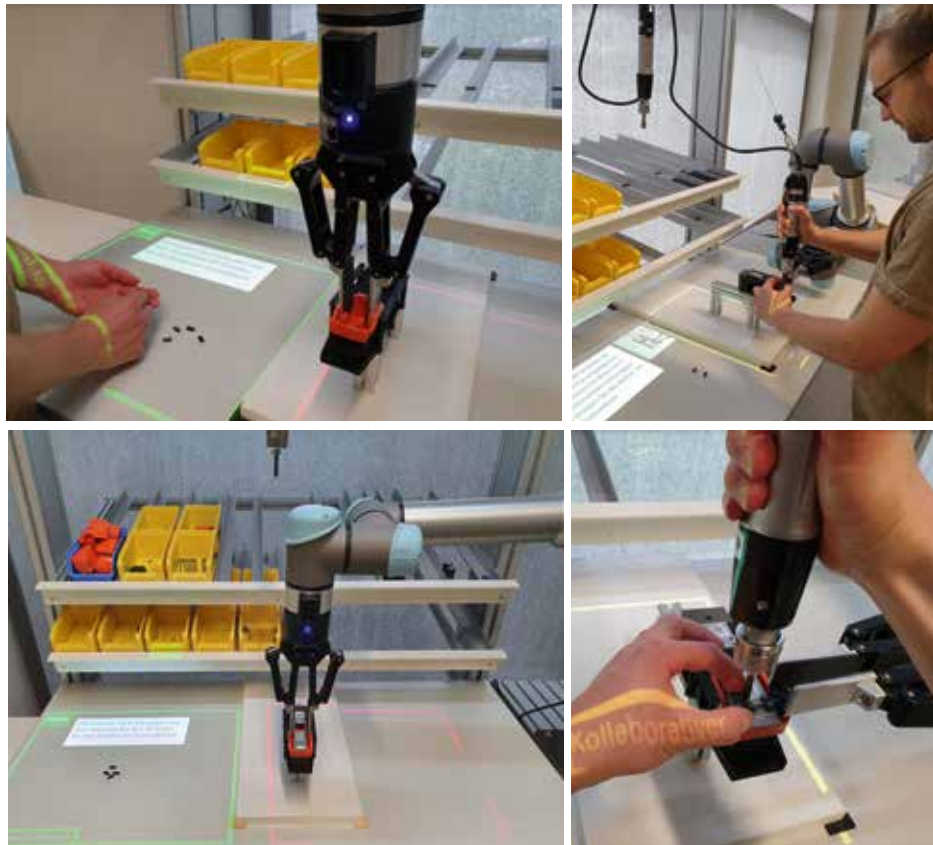


Abbildung 45: (linke Seite) koexistente Interaktionsform, (rechte Seite) kollaborative Interaktionsform

## Stand der Wissenschaft

Nach den eher praxisorientierten Aspekten zur assistierten Mensch-Roboter-Interaktion soll nun abschließend der Stand der Forschung beleuchtet werden. Zugegeben eine eher ungewöhnliche Gliederung, jedoch steht die Anwendungsorientierung und die Praxisnähe im Vordergrund dieses Leitfadens. Dennoch soll die wissenschaftliche Eruierung des Stands der Forschung nicht zu kurz kommen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zum Thema MRK zeigen, dass es bereits umfangreiche Untersuchungen in den für die Montage relevanten Bereichen gibt. Durch aktive und passive Sicherheitsvorkehrungen, einem geringen Eigengewicht und einer angepassten Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters kann die Sicherheit des Menschen gewährleistet werden [33] [34] [35]. Mit dem Einsatz von Software können bereits im Vorfeld Arbeitsplätze und Montageprozesse hinsichtlich Layoutgestaltung, Produktivität und Koordination des Roboters sowie Sicherheit simuliert und geprüft werden [35] [36] [37]. Bezüglich Ergonomie und Akzeptanz muss auf einen angepassten Bewegungsablauf bei entsprechender Geschwindigkeit geachtet werden, um keine zusätzliche Belastung des Menschen zu erzeugen [38]. Es kann durch den Einsatz von Cobots nachweislich die Montagezeit, sowie die Beanspruchung des Menschen reduziert werden [39]. Zudem bietet der Einsatz von Cobots die Möglichkeit schwerbehinderte Menschen in den Montageprozess zu integrieren. Die Nutzung von MRK-fähigen Robotern hat einen signifikanten Einfluss auf die Produktivitätssteigerung, sowie Flexibilität im Montageprozess [40].

Auch zum Thema Assistenzsysteme mit AR-Technologien gibt es bereits Untersuchungen im Einsatzgebiet der Montage zur Produktivitätssteigerung und Entlastung der Mitarbeitenden. Durch den Vergleich von AR-basierenden Assistenzsystemen mit einer herkömmlichen Printanleitung konnte aufgezeigt werden, dass sich die Projektion auf die Arbeitsfläche und auf das Objekt als bessere Unterstützung herausstellt als andere Technologien [41]. Grundsätzlich lässt sich eine Reduktion der kognitiven Belastung, der Durchlaufzeit und Fehlerquote, bei Erhöhung der Flexibilität feststellen [42] [43] [56] [58]. Des Weiteren wurden die Grenzen und Möglichkeiten verschiedener AR-Assistenzsysteme untersucht und aufgezeigt, sowie Handlungs- und Gestaltungsempfehlungen zur Lern- und Gesundheitsförderung erarbeitet [41]. Aus den Befragungen der Teilnehmenden der Studien kann eine generelle Akzeptanz von AR-basierenden Assistenzsystemen festgestellt werden [36] [37] [58].

Wie die Literaturrecherche in Bezug auf ein Gesamtsystem aus Cobot und Assistenzsystem zeigt, wurde in diesem Bereich bisher wenig Forschung betrieben. Es wurden lediglich Konzepte zu Potenzial, Sicherheit, Ergonomie und Akzeptanz erarbeitet und Montagearbeitsplätze mit verschiedenen AR-Technologien aufgebaut [38] [39] [40] [42]. Bei einem entwickelten Montagearbeitsplatz wurde zusätzlich ein Steuerrechner mit künstlicher Intelligenz aufgebaut, um die physische und kognitive Belastung zu reduzieren [43]. Bei den betrachteten Forschungsberichten konnte bei einer Untersuchung herausgefunden werden, dass der Einlernprozess bei der Zusammenarbeit mit einem Cobot durch ein AR-Assistenzsystem unterstützt und vereinfacht werden kann. Eine weitere praktische Untersuchung wies die Reduzierung der Montagezeit nach [41].

Um einen genaueren Überblick über die untersuchten Forschungsberichte zu MRK und Assistenzsystemen zu erhalten, wurden diese nach den Aspekten Sicherheit, Planung / Layout, Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz und Ergonomie kategorisiert. Die Forschungsberichte, welche auf Untersuchungen einer Kombination aus Cobot und Assistenzsystem abzielen, wurden nach

den Aspekten kategorisiert, ob ein Konzept entwickelt, ein Arbeitsplatz aufgebaut oder eine Studie durchgeführt wurde. Die Kategorisierung ist in die nachfolgende Tabelle eingetragen.

	MRK				AR-Assistenzsystem				Gesamt-system				
	Sicherheit	Planung / Layout	Wirtschaftlichkeit	Akzeptanz	Ergonomie	Sicherheit	Planung / Layout	Wirtschaftlichkeit	Akzeptanz	Ergonomie	Konzeptentwicklung	Arbeitsplatz installiert	Studie
Vysocky und Novak [44]	x												
Gopinath, Ore u.a. [45]	x												
Bobka, Germann u. a. [46]	x	x	x										
Berg, Gebauer u. a. [47]		x			x								
Kemény, Beregi u. a. [48]		x											
Johannsmeier, Haddadin [49]		x			x								
Cesta, Orlandini u. a. [50]		x			x								
Matheson, Minto u. a. [51]			x	x	x								
Lee, Barthelmey u. a. [52]		x	x		x								
Hegenberg, Wilhelm u. a. [53]			x	x	x								
Lungfiel u. a. [54]				x	x								
Kremer, Hermann [33]					x								
Schenk, Haase u. a. [34]						x			x				
Funk, Kosch u. a. [35]							x		x				
Makris, Pintzos u. a. [55]							x		x				
Tang, Owen u. a. [56]							x		x				
Bonino, Giannini u. a. [36]								x					
Nilsson und Johansson [37]								x					
Zäh, Wiesbeck u.a. [57]									x				
Hou, Wang u. a. [58]							x	x	x				
Liu, Wang [39]										x	x		
Blaga und Tamas [38]										x	x		
Makris, Karagiannis u. a. [40]										x	x		
Danielsson, Syberfeldt u. a. [42]										x	x	x	
Charoenseang, Tonggoed [41]										x	x	x	
Ender, Wagner u. a. [43]										x	x		



## Fazit und Ausblick

Der Leitfaden zur Einführung hybrider Montagearbeitsplätze soll Produktionsplanenden, Führungskräften und Anwendenden eine Orientierung zur Planung assistierter MRK-Arbeitsplätze geben. Die Checklisten nach jedem Schritt ermöglichen ein schnelles, iteratives Vorgehen, bei dem mögliche Risiken frühzeitig erkannt und beseitigt werden. Bisherige Erfahrungen aus Industrie und Forschung sind in Form von Leitfragen mit in die vorgeschlagene Vorgehensweise eingeflossen und helfen Stolpersteine bei der Einführung zu umgehen.

Der Leitfaden soll den Paradigmenwechsel von manueller Montage zu hybriden Arbeitsplätzen erleichtern und so vor allem KMU dabei helfen Produktionsstandorte in Hochlohnländern langfristig zu erhalten und so Arbeitsplätze sichern. Die Kombination aus Cobot und Assistenzsystem bietet dabei einen innovativen Ansatz bei der Unterstützung neuer Montageabläufe. Durch das hybride Team können Arbeitsplätze flexibler gestaltet werden und eine Anpassung an sich ändernde Marktbedingungen, wie kleiner werdende Losgrößen oder höhere Variantenvielfalt wird vereinfacht.

Dieser Leitfaden basiert auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt InKoMo – Interaktive, kollaborative Montage komplexer Bauteile, das von der Bayerischen Forschungsförderung (AZ-1401-19) gefördert wurde. Für die Zukunft ist ein Folgeprojekt geplant, das sich mit einer konfigurierbaren Prozesskette in der kollaborativen Montage befasst. Ziel dieser Forschung soll es sein, die Konfiguration der Prozesskette von assistierten MRK-Arbeitsplätzen zu automatisieren und mit Hilfe einer Echtzeit-Algorithmik adaptiv Änderungen im Roboterprogramm zu realisieren.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.)** (2012), »Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis«, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [2] **Buxbaum, H.J. (Ed.)** (2020), »Mensch-Roboter-Kollaboration«, Springer-Verlag, Berlin
- [3] **Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kuhlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A.** (2019), »Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration«, Carl Hanser Verlag, München
- [4] **Bauer, W.; Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholtz, O.** (2016), »Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen. Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen«, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, verfügbar in: [https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-4151100.pdf](https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4151100.pdf)
- [5] **Matthias, B.; Ding, H.** (2013), »Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage«, in Internationales Forum Mechatronics (ifm), verfügbar in: [https://www.researchgate.net/publication/269410966\\_Die\\_Zukunft\\_der\\_Mensch-Roboter\\_Kollaboration\\_in\\_der\\_industriellen\\_Montage](https://www.researchgate.net/publication/269410966_Die_Zukunft_der_Mensch-Roboter_Kollaboration_in_der_industriellen_Montage)

- [6] **Mewes E.; Minow A.; Bergmüller A.; Wassmann S.** (2020), »Digitale Assistenzsysteme zur mobilen Verwendung im technischen Service«, Fraunhofer IFF, verfügbar in: [https://www.researchgate.net/publication/340655390\\_DIGITALE\\_ASSISTENZSYSTEME\\_ZUR\\_MOBILEN\\_VERWENDUNG\\_IM\\_TECHNISCHEN\\_SERVICE\\_Ein\\_Leitfaden\\_fur\\_die\\_Gestaltung\\_und\\_Nutzung](https://www.researchgate.net/publication/340655390_DIGITALE_ASSISTENZSYSTEME_ZUR_MOBILEN_VERWENDUNG_IM_TECHNISCHEN_SERVICE_Ein_Leitfaden_fur_die_Gestaltung_und_Nutzung)
- [7] **Picavi** (2017), »Datenbrille unterstützt Sequenzierung«, verfügbar in: <https://www.maschinenmarkt.ch/datenbrille-unterstuetztsequenzierung-a-642814/>
- [8] **Rapp S.; Weber I.** (2009), »LumEnActive: bewegte Projektion mit Anwendungsmöglichkeiten in Fertigung und Entwicklung«, verfügbar in: [http://conante.com/~rapp/publications/IFFMagdeburg09/Publication/beitrag\\_rapp\\_weber.pdf](http://conante.com/~rapp/publications/IFFMagdeburg09/Publication/beitrag_rapp_weber.pdf)
- [9] **Apt W.; Bovenschulte M.; Priesack K.; Weiß C.; Hartmann E. A.** (2018), »Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb«, Forschungsbericht, verfügbar in: [https://www.iit-berlin.de/iit-docs/0b0ab71d0ed949269fa39e2b38665fde\\_Einsatz-von-digitalen-Assistenzsystemen-im-Betrieb.pdf](https://www.iit-berlin.de/iit-docs/0b0ab71d0ed949269fa39e2b38665fde_Einsatz-von-digitalen-Assistenzsystemen-im-Betrieb.pdf)
- [10] **VDMA** (2018/2019), »Industrielle Bildverarbeitung 2018/19 – Anwendungen, Produkte, Bezugsquellen«, verfügbar in: [https://rua.vdma.org/documents/256550/26983528/VDMA\\_IBV\\_Branchenfuehrer\\_dt\\_Final\\_1540547428804.pdf/27381ef3-c073-a38d-2ae3-4fd8a9a040a7](https://rua.vdma.org/documents/256550/26983528/VDMA_IBV_Branchenfuehrer_dt_Final_1540547428804.pdf/27381ef3-c073-a38d-2ae3-4fd8a9a040a7)
- [11] **Ulixes** (2021), »A300 / A500 / A600 de Handbuch«, Ulixes Robotersysteme GmbH
- [12] **Rüger C.; Moosburner S.; Sauer I. M.** (2020), »Extended-Reality-Technologien zur Unterstützung chirurgischen Handelns«, *Der Chirurg* Volume 91, S. 544–552.
- [13] **Hochberg J.; Vogel C.; Bastiaens T.** (2017), »Gestaltung und Erforschung eines Mixed-Reality-Lernsystems«, verfügbar in: <https://www.medienpaed.com/article/view/476/459>
- [14] **Teizer J.; Wolf M.; König M.** (2018), »Mixed Reality Anwendungen und ihr Einsatz in der Aus- und Weiterbildung kapitalintensiver Industrien«, VDI-Bautechnik, verfügbar in: [https://digirab.blogs.ruhr-uni-bochum.de/wp-content/uploads/2019/07/2018\\_Bauingenieur\\_Teizer\\_MixedReality.pdf](https://digirab.blogs.ruhr-uni-bochum.de/wp-content/uploads/2019/07/2018_Bauingenieur_Teizer_MixedReality.pdf)
- [15] **Galaske N.; Rönick K.; Stockinger C.** (2019), »Leitfaden Arbeit 4.0 – Erfassung und Verarbeitung sensibler Mitarbeiterdaten für Assistenzsysteme in der Produktion«, *Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrum Darmstadt*, verfügbar in: [https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/leitfaden-arbeit-40.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/leitfaden-arbeit-40.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- [16] **Kasselmann S; Willeke S.** (2016), »4.0 READY – Technologie-Kompendium – Interaktive Assistenzsysteme«, Institut für Integrierte Produktion Hannover, verfügbar in: [https://www.iph-hannover.de/\\_media/files/downloads/Projekt\\_40-Ready\\_Technologie-Kompendium.pdf](https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Projekt_40-Ready_Technologie-Kompendium.pdf)
- [17] **Bauer, W.; Rally, P., Scholtz, O.** (2018), »Schnelle Ermittlung sinnvoller MRK-Anwendungen – Auswahlunterstützung in der Montage«, *ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, JG. 113, Carl Hanser Verlag, München.

- [18] **KUKA Roboter GmbH** (2013) »KR 5 R1400 Specification«, verfügbar in: [http://supportwop.com/IntegrationRobot/content/2-Robots/Petites\\_charges\(5-16kg\)/KR\\_5\\_arc/English\\_manual\\_KR\\_5\\_R1400\\_en.pdf](http://supportwop.com/IntegrationRobot/content/2-Robots/Petites_charges(5-16kg)/KR_5_arc/English_manual_KR_5_R1400_en.pdf)
- [19] **Berg J.; Merhar L.; Lottermoser A.; Härdtlein C.; Henke M.** (2019), »Roboter für den Mittelstand – Praxisleitfaden für Leichtbauroboter in der Produktion«, Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV, verfügbar in: [http://www.kompetenzzentrum-augsburg-digital.de/leitfaden\\_robotik](http://www.kompetenzzentrum-augsburg-digital.de/leitfaden_robotik)
- [20] **Hesse S.** (2011), »Greifertechnik – Effektoren für Roboter und Automaten«, Carl Hanser Verlag, München
- [21] **Schröter D.** (2017), »Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in MRK«, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung Band 81, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, verfügbar in: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9966/1/Daniel-Schroeter-81.pdf>
- [22] **Büttner S.; Funk M., Sand O. und Röcker C.** (2016) »Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems: A Comparison«, Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments
- [23] **Berg, J.; Gebauer, D.; Reinhart, G.** (2019), »Method for the evaluation of layout options for a human-robot collaboration«, *Procedia CIRP*, Jg. 83, S. 139–145.
- [24] **Daub U.; Ackermann A.; Kopp V.** (2019), »Ergonomie-Benefits - Kriterien zur Bewertung ergonomischer Maßnahmen in der Kosten-Nutzen-Analyse«, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA – Stuttgart
- [25] **Schunk GmbH & Co. KG** (2021), verfügbar in: [https://schunk.com/de\\_de/co-act/hintergrundwissen-mrk/](https://schunk.com/de_de/co-act/hintergrundwissen-mrk/)
- [26] **Deutsches Institut für Normung (DIN)** (2011), »Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung«, DIN EN ISO 12100:2011-03, verfügbar in: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-12100/128264334>
- [27] **Niewerth, C.; Miro, M.; Schäfer, M.; Wannöffel, M. (Hrsg.); Kuhlenkötter, B. (Hrsg.)** (2019), »Leitfaden zur Einführung von Mensch-Roboter-Kollaboration: Perspektiven der betrieblichen Interessenvertretung«, Ruhr-Universität Bochum, verfügbar in: <https://rubigm.ruhr-uni-bochum.de/Transfer/MRK%20Leitfaden.pdf>
- [28] **Oberc, H.; Prinz, C.; Glogowski, P.; Lemmerz, K.; Kuhlenkötter, B.** (2019), »Human Robot Interaction – learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines«, *Procedia Manufacturing*, Jg. 31, S. 26–31.
- [29] **Universal Robots A/S** (2018), »Universal Robots e-Series Benutzerhandbuch«, verfügbar in: [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/40980/UR5e\\_User\\_Manual\\_de\\_Global.pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/40980/UR5e_User_Manual_de_Global.pdf)

- [30] **Robotiq Inc.** (2018), »2F-85 & 2F-140 – Instruction Manual«, verfügbar in: [https://robotics.ee.uwa.edu.au/courses/robotics/project/ur5/Gripper\\_UserManual.pdf](https://robotics.ee.uwa.edu.au/courses/robotics/project/ur5/Gripper_UserManual.pdf)
- [31] **JUGARD+KÜNSTNER** (2021), verfügbar in: <https://www.jugard-kuenstner.de/universal-robots/cobots/ur5.html>
- [32] **WiredWorkers** (2021), verfügbar in: <https://wiredworkers.io/product/robotiq-2f-140>
- [33] **Kremer, D. und Hermann, S.** (2018), »Mensch-Roboter-Zusammenarbeit – Gestaltung sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit«, verfügbar in: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Veranstaltungen/Dokumentationen/Neue-Technologien/Mensch-Roboter-2017.html>
- [34] **Schenk, M.; Haase, T.; Keller, A.; Berndt, D.** (2016), »Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion für die Gestaltung zukünftiger Arbeitssysteme« in Schlick, C. M. (Hrsg.), Megatrend Digitalisierung – Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation, GITO Verlag, Magdeburg, S. 131–139.
- [35] **Funk, M.; Kosch, T.; Schmidt, A.** (2016), »Interactive worker assistance: comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions« in Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.), UbiComp '16: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct, 12.–16. September, Heidelberg, Deutschland, ACM, S. 934–939.
- [36] **Bonino, B.; Giannini, F.; Monti, M.** (2019), »Augmented Reality in manufacturing engineering«, CNR-IMATI, Genova, verfügbar in: <http://irs.imati.cnr.it/files/reports/19-03.pdf>
- [37] **Nilsson, S.; Johansson, B. J.** (2008), »Acceptance of Augmented Reality Instructions in a Real Work Setting«, in Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.), CHI '08: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 5.–10. April, Florence, Italy, ACM, S. 2025–2032.
- [38] **Blaga, A.; Tamas, L.** (2018), »Augmented Reality for Digital Manufacturing«, MED '18: The 26th Mediterranean Conference on Control and Automation, 19.–22. Juni, Zadar, Kroatien, S. 173–178.
- [39] **Liu, H.; Wang, L.** (2017), »An AR-based Worker Support System for Human-Robot Collaboration«, *Procedia Manufacturing*, Jg. 11, S. 22–30.
- [40] **Makris, S.; Karagiannis, P.; Koukas, S.; Matthaiakis, A.-S.** (2016), »Augmented reality system for operator support in human–robot collaborative assembly«, *CIRP Annals*, Jg. 65, Nr. 1, S. 61–64.
- [41] **Charoenseang, S.; Tonggoed, T.** (2011), »Human-Robot Collaboration with Augmented Reality« in Stephanidis, C. (Hrsg.), HCI International 2011 Posters' Extended Abstracts, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 93–97.

- [42] Danielsson, O.; Syberfeldt, A.; Brewster, R.; Wang, L. (2017), »Assessing Instructions in Augmented Reality for Human-robot Collaborative Assembly by Using Demonstrators«, *Procedia CIRP*, Jg. 63, S. 89–94.
- [43] Ender, J.; Wagner, J.; Kunert, G.; Guo, F.; Larek, R.; Pawletta, T. (2019), »Concepts of a self-learning Workplace Cell for Worker Assistance while Collaboration with a Robot within the Self-Adapting-Production-Planning-System«, *Informatyka Automatyka Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, Lublin University of Technology, verfügbar in: [https://www.researchgate.net/publication/337997920\\_CONCEPT\\_OF\\_A\\_SELF-LEARNING\\_WORKPLACE\\_CELL\\_FOR\\_WORKER\\_ASSISTANCE\\_WHILE\\_COLLABORATION\\_WITH\\_A\\_ROBOT\\_WITHIN\\_THE\\_SELF-ADAPTING-PRODUCTION-PLANNING-SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/337997920_CONCEPT_OF_A_SELF-LEARNING_WORKPLACE_CELL_FOR_WORKER_ASSISTANCE_WHILE_COLLABORATION_WITH_A_ROBOT_WITHIN_THE_SELF-ADAPTING-PRODUCTION-PLANNING-SYSTEM)
- [44] Vysocky A.; Novak P. (2016) »Human-Robot Collaboration In Industry«, *MM Science Journal*, verfügbar in: [https://www.researchgate.net/publication/303853919\\_Human\\_-\\_Robot\\_collaboration\\_in\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/303853919_Human_-_Robot_collaboration_in_industry)
- [45] Gopinatha V.; Oreb E.; Grahnd S.; Johansen K. (2018), »Safety-Focussed Design of Collaborative Assembly Station with Large Industrial Robots«, Elsevier B.V., Stockholm
- [46] Bobkaa P.; Germanna T.; Heyna J. K.; Gerbersa R.; Dietricha F.; Drödera K. (2016), »Simulation platform to investigate safe operation of human-robot,« Elsevier B.V., Braunschweig
- [47] Matheson E.; Minto R.; Zampieri E.; Faccio M.; Rosati G. (2019), »Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review«, Licensee MDPI, Basel
- [48] Keménya, Z.; Beregia, R.; Nacsaa, J.; Kardosa, C.; Horvátha, D. (2018), »Human–robot collaboration in the MTA SZTAKI learning factory facility at Győr«, *Procedia Manufacturing*, Jg. 23, S. 105–110.
- [49] Johannsmeier, L. und Haddadin, S. (2017), »A Hierarchical Human-Robot Interaction-Planning Framework for Task Allocation in Collaborative Industrial Assembly Processes«, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Jg. 2, Nr. 1.
- [50] Cesta, A.; Orlandini, A.; Umbrico, A. (2018), »Fostering Robust Human-Robot Collaboration through AI Task Planning«, *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 1045–1050.
- [51] Matheson, E.; Minto, R.; Zampieri, E. G. G.; Faccio, M.; Rosati, G. (2019), »Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review«, Licensee MDPI, Basel
- [52] Lee, E.; Barthelmey, A.; Reckelkamm, T.; Kang, H.; Son, J. (2019), »A Study on Human-Robot Collaboration based Hybrid Assembly System for Flexible Manufacturing«, in *Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) (Hrsg.) IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2019*, 14.–17. Oktober, Lissabon, IEEE, S. 4197–4202.

- [53] Hegenberg, J.; Schimpf, D.; Fischer, N.; Schmidt, L. (2018), »Fallstudie zur Roboterunterstützung des Menschen bei manueller Montage«, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 72, S. 239–251.
- [54] Koppenborg, M.; Lungfiel, A.; Naber, B.; Nickel, P. (2013), »Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit«, in Gesellschaft für Arbeitswissenschaften e. V. (Hrsg.), 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, 27. Februar – 1. März, Krefeld, GfA-Press, Dortmund S. 417–420.
- [55] Makris, S.; Pintzos, G.; Rentzos, L.; Chryssolouris, G. (2013), »Assembly support using AR technology based on automatic sequence generation«, CIRP Annals, Jg. 62, Nr 1, S. 9–12.
- [56] Tang, A.; Owen, C.; Biocca, F.; Mou, W. (2003), »Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly« in Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.), CHI '03: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 5.–10. April, Ft. Lauderdale, Florida, USA, ACM, S. 73–80.
- [57] Zäh, M.; Wiesbeck, M.; Engstler, E.; Friesdorf, F.; Schubö, A.; Stork, S.; Bannat, A.; Wallhoff, F. (2007), »Kognitive Assistenzsysteme in der Montage«, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
- [58] Hou, L.; Wang, X.; Martijn, T. (2015), »Using Augmented Reality to Facilitate Piping Assembly: An Experiment-Based Evaluation«, Journal of Computing in Civil Engineering, Jg. 29, Nr. 1.