



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Konzept eines digitalen Zwillings einer Mensch-Roboter Kollaboration – Simulation und Vergleich eines Arbeitsprozesses

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (Dipl. Ing.)

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institute of Management Science,
Bereich: Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

Dipl.-Ing. Clara Fischer

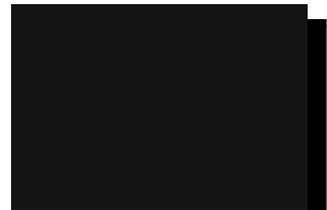
(E330 Institute of Management Science,
Bereich: Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

eingereicht an der TU Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Mathias Schmidt



Wien, im August 2023

Mathias Schmidt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

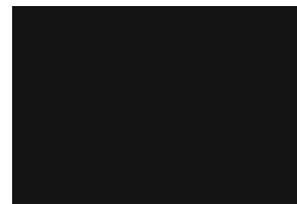
Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien im Monat August



Mathias Schmidt

Danksagung

Vielen Dank an Clara Fischer für die inhaltliche Betreuung der Arbeit und die Unterstützung bei der Umsetzung in der „Pilotfabrik Industrie 4.0“. Die Durchführung der DSER Übung (Digital Simulation of Ergonomics and Robotics) geleitet durch Clara, war eine ideale Vorbereitung für die Simulationstechniken des Umsetzungsteils und um einen Überblick über die verfügbaren Simulationsprogramme zu bekommen. Danke auch an Herrn Schlund, für die Bereitstellung der Räumlichkeiten und Geräte der Pilotfabrik, ohne die der Umsatzteil nicht möglich wäre, sowie die Vergabe der Arbeit. Außerdem will ich Andreas Schütz danken, der mit seiner fachlichen Expertise im Bereich der Industrie-Elektronik einen wesentlichen Teil dazu geleistet hat, ein Grundverständnis für die programmierte Sicherheitslogik zu erhalten und diese umzusetzen.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Eignung von Prozess-Simulationen vor und nach der physischen Implementierung einer Mensch Roboter Kollaboration (MRK) Anwendung überprüft. Dafür wird ein eigens entwickeltes Digital-Twin (DT)-Modell vorgestellt, das als Grundlage für die Überprüfung dient. Als DT werden digitale Abbildungen physischer Prozess bezeichnet, welche eine Verbindung zwischen physischen und digitalen Objekten etablieren. Durch die immer engere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter wird die Abbildung realer Produktionsprozesse, beispielsweise über DT, notwendig, um die Sicherheit, Ergonomie und Effizienz zu beurteilen. Während im Bereich der Automatisierungstechnik DT bereits vermehrt eingesetzt werden, befinden sich Modelle für MRK Anwendungen, aufgrund der Einbindung des menschlichen Verhaltens, oft noch in der Konzeptphase. Die MRK kann den Automatisierungsgrad in Bereichen erhöhen, die traditioneller Robotik nicht zugänglich war, beispielsweise bei Montageprozessen. Diese flexiblen und komplizierten Herstellungsprozesse fordern eine Integration von intelligenter Sensorik, um eine sichere und effiziente Zusammenarbeit zu gewährleisten. Dazu werden Sensordaten welche nahezu in Echtzeit in den Prozessablauf einfließen notwendig. Das eigene DT-Modell wird an einem industriellen Fallbeispiel erprobt. Zuerst wird eine DT-Simulation erstellt, welche dann in der realen Umgebung nachgebaut wird. Diese Gegenüberstellung ermöglicht die Ausarbeitung etwaiger Abweichungen zwischen dem Simulations- Umfeld und dem realen Aufbau in Bezug auf die Faktoren Sicherheit, Effizienz und Ergonomie. Es wird gezeigt, ob die zweiseitige Datenanbindung, zwischen physischer Anwendung und Simulation, welche einen DT definiert, ausreichend präzise funktioniert, um die Kombination von DT mit MRK zu rechtfertigen. Die Implementierung der Prozesse hat gezeigt, dass der Begriff DT den derzeitigen Stand der Datenströme nicht widerspiegelt, da die Implementierung von beidseitigen Verbindungen begrenzt ist. In Bezug auf das Prozesslayout und die Prozessoptimierung hat sich DT als vorteilhaft erwiesen. Die Umsetzung bestehender Design- und Layout- Richtlinien erlaubt die Entwicklung eines fortgeschrittenen HRC-Prozesses. Diese Arbeit trägt zur Validierung der beidseitigen Datenströmen, welche charakteristisch für DT-Anwendungen sind, bei und legt die Abweichungen der Übertragung dar.

Abstract

In this thesis, the implementation of process simulations before and after the physical implementation of a human robot collaboration application is evaluated. Therefore, an self-designed Digital Twin (DT) model is presented, which serves as the foundation of the review. DT refers to digital representations of physical processes that establish a connection between physical and digital objects. As humans and robots are working ever closer together, the mapping of real production processes, for example through DT, to assess safety, ergonomics and efficiency, are becoming more relevant. While DTs are already increasingly implemented in the field of automation, models for HRC applications are often still stuck in the concept phase, due to incorporation of human behaviour. With the right implementation, HRC can increase the level of automation in fields that were inaccessible to traditional robotics, such as assembly processes. These flexible and complicated manufacturing processes require the integration of intelligent sensor technology to ensure safe and efficient collaboration. Therefore sensor-data has to be generated and processed throughout the process flow in real time. The self-designed DT -model will be tested in an industrial case study. The DT simulation is created first and replicates the real environment. Afterwards a comparison between real environment and the simulation, enables the elaboration of possible deviations, with respect to the factor's safety, efficiency and ergonomics. It will be shown whether the two-way data link, between physical application and simulation, which is the core of a DT, is sufficiently accurate to claim a symbiotic combination of DT with HRC. The process implementation has revealed that the term DT does not accurately reflect the state of the data streams as options for two-sided links are limited. In terms of process layout and process optimization, DT has proven to be beneficial. Following the implementation of existing design and layout paradigms to develop an advanced HRC process, this work contributes by validating the presence of two-sided data streams, which are characteristic of DT applications.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld.....	1
1.2	Problemstellung / Forschungsfragen.....	2
1.3	Lösungsansatz / Arbeitspakete.....	3
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit.....	3
1.5	Forschungsmethodik.....	4
2	Theoretische Grundlagen.....	6
2.1	Digital Twin und Digital Shadow.....	6
2.2	Simulationsumfeld.....	8
2.3	Menschzentrierter Ansatz.....	8
2.4	Anforderungen an eine MRK-Applikation.....	9
2.5	Weitere Aspekte der MRK.....	11
3	State-of-the-Art / Literaturanalyse (SLR).....	16
3.1	Auswertung.....	17
3.2	Existierende Lösungsansätze für die Problemstellung.....	18
3.2.1	DT Auslegung.....	19
3.2.2	Dateneinbindung verschiedener Technologien.....	20
3.2.3	Sicherheit.....	21
4	Konzipierung des DT-Modells.....	23
4.1	Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK).....	23
4.2	Spannungsfeld der MRK.....	24
4.3	Modellbeschreibung.....	26
5	Umsetzung des Montage Prozesses.....	28
5.1	Bauteilauslegung.....	29
5.2	Beschreibung des Arbeitsablaufs.....	32
5.3	Arbeitsplatzauslegung.....	33
5.3.1	Ergonomie Betrachtung der Anwendung (RULA).....	38
5.3.2	Sicherheitssensorik.....	41
5.4	Einrichtung der zweiseitigen Datenanbindung.....	44
5.4.1	Motion Capture.....	44

6	Auswertung / Resultate	47
6.1	Roboteranbindung.....	47
6.2	Motion Tracking Einbindung	49
6.3	Sicherheitsscanner	54
6.4	Gesamtübersicht	58
7	Diskussion und Ausblick	60
7.1	Diskussion der Ergebnisse	60
7.2	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	61
7.3	Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung	62
8	Abbildungsverzeichnis	66
9	Tabellenverzeichnis	67
10	Abkürzungsverzeichnis.....	68
11	Literaturverzeichnis	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Einleitung

Die Mensch Roboter Kollaboration (MRK) hat zum Ziel Robotersysteme zu entwerfen und zu bewerten, die zusammen mit Menschen genutzt werden (Jahanmahin et al. 2022, S. 2). MRK durchbricht dabei die physische Isolation zwischen Mensch und Roboter und kombiniert die Stärke der Präzision von Robotern mit der Kognition und Flexibilität menschlicher Mitarbeiter*innen. Insgesamt wird dadurch die Effizienz und Agilität des Ablaufs verbessert (Li et al. 2023, S. 1). Die jüngsten Entwicklungen kollaborativer Anwendungen zeigen, dass Roboter in der Nähe von Menschen arbeiten und sich dabei einen gemeinsamen Arbeitsbereich ohne physische Schutzzäune teilen können (Simões et al. 2022, 2). Um einen reibungslosen Ablauf von Prozessen zu ermöglichen, kann eine Optimierung vor der physischen Implementierung einer Anwendung anhand von Simulationen erfolgen (Jahanmahin et al. 2022, 1). Die Idee, die reale physische Welt digital abzubilden, gipfelt in dem digital Twin (DT) als vollständige digitale Replikation eines physischen Objekts, Ablaufs oder Anwendung inklusive der relevanten Eigenschaften, um eine dynamische Interaktion mit der umgebenden Welt zu ermöglichen (Bergs et al. 2021, S. 1). Basierend auf datengesteuerten und physikbasierten Modellen werden DT eingesetzt, um Aspekte des Arbeitsablaufs zu überwachen, analysieren und vorherzusagen (Langlotz et al. 2022, S. 1). Während im Bereich der Automatisierungstechnik DT bereits vermehrt eingesetzt werden, befinden sich Modelle für MRK Anwendungen oft noch in der Konzeptphase (Raza et al., 2022). Ein Grund dafür ist die komplizierte Vorhersage menschlichen Verhaltens, wodurch es derzeit nur wenige Anwendungsbeispiele gibt, in denen die Vorteile von DT-Modellen in Bezug auf MRK und speziell den Montageprozess betrachtet werden. Diese Arbeit soll einen Beitrag zu dem Forschungsfeld leisten, indem die zwei Felder DT und MRK sowie ihre jeweiligen Stärken in einem realen Anwendungsfall kombiniert und Abweichungen der Datenübertragung betrachtet werden.

1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Bei traditionellen Anwendungen verfahren Roboter innerhalb von Zäunen, bei der Kollaboration hingegen schutzzaunlos, mit geringeren Geschwindigkeiten und benötigen dafür höhere Sicherheitsvorkehrungen (Simões et al. 2022, S. 2). Durch die gestiegene Produktnachfrage an massenindividualisierbaren Produkten, ist die Konzeption flexibler Produktionssysteme ohne Einbußen der Effizienz und Produktivität gefordert (Simões et al. 2022, S. 2). Um eine symbiotische MRK zu erreichen, können Prozess-Simulationen dazu beitragen, schon in der Planungsphase grundlegende Konzepte einer Anwendung über einen DT zu erproben. Der DT bildet alle Elemente des physischen Raumes in den virtuellen Raum mit einem digitalen Modell ab und besteht aus drei Teilen: physischer Aufbau im realen Umfeld, virtueller Aufbau im virtuellen Raum

und der Verbindungen der beiden durch Daten und Informationen (Qibing et al. 2021, S. 1). Generell wird zwischen einem Digital Shadow (DS) und dem Digital Twin (DT) unterschieden. DS ist ein Modell, welches durch einen einseitigen Datenfluss charakterisiert ist und mit Zustandsdaten eines physischen Objekts gespeist wird. Eine Zustandsänderung des physischen Objekts führt zu einer Änderung des digitalen Objekts, aber nicht umgekehrt. Im Gegensatz dazu sind bei dem DT-Modell die Datenflüsse zwischen physischem und digitalem Objekt in beide Richtungen vollständig integriert (Bergs et al. 2021, S. 2). Die Anwendungen in denen MRK und DT zusammen wirken sind nach Bediener*innen (Mensch und Roboter) und Betriebsobjekten, also physischen Objekten eingeteilt. Eine Vielzahl von Sensoren und Steuerungen sind zudem um die Objekte verteilt, um die Überwachung und Steuerung der verschiedenen Zustände mittels Echtzeit-Sensorik zu ermöglichen. Diese Sensoren gewährleisten die Kommunikation zwischen dem physischen Raum und dem virtuellen Raum (Wang 2022, S. 3). Ein mit DT-Ansatz konzipiertes MRK-Produktionssystem resultiert idealerweise in einer schnellen Integration, ständigen Rekonfiguration der Produktion und Sicherheitsvalidierung (Malik und Brem 2021, S. 4).

Diese Arbeit bezieht sich auf die Interaktions-Art „Kollaboration“, in der sich Roboter und Mensch einen Arbeitsplatz und Inhalte teilen. Aufgaben sind hier über sequenzielle Abläufe miteinander verknüpft. Die MRK zielt darauf ab, die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter*innen und die Produktionsleistung zu verbessern, indem die Stärken der einzelnen Akteure kombiniert werden (Gualtieri et al. 2022, S. 1). Der Roboter gelangt hier also in die Rolle eines menschlichen Partners bei der Durchführung komplexer Operationen in der Arbeitsumgebung (Yushenko 2020, S. 10).

1.2 Problemstellung / Forschungsfragen

Gänzlich ersetzen kann der Roboter den Menschen nicht, da bei Anwendungen mit hoher Flexibilität die menschliche Beteiligung nützlich und sogar notwendig ist. Bei "Human-in-the-Loop"-Kontrollkonzepten soll die menschliche Informationswahrnehmung und die Interaktion mit dem System betrachtet werden (Li et al. 2022, S. 3). Für diese Arbeit wird der Bereich der Montage gewählt, da Menschen eine zentrale Rolle in diesem Tätigkeitsfeld haben und sie eine der wichtigsten Bereiche in der Produktherstellung ist. Durch MRK werden die Vorteile von Menschen und Robotern zusammengeführt, wodurch die Qualität und Produktionseffizienz insgesamt zunimmt (Wang et al. 2021, S. 1). Da MRK Lösungen auf die Schaffung von menschenzentrierten Systemen abzielen, eignet sich die Montage zur Betrachtung in dieser Arbeit, da sie laut Löcklin et al. 2021 einen bidirektionalen Informationsfluss zwischen der Bedienperson und dem automatisierten System voraussetzt und Daten, Modelle sowie Simulationen benötigt (Löcklin et al. 2021, S. 1).

Eine zuverlässige Mensch-Roboter-Anwendung ist auf genaue und nahezu in Echtzeit aktualisierte digitale Modelle angewiesen (Liu et al. 2022, S. 1–2). Oft wird angenommen, dass Cobots von Natur aus sicher sind, dennoch sind in der Regel zusätzliche Geräte, wie Sensoren oder Laser Scanner notwendig, um eine sichere Anwendung zu gewährleisten (Boschetti et al. 2023, S. 1). Ausgehend von der Problemstellung ergeben sich folgende Forschungsfragen:

Wie kann ein Konzept für einen digitalen Zwilling einer Applikation zur Mensch-Roboter Kollaboration gestaltet werden?

- Unterfrage: Welche Komponenten werden benötigt, um einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen digitalem und physischem Zwilling einer MRK Anwendung umzusetzen?

Welche Unterschiede ergeben sich zwischen der MRK-Simulation und realen Anwendung in Bezug auf die Sicherheit, Taktzeit und Ergonomie?

1.3 Lösungsansatz / Arbeitspakete

In dieser Arbeit erfolgt die Simulation einer MRK Anwendung und der Abgleich mit einem real nachgebauten Aufbau, um etwaige Abweichungen der beiden Umfelder aufzuzeigen. Dadurch können Aussagen zur Anwendbarkeit derzeitiger DT-Methoden getroffen, bzw. Verbesserungspotentiale dargelegt werden. Ein Montageprozess wird mit der Unterstützung von DT ausgelegt und optimiert. Wie von anderen Autoren beschrieben, gliedert sich der Layout-Prozess zur Erstellung des Montageszenarios in fünf Schritte: die initiale Layout-Generierung, Layout-Simulation, Aufgabenzuweisung, Layout-Auswertung und Layout-Optimierung (Wang et al. 2021, S. 4). Das Layout wird auch in dieser Arbeit generiert, simuliert, die Aufgabenzuweisung durchgeführt und der Prozess optimiert. Dadurch soll eine reibungslose und intuitive Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter erreicht werden. Etwaige Abweichung zwischen dem realen und digitalen Umfeld können aufgezeigt werden und die zweiseitige Datenanbindung überprüft werden.

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Um ein Grundverständnis der MRK zu erlangen, erfolgt eine Darlegung der theoretischen Grundlagen und Abgrenzung der Begriffsdefinitionen. Dabei wird gezeigt, wie Mensch und Maschine in traditioneller Weise miteinander interagieren und welche Schritte hin zur Kollaboration notwendig sind. Außerdem wird die Auswirkungen der Kollaboration auf den Faktor Mensch behandelt.

In der anschließend durchgeführte systematischen Literaturrecherche (SLR) werden der derzeitige Stand des Forschungsfelds und bereits existierende Lösungen dargelegt. Um eine Übersicht des Themengebiets zu bekommen, wird in gängigen Datenbanken nach Schlagworten gesucht, welche Ergebnisse im Fachbereich hervorbringen. Dieser Vorgang wird auch als „Systematische Literaturrecherche (SLR)“ bezeichnet. Die gefundenen Werke werden anschließend nach Titeln und Abstract aussortiert, um hochrelevante Arbeiten herauszufiltern. Danach werden die Volltextversionen herangezogen und es erfolgt eine Analyse des Inhalts, sowie eine Einteilung in Kategorien. Systematische Literaturrecherchen sind ein wesentlicher Schritt bei der Erstellung von strukturierten Übersichten. Es lassen sich Schlussfolgerungen für die untersuchte Fragestellung ableiten, sowie eine genaue Dokumentation und Nachvollziehbarkeit gewährleisten (Guba et al. 2008, 4).

Ein DT-Modell wird erstellt, welches die Forschungslücke darlegt und im Umsetzungsteil am Beispiel des Zusammenbaus eines Elektromotors Anwendung findet. Dadurch wird die Anwendbarkeit von MRK erprobt und anschließend ausgewertet. Das gesamte Layout wird durch 3D Modellierung generiert und durch Simulationstechnik mit Funktionalität versehen, wodurch die Optimierung in der Simulation möglich ist. Der simulierte Arbeitsablauf wird anschließend in einem physischen Setup nachgebaut, ebenfalls durchgeführt und mit der Simulation verglichen. Hier soll gezeigt werden, ob und wie der reale Aufbau auf das Simulationsumfeld reagiert. Das Kapitel 6 Auswertung beschäftigt sich mit den gefundenen Abweichungen zwischen dem realen und virtuellen Umfeld und trifft eine Aussage über die Tauglichkeit der Kombination DT und MRK.

1.5 Forschungsmethodik

Für diese Arbeit wird die Modellierung und Designzyklus nach Hevner angewandt. Die Methode „Design Science Research“ (DSR) nach Hevner bietet die technologische und wissenschaftliche Grundlage, um ein betrachtetes Problem zu lösen und die Umgebung des Problems entsprechend anzupassen. Die Methode funktioniert in drei Zyklen, wobei der Relevanz-Zyklus das kontextuelle Umfeld des Forschungsthemas mit den gestalterischen Aktivitäten (design) verbindet. Der Rigor-Zyklus verbindet die gestalterischen Aktivitäten mit der Wissensbasis, Erfahrungen und Fachwissen, die dem Forschungsprojekt zugrunde liegen. Der zentrale Design-Zyklus iteriert zwischen den Kernaktivitäten des Aufbaus und der Evaluierung der Designartefakte durch aktuelle Forschungsentwicklungen (Hevner und Chatterjee 2010, S. 5). Die drei Zyklen werden in dieser Arbeit angewandt, um den Arbeitsplatz und die darin enthaltenen Bauteile, optimal zu gestalten. Die virtuellen Modelle der Montagekomponenten sind notwendig, um die DT-Prozesse ganzheitlich zu modellieren (Malik und Brem 2021, S. 6). Außerdem erfordert die Auslegung der Arbeitsumgebung eine Erstellung der virtuellen Bauteile, welche zur Montage verwendet werden. Eine ganzheitliche DT Implementierung

eines MRK-Systems beginnt mit der digitalen Modellierung der Komponenten, die in dem System montiert werden, wobei die Komponenten so gestaltet werden, dass sie sich leicht automatisiert montierbar sind (Design for Cobot Assembly) (Malik und Brem 2021, S. 6). Zu diesem Zweck, werden die 3D-Modelle des Montageprozesses in einer CAD-Software erstellt, wobei die Abkürzung CAD für Computer Aided Design steht.

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen sowie Begriffsdefinitionen zum Zweck der Verständlichkeit ausgeführt werden. Außerdem wird der Unterschied zwischen den Konzepten Digital Twin und Digital Shadow beschrieben, welcher in der Formulierung des eigenen DT-Modells relevant ist. Für die Auslegung eines menschenzentrierten Arbeitsablaufs, existieren geltende Normen und Richtlinien, welche im Kapitel 2.4 „Anforderungen an den Arbeitsbereich“ aufgezeigt sind. Zudem werden kurz die theoretischen Hintergründe des Simulationsumfelds beschrieben.

2.1 Digital Twin und Digital Shadow

Das konzeptionelle Modell des DT besteht hauptsächlich aus einer physischen und einer virtuellen Entität, sowie deren Verbindung. Die Steuerung und Optimierung der physischen Entität, erfolgt durch Echtzeit-Abbildung, Simulation und Berechnungen im virtuellen Raum (Yichen Wang et al. 2022, S. 2). Generell wird hier zwischen einem Digital Shadow (DS) und dem Digital Twin (DT) unterschieden. DS ist ein Modell, welches durch einen einseitigen Datenfluss charakterisiert ist und mit Zustandsdaten eines physischen Objekts gespeist wird. Eine Änderung des Zustands des physischen Objekts führt zu einer Änderung des digitalen Objekts, aber nicht umgekehrt, der DS kann also als eine Vorstufe des DT angesehen werden. Der DS bildet die Grundlage für den DT, indem er Messdaten oder Metadaten, einem bestimmten Objekt mit räumlichem oder zeitlichen Bezug zuweist (Bergs et al. 2021, S. 2). Im Gegensatz dazu sind bei dem DT Modell die Datenflüsse zwischen physischem und digitalem Objekt in beide Richtungen vollständig integriert (Bergs et al. 2021, S. 2). Dieser Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt. Das Konzept der digitalen Zwillinge geht auf einen Hardware-Zwilling zurück, welcher im Apollo-Programm der NASA entwickelt wurde und aus zwei identischen Raumfahrzeugen bestand (Schleich et al. 2017, S. 1). Die Fortschritte bei der Virtualisierung, Sensortechnologien und Rechenleistungen haben das Konzept der digitalen Zwillinge weiterentwickelt, um komplexe Systeme zu entwerfen, entwickeln und steuern, indem ein sicherer virtueller Raum für Tests und Validierungen geschaffen wird (Bilberg und Malik 2019, S. 1).

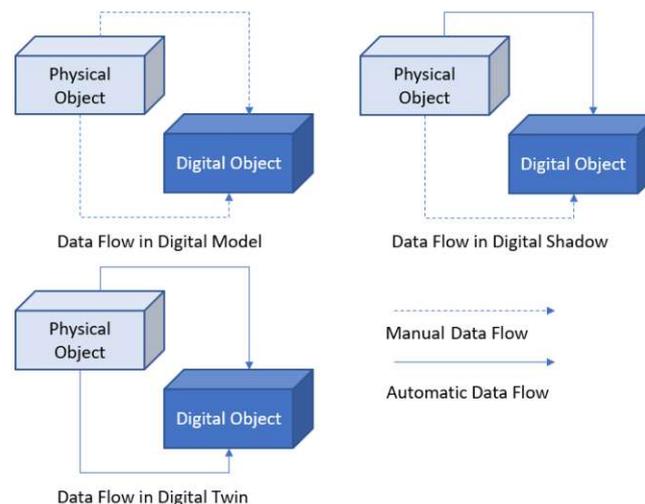


Bild 1: Data Flow in Digital Twin and Shadow vgl. (Wang et al. 2022b, S. 5)

Für die Auslegung von Anwendungen, die DT und MRK kombinieren, gibt es bereits Ansätze von beispielsweise Malik und Brem 2021:

DT – Entwurf: Bei der Entwicklung eines neuen physischen Systems wird der digitale Zwilling oft zuerst entwickelt und das anfängliche Design, Verhalten, Layout usw. generiert, sowie validiert. Obwohl in der Entwurfsphase der entsprechende physische Zwilling noch nicht existiert, bezieht sich der DT-Entwurf dennoch auf einen zukünftigen physischen Zwilling. Auch ohne Echtzeit-Konnektivität kann der digitale Zwilling des Produktionssystems verschiedene „What-if“-Szenarien durchspielen, um ein schnelleres, sichereres und besseres Design zu erreichen.

DT – Entwicklung: In der DT-Entwicklung werden die Ergebnisse des DT-Designs genutzt, um Elemente des physischen Zwillings zu entwickeln. Ein MRK-System kann die Entwicklung des Arbeitsplatzes, der Vorrichtungen, der Zuführungsgeräte und anderer Hardware beinhalten. Es können Stücklisten und Prozesslisten sowie das physische System erstellt werden.

DT – Inbetriebnahme: In dieser Phase kann eine erste Verbindung zwischen dem physischen und dem digitalen Zwilling hergestellt werden, indem der digitale Zwilling mit einer realen Steuerung verbunden wird, um mögliche Fehler zu erkennen. Diese Methode ähnelt der virtuellen Inbetriebnahme. Der Ansatz wird auch als „Hardware-in-the-Loop-Simulation“ bezeichnet, und kann dazu beitragen, die Entwicklungszeit durch virtuelle Tests und Integration lange vor der realen Inbetriebnahme zu verkürzen. Der reale Roboter im physischen Aufbau kann live mit dem virtuellen Roboter im DT verbunden werden, sodass der physische Roboter die Aufgaben wie im DT entworfen ausführen kann (Malik und Brem 2021, S. 5).

Wie bei allen Zwillingen gibt es immer eine/n Erstgeborene/n. Im Fall von digitalen Zwillingen von Produktionssystemen ist das Erstgeborene laut Malik und Brem 2021 für gewöhnlich der digitale Zwilling, da die Idee, Form und Funktionalität meistens der tatsächlichen Realisierung in der physischen Form vorausgehen. Bei der Entwicklung

einer MRK-Anwendung empfiehlt es sich, den DT so früh wie möglich während der Ideenfindung und parallel zum physischen Zwilling zu entwickeln. Im Laufe der Entwicklung werden sowohl der DT als auch der „Physical twin“ (PT) als Spiegelbild des jeweils anderen kontinuierlich aktualisiert (Malik und Brem 2021, S. 4).

2.2 Simulationsumfeld

Eine Softwareumgebung dient als Raum, in dem der DT erstellt, visualisiert und mit diesem interagiert wird. Die virtuellen Modelle des Produktionssystems werden im digitalen Raum erstellt oder in diesen importiert. Digitale Modelle der einzelnen Elemente könne vom Hersteller bereitgestellt oder aus eine Bibliothek für Standardressourcen bezogen werden. Weitere nicht verfügbare Bauteile können entworfen und modelliert werden (Malik und Brem 2021, S. 5–6). Die vier Schichten, aus denen ein DT aufgebaut ist, sind, Geometrie (Generierung von 3D-CAD-Objekten), Physik (Kinematik von Robotern und Menschen), Verhalten (Positionierung der CAD-Objekte im DT) und Regel (Montageprozessablauf) (Malik und Brem 2021).

Die in der Software verwendeten digitalen Menschmodelle basieren auf Datenbanken von Körperformen, welche deformierbarer Mesh-Technologie nutzen, um genaue Körperformen darzustellen. Komplexe Aufgaben können virtuell abgebildet und Arbeitsabläufe optimiert werden (Malik und Brem 2021, S. 5–6). Die Fähigkeiten des Menschen sind modellhaft darstellbar, dadurch werden Simulationen verschiedener Szenarien möglich, welche Erkenntnisse in diversen Arbeitsumfeldern ermöglichen. Die virtuelle Ergonomie basiert auf digitalen Menschmodellen, da diese die Manipulation der Körperhaltung ermöglichen und Funktionen zur ergonomischen Analyse bieten. Speziell in der frühen Gestaltungsphasen ist diese Vorauslegung sinnvoll, um korrektiv Änderungen vorzunehmen (Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt 2016, S. 73–74). Die Menschmodelle sind adaptierbar durch die Variablen Gewicht, Körperhöhe, Geschlecht und weiteren menschbezogenen Parameter (Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt 2016, S. 139).

2.3 Menschzentrierter Ansatz

Die nachhaltige Adaption von MRK benötigt einen auf den Menschen ausgerichteten Ansatz (Simões et al. 2022, S. 13). „Human Centered MRK“ konzentriert sich auf die Nutzerperspektive und Bedürfnisse in einer kollaborativen Umgebung (Jahanmahin et al. 2022, S. 4), generell sind menschliche Parameter jedoch schwer zu quantifizieren und können im Laufe der Zeit stark variieren (Lippi 2021, S. 1). Menschliche Faktoren, die in Bezug auf MRK berücksichtigt werden sollen, sind beispielsweise: Kognitive Arbeitsbelastung, Benutzerfreundlichkeit, Vertrauen, Akzeptanz, Stress, Frustration und wahrgenommene Freude, Informationsüberfluss, gesteigerte kognitive Belastung,

Frustration und Motivationsverlust (Gualtieri et al. 2022, S. 1–2). Diese Faktoren sollten bei der Konzipierung der Zusammenarbeit berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass sich Menschen von Robotern nicht frustriert, vernachlässigt oder sogar überfordert fühlen (Simone et al. 2022, S. 3). Ein weiterer Aspekt des menschenzentrierten Ansatzes sind die körperlichen und sensorischen Fähigkeiten des Menschen. Erstere beziehen sich auf die physischen Funktionen (Heben, Gehen, Manipulieren), sowie die damit verbundenen Attribute Geschwindigkeit, Kraft und Präzision. Sensorische Fähigkeiten beinhalten die Datenaufnahme aus der Umgebung in zwei Komponenten, das Sammeln von Daten durch Sinneswahrnehmungen wie Sehen, Riechen, Hören, sowie die Wahrnehmung der Sinne an sich. Kognitive Fähigkeiten des Menschen sind beispielsweise mentale Aufgaben wie Denken, Entscheidungen treffen oder die Wahrnehmung selbst (Malik und Bilberg 2019, S. 2).

2.4 Anforderungen an eine MRK-Applikation

An den Entwurf des Arbeitsprozesses und der damit verbundenen Arbeitsumgebung gibt es zahlreiche Anforderungen, die im Folgenden dargelegt werden. Die Auswahl und optimale Platzierung der Produktionsmittel in einer Produktionseinrichtung ist wichtig, um Ineffizienz entgegenzuwirken. Eine mangelhafte Gestaltung des Arbeitsplatzes führt zu körperlichem Stress und einer verringerten Produktivität (Malik und Brem 2021, S. 7). Um die Mitarbeiter*in zu entlasten, sollen bei der MRK-Montage folgende ergonomische Aspekte mit einbezogen werden: Vermeidung eines langwierigen Einsatzes der oberen Gliedmaßen, Ellenbogen auf der Schulterhöhe, kontinuierlichen Kraftaufwand, Kraftspitzen, Greifen mit den Fingerspitzen, hohe Bewegungsfrequenz und ähnliche Bewegungen der oberen Gliedmaßen. Die Arbeitsplatz-Elemente können ebenfalls optimiert werden (Gualtieri et al. 2020, S. 4–5):

- Visuelle Unterscheidung der Teile durch Größe, Farbe, Textur
- Die Arbeit soll intuitiv erfolgen, um beispielsweise die Reaktionszeit bei der Auswahl der Teile zu reduzieren (Gualtieri et al. 2020, S. 4–5).

Ein weiterer Aspekt der Arbeitsplatzgestaltung ist die Reichweiten- und Platzierungsbewertung. Die Gelenkgrenzen des gewählten Roboters bieten eine zulässige maximale Reichweite. Die Platzierung des Roboters und der Bauteile bestimmt, ob der Roboter die gewünschten Stellen innerhalb des Arbeitsbereichs erreichen kann (Malik und Brem 2021, S. 7). In der Arbeit Gualtieri et al. 2020 werden Design Vorschläge aufgezeigt, welche als Leitlinien für die Gestaltung eines Mensch-Roboter-Montagearbeitsplatzes in Bezug auf die Arbeitssicherheit anwendbar sind: (Gualtieri et al. 2020, S. 3–5)

- Minimierung spezifischer mechanischer Gefahren im Zusammenhang mit dem Einklemmen von menschlichen Körperteilen zwischen den Robotersystemen und den Elementen des Arbeitsplatzes
- Begrenzung von Schwung, mechanischer Leistung oder Energie in Funktion von Massen und Geschwindigkeiten
- Einrichten sicherer virtueller Ebenen-Systeme oder Festlegen von Geschwindigkeitsgrenzen für kollaborierende Roboter sowie Einsatz von Sensorik zur Vorwegnahme oder Erkennung von Annäherungen
- Signalisierung des Übergangs zwischen kollaborativen Operationen

Die Auslegung der vorgestellten Anwendung ist auch mit der DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 46 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration“ abgestimmt. Die Anforderungen an einen kollaborativen Betrieb sind:

- 1) die Robotereigenschaften (z. B. Last, Geschwindigkeit, Kraft, Energie)
- 2) die Gefährdungen durch die Endeffektoren einschließlich des Werkstücks (z. B. ergonomische Gestaltung, scharfe Kanten, überstehende Teile, Arbeiten mit Werkzeugwechslern)
- 3) die Anordnung des Robotersystems
- 4) die Position der Mitarbeiter*innen im Hinblick auf die Nähe zum Roboterarm (z.B. Arbeiten unter dem Roboter verhindern)
- 5) die Position der Mitarbeiter*innen und Verfahrensweg im Hinblick auf die Positionierung von Teilen, Orientierung zu Aufbauten (z. B. Befestigungen, tragende Gebäudeteile, Wände) und Lage von Gefährdungen an Befestigungen
- 6) die Gestaltung der Befestigungen, Platzierung und Betrieb der Spannvorrichtungen, andere verbundene Gefährdungen
- 7) die Gestaltung und Position aller manuell gesteuerten Roboterführungseinrichtungen (z. B. Erreichbarkeit, Ergonomie, usw.)
- 8) die anwendungsspezifischen Gefährdungen (z. B. Temperatur, herausgeschleuderte Teile, Schweißfunken)
- 9) die Einschränkungen aufgrund der Anwendung erforderlicher persönlicher Schutzausrüstung
- 10) die Umgebungsbedingungen (z. B. chemisch, Funkfrequenz, Strahlung, usw.)
- 11) die Leistungskriterien der verbundenen Sicherheitsfunktionen (DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 46)

Ebenfalls in der DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 28 ist festgelegt, welche Informationen über die Arbeitsaufgabe dokumentiert werden sollen:

- a) Beschreibung aller relevanten Arbeitstätigkeiten oder -abläufe der Mitarbeiter*innen
- b) Beschreibung aller relevanten Arbeitstätigkeiten oder -abläufe des kollaborierenden Robotersystems

- c) Spezifikation der chronologischen Reihenfolge aller Arbeitstätigkeiten, insbesondere derer im Kollaborationsraum
- d) Dokumentation von Messungen des Gefährdungsabstands zwischen Roboter und Person in allen Arbeitsphasen
- e) eine Beschreibung oder Zeichnung des Kollaborationsraums

Diese Informationen sind in Kapitel 5.2 „Beschreibung des Arbeitsablaufs“ dargelegt. Viele weitere Empfehlungen und Verbesserungen werden in Gualtieri et al. 2020 aufgeführt und in dieser Arbeit integriert. Dadurch werden die folgenden Beanspruchungen des Menschen, durch den Einsatz des Roboters reduziert: (Gualtieri et al. 2020, S. 4–5)

- Manuelles Heben und Senken von Gegenständen
- Arbeitsplatzelemente, welche weit vom Körper entfernt gehalten werden
- Reduktion des zu manipulierenden Gewichts und/oder Unterstützung durch Geräte
- Minimierung der biomechanischen Überbelastung von Kopf/Hals/Rumpf/oberen oder unteren Gliedmaßen in Verbindung mit statischen oder ungünstigen Arbeitshaltungen

2.5 Weitere Aspekte der MRK

Im Folgenden werden verschiedene Aspekte der MRK behandelt, da diese für die spätere Modellkonzipierung relevant sind.

Sicherheit: Bei kollaborativen Roboteranwendungen ist es notwendig, alle Prozesse unter Gewährleistung der Sicherheit der beteiligten Arbeiter*innen durchzuführen (Li et al. 2023, S. 1). Der Roboter alleine stehend stellt noch keine vollständige Maschine dar, wie in DIN EN ISO 10218-1 2012 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter“ beschrieben. Hier wird der Roboter als eine Komponente in einem betriebsfertig kollaborierenden Robotersystem bezeichnet, welche unzureichend ist für den sicheren kollaborierenden Betrieb. Eine Risikobeurteilung, während der Auslegung des Anwendungssystems ist daher notwendig (DIN EN ISO 10218-1 2012, S. 23–24). Im Allgemeinen betrifft die Sicherheit einer Anwendung die Ermittlung und Vermeidung der mit der Aufgabe verbundenen Risiken und Gefahren, sowie die entsprechend zu treffenden Sicherheitsmaßnahmen. Sicherheit gilt als grundlegend für die Einführung von kollaborativen Anwendungen, gefolgt von Benutzerfreundlichkeit, Flexibilität und Effizienz (Simone et al. 2022, S. 5). Für jede kollaborative Anwendung ist es notwendig eine Risikobeurteilung durchzuführen, welche alle an der Interaktion beteiligten Komponenten umfasst (z.B. der Roboter, Greifer, Pfade, Bewegungen, Bauteile und Sensorik). Sicherheitsrelevante Strategien der Mensch-Roboter-Kollabo-

ration sind in zwei Hauptrichtungen unterteilt. Erstere ist die Kollisionserkennung, welche hauptsächlich die Sensoren in den Gelenken des Roboters nutzt, um das Auftreten einer Kollision oder eines Kontakts zu erkennen. Ab einer Überschreitung gewisser Kraftwerte oder Stromspitzen wird über eine Steuerung auf den Kontakt reagiert. Bei der Kollisionsvermeidung hingegen werden häufig Sensoren außerhalb des Roboters verwendet, um den Arbeitsbereich in Echtzeit zu überwachen und Kollisionen aktiv zu vermeiden (Liu et al. 2020, S. 3). Faktoren, die sich auf die Sicherheit auswirken, sind vielfältig, wie z. B. das Material des Roboters, das Eigengewicht, Werkzeugtyp, Arbeitsgeschwindigkeit, Reaktionsgeschwindigkeit. Die technische Spezifikation ISO/TS 15066:2016 „Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter“ gibt Hinweise zu kollaborativen Anwendungen und gilt als weltweit anerkanntes Dokument für die Sicherheit von Cobot-Arbeitszellen (Raza et al. 2022, S. 3). Die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung nach ISO/TS 15066: 2016 beschreibt die Sicherheitsmaßnahmen, welche angewandt werden, wenn sich ein Robotersystem und die Bedienperson gleichzeitig im Kollaborationsraum bewegen. Eine Anforderung ist die Einhaltung eines notwendigen Sicherheitsabstands, zwischen den Mitarbeiter*innen und Roboter. Bei einer Unterschreitung des Abstands ist ein Stopp des Robotersystems notwendig. Bei Wiedereinhaltung des Abstands kann automatisch die Wiederaufnahme der Tätigkeit erfolgen (ISO/TS 15066: 2016, 17). Der geschützte Bereich sollte mit der Betrachtung des Orts, der Anordnung der Maschinen und unter Berücksichtigung der Gefährdungen innerhalb des geschützten Bereichs angeordnet sein. Ein eingeschränkter Raum des Robotersystems soll durch Einrichtungen festgelegt werden, welche die Bewegung des Roboters, des Endeffektors, der Vorrichtung und des Werkstücks begrenzen. Zwei Kontaktarten werden in der ISO TS 15066:2016 unterschieden, die zwischen Robotern und Personen auftreten können, die transiente Berührung und die quasi-statische Berührung. Transienter Kontakt wird auch als dynamischer Stoß bezeichnet und beschreibt eine Situation, in der eine Person von einem beweglichen Teil des Robotersystems getroffen wird und sich vom Roboter zurückziehen kann, ohne dass der berührte Körperbereich eingeklemmt oder gefangen wird. Quasistatischer Kontakt umfasst Klemmen oder Quetschen eines Körperteils einer Person zwischen einem beweglichen Teil des Robotersystems und einem anderen festen oder beweglichen Teil der Arbeitszelle. Daher erfolgt eine Kraft oder ein Druck über eine längere Zeitspanne (Ganglbauer et al. 2020, S. 2, DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 23). Um die sichere Interaktion von Mensch und Roboter zu gewährleisten, gibt es vier Arten des kollaborativen Betriebs, wie in der DIN EN ISO 10218-2 2012 beschrieben und in Bild 2 dargestellt.

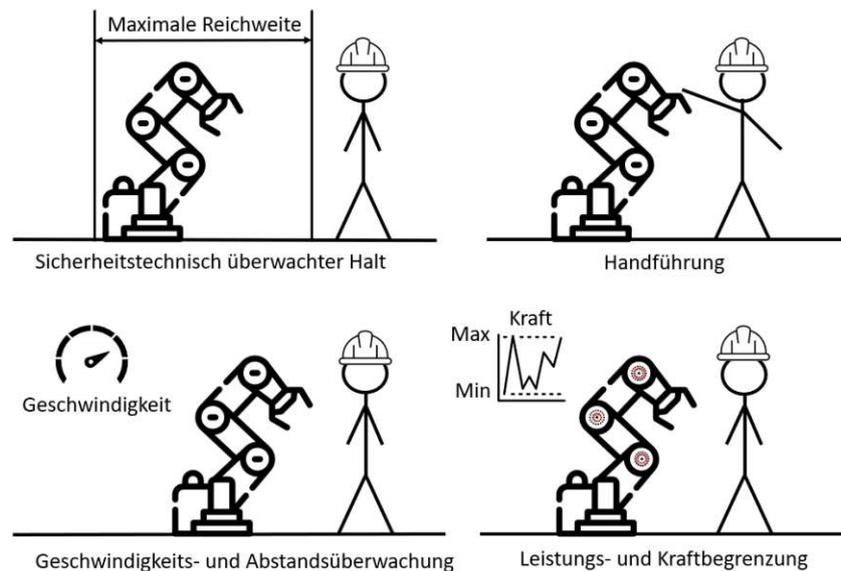


Bild 2: MRK in vier kooperative Betriebsarten vgl. Galin et al. 2020, S. 5

- Beim sicherheitsüberwachten Halt stoppt der Roboter, wenn der Mensch den kollaborativen Arbeitsbereich betritt und fährt weiter, wenn der Arbeitsbereich frei ist.
- Die Handsteuerung/Handführung ermöglicht die Steuerung des Roboters durch einen Menschen, wobei dieser ein handbetriebenes Gerät zur Übertragung von Bewegungsbefehlen verwendet.
- Bei Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachten Szenarien bewegen sich der Mensch und das Robotersystem gleichzeitig im kollaborativen Arbeitsraum. Ein festgelegter Mindestabstand zu den Mitarbeiter*innen ist einzuhalten, wobei dieser von der Geschwindigkeit des Roboters abhängig ist. Dieser Ansatz kann auch dynamisch umgesetzt werden, sodass der Roboter ab einem gewissen Abstand langsamer wird, und ab einem Mindestabstand stoppt
- Die Kontaktkräfte und Kontaktdrücke zwischen Mensch und Roboter sind für den letzten Ansatz, die Leistungs- und Kraftbegrenzung, auf ein sicheres Maß begrenzt. Die Kraft und Leistungsreduktion erfordert die Einhaltung biomechanischer Grenzwerte (Galín et al. 2020, S. 5, Boschetti et al. 2023, S. 1.)

Vertrauen: Ein Aspekt, der die Sicherheit des Systems beeinflusst, ist das Vertrauen, welches die Bedienperson dem System entgegenbringt. Dieses kann definiert werden als die Bereitschaft, das Risiko einzugehen, sich Handlungen Anderer auszusetzen, unabhängig von der Fähigkeit, diese Handlungen zu kontrollieren. Vertrauen entwickelt sich dynamisch mit dem Wissen über das System und Erfahrungen mit dem System (Gualtieri et al. 2022, S. 5). Dabei ist das Vertrauen nicht auf zwischenmenschliche Interaktionen beschränkt. Es beeinflusst ebenfalls die MRK, da es die Bereitschaft eines menschlichen Benutzers beeinflusst, Aufgaben abzugeben, Informationen zu teilen, sowie Zusammenarbeit und Unterstützung anzunehmen. Außerdem wird die Ak-

zeptanz von Ergebnissen und Interaktion mit dem Roboter direkt beeinflusst. Vertrauen ist eine der Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche MRK. Die Faktoren zum Aufbau von Vertrauen beziehen sich meist auf Leistungsfaktoren des Roboters wie z. B. das Verhalten, kognitives Vertrauen, Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit des Roboters (Simões et al. 2022, S. 3).

Auswirkungen der Kollaboration: Die Interaktionsart Kollaboration hat Auswirkungen auf den Faktor Mensch. Dabei sind die fünf am meisten untersuchten menschenbezogene Faktoren, die in der Literatur aufscheinen: Stress, Arbeitsbelastung, Akzeptanz, Vertrauen und Benutzerfreundlichkeit. (Gualtieri et al. 2022, S. 1). Der Stress des Menschen wird durch die MRK negativ beeinflusst, da die Angst vor einer möglichen Kollision mit dem Roboter besteht. Die Leistung der Arbeiter*in hängt stark von Akzeptanz, Vertrauen und Benutzerfreundlichkeit des Menschen gegenüber dem System ab. Mangelnde Benutzerfreundlichkeit kann mehrere Risikofaktoren für die Arbeitnehmer*innen bewirken, darunter fallen fehlerhafte Aufgabenausführung und hohe Fehlerquote aufgrund menschlicher Fehler, längere Ausführungszeiten der Aufgabe durch falsche Reaktionen der Nutzer*innen, Informationsverlust und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Arbeitsumgebung, welche dadurch anfälliger für Gefahren wird (Gualtieri et al. 2022, S. 5). Faktoren, die in einer Konzipierung einer MRK Anwendung beachtet werden sollen, sind zum Beispiel Ängstlichkeit, Genauigkeit, Anpassungsfähigkeit (Simone et al. 2022, S. 7), weitere sind in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Auswirkungen verschiedener Faktoren auf den Menschen vgl. (Simone et al. 2022, S. 7)

Faktoren	Auswirkungen auf den Faktor Mensch (+ positiv, - negativ, ~ neutral)
Stress	- Erhöhung des mentalen Stresslevels durch hohe Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters und geringe Abstände zu Menschen
Arbeitspensum	+ Reduktion physischer Belastungen - Mögliche Erhöhung der mentalen Belastung durch gesteigerte Kollaborationsanforderung
Benutzerfreundlichkeit	+ Leistungssteigerung bei erhöhter Benutzerfreundlichkeit + Steigerung des Wohlbefindens und hoher Akzeptanzgrad gegenüber Roboter
Akzeptanz	- Angst vor Arbeitsplatzverlust durch Roboter - Ungeübte Anwendung der Roboter kann zu Ineffizienz führen, wodurch die Akzeptanz gesenkt wird
Vertrauen	~ Kollaborative und vertrauensbasierte Beziehung zu dem Roboter für Vertrauen notwendig

Diese humanen Faktoren können teilweise in der Konzipierung der MRK Applikation berücksichtigt werden. Eine menschenähnliche Trajektorien-Planung der Roboterbahnen löst bei menschlichen Nutzer*innen beispielsweise weniger Stress aus. Außerdem wird eine geringere mentale Arbeitsbelastung vernommen, wenn Roboter weniger autonom agieren und Menschen durch auditive oder visuelle Signale informiert werden, dass der Roboter eine Bewegung ausführend wird (Gualtieri et al. 2022, S. 3). Für den

gewählten Anwendungsfall wird im Verlauf der Arbeit noch erläutert, dass der Mensch selber kontrolliert, wann die Kollaboration zum nächsten Zusammenbau-Schritt übergeht. Dadurch ist eine gute Vorhersagbarkeit und Kontrolle gegeben, wodurch wahrgenommene Stresslevel reduziert wird.

Effizienz: Langfristig wird die Effizienz von Robotern laut Galin et al. 2020 zunehmen, das geben die folgenden drei Hauptfaktoren vor: 1.) Allgemeines Voranschreiten der wirtschaftlichen Effizienz von Robotern im Vergleich zu menschlicher Arbeit, 2.) Effektive Implementierung von Robotik Lösungen in Schlüsselindustrien, 3.) Schnelle Entwicklung des Robotikmarktes und damit verbundenen Innovationen hin zu mobilen, einfach zu bedienenden und kostengünstigen Robotik-Lösungen (Galin et al. 2020, S. 5). Mit Faktor 1.) ist gemeint, dass einfache, wenig kognitiv fordernde Tätigkeiten in der Produktion zunehmend durch Roboter automatisierbar werden und dadurch die Gesamteffizienz von Prozessen steigern.

Ergonomie: Mit der Einführung von kollaborierenden Robotern in der Montage, stehen viele Unternehmen vor der Herausforderung, ihre Arbeitsplätze sicher und ergonomisch zu gestalten (Gualtieri et al. 2020, S. 1). Manuelle Arbeit ist, wie zuvor beschrieben, mit verschiedenen Aspekten der menschlichen Leistungsfähigkeit verbunden, darunter die Arbeitshaltung, sowie Belastungen beispielsweise beim Heben von Gewichten.

3 State-of-the-Art / Literaturanalyse (SLR)

Um eine Übersicht des Themengebiets MRK zu bekommen, wird in gängigen Datenbanken nach „Keywords“ gesucht, welche Ergebnisse im Fachbereich hervorbringen. Die gefundenen Werke werden anschließend nach Titeln und Abstract aussortiert, um hochrelevante Arbeiten herauszufiltern. Danach werden die Volltextversionen herangezogen und es erfolgt eine Analyse des Inhalts sowie eine Einteilung in Kategorien. Dieser Vorgang wird auch als systematische Literaturrecherche (SLR) bezeichnet und ist ein wesentlicher Schritt bei der Erstellung von systematischen Übersichten (Guba et al. 2008, S.1). Es lassen sich Schlussfolgerungen für die untersuchte Fragestellung ableiten, sowie eine genaue Dokumentation und Nachvollziehbarkeit gewährleisten (Guba et al. 2008, S.4). Dabei wird in zwei Phasen vorgegangen, die Recherchephase und die Bewertungsphase. Der Prozess legt den aktuellen Forschungsstand des Themenbereichs offen und zeigt Lücken in der bestehenden Forschung auf. Die Schnittmenge der Arbeiten, welche DT und MRK kombinieren, ist bei dieser Recherche von Interesse. Durch die Neuartigkeit des Themas verlieren ältere Werke schnell ihre Relevanz, weswegen keine Arbeit älter als fünf Jahre einbezogen wurde. Dadurch soll der neuste Stand des Themenfelds betrachtet werden. Die enge Limitation des Publikationsjahres, ist im Verlauf des „backwards research“, sprich der Weiterverfolgung von Quellen relevanter, herangezogener Arbeiten, nicht beibehalten worden. Zur Übersicht der Recherchestrategie sind in Tabelle 2 die gewählten Parameter aufgelistet:

Tabelle 2: Suchstrategie der Literaturrecherche

Datenbanken	<ul style="list-style-type: none"> • Elsevier • Springer Link • Scopus • TU Wien • Research Gate (Backwards Research)
Suchbegriffe	Digital Twin Frameworks Human robot collaboration sustainability Efficiency Human Robot Interaction Digital Twin Robot Simulation Human-centric assembly (HCA)
Suchstrategie	Publizierungsdatum limitiert, Preview-content exkludiert
Inklusions-Kriterien	Konferenzunterlagen und Artikel, publiziert in den letzten 5 Jahren

Da das Thema DT ein breites Spektrum abdeckt, werden in Tabelle 3 die verwendeten Begriffsblöcke und ihre Relevanz für die Recherche dargelegt:

Tabelle 3: Darlegung der Relevanz gewählter Keywords

Digital Twin Frameworks	Über diesen Begriffsblock werden erste Richtungen und Trends im Bereich Digital Twin identifiziert. Dadurch entsteht ein grober Überblick über das Themengebiet DT.
Efficiency Human Robot Interaction	Um das Thema Taktzeit darzustellen, sollte auch die Effizienz miteinbezogen werden. Effizienz fand dabei in gleich mehrere Richtungen Erwähnung. Die Taktzeiteffizienz wird durch die Optimierung der Fahrgeschwindigkeiten des Roboters oder auch der Gehwege des Faktors Mensch in der Produktion beeinflusst.
Digital Twin Robot Simulation	Nach der Konkretisierung des Szenarios einer MRK Anwendung im Bereich der Montage, ist die Kombination von DT mit dem Begriff Simulation sinnvoll, um etwaige Vorarbeiten zu identifizieren. Dabei kann eine Vielzahl an Simulationsmöglichkeiten identifiziert werden.
Human-centric assembly (HCA)	Der Begriff HCA hat durch seine Mensch-bezogene Ausrichtung starke Korrelation zum Konzept der MRK. Der Begriff ist erst zum Ende der Recherche identifiziert worden, da er sehr spezifisch und noch nicht weit verbreitet ist. Es herrscht noch keine Einigkeit darüber, wie der Begriff zu handhaben ist, so lassen sich „human-centric assembly“ (HCA) ebenso finden wie „human-robot-collaborative-assembly“ (HRCA)

Von den 170 Arbeiten, die für eine detaillierte Betrachtung geöffnet wurden, sind 71 aufgrund der Qualität und Relevanz der Abstracts heruntergeladen worden. In dieser Arbeit wurden 43 Werke zitiert, wobei auch die Methode nach Hevner oder Normen gezählt sind, in der Auswertung jedoch nicht berücksichtigt werden. Die zitierten Normen werden ebenfalls nicht in die Auswertung einbezogen.

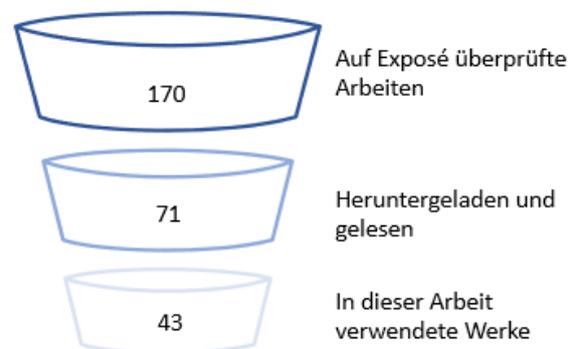


Bild 3: Filterungsverlauf der recherchierten Werke

3.1 Auswertung

Die meisten Forschungsergebnisse im Bereich DT liegen in Form von konzeptionellen Modellen und Simulationen vor, die Anwendung auf reale Szenarien ist begrenzt (Malik und Brem 2021, S. 3). Von Interesse sind daher Werke, die DTs als Unterstützung von MRK Anwendungen verwenden.

Der Publikationstrend (Bild 4) aus den in dieser Arbeit zitierten Werke zeigt eindeutig, dass MRK und die Kombination mit DT an Relevanz zunimmt. Das Jahr 2023 ist von der Darstellung ausgenommen, obwohl bereits Werke in dieser Arbeit zitiert werden, da vor Abschluss des Jahres keine relevante Aussage über den Trend getätigt werden kann.



Bild 4: Publikationstrend 2019-2022

Das Bild 5 zeigt die für diese Arbeiten relevante Schnittmenge der Themengebiete DT und MRK. Von den 37 in dieser Arbeit fachlich zitierten Werke haben 17 einen Ansatz verfolgt, in dem der DT in Bezug auf die MRK genutzt wird, fast alle davon haben diese Kombination auch in einem physischen Setup erprobt. Ein Viertel der Arbeiten hat dabei ebenfalls Prozesssimulationen genutzt. Immerhin 40 % der 37 Werke haben eine Art von Datenstrom aufgebaut.

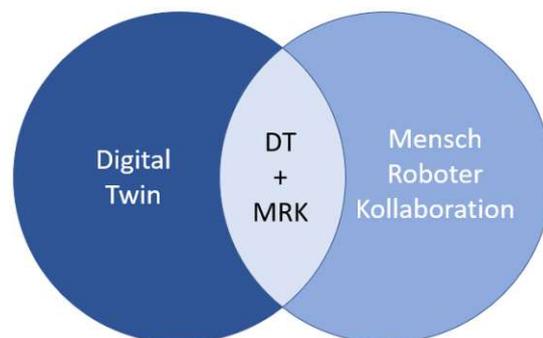


Bild 5: Schnittmenge der Themengebiete DT und MRK

Die generierten Datenströme sind hier jedoch sehr unterschiedlich, da Abstandssensoren, AR-Anwendungen (Augmented Reality), Smart-Watches oder auch Kamerasysteme zur Erfassung der Ressource Mensch etabliert wurden. Direkte Erfassung des Menschen durch „motion capture“, ist bei den in der Literaturrecherche ermittelten Arbeiten nur in Fischer et al. 2023 durchgeführt. Die vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag dazu leisten, die Methode „motion capture“ mit Sicherheits-sensorik zu kombinieren.

3.2 Existierende Lösungsansätze für die Problemstellung

Auf dem Gebiet der MRK werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, wie die Arbeit der Autor*innen Jahanmahin et al. 2022 zeigt, hier hat das Forschungsfeld folgende Ausprägungen: 43 % der MRK Ansätze stützen sich auf Bildsensoren (dies lässt sich auf die Vielseitigkeit, Wiederverwendbarkeit und Erschwinglichkeit von Bildsensoren, insbesondere von Kameras zurückführen), Entfernungssensoren (21 %) akustischen Sensoren (10 %), taktilen Sensoren (9 %), Kraft-/Drehmoment (5 %), Bewegung (2 %) und physiologische Sensoren (2 %) (Jahanmahin et al. 2022, S. 2). Immer noch ist die roboterzentrierte MRK mit 71 % der veröffentlichten Arbeiten dominant (Jahanmahin et al. 2022, S. 2). Außerdem validieren 70 % der untersuchten Arbeiten ihre Ergebnisse auf der Basis einer realen Roboterumgebung, während 42 % der Literatur sich auf

Simulationen stützten (Jahanmahin et al. 2022, S. 2). Im Folgenden werden existierende Lösungsansätze dargelegt und in Kategorien zusammengefasst.

3.2.1 DT Auslegung

Die Notwendigkeit und Anwendbarkeit eines DT bei Entwurf, Entwicklung und Betrieb von kollaborativen Montageaufgaben wird in Malik und Brem 2021 dargelegt. Dabei wurde ein physischer Aufbau der digitalen MRK Anwendung umgesetzt (Malik und Brem 2021). In Yichen Wang et al. 2022 wurden MRK- Richtlinien definiert und anhand eines industriellen Use Case erprobt. Dabei wurde am Anwendungsfall die Aufgabenzuweisung, das Szenen-Layout und der Abgleich zwischen der virtuellen und physikalischen Abbildung durchgeführt.

Bilberg und Malik 2019 verfolgen einen ähnlichen Ansatz wie die vorliegende Arbeit. Auch hier wird „Siemens Process Simulate Tecnomatix“ als Software genutzt und ein Leichtbauroboter der Marke Universal Roboter eingesetzt, um einen Arbeitsablauf kollaborativ aufzubauen, indem zuerst ein DT implementiert und anschließend an dem realen Setup erprobt wird. Die Autoren merken an, dass eine Realisierung von DT an unzureichenden Synchronisationsmöglichkeiten zwischen den physischen und digitalen Räumen scheitert (Bilberg und Malik 2019, S. 4). Eine Spezifizierung welcher Synchronisationen ist nicht angeführt.

Gualtieri et al. 2020 dient als Vorgabe zur Optimierung bestehender MRK-Montagelinien, aber auch für die Schaffung und Bewertung neuer MRK-Linien, welche rekonfigurierbar, sicher, menschenzentriert und effizient sind. Berücksichtigt wird nicht nur die Sicherheit der Roboterbauteile, sondern auch die Gesamteffizienz von Montagesystemen unter Berücksichtigung der Bediener*innen, sowie der Produktionsaspekte und organisatorischen Aspekten. Die Arbeit dient als Designunterstützung von Produktfamilien innerhalb des kollaborativen Montage Umfelds (Gualtieri et al. 2020).

Ren et al. 2021 präsentieren einen auf dem DT basierenden Rahmen für komplexe Montageaufgaben in einem kollaborativen Montagesystem von Mensch und Roboter. Eine kollaborative Anwendung wurde entwickelt, um die Planung, Entscheidungsfindung und Umsetzung der MRK zu unterstützen. Der Montageprozess wurde in einer dreidimensionalen Softwareumgebung als DT erstellt. Dabei wurde ebenfalls die Software „Siemens Process Simulate Tecnomatix“ von der Aufgabenplanung bis zur Robotersteuerung eingesetzt, einschließlich der Rollenzuweisung und Terminplanung aller Montageaufgaben, sowie der Planung und Programmierung der Roboterbewegung. Durch eine Online-Optimierung wird der Status der Bedienperson und des Roboters im realen Produktionssystem über programmierbare Logikeinheiten miteinbezogen (Ren et al. 2021).

Das Konzept des Operator 4.0 wird vorgestellt, um eine menschenzentrierte Mischung aus DT und PT zu schaffen. Dabei wird der Fokus auf die Darstellung und Integrierung des Menschen im Simulationsumfeld gelegt, inklusive der Humanfaktoren, welche in bspw. in Kapitel 2.5 dargelegt sind. Die Autoren argumentieren, dass solche Anwendungen einen bidirektionalen Informationsfluss fordern und Daten, Modelle und Simulationen von Maschinen sowie von Menschen benötigen. Das Paper legt die Anpassung konventioneller DT-Architekturen dar, um eine stärkere Mensch-Zentrierung zu gewährleisten, welche durch die Implementierung menschlicher Verhaltensmodelle in den virtuellen Raum erfolgt (Löcklin et al. 2021).

3.2.2 Dateneinbindung verschiedener Technologien

Eine flexible und sichere Mensch-Roboter-Kollaboration hängt von der genauen Erfassung der dreidimensionalen Bewegungen von Mensch und Roboter im Bereich der intelligenten Fertigung ab, wie in Ganglbauer et al. 2020 beschrieben. Hier wird die Position des Menschen über ein Kamerasystem zusammen mit Algorithmen, welche die Kamerainputs verarbeiten, eingespielt. Ähnliche Lösungen der Datenstromgenerierung umfassen beispielsweise Arbeiten wie Rückert et al. 2018. Hier wurde eine Kinect Kamera verwendet, um den Montageprozess zu überwachen und die Aufgabe sowie den Fortschritt der Bedienperson in Echtzeit anzuzeigen, sowie eine Anpassung der Bewegungen des Roboters abhängig von der menschlichen Aktivitäten zu ermöglichen (Rückert et al. 2018).

In Fischer et al. 2023 wird die Technologie „motion capture“ angewandt, um die automatische Aufzeichnung von Bewegungsdaten eines realen Menschen durchzuführen und diese computergestützt in ein digitales Menschmodell zu übertragen. Anschließend erfolgte eine Auswertung der Bewegungen nach gängigen ergonomische Analysen (Fischer et al. 2023).

Mittels „Virtual Reality“ (VR) wird in Giacomo et al. 2022 die Bewertung einer Kollisionsvermeidungsstrategie durchgeführt. Durch VR taucht der Mensch mit Hilfe einer VR-Brille in die digitale Welt ein. Die Roboterbahnen werden virtuell modelliert, während das zu vermeidende Hindernis, eine virtuelle Abbildung der Bedienperson ist. Die räumlichen Koordinaten des Hindernisses, stehen in Echtzeit zur Verfügung und können verwendet werden, um die Bewegung des Roboters zu aktualisieren und eine mögliche Kollision zu vermeiden. Das System wurde getestet und soll in einem weiteren Schritt für eine reale industrielle Anwendung genutzt werden, um weitere Sensoren zu integrieren und die Fähigkeiten des Systems zu verbessern (Giacomo et al. 2022).

Die Implementierung von „Augmented-Reality (AR)“ Systemen, welche virtuelle Objekte beispielsweise durch Datenbrillen in reelle Umfelder überträgt, schreitet voran. Dadurch wird, wie die Autor*innen Li et al. 2023 beschreiben, die Menschzentrierung

des Industrie 5.0 Paradigmas berücksichtigt, indem beispielsweise entfernungsabhängige Geschwindigkeitssteuerung und virtuell-physikalische Kollisionserkennung ermöglicht wird (Li et al. 2023). Die Industrie 4.0 ist eine eher technologieorientierte Entwicklung, während Industrie 5.0 eher wertorientiert und auf die praktische Umsetzung der verfügbaren Technologien bezogen ist. Industrie 5.0 ist also nicht einfach eine chronologische Fortsetzung der Industrie 4.0, sondern ergänzt und erweitert diese (Wang 2022, S. 1).

Liu et al. 2022 bildeten eine MRK-Montagezelle digital nach und integrierten sensorgesteuerte Java 3D-Modelle, welche physikbasierte Daten einbeziehen. Dabei erfolgte eine sekundengenaue Vorabausführung des DT-gesteuerten MRK-Systems welches sich auf Echtzeitüberwachung stützt. Dadurch wurde eine zuverlässige kollaborative Montage und adaptive Robotersteuerung ermöglicht und durch eine AR-basierte Datenbrille zusätzlich Funktionsblöcke mit intelligenten Steuerungsalgorithmen angewandt (Liu et al. 2022).

Flacco et al. 2015. schlugen eine Methode zur dynamischen Umgebungsabstandsmessung auf Basis von Dualkameras vor, die den Abstand zwischen Mensch und Roboter bestimmen und Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung in Echtzeit ergreifen (Flacco et al. 2015). In der Arbeit de Gea Fernández et al. 2017 wurden mehrere Sensoren zur Erfassung und Steuerung des Montageplatzes integriert. Der Mensch kann hier den Roboter direkt durch Gesten steuern, während der Roboter seine Geschwindigkeit, abhängig von der Körperhaltung des Menschen, in Echtzeit an das menschliche Verhalten anpasst (de Gea Fernández et al. 2017).

Ein neuer Rahmen für die kollaborative Montage von Mensch und Roboter auf Basis von Digital Twin (DT) wird in Qibing et al. 2021 vorgeschlagen. Über ein Datenmanagementsystem werden alle Arten von Daten aus den Digital Twin-Räumen integriert und eine dynamische Umgebung geschaffen. Ein Optimierungsmodell wird im DT angewendet, um die Qualität während der Montage zu bewerten. In der angeschlossenen Fallstudie hat sich gezeigt, dass die auf dem DT basierende MRK-Montage zur Verbesserung von Montageeffizienz und -sicherheit beiträgt (Qibing et al. 2021).

3.2.3 Sicherheit

Die Interaktion zwischen Menschen und kollaborativen Robotern, sowie ihren gemeinsamen Handlungen, im geteilten Arbeitsbereich werden in Galin et al. 2020 behandelt. Das Ziel der Arbeit ist es, potenzielle Gefahrenquellen zu identifizieren und zu bestimmen, welche Personen in der Nähe des Roboters gefährdet sein könnten. Dabei wird auch die Art der Verletzungen, die resultieren können, betrachtet. Daraus wird dann eine effektive Interaktion zwischen Mensch und kollaborativem Roboter entworfen, welche die Fähigkeiten der Akteure miteinbezieht (Galin et al. 2020).

Die minimale Mensch-Roboter-Distanz kann anhand von 3D-Punktwolken in Zusammenhang mit einem „deep learning model“ berechnet werden. Dadurch ist die Darstellung des Menschen als Skelettmodell und die Lokalisation möglich. Auf der Grundlage der erkannten potenziellen Kollisionsereignisse warnt das System die Bedienperson, hält den Roboter an und ändert den Roboterpfad als Maßnahme zur Risikominderung. Über visuelle Verarbeitung wird die Position des Menschen und dessen Arbeitsbereich berechnet. Danach erfolgt eine Abfrage, ob dieser Bereich mit der Roboter-Aktivitätssphäre kollidiert. Dieser Prozess ist wie von den Autoren beschrieben langwierig und erfordert eine Segmentierung des Körpers, Kalibrierung der Anwendung und Erkennung der Kollisionen selbst (Yi et al. 2022, S. 1).

Wiederholte Risikobewertungen sind notwendig, um die erhöhte Flexibilität der MRK Anwendungen nutzen zu können. Ganglbauer et al. 2020 entwickelten zum Zweck der Sicherheitsbetrachtung einer kollaborativen Anwendung ein Visualisierungs- und Simulationssystem, das genaue dynamische Modelle des Roboters und der Körperregionen verwendet, um mögliche Kontaktkräfte abzuschätzen. Außerdem werden anwendungsspezifische Gefahren hervorgehoben, indem die Geometrie der kollaborativen Arbeitszelle berücksichtigt wird (Ganglbauer et al. 2020).

In Raza et al. 2022 ist die Verwendung von 3D-Simulation als Tool zur Sicherheitsbewertung basierend auf der technischen Spezifikation ISO/TS 15066:2016 für eine kollaborative Roboterarbeitszelle dargelegt. Ein DT wurde erstellt, um mehrere Sicherheitsbewertungen basierend auf ISO/TS 15066:2016 durchzuführen. Das Simulationsumfeld hat sich als relevantes Werkzeug zur Sicherheitsbewertung erwiesen. Zudem werden menschliche Faktoren bei der Gestaltung der Anwendung berücksichtigt (Raza et al. 2022).

Der Fokus der Arbeit Papanastasiou et al. 2019 liegt auf der Sicherheit und vereinfachten Interaktion. Tragbare Geräte (AR) werden implementiert und von den Mitarbeiter*innen genutzt, um Informationen zu Produktions- und Sicherheitsaspekten zu visualisieren werden. Die Roboterwahrnehmung wird mit einem visuellen System bewerkstelligt und mit einem Kontaktsensor erweitert. Sicherheitsüberwachte Bereiche, die den Bereich der Roboteraktivitäten abgrenzen, sind vorgesehen, parallel dazu wurden Sicherheitsfunktionen durch Kollisionserkennungstechnologien umgesetzt (Papanastasiou et al. 2019).

Paul Rybski et al. fusionierten die Daten von mehreren 3D-Sensoren, um die Positionen von Mensch und Roboter zu identifizieren und sichere sowie gefährliche Bereiche zu definieren. Sobald die beiden Bereiche von Mensch und Roboter sich überschneiden, wird der Roboter angehalten, um Kollisionen zu vermeiden (Wang et al. 2021, S. 2).

4 Konzipierung des DT-Modells

Im folgenden Abschnitt wird das eigens konzipierte DT-Modell, dessen Einflüsse und Überlegungen kurz dargelegt. Für das vorgeschlagenen Konzept werden die drei zuvor beschriebenen Grundsäulen Ergonomie, Sicherheit und Effizienz miteinbezogen. Der Fokus des Modells ist die Datenanbindung und die Frage nach der Zweiseitigkeit dieser Verbindungen, um die Frage zu beantworten, ob derzeitige Softwareumgebungen auch wirklich als DT oder als DS bezeichnet werden können. Im ersten Schritt wird dazu auf den Begriff MRK eingegangen, da Arten der Mensch-Roboter-Interaktion je nach Autor unterschiedlich ausgeführt sind. Danach werden die Spannungsfelder der MRK aufgezeigt, um anschließend das eigene Modell vorzustellen.

4.1 Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)

Die Definition des Begriffs Kollaboration legt eine Abfolge gemeinsamer Aktionen für ein gemeinsames Ziel dar, bei denen Menschen und Robotersysteme gleichzeitig an demselben Produkt oder Bauteil arbeiten und sich aneinander anpassen (Gualtieri et al. 2022, S. 2). Bei Maximierung der menschlichen Beteiligung an der Entscheidungskette wird das Wohlbefinden der Bedienperson und die Qualität der Arbeit gefördert (Simões et al. 2022, S. 1). Die unterschiedlichen Stufen der Interaktion nach Jahanmahin et al. 2022 sind in Tabelle 4 und Bild 6 dargelegt:

Tabelle 4: Beschreibung der Kollaborationsarten nach Jahanmahin et al. 2022, S. 1

Koexistenz	Keine zusammenhängenden Aufgaben Aufgeteilte Arbeitsplätze ohne Kontakt
Kooperation	Aufgaben über sequenzielle Abläufe miteinander verknüpft Selber Arbeitsplatz
Kollaboration	Roboter und Mensch arbeiten an denselben Aufgaben Selber Arbeitsplatz

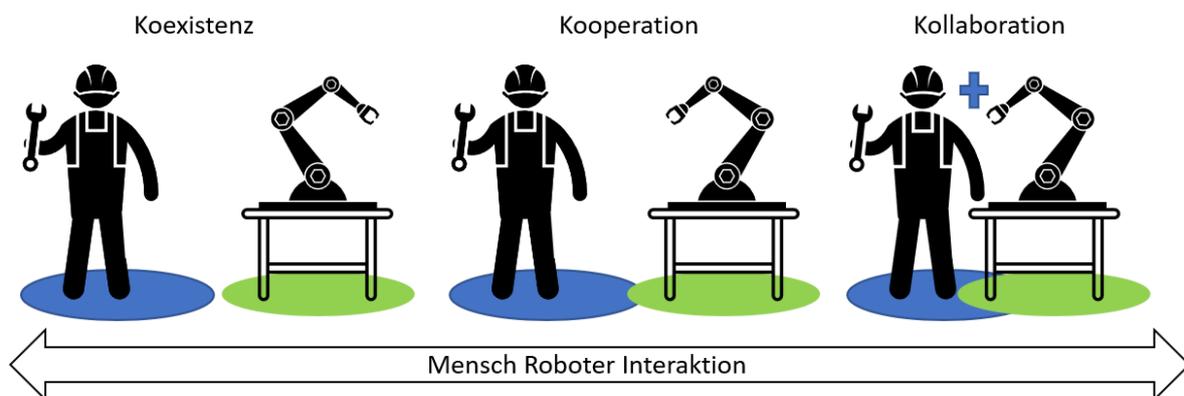


Bild 6: : Beschreibung der Kollaborationsarten nach vgl. Jahanmahin et al. 2022, S. 2

Andere Autoren beschreiben die Zusammenarbeit folgendermaßen:

(i) Koexistenz - Mensch und Roboter arbeiten schutzzaunlos Seite an Seite, teilen

sich aber nicht den Arbeitsraum

(ii) synchronisiert - Mensch und Roboter teilen sich einen Arbeitsraum, in dem sich jedoch immer nur einer der beiden Agenten befindet

(iii) Kooperation - Mensch und Roboter teilen sich gleichzeitig einen Arbeitsraum, arbeiten aber nie gleichzeitig an derselben Komponente

(iv) Kollaboration - Mensch und Roboter teilen sich gleichzeitig einen Arbeitsraum und arbeiten gleichzeitig an demselben Bauteil (Simões et al. 2022, S. 2)

Diese Arbeit bezieht sich auf die Interaktionsart der Kollaboration, da sich der Roboter und der Mensch einen Arbeitsplatz teilen und dabei an denselben Aufgaben zur selben Zeit arbeiten. Als Kollaborationsraum wird der Arbeitsraum des geschützten Bereichs, in welchem der Roboter und der Mensch während des Produktionsbetriebs gleichzeitig Aufgaben ausführen, laut Norm DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 11 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration“ beschrieben (DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 11). Die Kollaboration erfolgt schutzzaunlos, mit den dafür benötigten erhöhten Sicherheitsvorkehrungen (Simões et al. 2022, S. 2). Neben der Sicherheit einer MRK-Anwendung werden hier auch die Faktoren Ergonomie und Effizienz betrachtet.

4.2 Spannungsfeld der MRK

Die in Bild 7 angeführten Felder Ergonomie, Effizienz und Sicherheit beeinflussen einander und sollen durch eine DT-Implementierung an Gesichtspunkten wie Montagplatzauslegung, Unterstützung des Faktors Mensch usw. überprüft werden. Beispielsweise kann eine erhöhte Gesamteffizienz der Anwendung durch die Erhöhung der Geschwindigkeit des Roboter manipulators erfolgen (Baizid et al. 2015, S. 1). Die Bewegungsgeschwindigkeit hängt aber auch mit der Vorhersagbarkeit des Roboters zusammen, wobei die Aufgabenleistung bei geringerer Vorhersagbarkeit abnimmt. Bei schnelleren Bewegungen werden also höhere Werte für die wahrgenommene Aufgabenbelastung und Angst durch den Menschen wahrgenommen (Gualtieri et al. 2022, S. 3). Die Faktoren Stress und mentale Belastung können dann erheblich die Effizienz und Genauigkeit eines menschlichen Arbeiters beeinflussen und Fehler oder Sicherheitsprobleme in MRK-Systemen verursachen (Wang et al. 2022a, S. 2). Raza et al. 2022 argumentiert, dass in Bezug auf kollaborative Robotik das Verhältnis zwischen Sicherheit und Ergonomie entscheidend ist (Raza et al. 2022, S. 7). In einer komplexen Umgebung ist die größte Auswirkung auf die Sicherheit die Geschwindigkeit von Industrierobotern, welche auch die wichtigste Ursache für die Verletzungen von Menschen ist (Liu et al. 2020, S. 2). Hier können virtuelle Räume (DT) genutzt werden, um kollaborative Anwendungen schnell und sicher zu entwerfen. Diese computergestützten Modelle physischer Systeme können beispielsweise genutzt werden, um Produktionsstrategien zu testen und zu validieren, bevor sie in die Praxis umgesetzt werden (Malik und Brem 2021, S. 1). Dabei soll in der Auslegung der Anwendung verschiedene

Faktoren berücksichtigt werden, wie etwa die Gesamtdauer, Ermüdung der Mitarbeiter*innen und spezifisches Fachwissen der Menschen. Die menschlichen Parameter sind im Allgemeinen jedoch schwer zu quantifizieren und können im Laufe der Zeit stark variieren (Lippi 2021, S. 1). Diese Überlegungen können bei allen drei Feldern angestellt werden, wie in Bild 7 dargestellt.

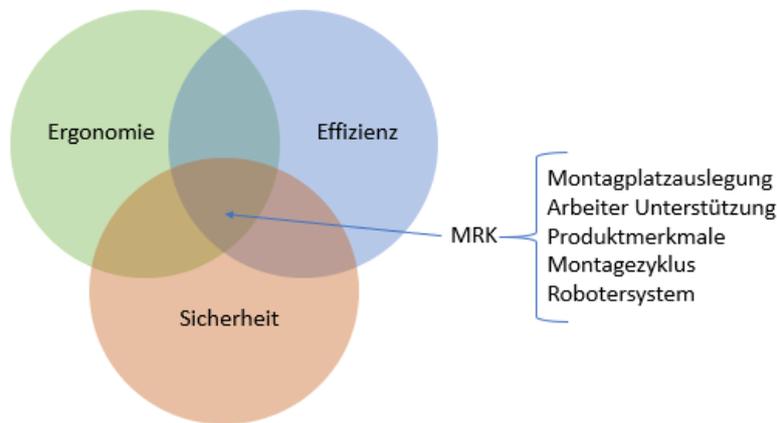


Bild 7: Interessensfelder der MRK vgl. (Gualtieri et al. 2020, S. 2)

Bei der Auslegung einer MRK Anwendung können die Felder abgewägt und ein Optimum gefunden werden kann. Ein eigenes DT Modell wird nun nach zuvor getroffenen Begriffsabgrenzung und der Darlegung der MRK-Aspekte (Kapitel 2) definiert. In dem Modell wird außerdem die zweiseitige Datenanbindung visualisiert und die Faktoren Ergonomie, Sicherheit und Effizienz als Basis bezeichnet, auf denen der Aufbau des PT und DT fußt. Auf den beschriebenen Säulen baut dann der Prozessablauf auf, welcher virtuell sowie real existiert und durch Datenverbindungen verknüpft ist. Diese Vollständigkeit der zweiseitigen Verbindung ist die Forschungslücke, welcher sich diese Arbeit annimmt, um darzulegen, wie integrierbar Datenströme des realen Umfelds in die virtuelle Sphäre und umgekehrt, sind.

4.3 Modellbeschreibung

In diesem Modell ist der zentrale Betrachtungswinkel der Austausch und die Reaktion der beiden Umfelder PT und DT wie in Kapitel 2.1 beschrieben.

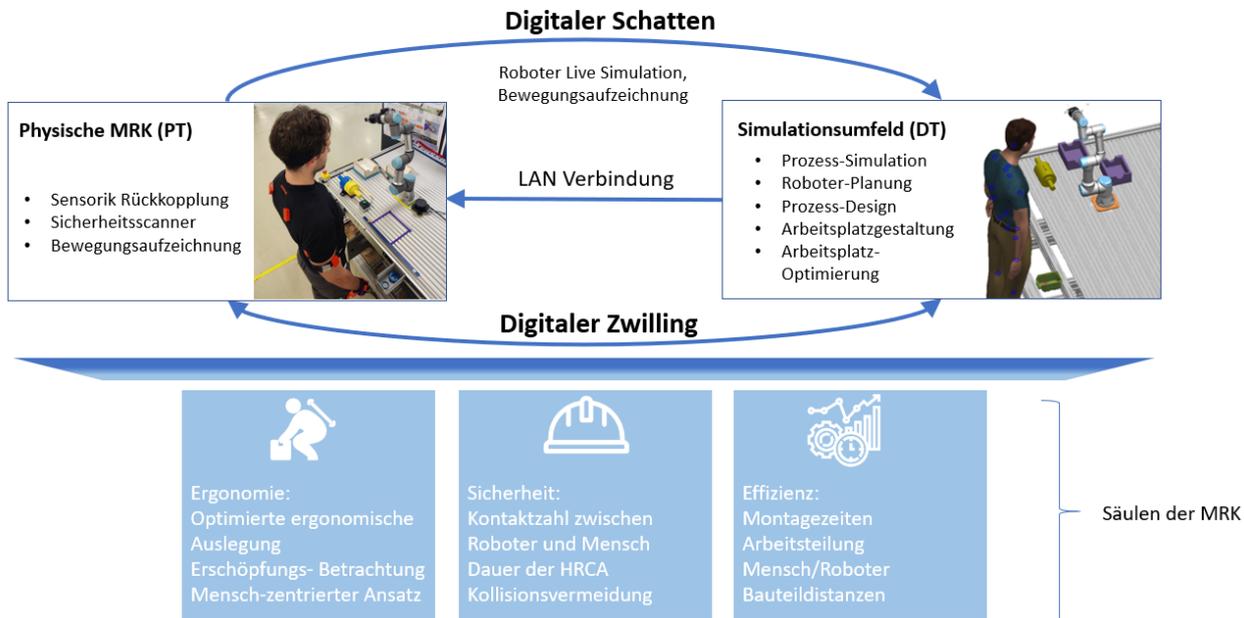


Bild 8: DT Modell zur Darstellung der Datenflüsse, erweitert durch die Säulen der MRK

Auf der linken Seite in Bild 8 ist der Bereich physischer MRK mit den Technologien Sicherheitsscanner sowie Bewegungsaufzeichnung dargestellt, da die Umsetzung dieser im realen Umfeld erfolgt. Im Umsetzungsteil dieser Arbeit soll gezeigt werden, ob eine vollständige Sensorik Rückkopplung zwischen DT und PT erfolgt, bzw. ob Abweichungen in der Datenübertragung auftreten, wodurch die Ausprägung eines DS gegeben wäre. Wie zuvor beschrieben ist der DS durch eine einseitige Datenanbindung charakterisiert und umfasst in dem gezeigten Modell die „robot live simulation“ und die Technologie „motion capture“ (Bewegungsaufzeichnung). Die Aufzeichnung der menschlichen Bewegungsabläufe im PT sollen ebenfalls in die Simulation übertragen werden. Bei der „robot live simulation“ ist die Vermutung eines DS gegeben, diese wird im Verlauf der Arbeit überprüft. Die zwei Umfelder sind mit einer LAN Verbindung zwischen der Robotersteuerung und dem Laptop verbunden, welche in der Mitte des Bildes dargestellt ist. Der Roboter kann mit dieser Verbindung seine Bewegungsdaten an die Simulation senden. Diese Datenströme sind mit dem oberen Pfeil „Digitaler Schatten“ dargestellt.

Im Simulationsumfeld auf der rechten Seite erfolgen die Prozesssimulation, Roboter Planung, das Prozessdesign, sowie die Arbeitsplatzgestaltung und Layout-Optimierung. All diese Schritte gehen der realen Implementierung voraus und werden wie in Kapitel 2.4 beschrieben, optimiert. Für die Implementierung eines DT, also einer zweiseitigen Datenanbindung, stellt sich die Frage, ob alle Datenströme vollständig, sprich

zweiseitig integrierbar sind. Dieser Zusammenhang ist mit dem Doppelpfeil „Digitaler Zwilling“ dargestellt.

Zuletzt soll noch die Forschungsfrage „Welche Unterschiede ergeben sich zwischen der MRK-Simulation und realen Anwendung in Bezug auf die Sicherheit, Taktzeit und Ergonomie?“ Einfluss finden. Dazu wurde die Datenbetrachtung um die drei Säulen Ergonomie, Sicherheit und Effizienz erweitert. Innerhalb der drei Säulen sind Schwerpunktthemen angegeben, welche in der Auslegung jeder DT-Anwendung miteinbezogen werden sollten. Im Kapitel 6 Auswertung werden die Themen Roboteranbindung, Motion Tracking und Sicherheitsscanner anhand dieser Säulen beurteilt. Die Forschungsfrage „Welche Komponenten werden benötigt, um einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen digitalem und physischem Zwilling einer MRK Anwendung umzusetzen?“ wird auch in diesem Kapitel beantwortet.

5 Umsetzung des Montage Prozesses

In Bezug auf technologische Entwicklungen ist es notwendig, einen proaktiven, sprich vorgelagerten Designansatz anstelle eines reaktiven (nachfolgenden) Designansatzes zu verfolgen, das gilt auch bei der Gestaltung ergonomischer Arbeitsplätze in der Fertigung (Simões et al. 2022, S. 2). Nachdem zuvor die CAD-Modellierung und der Designzyklus nach Hevner, sowie die additive Fertigung der Bauteile erklärt wurde, folgt nun die Beschreibung der Prozessauslegung. Der physische und der digitale Zwilling werden im Verlauf der Arbeit parallel entwickelt, um gängigen Richtlinien zu entsprechen und etwaige Optimierungen vorzunehmen. Der DT bietet hier die Optimierungs-Umgebung für die kollaborative MRK, durch die Erstellung und Aktualisierung des digitalen Zwillingsmodells (Wang et al. 2021, S. 1).

Das gewählte Szenario zur Umsetzung ist der Zusammenbau eines Elektromotors. Die Montage dessen ist eine arbeitsintensive Tätigkeit und hat ein hohes Potenzial für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. Die Montageautomation wird oft als die Mechanisierung von physischen Aufgaben bezeichnet, der Montageprozess besteht jedoch aus komplexen physischen und kognitiven Aufgaben. Physische Aufgaben sind dabei die grundlegenden Aufgaben wie Handhabung, Fügen, Schrauben usw. während sich kognitive Aufgaben mit der Steuerung und Unterstützung der physischen Aufgaben befassen (Malik und Bilberg 2019, S. 2). Diese komplexen Prozesse ermöglichen keine vollständige Automatisierung, da diese nicht von Robotern alleine durchgeführt werden können, sondern die Unterstützung menschlicher Fachkräften benötigen (Kanazawa et al. 2019, S. 1). Auch aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf die Interaktionsart Kollaboration im Zusammenhang mit dem Bereich Montage eingegangen. Der Elektromotor besteht aus genügend Teilen, um einen Arbeitsprozess zu gestalten, welcher durch seine Anzahl an Prozessschritten, Durchführungszeit und Komplexität, relevante Aussagen über die Eignung von DT in Kombination mit MRK zulässt. Die Relevanz des Anwendungsfalls ist trotz der vereinfachten Darstellung der Komponenten gegeben, da sich die Vorteile eines Roboters mit denen eines Menschen, wie zuvor beschrieben, kombinieren lassen. Das Erstellen des virtuellen Simulationsmodells besteht aus vier Schichten:

- Modellierung - Erstellung von 3D-CAD-Objekten (Kapitel 5.1)
- Regeln - Ablauf des Montageprozesses (Kapitel 5.2)
- Integration - Platzierung von CAD-Objekten in der Szene (Kapitel 5.3)
- Verhalten - Kinematik von Robotern und Menschen (5.3)

Für die Implementierung von MRK-Systemen ist es unerlässlich, diese während des Entwurfs, der Entwicklung und des Betriebs schnell validieren zu können (Bilberg und Malik 2019, S. 1). Die verwendete Prozess-Simulationssoftware hat sich als eine sehr gute Lösung für DT-Anwendungen erwiesen (Raza et al. 2022, S. 7) und wird auch

hier für den Layout-Prozess und die Etablierung der Datenströme genutzt. Die Software eignet sich, da vordefinierte Modelle für den Menschen und Roboter einfach integriert werden, wie in Kapitel 2.2 Simulationsumfeld beschrieben.

5.1 Bauteilauslegung

Der Elektromotor besteht aus verschiedenen komplexe Baugruppen, wie im Produktbaum, in Bild 9, ersichtlich ist:

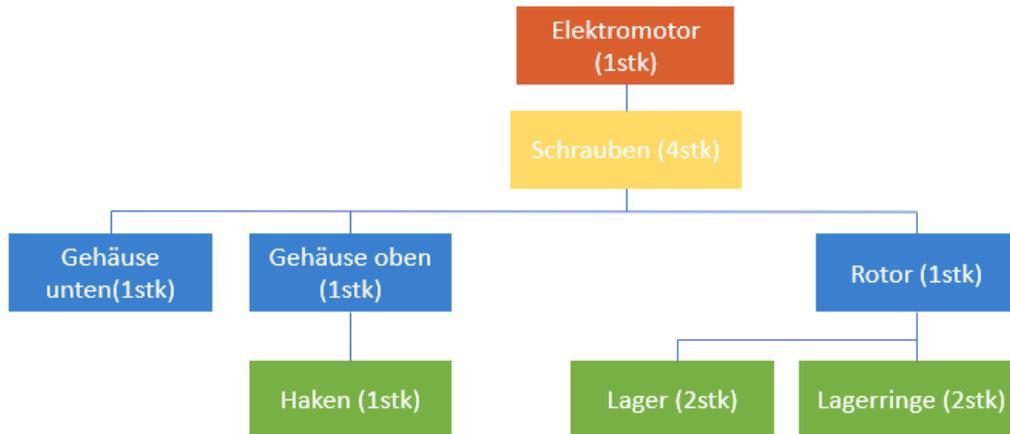


Bild 9: Produktaufbau und Baugruppen des Elektromotors

Der in Bild 10 und 11 dargestellte Elektromotor (Oberteil und Haken ausgeblendet) besteht aus insgesamt neun Teilen, wobei sich die Lager und Lagerringe der linken Seite nicht zur rechten Seite unterscheiden. Die Anzahl der Teile erzielt einen aussagekräftigen Arbeitsprozess, der in der Umsetzung als realer Aufbau zu ausreichender Komplexität führt, um eine MRK zu rechtfertigen. Im Folgenden werden die Bauteile des Elektromotors genau erklärt, in einigen Fällen, in denen die Designmethode nach Hevner und speziell der Design-Zyklus zum Einsatz gekommen ist, werden die erreichten Optimierungen aufgezeigt. Wie zuvor beschrieben, werden die Artefakte, in diesem Fall die modellierten Bauteile an die Umgebung angepasst, mit den Informationen aus der Wissensbasis.

Das Gehäuse des Elektromotors ist eckig ausgeführt, um eine einfache Manipulation zu ermöglichen und eine groß gestaltete Auflagefläche zu bieten. Dadurch entsteht eine hohe Stabilität im Vergleich zu Ausführungen mit vier Beinen an den Ecken der Konstruktion, wie es bei industriellen Elektromotoren üblich ist. Der gezeigte Haken im oberen Gehäuseteil ist bei Elektromotoren zur Manipulierung, sprich um ihn zu heben und bewegen, üblich. Auch in dieser vereinfachten Ausführung wird er genutzt, um am Ende des Arbeitsprozesses den fertigen Elektromotor aus dem Arbeitsbereich zu bewegen.

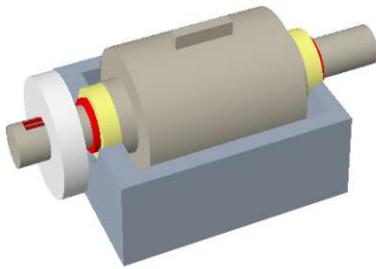


Bild 10: Untere Hälfte des Elektromotor inklusive Rotor

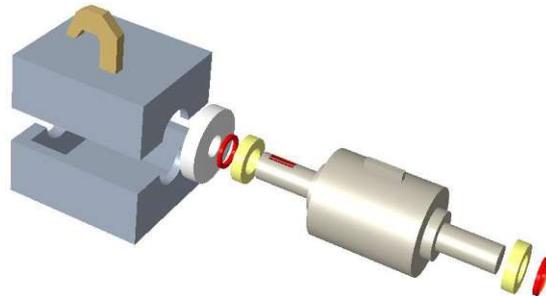


Bild 11: Explosionszeichnung Elektromotor

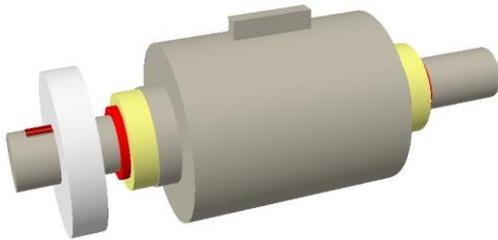


Bild 12: Rotorausführung fertig montiert

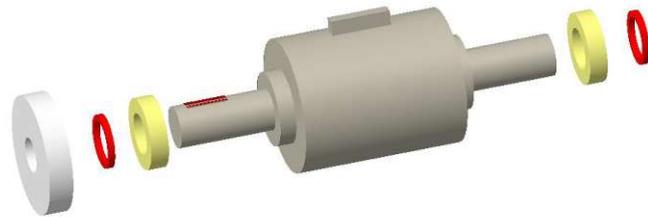


Bild 13: Rotormontage als Explosionsdarstellung

Der Rotor (Bild 12,13) hat aufgrund seiner üblichen Bauform einen großen mittleren Durchmesser. Dadurch wird in der Praxis der Abstand, den der Rotor zu den Wicklungen des Motors hat, gering gehalten und die Übertragungseffizienz erhöht. Der 3D-Druck des Bauteils wurde durch dieses voluminöse Bauteil kompliziert, wie im Folgenden erklärt wird. Die weiße Scheibe auf der linken Seite des Rotors stellt den Lüfter des Motors dar. Auch dieses Bauteil ist üblich bei Elektromotoren, um eine ausreichende Kühlung sicherzustellen. Die simplifizierte Form der Scheibe wurde gewählt, um den 3D-Druck zu vereinfachen, wobei diese Adaption keine relevante Auswirkung auf die Montage hat. Für den Prozess der Lagermontage erfolgen zwei Arbeitsschritte, das Aufziehen der Lager (gelbe Scheiben) selbst, sowie der Lagersicherung in Form der Lagerringe (rote Scheiben). Das gewählte Greifer-Modell ist der „Robotiq Hand-E“ Gripper welcher einen Hub von 50 mm und eine Greifkraft von 20 bis 185 N sowie eine formschlüssige Griff-Nutzlast von 5 kg aufweist (Robotiq 2023). Die Kinematik des Modells ist in der Simulation vordefiniert. Der Greifer reicht in seiner Standardausführung nicht aus, um den Rotor zu umfassen, da der Hub kleiner ist als der modellierte Durchmesser. Aufgrund dieses großen Durchmessers und der begrenzten Greifer Spannweite, ist eine kleine Lasche an der Oberseite des Rotors angebracht, welche nicht mit dem Gehäuse kollidiert. Mit einem anderen Greifer, beispielsweise dem 2F-140 desselben Herstellers, wäre diese Adaption nicht notwendig (Robotiq 2023).

Komplikationen während des 3D-Drucks entstanden bei den 25 mm dick ausgeführten Wandstärken des Gehäuses, welche zu Spannungen im Querschnitt führten und den 3D-Druckablauf verfälschten. Die gewählte Adaption (Bild 14) liegt darin, die Wand-

stärken, soweit als möglich hohl auszuführen. Dieser Schritt war bei den zwei Gehäusenhälften notwendig, als auch bei dem in der Ursprungsform sehr voluminösen Rotor. In der unteren Abbildung ersichtlich ist die Aushöhlung und damit einhergehende Vorbereitung auf den Druck. Der Rotor wurde aus baulichen Gründen in zwei Teilen gedruckt, da er aufgrund seiner runden Ausführung nur mit einer massiven Stützstruktur zu fertigen wäre. Die Teilung ermöglicht eine saubere Auflage auf dem Druckbett. Eine weitere Adaption in Bezug auf den Rotor ist die Lasche, welche an der Oberseite zur Manipulation modelliert und zuvor beschrieben wurde.

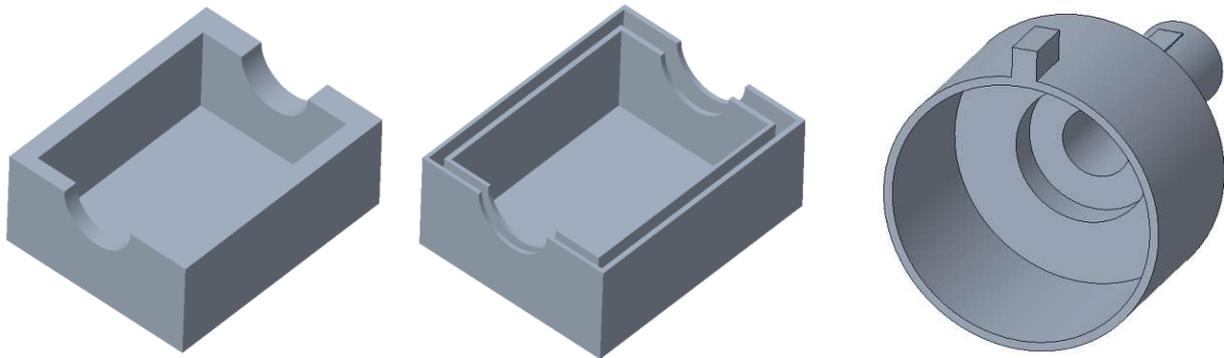


Bild 14: Vorbereitung für den Druck - Unteres Gehäuse & Rotor

Der Haken ist in der Simulation nicht vollständig modelliert (Bild 15), da das Design sich nicht auf den Montageprozess auswirkt. Erst in der physischen Anwendung wird der Haken tatsächlich am oberen Gehäuseteil montiert und trägt zur Manipulation des gesamten Motors bei. Eine weitere Veränderung, welche die Haken-Montage betrifft, ist die Berücksichtigung des Gegenstücks im oberen Gehäuse. Hier ist ein Volumen mit einem Durchgangsloch modelliert, um das Gewinde darzustellen.

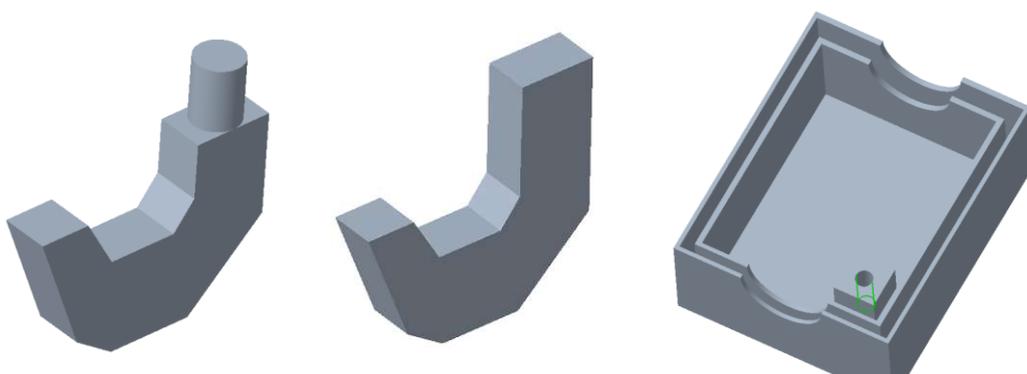


Bild 15: Vorbereitungen für physische Implementierung - Hakenmontage

Im Anschluss an die Erstellung und Optimierung der Bauteile wird zur Umsetzung des „Physical twin“ (PT) der 3D-Drucker Raise3D-E2CF mit 3 Extrudern genutzt. Die digital erstellten Bauteile werden im .STEP Format exportiert und anschließend in der von Raise3D zur Verfügung gestellten Anwendung „ideaMaker“ für den Druck vorbereitet. Dabei wird das jeweilige Bauteil am Druckbett ausgerichtet und anschließend in druckbare Schichten geschnitten, dieser „slicing“ genannte Prozess ist essenziell für die

Druckqualität und Durchführbarkeit des Drucks. Hier hat sich gezeigt, dass die additive Fertigung, mit ihren zahlreichen Parametern, fluktuierende Ergebnisse lieferte, welche mit einigen Testläufen optimiert wurden. Das .STEP Format wird im Simulationsprogramm als Basistyp erkannt und erlaubt die Nutzung des „CAD-Import-Tool“, mit dem die erstellten Bauteile in den Arbeitsplatz geladen werden.

5.2 Beschreibung des Arbeitsablaufs

Der gesamte Prozess der Aufgabenplanung und Programmierung wird in vier Schritte unterteilt: Zerlegung der Montageaufgabe, Bewertung der Montageressourcen (Mensch und Roboter), Aufgabenzuweisung - Zuteilung von Aufgaben und Roboterprogrammierung (Ren et al. 2021, S. 2). Zu diesem Zweck wird der DT für die Aufgabenplanung genutzt, indem die Montageaufgaben zerlegt und auf Mensch bzw. Roboter auf Grundlage der digitalen Simulation aufgeteilt werden (Ren et al. 2021, S. 4). Der Montage-Prozess startet im gewählten Anwendungsfall mit dem unteren Gehäuse, danach werden komplexere Baugruppen wie die Lager und der Rotor montiert. Der fertige Rotor des Motors trägt aufgrund seiner Funktionalität die meisten Bauteile und bietet die höchste Kollaborationsanforderung. Das obere Gehäuse trägt den vom Mensch montierten Haken. Insgesamt erfolgen 11 Arbeitsschritte welche in Tabelle 5 aufgelistet sind:

Tabelle 5: Prozessablauf und Aufteilung zwischen Mensch und Roboter

Prozessschritt	Ressource
1.) Untere Gehäusehälfte vor Mensch stellen	Roboter
2.) Welle beschaffen und auf Arbeitshöhe des Menschen positionieren	Roboter
3.) Welle positionieren/ in Position halten	Roboter
4.) Lagermontage Mensch nimmt Lager und steckt sie links und rechts auf die Welle Anbringung der Sicherungsringe an beiden Seiten	Mensch
5.) Welle in untere Gehäusehälfte einlegen	Roboter
6.) Abnahme der Wellenmontage Überprüfung, ob sich Welle gut drehen lässt → Einbau erfolgreich	Mensch
7.) Obere Gehäuse Hälfte vor Menschen positionieren	Roboter
8.) Montage des Hakens	Mensch
9.) Positionierung oberes Gehäuse auf unterem Gehäuse	Roboter
10.) Festschrauben der vier Schraubverbindungen an den Ecken des Elektromotors	Mensch
11.) Elektromotor über Haken außerhalb des Arbeitsumfeldes bewegen → mögliche Übernahme durch anderen Roboter oder Arbeitsstation	Roboter

Bei Prozessschritt (3) steht der Roboter in einer Position, welche die Welle auf eine adäquate Höhe hält (Bild 16), um die Lagermontage durch den Menschen zu ermöglichen. Bis dahin, sprich in den Prozessschritten (1) und (2) ist die Ressource

Mensch im Stillstand. Der Prozessschritt (3) ist angeführt, obwohl der Roboter stillsteht, da der Roboter währenddessen eine relevante Aufgabe hat, nämlich die Welle in Position zu halten. Während dem Prozessschritt (6) ist der Roboter mit keiner Aufgabe versehen, da hier der Mensch eine Inspektion durchführt und der Roboter in der „Home-Position“ wartet. Die Home Position ist ein zuvor definierter Punkt im dreidimensionalen Raum, welcher dem Roboter als Ausgangspunkt dient. Von hier startet er bei dem ersten Prozessschritt, zu diesem fährt er in Stillstandszeiten und zu diesem kehrt er nach der fertigen Montage zurück. Die Zusammenhänge der Prozessschritte sind hier ersichtlich, die Nummerierung folgt dem oben gezeigten Prozessablauf:

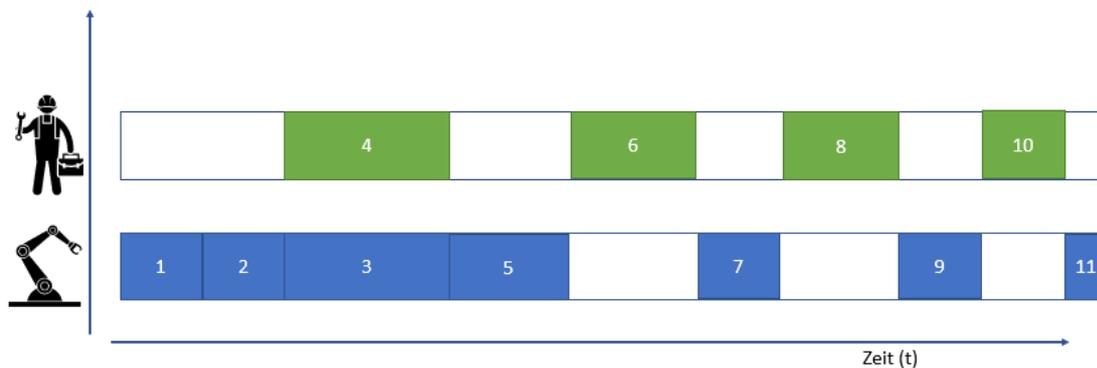


Bild 16: Zeitlicher Prozessablauf – Montageprozess Elektromotor

Durch die dargelegte Aufteilung der Tätigkeiten manipuliert der Roboter schwere Bauteile wie den Rotor und die Gehäuseteile des Elektromotors. Der Mensch hingegen nutzt seine Kognition, um die körperlich weniger anstrengenden Aufgabe durchzuführen, wobei dessen Kognition beispielsweise bei der Lagermontage und zur Überprüfung der erfolgreichen Montage genutzt werden. Für diese Arbeitsschritte werden Präzision und fachliches Wissen benötigt. Die Kreativität des menschlichen Spezialisten kann hier im Zusammenarbeit mit effektiven Maschinen eine Symbiose bewirken (Jahanmahin et al. 2022, S. 1). Der Roboter bringt, wie in einer menschenzentrierten Kollaboration angestrebt, Aspekte wie Kraft, Geschwindigkeit, Wiederholbarkeit ein, während der/die menschliche Akteur*in Intelligenz, Kreativität und kognitive Fähigkeiten beisteuert (Simone et al. 2022, S. 6). Um den eben beschriebenen Arbeitsablauf der Anwendung als DT aufzubauen, ist eine Simulationsumgebung notwendig.

5.3 Arbeitsplatzauslegung

Das Simulationsmodell der MRK wird zur Gestaltung des DT als virtuelle 3D-Darstellung des MRK-Arbeitsplatzes unter Einbeziehung der in der CAD-Software erstellten Bauteile des Elektromotors verwendet. Das Simulationsprogramm eignet sich aus mehreren Gründen für den betrachteten Anwendungsfall:

- Menschen können als virtuelle Modelle dargestellt und Bewegungsabläufe simuliert werden, wodurch Prozessabläufe detailliert darstellbar sind

- Die Integration von Roboter-Modellen ist möglich, zudem kann die Live Simulation der Roboterbewegung erfolgen, bei der eine LAN Verbindung zwischen dem Roboter und dem Computer etabliert wird. Offline können jedoch ebenfalls Simulationen durchgeführt werden, um eine Iteration des Aufbaus und Ablaufs der Arbeitsschritte durchzuführen
- Die Controller Version von Universal Robots ist in der Software inkludiert, daher können simulierte Fahrwege des Roboterarms einfach in den physischen Aufbau übertragen werden

Das virtuelle Modell des Roboters ist ein vordefiniertes Modell des „universal robots“ UR-3e. Digitale Modelle von Roboter manipulatoren werden häufig vom Roboterhersteller bereitgestellt. Die Kinematik, die Gelenkgrenzen und die maximalen Gelenkgeschwindigkeiten sind in diesem Fall vordefiniert (Malik und Brem 2021, S. 6). Als Menschmodell wird das integrierte Jack Modell der Software verwendet und an die Körpergröße der Bedienperson angepasst.

Die Simulation umfasst in dieser Arbeit ähnlich wie in (Cimino et al. 2023, S. 2, Ren et al. 2021, S. 5):

- 1) Aufbau der virtuellen Umgebung und Entwurf des digitalen Zwillings als Darstellung des kollaborativen Mensch-Roboter-Montagesystems für die Fallstudie. In diesem Prozess werden die 3D-Modelle der Montageressourcen, einschließlich des Roboters, des Menschen und anderer Geräte, in CAD-Software erstellt. Alle 3D-Modelle werden in die Simulationssoftware importiert und die virtuelle Umgebung aufgebaut
- 2) Fahrwege und Programmerstellung für den Roboter
- 3) Aufgabenplanung der MRK (Aufgabenzuweisung an Mensch und Roboter), Auswertung der Bearbeitungszeit für alle in den Montagevorgängen verfügbaren Ressourcen
- 4) Online-Optimierung für MRK auf Grundlage der Echtzeitdaten aus der physischen Welt

Zusätzlich, wird noch der Aspekt der zweiseitigen Datenströme implementiert und folgendermaßen definiert:

- 5.) Einbeziehung der Ressource Mensch durch „motion capture“ sowie Integration von Sicherheitssensorik

Durch die Online-Verbindung zwischen dem physischem und virtuellem Roboter können Roboter manipulieren und -aktionen, die im physischen Raum ausgeführt werden, dynamisch an den Roboter im virtuellen Raum übertragen werden. Die Programmierung des Roboters kann entweder als Live-Simulation (Funktion „Robot Connect“ in der Simulationsumgebung) als Abbildung der realen Roboterbewegungen in der Simulation in Echtzeit erfolgen oder durch Offline Programming (OLP) isoliert vom physischen Roboter aufgebaut werden. Die Übertragung der realen Roboterbewegungen an den virtuellen Roboter erfolgt in Echtzeit, über die Verbindung mittels LAN Kabel.

Dieses wird in den Controller des Universal Robot eingesteckt und an den Computer, auf dem die Simulation aufgebaut ist.

Wie zuvor beschrieben ist die Einbeziehung menschlicher Faktoren von grundlegender Bedeutung für die Gestaltung hochtechnologischer und komplexer Systeme wie MRK Anwendungen, da sie eng mit der Sicherheit, dem Wohlbefinden und der Arbeitsleistung der Bedienperson zusammenhängen (Gualtieri et al. 2022, S. 2). Der MRK Designprozesses in Bezug auf den Bereich Montage ist hauptsächlich unterteilt in den Entwurf, Bewertung und Optimierung des Layouts, der Aufgabenzuweisung und der Festlegung der Montagereihenfolge (Yichen Wang et al. 2022, S. 3). Die Auslegung eines geeigneten Arbeitsplatzes stützt sich außerdem auf bereits vorhandene Richtlinien: (Gualtieri et al. 2020, S. 2)

1. Minimierung der beruflichen Sicherheitsrisiken (insbesondere der mechanischen Risiken) für Gesundheit und Sicherheit, welche bei der Interaktion zwischen dem Menschen und dem Robotersysteme und/oder zwischen dem Menschen und den anderen Elementen des Arbeitsplatzes auftreten können
2. Maximierung des Wohlbefindens des Menschen während der Interaktion mit dem Roboter und mit anderen Elementen des Arbeitsplatzes in Bezug auf die physische und kognitive Ergonomie
3. Minimierung des Zeit- und Kostenaufwands für manuelle, robotergestützte und kollaborative Aufgaben (Gualtieri et al. 2020, S. 2)

In Gualtieri et al. 2020 werden einige Design-Richtlinien, welche als Leitlinien für die Gestaltung eines Mensch-Roboter-Montagearbeitsplatzes in Bezug auf die Arbeitssicherheit anwendbar sind, aufgezeigt. Die relevanten und umgesetzten Maßnahmen werden hier aufgezählt: (Gualtieri et al. 2020, S. 3–5):

- Minimierung spezifischer mechanischer Gefahren im Zusammenhang mit dem Einklemmen von menschlichen Körperteilen zwischen den Robotersystemen und den Elementen des Arbeitsplatzes → Bewegungsplanung/Trajektorien-Planung entsprechend angepasst, um Gefahren zu reduzieren
- Begrenzung von Schwung, mechanischer Leistung oder Energie in Funktion von Massen und Geschwindigkeiten → Reduktion der kinetischen Energie durch Geschwindigkeitsreduktion im mit dem Menschen geteilten, vorderen Arbeitsbereich des Kollaborationsumfelds. In einer komplexen Umgebung ist die größte Auswirkung auf die Sicherheit die Geschwindigkeit von Industrierobotern, welche auch die wichtigste Ursache für die Verletzungen von Menschen ist (Liu et al. 2020, S. 2)
- Einhaltung von Geschwindigkeits- und Abstandsbegrenzung → implementiert durch den Sicherheitsscanner

- Erfüllung der Anforderungen der Maschinenrichtlinie → In der vorliegenden Arbeit wird das „Teach-Pendant“, als Steuerungseinheit verwendet, welches gleichzeitig die Funktion eines Not-Halts erfüllt, da dieser universal erreichbar und deutlich zu erkennen ist. Ein weiterer Not-Stopp ist an der linken Kante des Tisches befestigt und dient der bessere Erreichbarkeit. Der „Teach Pendant“ ermöglicht die Roboterprogrammierung im Teach-Modus und ist eine intuitive Methode, zur Programmerstellung. Positionen werden gespeichert und in eine Programmsequenz integriert, anschließend kann der Roboter die Wegpunkte abfahren. Die Punkte könne auch durch eine haptische Führung des Roboters eingelernt werden (Wang et al. 2020, S. 41)
- Signalisierung des Übergangs zwischen kollaborativen Operationen → Implementierter Taktschalter zur Umsetzung eines sequentiellen Ablaufs, welcher durch den Menschen betätigt wird. Dadurch hat die Bedienperson die Kontrolle über den Ablauf und wird nicht von Bewegungen des Roboters überrascht.

Die Optimierung der Arbeitsplatz-Elemente wurde wie folgt durchgeführt: (Gualtieri et al. 2020, S. 4–5)

- Visuelle Unterscheidung der Teile durch Größe, Farbe, Textur → Die additive Fertigung ermöglicht durch den Druck mit einem Filament und damit eine bunte Ausführung der Bauteile, wodurch eine bessere Unterscheidung zum Arbeitsplatz und eine niedrigere Fehlerquote gewährleistet wird. Auch im realen industriellen Umfeld könnte man Bauteile durch eine Einfärbung adaptieren.
- Anordnung der Montageelemente → Die Arbeit soll intuitiv erfolgen, um beispielsweise die Reaktionszeit bei der Auswahl der Teile zu reduzieren. Dafür erfolgt die Anordnung der Schütten an der Vorderkante des Tisches links und rechts des Menschen, wodurch eine einfache Zuordnung zur Bauteilseite erfolgt. Die Arbeitsplatzelemente sind so gestaltet, dass sie während der Montage nicht neu auszurichten, justieren und manipulieren sind (Gualtieri et al. 2020, S. 4–5).

Die finale Bauteil- und Arbeitsplatzanordnung ist in Bild 17 dargestellt:

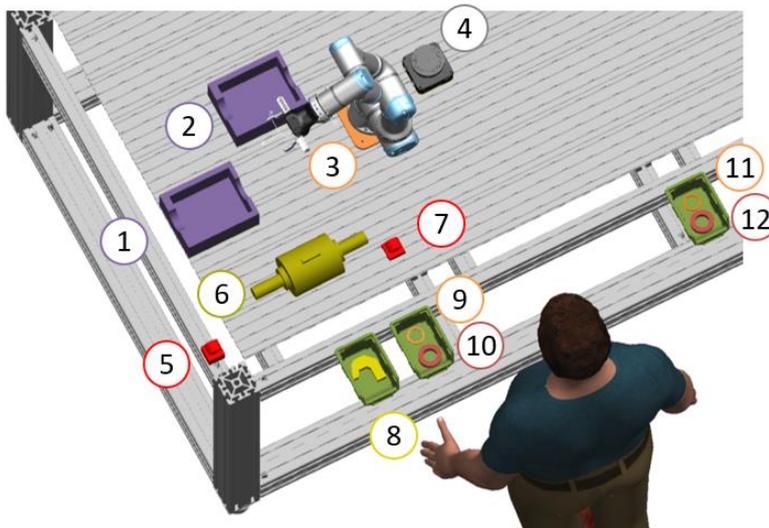


Bild 17: Bauteilanordnung der MRK Anwendung

Bauteilanordnung

1. Unteres Gehäuse
2. Oberes Gehäuse
3. Roboter UR3e
4. Sicherheitsscanner
5. Notstopp
6. Rotor
7. Schalter für sequentiellen Ablauf
8. Haken
9. Lagerring links
10. Lager links
11. Lagerring rechts
12. Lager rechts

Nach der Optimierung nach dargelegten Punkten, werden weitere Überlegungen zur Arbeitsplatzauslegung präsentiert:

Zur Überprüfung der Reichweiten von Mensch und Roboter gibt es in der gewählten Simulationssoftware die Funktion „Smart Place“ bei der, der Roboter optimal positioniert wird, abhängig von den bereits platzierten, zu manipulierenden Bauteile. Außerdem können mit dem „Reach-Test“ einzelne Bauteile angewählt werden, um eine Erreichbarkeitsanalyse durchzuführen. Dabei wird überprüft, ob der Robot innerhalb seiner maximalen Reichweite verfährt. Beide Tests können in der simulierten Umgebung durchgeführt werden. Bei jeder Bewegung des Roboters, wird ein Volumen durch die Bauteile des Roboters überstrichen, welches als Swept Volumen bezeichnet wird. In ähnlicher Weise kann die Erreichbarkeit des Menschmodells (abhängig von den Körpermaßen) untersucht werden. Diese Betrachtung ist in Bild 18 dargestellt. Die durchschnittliche Entfernung, die der Mensch zurücklegt und das durchschnittliche Gewicht, welches manipuliert wird, ist in der Auslegung ebenfalls berücksichtigt (Conti et al. 2022, S. 10).

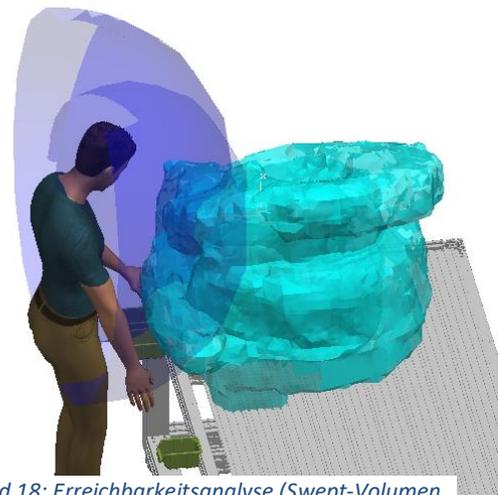


Bild 18: Erreichbarkeitsanalyse (Swept-Volumen des Roboters und menschliches Bewegungsfeld)

Der PT und der DT wurden aneinander angepasst, wie in den Bildern 19 und 20 zu sehen ist:

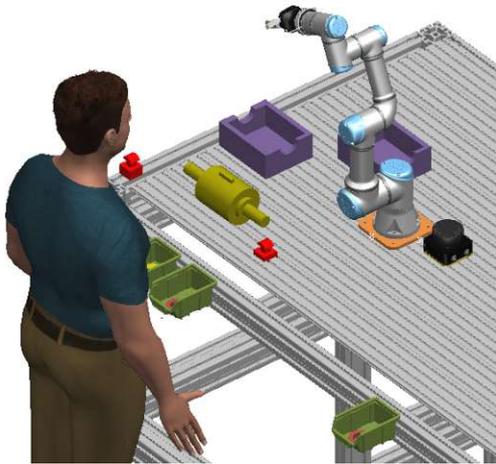


Bild 19: Arbeitsplatzaufbau im DT



Bild 20: Arbeitsplatzaufbau des physischer Zwillings

Damit der Roboter die Bauteile manipulieren kann, ist die Positionierung an den im Simulation-Umfeld definierten Positionen essenziell. Ursprünglich war dafür eine Vorrichtung geplant, welche die Abstände der Teile zueinander vorgibt. Dieser Ansatz wurde verworfen, da der Bauraum des 3D Druckers nicht ausreicht, um den Rotor und die zwei Gehäusehälften in dieselbe Vorrichtung einzulegen. Stattdessen werden sie anhand der x und y-Achse des Bezugssystems ausgerichtet, der Nullpunkt ist dabei die linke untere Kante des Tisches. Dadurch werden die Pick-and-Place-Positionen definiert und mit Klebeband markiert, wodurch Komponenten wiederholt an der gleichen Stelle positionierbar sind.

5.3.1 Ergonomie Betrachtung der Anwendung (RULA)

Eine Vielzahl der ergonomischen Aspekte von Produktionssystemen kann bereits in der Konzeptionsphase des Arbeitsprozesses simuliert und getestet werden. Die Software stellt hier den Reiter „ergonomic analysis“ bereit, wodurch in wenigen Schritten gängige ergonomische Analysen (EAWS, RULA, NIOSH), wie in Fischer et al. 2023, S. 2 beschrieben durchführbar sind. Das „rapid upper limb assessment“ (RULA) wurde für die ergonomische Arbeitsplatzbewertung entwickelt und wird verwendet, um eingenommenen Haltung zu untersuchen. Dabei werden die Neigungswinkel der Arme, des Nackens und des Rumpfes betrachtet. Eine Punktzahl der Auswertung von 1-2 bedeutet eine akzeptable Haltung, bei 3-4, ist eine weitere Betrachtung notwendig und möglicherweise Änderung notwendig. Haltungen die mit 5-6 bewertet wurden, erfordern generell eine Änderung, bei einer Bewertung von 7, ist eine sofortige Änderung vorzusehen (Fischer et al. 2023, S. 2, Scoccia et al., S. 2). Die Auswertungsmethode wird genutzt, da für die gewählte Anwendung der Montage nur die obere Körperhälfte belastet ist. In der Auswertung durch RULA werden ergonomisch ungünstige Positionen und Haltungen rot eingefärbt, wodurch sie leicht erkennbar und behebbar werden. Die Maßnahmen sind dabei vielfältig, können jedoch alle im Simulationsumfeld getestet werden. Beispielsweise kann die Erhöhung der durch den Mensch zu manipulierenden Teile auf eine adäquate Höhe, einen großen Unterschied bewirken. Die Grundhaltung

in welcher der Mensch ein Teil manipulieren soll, beispielsweise stehend oder auf dem Boden kniend, ist ebenfalls relevant. Überdrehungen einzelner Gelenke oder Körperteile wie beispielsweise des Torsos, der Hände oder des Nackens können betrachtet und angepasst werden. Im Bild 21 ist eine Bewegung dargestellt, die im weiteren Verlauf der Auslegung behoben wurde. Diese Position hätte ohne eine weitere Optimierung eine negative ergonomische Auswirkung, durch die starke Überstreckung des Handgelenks. Verschiedene Problembhebungen können erprobt werden, beispielsweise bringt die Abwinkelung des Ellbogens oder das Senken der Schulter das Handgelenk bereits in eine bessere Grundposition (Bild 22). Der DT hilft hier dabei, ergonomische Prozesse vor der physischen Implementierung zu entwerfen.

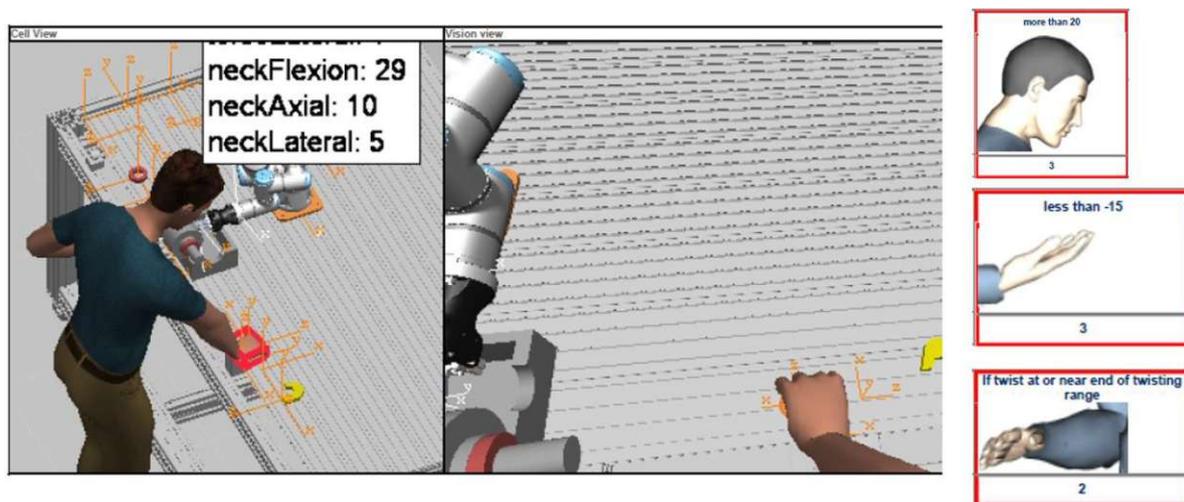


Bild 21: Darstellung unerwünschter Geometrie und beispielhafte ergonomische Auswertung – Arbeitsschritt Get_Lager_rechts - RULA

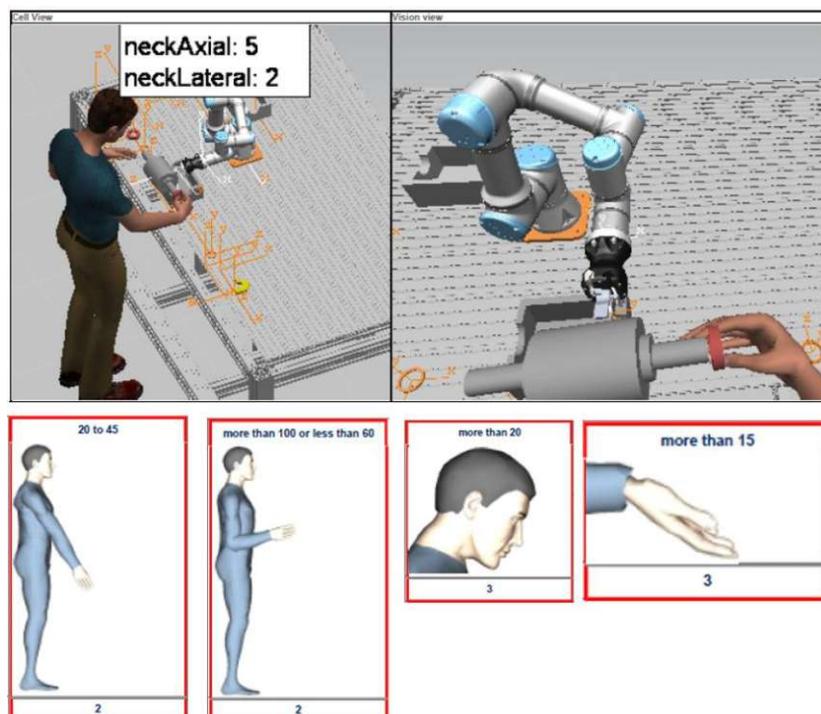


Bild 22: Beispielhafte ergonomische Auswertung – Arbeitsschritt Lagermontage - RULA

Die Arbeitsabläufe in der Simulation lassen sich bis ins kleinste Detail der Körperhaltung darstellen (Bild 21, 22), in Echtzeit auswerten und erlauben die Optimierung und Berücksichtigung gängiger MRK-Richtlinien. Die Software ermöglicht dem Benutzer außerdem spezifische Körperhaltungen für jede Aufgabe zu definieren, wobei jeder Körperwinkel und die Position der Hände angepasst werden können, um die Bewegungen sehr genau nachzubilden (Fischer et al. 2023, S. 4). Auch ein Szenario ohne MRK kann betrachtet werden (Bild 23), um darzustellen, welche Belastungen der Mensch ohne die Unterstützung des Roboters erfahren würde. In diesem Beispiel ist der Rotor mit einem Gewicht von 6 kg angenommen und wird durch den Menschen manipuliert. Jede Hand wird daher in der Handmitte mit einem Gewicht von 3 kg belastet. In der RULA Auswertung fließt diese Belastung ein, wird aber gering bewertet, da es sich um eine Belastung zwischen 3-10 kg handelt. In dieser Gewichtsklasse wird eine unregelmäßige Belastung mit „+1“ bewertet, während eine statische/wiederholte Manipulation mit „+2“ einfließt. Diese Punkte werden in der RULA-Auswertung zusammengerechnet und über eine Tabelle der finale Wert ermittelt.

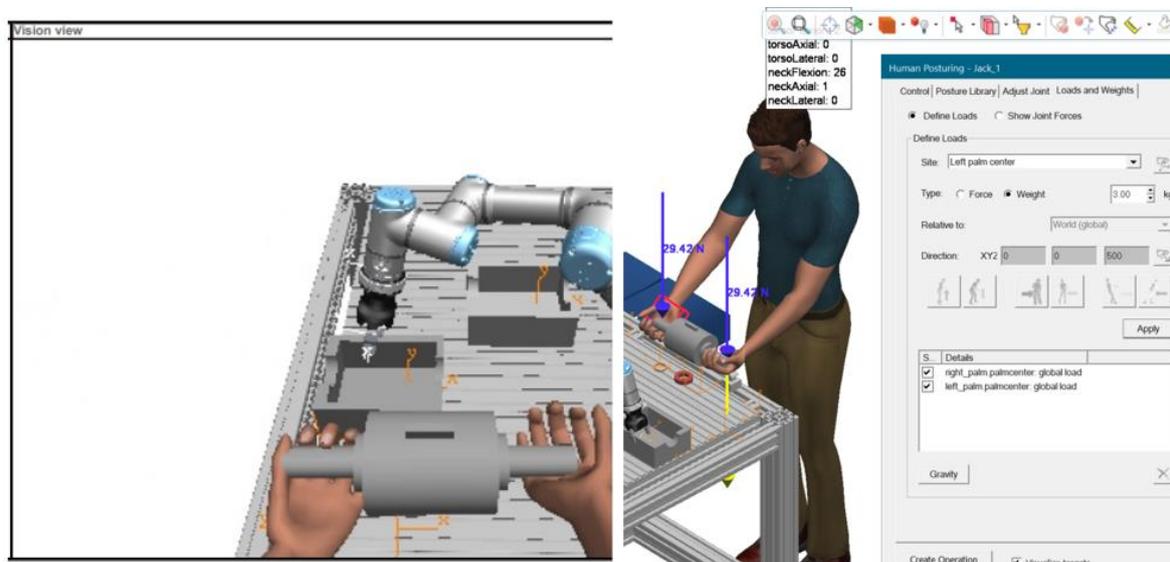


Bild 23: Ergonomische Auswertung - Szenario ohne MRK mittels RULA

Nach der Darlegung der Richtlinien und daraus abgeleiteten Maßnahmen kann die entwickelte Montagezelle für die MRK Prozesse als optimiert bezeichnet werden. Die Auswertung hat gezeigt, dass die ausgelegte Arbeitszelle keine ergonomischen Probleme aufweist. Diese Aussage ist mit dem realen Ablauf übereinstimmend, bei der Durchführung der Prozessschritte wurden keine merklichen ergonomischen Probleme wahrgenommen.

5.3.2 Sicherheitssensorik

Der implementierte Sicherheitsscanner fällt unter die Kategorie „Nicht-mechanische Begrenzungseinrichtungen“, da nicht die Roboterbewegung begrenzt wird, sondern vielmehr einen Stopp über die Steuerung des Roboters ausgelöst wird, sobald Sicherheitszonen verletzt werden. Mit dem Prinzip der Laufzeitmessung erfassen Laser-Scanner ihre Umgebung und messen Entfernungen zu Objekten. Ein eingebauter Drehspiegel ermöglicht es, die zuvor definierten Schutzbereiche in den zwei Dimensionen Zeit und Distanz zu überwachen (Product portfolio | SICK 2023). Der Anhalteweg wird bei der Festlegung des eingeschränkten Raums des Roboters berücksichtigt (ISO/TS 15066: 2016, S. 25). Für diese Anwendungen wird ein Sicherheitsscanner der Marke „SICK“ für die Einrichtung der Sicherheitszonen am Arbeitsplatz genutzt. Die Integration dieses spezifischen Scanners in „Siemens Process Simulate Tecnomatix“ ist laut den „Release Notes“ des Herstellers erst seit Jänner 2023 möglich (Tecnomatix 2022).

Die von dem Scanner erfassten Informationen werden als Sensordaten in dem Format .XML abgespeichert, welches in die Simulations integrierbar ist. Zur Erstellung der .XML-Datei ist zuerst eine Kalibrierung in der firmeneigenen Software „Safety Designer“ notwendig. In dieser werden die Zonen und der Wahrnehmungsradius des Sensors definiert. Um eine Sicherheitslogik zu erstellen, welche für eine sichere Kollaboration essenziell ist, wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) im Zusammenhang mit dem Scanner und einem Rest-Button in der Software „Flex Soft Designer“ erstellt. Diese Logik ist in Bild 24 dargestellt und zeigt, dass beide Inputs des AND Blocks erfüllt sein müssen (grün), damit der Roboter den derzeitigen Arbeitsschritt durchführt:

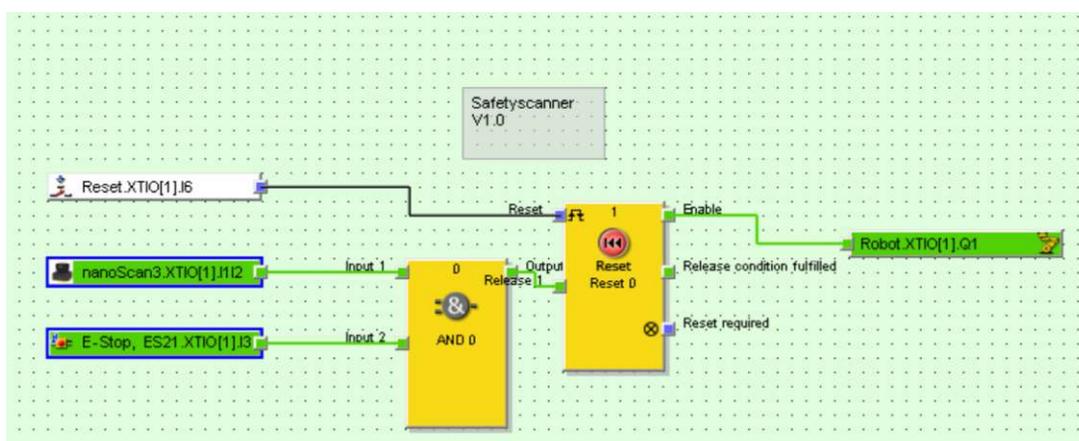


Bild 24: SPS Logik Sicherheitsscanner

Eine Erfüllung ist dann gegeben, wenn weder die Stopp-Zone des Scanners durchbrochen, noch der Not-Stopp Schalter betätigt ist. Für Sonderfälle ist außerdem noch eine Reset-Logik vorgesehen. Diese wird notwendig, falls beispielsweise ein Mensch in den

Stoppbereich eindringt und anschließend nicht rückwärts durch das Warnfeld den Bereich verlässt, sondern theoretisch unter dem Werk Tisch hinter den Roboter gerät. Hier wäre durch die erstellte Logik kein automatischer Wiederanlauf des Roboters möglich, sondern müsste durch das Betätigen des Reset-Schalters manuell gestartet werden. Dieser Fall ist in der gewählten Anwendung eher unrealistisch, wird aber vom Hersteller und der DIN EN ISO 10218-2 2012, S. 28 empfohlen. Die folgende Konfiguration erfolgt ebenfalls im Programm „Flexi Soft Designer“ und ist für die Konfiguration der Pins direkt an der SPS notwendig. Für die gewählte Anwendung ist ein Scanner ausreichend, da die Bedienperson stationär in der Mitte des Arbeitstisches steht und keine weiten Wegstrecken zurücklegt. Zwei Scanner eignen sich für komplexere Arbeitsumfelder mit weniger stationären Tätigkeiten, oder wenn eine 360° Abdeckung des Arbeitsbereichs notwendig ist. Da nur ein Sicherheitsscanner verwendet wird, ist nur die mittlere XTIO Einheit konfiguriert. Diese ist eine Ein-/Ausgangserweiterung mit 8 Sicherheitseingängen und 4 Sicherheitsausgängen, zur Überwachung angeschlossener Sicherheitsgeräte. Außerdem wird das Modul CPU0 verwendet, welches die zentrale Prozesseinheit des Systems darstellt und alle Signale gemäß der Konfiguration überwacht, sowie verarbeitet (Product portfolio | SICK 2023).



Bild 25: Verkablung der FLEXI soft XTIO Einheit

Der Anschluss des Sicherheitsscanners erfolgt an den Pins I1 und I2 der XTIO Einheit, welche als Safety-Input vorgesehen sind. Ebenfalls auf den Safety Input Pins wird der Not-Stopp verkabelt, in diesem Fall auf I3 und I4. Der erwähnte Reset-Schalter ist an den Pins I5 und I6 verkabelt. An den Safety-Outputs Q1 und Q2 erfolgt die Ansteuerung des Roboters, wodurch die Geschwindigkeitsreduzierung, sowie der Not-Stopp ausgelöst werden. X1 und X2 sind für die dargelegte Anwendung nicht relevant, da sie als Test-Puls Ausgänge konfiguriert werden können. An den Pins A1 und A2 liegen bei beiden Modulen (CPU0 und XTIO) die Versorgungsspannung von 24V an.

Die Verkabelung in Bild 25 ist durch die Symbole an den jeweiligen Pins dargestellt. Beispielsweise steht das NanoScan Symbol an den Eingängen I1 und I2 für den Sicherheitsscanner.

Durch diese Programmierung der Steuereinheit in Kombination mit dem Sicherheitsscanner, werden die in Kapitel 2.5 dargelegten Anforderungen laut ISO/TS 15066: 2016 eingehalten. Bei einer Unterschreitung des Mindestabstands, festgelegt durch die Zonen, wird das Robotersystem gestoppt, bei der Wiedereinhaltung des Abstands erfolgt die Wiederaufnahme der Tätigkeit. Zur Inbetriebnahme des Scanners wurde dieser ebenfalls mit 24V Spannung versorgt und eine kabelgebundene Verbindung zu

dem Computer hergestellt. Für die Geschwindigkeitsreduzierung oder Abschaltung des Roboters ist es erforderlich, dem Scanner Sicherheits-Zonen vorzugeben. In wenigen Schritten erfolgt die Einrichtung dieser Zonen, welche den Roboter anweisen, in welchen Bereichen er sich mit voller oder reduzierter Geschwindigkeit bewegen oder einen Stopp einleiten soll. Nach der Installation aller notwendigen Treiber ist die Hersteller-Software „Safety Designer“ das zentrale Werkzeug zur Konfiguration des Scanners. Die definierten Felder werden im nächsten Schritt Abschaltpfaden zugeordnet, welche in der Überwachungsfalltabelle in Bild 26 aufgelistet sind. Hier wird auch festgelegt, welches Sicherheits- oder Stopp-Feld, welche Ausgänge steuert. In dieser Anwendung schaltet das Stoppfeld z.B. das OSSDs (Output Signal Switching Device) Paar 1 und den Universalausgang 1, welcher direkt im Controller des Roboters verkabelt, zu Sicherheitsmaßnahmen wie Geschwindkeitsreduktion oder Not-Stopp führt. OSSD steht für einen Signalausgang an der Sicherheitssteuerung.

Überwachungsfall ?		Abschaltpfad ?			
		Abschaltpfad 1		Abschaltpfad 2	
Nr.	1 <input type="checkbox"/> Ruhezustand	Stopp			
Name	Überwachungsfall 1	Stopp		Schutz	
		↓		↓	
OSSDs ?		<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
Universalausgänge ?		<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
		<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4

Bild 26: Überwachungsfalltabelle

Eine andere Methode, um Sicherheitssensorik an der Arbeitszelle zu implementieren, wurde im Verlauf der Arbeit verworfen. Hierbei wären die Anwendungen SBot_Speed und SBot_Stop der Firma SICK verwendet worden, diese Softwarepakete sollte die Konfiguration der Sicherheitszonen vollzogen werden und die Implementierung von Sicherheitsfeldern vereinfacht werden, da bei der Implementierung keine Übertragung von einem Computer an den Roboter erfolgt. Stattdessen werden die Programme direkt auf dem „Tech Pendant“ des Roboters installiert. Diese Art der Konfiguration erwies sich nach näherer Betrachtung und Beratung durch die Firma SICK als vereinfachte Version der ohnehin vorgesehenen und implementierten Sicherheitsschaltung über die SPS in der Software „Flexi Soft Designer“. Eine Übertragung der eingerichteten Zonen ist nicht möglich und eignet sich daher auch nicht für die Betrachtung der zweiseitigen Datenanbindung, da die Konfiguration nur lokal am Roboter abgespeichert werden kann, ohne die Möglichkeit diese in eine Simulation zu übertragen.

5.4 Einrichtung der zweiseitigen Datenanbindung

Für die Schaffung von menschenzentrierten Systeme erfordern MRK-Anwendungen bidirektionale Informationsflüsse. Dazu werden Daten, Modelle und Simulationen sowohl von Maschinen als auch von Menschen benötigt (Löcklin et al. 2021, S. 1). Diese Informationsflüsse werden durch Implementierung von „motion capture“ sowie der Betrachtung der Roboteranbindung überprüft, während der Sicherheitsscanner zur Gewährleistung der Sicherheit verwendet wird.

5.4.1 Motion Capture

In der komplexen industriellen Produktion ist die präzise Erfassung der dreidimensionalen Bewegungen von Menschen und Robotern besonders wichtig für die Sicherheit von MRK-Systemen (Yi et al. 2022, S. 5–6). Der Faktor Mensch wird direkt über einen „Motion Tracking Suit“ abgebildet. Die internen Messeinheiten (IMUs) dessen führen die Aufzeichnung der realen Bewegungsabläufe durch, welche anschließend in die Simulationssoftware eingespielt werden. Der verwendete Anzug, bestehend aus 16 IMUs, von XSens3, Software-Version 2019.0.0. (MVN Awinda | Movella.com 2023). Die Sensoren werden am Kopf, Schultern, Becken, Oberarmen, Unterarmen, Händen, Oberschenkeln, Unterschenkeln und in den Schuhen befestigt. Nach der erfolgreichen Kalibrierung, kann der Mensch im realen Umfeld das digitale Menschmodell bewegen (Fischer et al. 2023, S. 5). Der gewählte Ansatz für die Erfassung und Integration der Ressource Mensch in den DT ist derselbe, welcher in Fischer et al. 2023 dargelegt wird. Die physische Bewegung des Menschen werden durch „motion capture“ aufgezeichnet und auf den digitalen Menschen übertragen. Der erste Schritt der Konfiguration, nach dem Anlegen der Sensoren, ist die Körpermaße in der Software anzugeben. Zu diesem Zeitpunkt ist das Körpermodell noch in einer chaotischen Anordnung und für Aufzeichnung unbrauchbar. Dadurch ist eine Kalibrierung notwendig, bei welcher eine „N-Pose“, sprich eine neutrale stehende Position, bei der die Arme und Beine in einer Linie fluchten, für eine kurze Zeit, möglichst ohne Bewegungen eingenommen wird. Anschließend erfolgt ein kurzer Gang nach vorne und hinten in einer natürlichen Gangart, um die Kalibrierung abzuschließen (Bild 27).

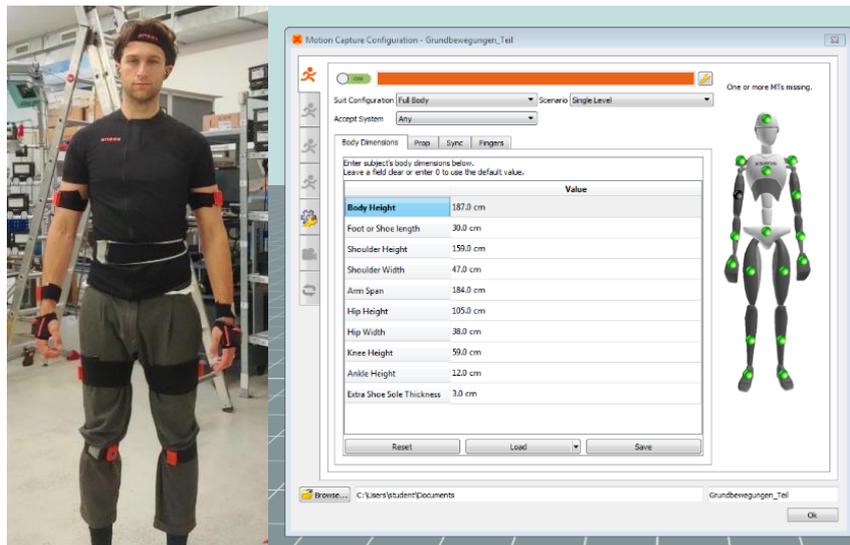


Bild 27: Motion Capture Kalibrierung

Nach diesem simplen Setup kann die Aufnahme von Bewegungsabläufen gestartet werden. Die physische Arbeitszelle wird vor der Aufnahme wie zuvor beschrieben exakt so ausgelegt und angeordnet wie in der Simulation. Anschließend erfolgt die Aufzeichnung der menschlichen Bewegungen. Nach Beendigung der Aufzeichnung entstehen beim Speichern Dateien mit der Endung .mvn, welche, um sie in das virtuelle Umfeld einzuspielen, noch auf die .mvnx Endung konvertiert werden. Die Darstellung in der Simulation erfolgt durch den „Task Simulation Builder“ (TSB), welcher in der Simulationssoftware genutzt wird, um das ausgewählte Menschmodell zu steuern und einzelne Tasks an dieses zu übertragen (Bild 28).

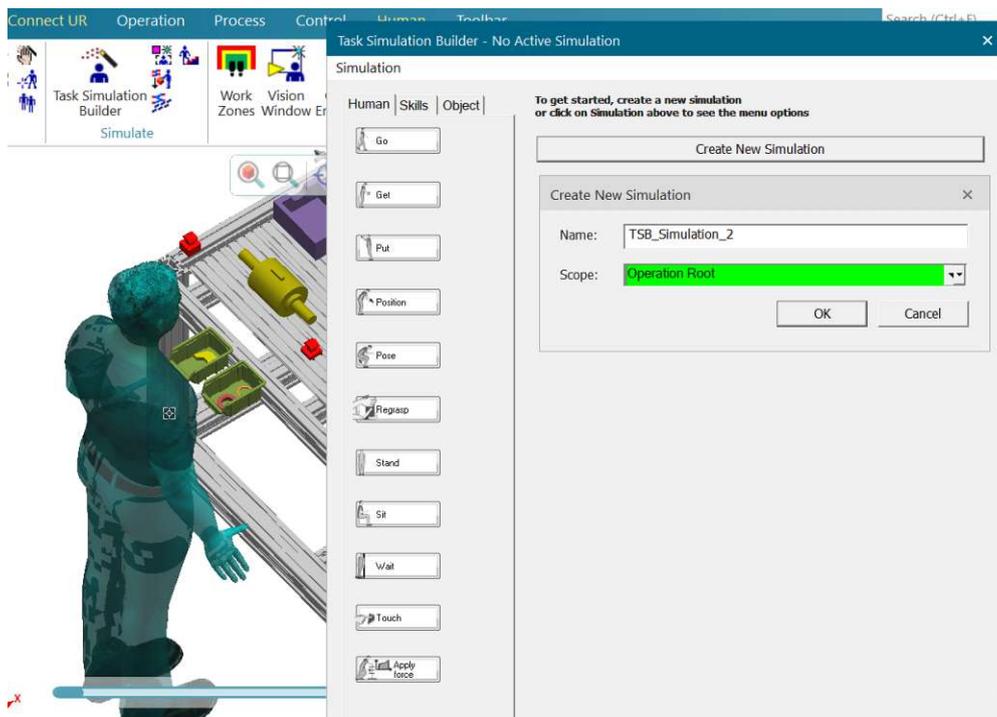


Bild 28: Task Simulation Builder (TSB)

Bei dem Import der Bewegungsabläufe wird der Task „Pose_Jack“ erstellt, welcher dem Menschmodell „Jack“ die aufgezeichnete Bewegung vorgibt. Die Pose kann nun in den allgemeinen Montage-Ablauf eingegliedert und mit anderen Operationen in der Simulation verknüpft werden. Die Bewegungsabläufe werden in der vorliegenden Konfiguration zuerst aufgezeichnet, abgespeichert und dann in der Simulationssoftware zu Bewegungen des Mensch-Modells verarbeitet. Der Übertragungsprozess erfolgt also nicht in Echtzeit, sondern über Zwischenschritte.

6 Auswertung / Resultate

Die Simulation (DT) ist nach allen zuvor erwähnten Aspekten optimiert und anschließend mit dem PT verglichen worden. Diese Optimierung in Bezug auf den Arbeitsplatz und Arbeitsablauf (Kapitel 2), nach bereits dargelegten und von anderen Autor*innen entwickelten Richtlinien ist notwendig, damit die Arbeitsstation dem „state of the art“ entspricht. Ansonsten könnten etwaige Abweichungen zwischen dem realen Umfeld und dem DT durch falsche Auslegungen verursacht werden, wodurch die Aussagekraft in Bezug auf die integrierten Datenströme reduziert wäre. Die Ergebnisse für die Säulen Ergonomie, Sicherheit und Effizienz werden im folgenden Abschnitt dargelegt und bewertet. Wie zuvor beschrieben besteht der DT aus drei Teilen: physischer Aufbau im realen Umfeld, virtueller Aufbau im virtuellen Raum und in dieser Auswertung wichtig, der Verbindungen der beiden durch Daten und Informationen (Qibing et al. 2021, S. 1). Die Verknüpfung der zwei Umfelder ist der Fokus dieser Arbeit. Daher wird in den folgenden Kapiteln jeweils dargelegt, welche Ausprägungen und Einschränkungen sich in Bezug auf die Verbindung der beiden Umfelder ergeben.

6.1 Roboteranbindung

Wie zuvor beschrieben wurden zuerst die Roboterbahnen offline in der Software simuliert, mit dem Ziel diese in der physischen Implementierung zu transferieren. Direkt übernommen werden können die offline programmierte Bewegungsabläufe des Roboters aus dem DT in den PT über die Verbindung per LAN-Kabel nicht. Es lässt sich festhalten, dass lediglich die Verbindung vom physischen zum virtuellen Roboter integriert ist und somit einem DS gerecht wird. Die zuvor beschriebenen Sicherheitsaspekte, die im PT durch das Sicherheitssystem implementiert sind (Kapitel 5.3.2), können insofern übertragen werden, als der Roboter stoppt, wenn im realen Umfeld der dafür notwendige Impuls an das Sicherheitssystem gegeben ist, beispielsweise, dass das Schutzfeld des Scanners durchbrochen wird. Die im physischen Umfeld programmierten Punkte können in die Software übertragen werden. Zu diesem Zweck wurde der physische Roboter an einen Wegpunkt positioniert und dieser in der Simulationssoftware anschließend abgespeichert. Das Bild 29 zeigt die Wegpunkte des Arbeitsschritts „Unteres Gehäuse“, welche mit der manuellen Übertragung der Gelenkwinkel (Bild30) in die Simulation übernommen wurden. Um einen Punkt im dreidimensionalen Raum zu erreichen, kann entweder über die kartesischen Koordinaten des TCP (tool center point) oder über die Gelenke des Roboters verfahren werden. Der TCP stellt die Mitte des eingespannten Greifers dar. Der Roboter navigiert entlang der gelben Koordinatenpunkte und überstreift dabei mit dem TCP die weiß eingezeichneten Pfade. Für jeden Punkt, den der Roboter abfährt, gibt es dazugehörige Informationen über die Gelenkwinkel. Wie in Bild 31 dargestellt, kann zur Erreichung desselben Raumpunkts eine unterschiedliche Konfiguration an Gelenkwinkel genutzt werden.

Die präzise Übertragung durch die einzelnen Winkel ist daher essenziell, um einen Abgleich zwischen dem PT und dem DT zu erreichen.

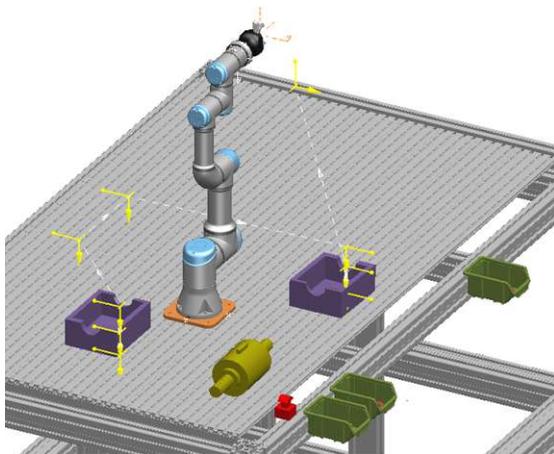


Bild 29: Wegpunkte des Arbeitsschritts „Unteres Gehäuse“

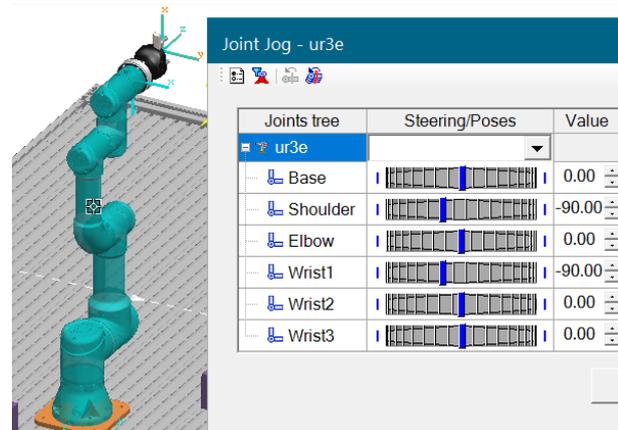


Bild 30: Gelenkwinkel in der definierten Home-Position

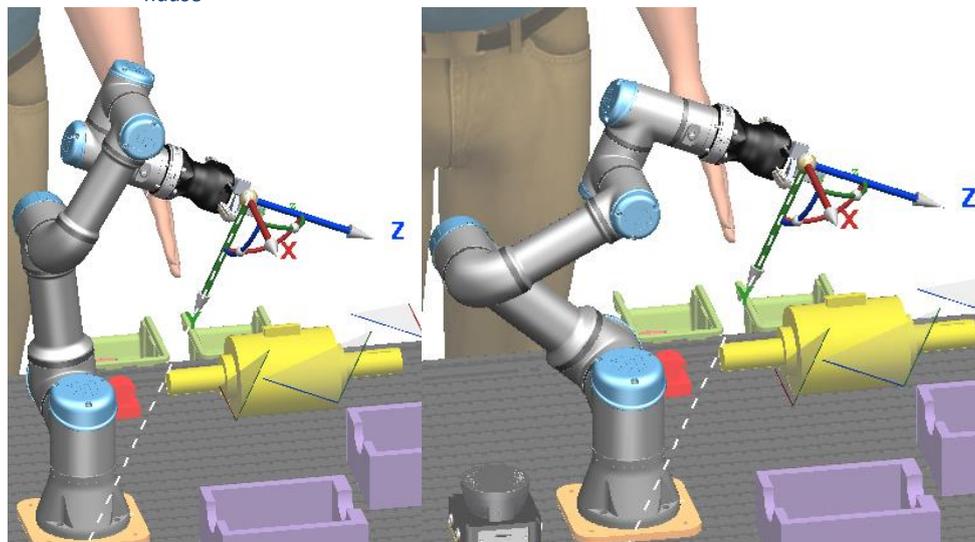


Bild 31: Erreichen desselben Raumpunkts durch unterschiedliche Roboterpositionierung

Offline programmierte Wegpunkte können über die Geometrie der Gelenke des Roboters abgeglichen werden. Ein Abgleich der Winkel positioniert den Roboter im virtuellen wie im physischen Umfeld gleich. Von einer zweiseitigen Datenanbindung kann trotzdem nicht gesprochen werden, da diese Form der Übertragung nicht in Echtzeit erfolgt und auf Umwegen mit erheblichem Aufwand erfolgt. Die Übertragung der reell programmierten Punkte in den virtuellen Raum hat aus der Sicht des Authors zu „natürlicheren“ Bewegungsabläufen des Roboters geführt, wobei der Begriff „natürlich“ subjektiv und nicht quantifizierbar ist.

Bei der Auslegung der Anwendung wurde der DT zuerst offline aufgebaut, um den grundsätzlichen Ablauf zu erproben. Anschließend wurden die Wegpunkte, wie eben beschrieben, in den PT übertragen. Bei etwaigen Problemen oder Abweichungen zwischen dem virtuellen Umfeld und der reellen Durchführung des Montageprozesses wurden die Wegpunkte online adaptiert und wieder an das Simulationsumfeld übertragen. Eine Abweichung ergab sich für den Punkt, an dem der Gripper des Roboters das

obere Gehäuse aufnimmt. Dieser Aufnahmepunkt am Bauteil war im DT vor der Erprobung im PT außerhalb der Mitte an der langen Seite des Gehäuses festgelegt und führte im physischen Aufbau dazu, dass sich das Gehäuse aufgrund des Schwerpunkts kippt. Diese physischen Zusammenhänge sind in der Softwareumgebung nicht darstellbar und müssen im physischen Umfeld mittels „trial and error“, sprich einfacher Erprobung erprobt werden.

Der Taktschalter für den sequenziellen Ablauf wird hier unter dem Kapitel Robotersteuerung angeführt, da er die Robotersteuerung beeinflusst. Der Schalter konnte sowohl im PT als auch im DT dargestellt werden, lediglich die Übertragung zwischen den beiden Umfeldern ist beschränkt möglich. Der Taktschalter im PT löst die Roboterbewegungen des realen Roboters aus, welche per LAN Verbindung, wie beschrieben, an den DT übertragen werden können. Die Programmierung des Roboters, erfolgt im PT über das „teach pendant“, welches auf den Input des implementierten Taktschalters reagiert. Dieser wurde am Tisch montiert, direkt mit dem Kontrollkasten des Universal Robot verkabelt und löst bei Betätigung den nächsten Roboter-Prozessschritt aus. Eine Betätigung bewirkt eine Ingangsetzung der Roboter beider Umfeld, PT und DT. Die Übertragung ist hier einseitig ausgeprägt, von dem PT in den DT. Die Aktivierung des physischen Roboters, über den in der Simulation implementierten Taktschalter, ist durch die fehlende Übertragbarkeit von Befehlen aus dem DT an den PT, nicht möglich.

6.2 Motion Tracking Einbindung

Nach dem Einspielen der Bewegungsdaten, werden in der Simulation blaue Kreise am Menschmodell angezeigt (Bild 32), welche jeweils die Gelenke darstellen.



Bild 32: Angebrachte Sensoren physisch und nach Übertragung an die Simulation

Das Menschmodell in der Simulationsumgebung konnte durch die aufgezeichneten Bewegungsabläufe gesteuert werden und somit eine genaue Wiedergabe der Ergonomie erzeugen wie in Bild 33 ersichtlich.

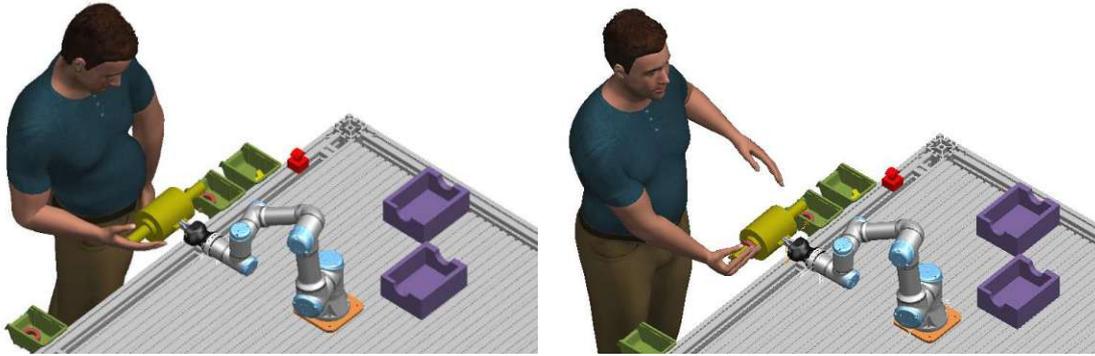
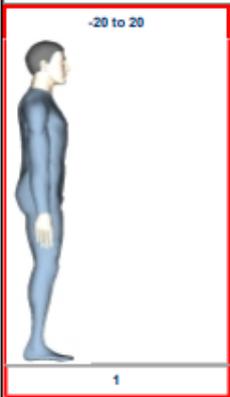
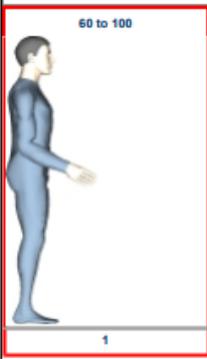
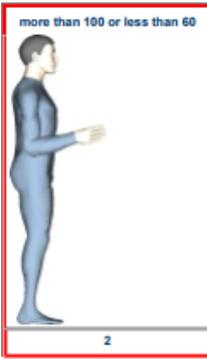
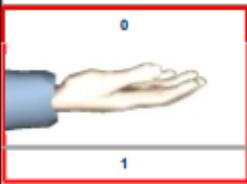
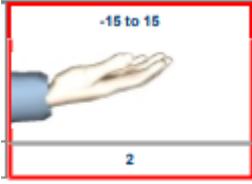
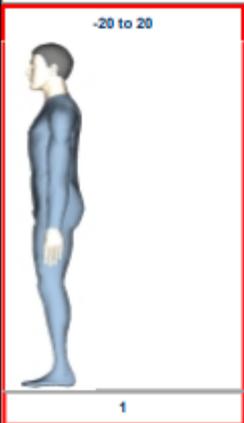


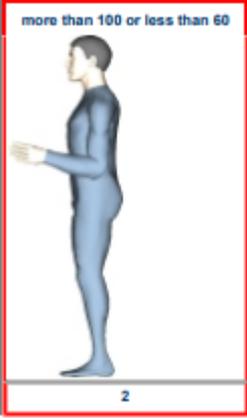
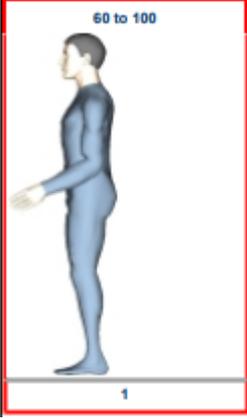
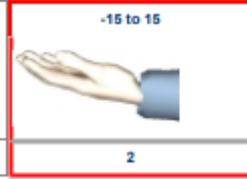
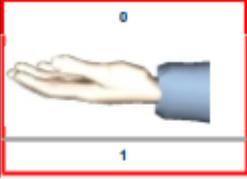
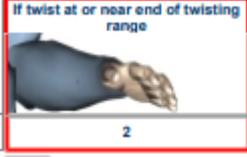
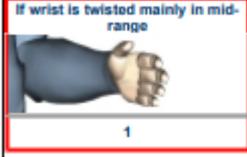
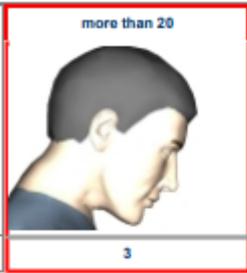
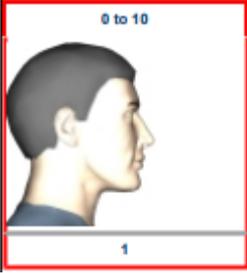
Bild 33: Vergleich eingespielter Bewegungsdaten (links) und programmierter Bewegungsablauf (rechts)

Eine Abweichung bei der Einspielung von Bewegungsabläufen aus dem PT in den DT, ist die fehlende Zuweisung von Bauteilen zu den erstellten Posen. Dadurch kann zwar die Bewegung eingespielt werden, in der z.B. eines der Lager aufgenommen wird, dadurch wird das Bauteil jedoch nicht tatsächlich manipuliert. In Bild 33 ist dieser Sachverhalt ersichtlich, da das Menschmodell in der linken Darstellung, kein Lager in der rechten Hand hält, beim Aufziehen dessen. Abweichungen in Bezug auf die Position der Finger ergeben sich, da nur ein Sensor am Handrücken vorhanden ist und dieser für Fingertätigkeiten nicht hinreichend genau ist. Auch dieser Zusammenhang ist in Bild 33 ersichtlich, links zieht der Mensch mit der flachen Hand das Lager auf, während auf der rechten Seite die genau Modellierung der Handposition erfolgt ist. Daher lassen sich jegliche Abläufe, welche sich um die Bauteilmanipulation drehen, nicht oder nur ungenau darstellen. Lediglich die Bewegungen können digital repliziert und somit zur Auslegung oder Optimierung der Arbeitszelle herangezogen werden.

Durch die Einspielung, können nicht nur am vordefinierten Menschmodell ergonomische Überprüfungen vorgenommen werden. Auch nach dem zuvor beschriebenen Einspielen der Bewegungsabläufe in die Simulation kann die Ergonomie in Reports ausgewertet werden. Alle zuvor erwähnten Auswertungsverfahren (EAWS, RULA, NI-OSH), sind auch bei dieser Darstellung über die eingespielten Bewegungsabläufe möglich. Der Bewegungsablauf ist also darstellbar, indem reale Bewegungen pro Körperregion in der Simulation eingelesen werden. In die andere Richtung ist diese Übertragung nicht möglich, da die Simulation nicht den realen Mensch direkt physisch beeinflussen kann. In der folgenden ergonomischen Auswertung werden die beiden in Bild 33 dargestellten Positionen ergonomisch durch die RULA Auswertung verglichen (Tabelle 6), bei der nur der Oberkörper in die Betrachtung miteinbezogen wird. Nur auf die Abweichungen wird eingegangen und jeweils links die eingespielte Position gezeigt, während rechts die programmierte Bewegung zu sehen ist:

Tabelle 6: Auswertung RULA und vergleich der Körperdaten

Rechter Arm	Eingespielten Bewegungen	Vorprogrammierten Bewegungen
Position des Oberarms	 <p>-20 bis 20 Grad Schulter ist angehoben Arm wird gestützt oder die Person lehnt sich an</p>	 <p>20 bis 45 Grad Schulter ist angehoben Arm wird gestützt oder die Person lehnt sich an</p>
Position des Unterarms	 <p>60 bis 100 Grad</p>	 <p>Mehr als 100 oder weniger als 60 Grad</p>
Handgelenkposition		 <p>Handgelenk ist von der Mittellinie abgewinkelt</p>
Linker Arm		
Position des Oberarms		

	-20 bis 20 Grad Schulter ist angehoben Arm wird gestützt oder die Person lehnt sich an	20 bis 45 Grad Schulter ist angehoben Oberarm ist abduziert Arm wird gestützt oder die Person lehnt sich an
Position des Unterarms		 Arm bewegt sich über die Mittellinie des Körpers oder seitlich vom Körper weg
Handgelenkposition		
Handgelenkdrehung		
Nacken		
Nacken Position	 Nacken beugt sich	
Rumpf Position	Rumpf ist verdreht	-
Beine	Beine und Füße sind gestützt und ausbalanciert	-
Gesamtauswertung		
Rechter Oberarm	2	4
Linker Oberarm	2	3
Nacken	5	1
Tabelle C Rechts	4	3
Tabelle C Links	4	3

Beide Positionen liegen, wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, also im Bereich „investigate further – change may be needed“ also der Weiterverfolgung von Maßnahmen, um die Position zu verbessern. Stärkere Abweichungen als in der gezeigten Montage-Anwendung sind möglich, falls der digital ausgelegte Prozess noch stärker von der realen Durchführung abweicht. Diese Differenzen können dazu führen, dass der Arbeitsprozess körperlich anspruchsvoller ist als in der Vorauslegung antizipiert, wodurch die Werte für Erschöpfung und Überlastung erhöht werden.

Weitere Abweichungen, die sich ergaben, wurden durch das falsche Anlegen der Sensoren verursacht. Bei einer Verdrehung z.B. eines Unterarmsensors steht dann der Arm in der Simulation vom Körper weg und gibt nicht den tatsächlichen Bewegungsablauf wieder. Eine höhere Anzahl an Sensoren resultiert in einer besseren Auflösung zur Darstellung der Arbeitsabläufe und liefert somit genauere Ergebnisse.

Sicherheit in Bezug auf „Motion Tracking“: Laut Boschetti et al. 2023 ist es nicht immer klar, wie menschliche Bewegungen antizipiert werden können, was zu einer erheblichen Verschlechterung der allgemeinen Sicherheit von MRK Anwendungen führt. Die Erkennung menschlicher Positionen innerhalb des kollaborativen Bereichs ist hilfreich, um das Sicherheitsbedürfnis durch eine Kollisionsvermeidungs-Strategie zu erfüllen (Boschetti et al. 2023, S. 2). Die Einbindung der Ressource Mensch durch „Motion Capture“ erfüllt also einen wichtigen Teil der Sicherheitsstrategie der ausgelegten MRK Zelle. Über digitale Annäherungssensoren und Funktionsblöcke kann in der Simulationsumgebung eine Logik erstellt werden, um das virtuelle Robotermodell von den Bewegungen des virtuellen Menschmodells (offline oder mit eingespielten Daten erstellt) abhängig zu machen. Diese Logiken können, genau wie bei der Roboteranbindung, jedoch nur in der Simulation verwendet werden und nicht an den realen Roboter im physischen Umfeld kommuniziert werden.

Taktzeit in Bezug auf „Motion Tracking“: Um eine hohe Produktivität zu erreichen, sollte eine minimale Ausführungszeit das Ziel sein. In Anbetracht der Komplexität der Fertigungssysteme kann die Leistung industrieller Manipulatoren durch den Einsatz von Optimierungstechniken und Offline-Programmierverfahren genutzt werden, um ein Endprodukt mit hoher Qualität und niedrigen Kosten zu gewährleisten (Baizid et al. 2015, S. 1). Diese Aussage war der Ausgangspunkt der Überprüfung in Bezug auf den Faktor Effizienz. Ursprünglich war für diese Auswertung eine Gegenüberstellung der realen Durchführungszeit, mit der in der Simulation erfassten und offline erstellten, angedacht, es konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen der Dauer der Arbeitsabläufe aufgezeigt werden.

Wie zuvor beschrieben gibt es zwei Möglichkeiten das digitale Menschmodell zu steuern. Einerseits den beschriebenen „task simulation builder“ (Kapitel 5.4.1) in dem vorprogrammierte Bewegungen und Befehle erstellt werden, um das virtuelle Menschmodell anzuweisen und andererseits die Einspielung der aufgezeichneten Bewegungen

durch „motion capture“. Bei der Erstellung der Abläufe durch den TSB erfolgt beispielsweise der „Get_ Befehl“, bei der das Menschmodell ein Bauteil beschafft in einer fixierten Zeitspanne. In der Simulationssoftware sind also für Wegstrecken und Bewegungen unveränderliche Zeiten festgelegt. Bei der Einspielung von Bewegungsdaten entstehen je nach Importformat ein Bewegungsablauf als Pose oder aus einzelnen Frames, welche den tatsächlichen Zeitaufwand für Bewegungen wiedergeben. Eine Effizienzbetrachtung ist hier also darauf beschränkt, reale Zeitspannen, die auch realistisch zu gleichbleibenden qualitativen Montagen führen, zu ermitteln. Optimierungskriterien zur Effizienzsteigerung sollten wie in Lippi 2021 beschrieben verschiedene Faktoren berücksichtigt, wie etwa die Gesamt-Fertigstellungszeit, Ermüdung der Mitarbeiter*innen und spezifisches Fachwissen der Menschen (Lippi 2021, S. 1). Eine geringe Effizienzsteigerung des Prozessablaufs konnte durch „Motion Tracking“ erreicht werden, da die eingespielten Bewegungsdaten den Prozess genauer als die offline programmierten Abläufe darstellen. Dadurch wird die tatsächliche Durchführungszeit für einzelne Tätigkeiten genau erfasst, wobei eine Erhöhung oder Verringerung der Gesamtausführungszeit möglich ist, je nachdem, wie genau der Prozess zuvor offline modelliert wurde. Bei mehrfacher Wiederholung und Aufzeichnung eines Arbeitsschrittes im PT kann ein Mittelwert gefunden werden, welcher für den Menschen eine natürliche Geschwindigkeit darstellt. Die dadurch reduzierte physische Belastung führt, wie im Kapitel 2.5 „Weitere Aspekte der MRK“ beschrieben, zu geringeren Fehlerquoten und verbessert damit die Gesamteffizienz des Prozesses, da weniger Ausfälle und fehlerhafte Montagen zu erwarten sind.

6.3 Sicherheitsscanner

Die Implementierung und Konfiguration des Scanners und den dazugehörigen SPS wurde zuvor in Kapitel 5.3.2 beschrieben. In diesem Kapitel geht es um die Datenanbindung des Sicherheitssystems zu der Simulationsumgebung. Zuvor festgelegte Felder können nach der Erstellung in einem .XML-Format exportiert und anschließend in das Simulationsumfeld als Sensor importiert werden. Dazu wird der Überwachungsfall ausgewählt und exportiert. Der Import umfasst den Überwachungsfall, inklusive der zwei erstellten Felder. Die Konfigurierung des Sensors ermöglicht die Festlegung der Anzahl an erstellten Strahlen innerhalb des Feldes. Außerdem kann die Reichweite in der Einheit [mm], sowie der Abdeckungsbereich in [degree] eingestellt werden (Bild 34).

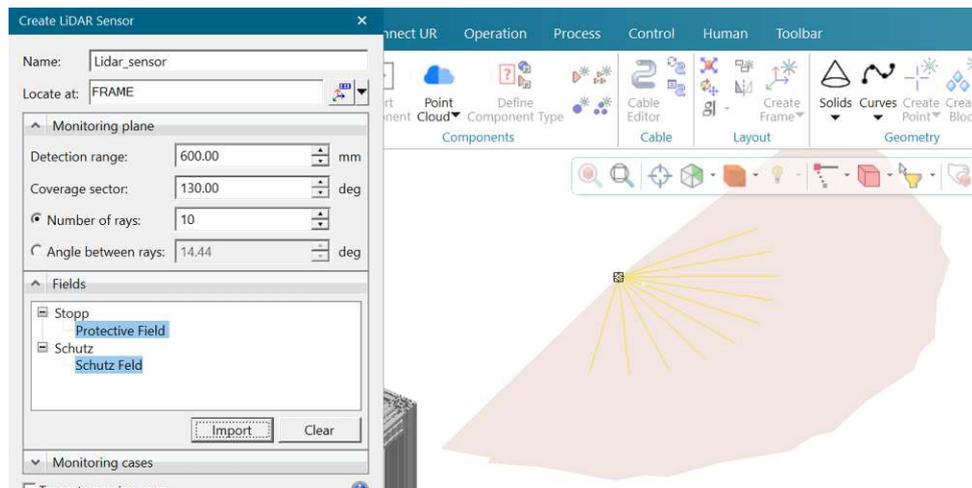


Bild 34: Erstellung des LIDAR Sensors auf Basis des zuvor erstellen Überwachungsfalls

Laut Herstellerwebsite, ist es auch möglich funktionelle Zusammenhänge zu den importierten Sensoren herzustellen (Tecnomatix 2022).

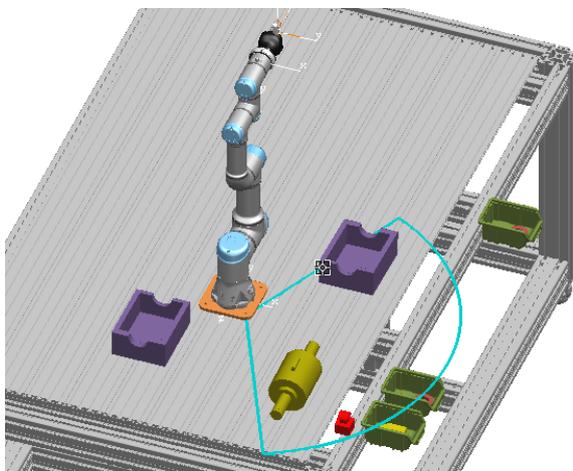


Bild 35: Erstellter LIDAR Sensor im Simulationsumfeld

Das importierte Feld kann nach der Erstellung, an die gleiche Position wie der reale Sensor bewegt werden (Bild 35). Über Funktionsblöcke und interne Funktion von der Simulationsumgebung ist es möglich eine Logik zu gestalten, welche z.B. darauf reagiert, wenn ein Mensch den Arbeitsbereich betritt und somit das Sicherheitsfeld durchbricht. Diese Logik ist jedoch nur im Simulationsumfeld erstellbar und kann nicht an den Sensor zurückgespielt werden.

Stattdessen gibt es die zuvor vorgestellten firmeneigenen Softwarepakete, welche die Konfiguration des Scanners und SPS ermöglichen. Der Datenstrom verläuft hier also vom digitalen Umfeld in der Software „Safety Designer“ an den realen Aufbau, kann allerdings auch in der virtuellen Umgebung integriert werden. Die Informationen des physisch implementierten Sicherheitssystems sind nicht in Echtzeit an die Simulation übertragbar.

Sicherheit in Bezug auf „Sicherheitsscanner“: Die Hauptgefahrenkategorie der MRK ist vor allem mechanischer Art, da bei der gemeinsamen Nutzung von Arbeitsbereichen und Aufgaben potenziell, nicht funktionaler und unerwünschter Kontakten zwischen Mensch und Robotersystem möglich ist (Gualtieri et al. 2020, S. 1). Die integrierte Sensorik und implementierte SPS-Logik im realen Umfeld ermöglicht die Reaktion auf das Annähern einer Bedienperson durch eine Reduktion der Geschwindigkeit oder einen Stopp des gesamten Systems. Wenn im PT ein Programm abläuft und das

Sicherheitsfeld des Scanners durchbrochen wird, z.B. durch Betreten des Stopp-Feldes, dann wird in beiden Umgebungen, physisch und virtuell, der Roboter gestoppt. Der Prozess wird fortgeführt, sobald im realen Umfeld der Befehl dazu erteilt wird. Die virtuell im Simulationsumfeld erstellte Sicherheitslogik kann nur für DT-Auslegungszwecke genutzt werden. Anschließend ist es notwendig, in den SICK firmeneigenen Anwendungen die Logik erneut zu konfigurieren. Die einzige Übertragungsrichtung, die sich als funktional erwiesen hat, ist der Not-Halt in der realen Umgebung, der auch in der Simulation stattfindet. Durch die einseitige Live-Verbindung des Roboters zum Simulationsumfeld ist nur eine Übertragung der physischen Bewegungsabläufe des Roboters in den virtuellen Raum möglich. Selbst wenn in der Simulation ein Stopp ausgelöst wird durch beispielsweise eine Kollision zwischen dem Menschen und dem Roboter, dann ist der Stoppbefehl aufgrund der Verbindung nicht auf den realen Roboter übertragbar.

Das Scanner-System erfüllt im realen Umfeld die Anforderungen an die Sicherheit laut DIN EN ISO 10218-1 2012, S. 21. Der Sicherheitshalt bestimmt, dass der Roboter anhält, wenn sich eine Person im Kollaborationsraum befindet. Der Roboter kann den Automatikbetrieb erst dann wiederaufnehmen, wenn die Person den Kollaborationsraum verlässt. Eine Geschwindigkeitsreduktion in Zusammenhang mit einem Not-Stopp ist auch zulässig. Sollte ein Ausfall der sicherheitsbewerteten Stoppfunktion erfolgen, ist es notwendig, dass ein sofortiger Stopp mit Unterbrechung der Energiezufuhr erfolgt. Um die Sicherheit durch den DT in Echtzeit zu gewährleisten, ist die Anpassungsfähigkeit des Roboters in Sekundenbruchteilen erforderlich, um sich den menschlichen Bewegungen anzupassen (Malik und Brem 2021, S. 12). Dieser Anforderung konnte der verwendete Sicherheitsscanner gerecht werden, da das System in kürzester Zeit eine Reaktion auf Störungen des festgelegten Sicherheitsradius ergreift. Der Scanner und die damit verbundene Steuereinheit sind direkt an der Roboter Kontrolleinheit angeschlossen und verursachen dadurch einen Sicherheitsstopp. Nach der Implementierung der Sicherheitsvorkehrungen erfolgt nun die Auswertung der aufgestellten Thesen in Bezug auf die Sicherheit:

Der virtuelle Roboter kopiert lediglich die Bewegungsmuster des physischen Roboters. Daher verringert der Roboter die Geschwindigkeit bei Durchbrechen des Warnfeldes und stoppt bei Betreten des Stopp-Feldes. Die programmierte Sicherheitslogik deckt diese beiden Szenarien wie in den Normen gefordert ab. Yi et al. 2022 argumentiert, dass eine Vorabausführung der Simulation einige Sekunden vor der realen Ausführungszeit der DT-Systeme notwendig ist für ein zuverlässiges und sicheres MRK-Montage-System. Dadurch ergab sich die Frage, ob eine zeiteffiziente Verbindung zwischen der Sensorik zur Simulation zurück zum realen Umfeld gegeben ist oder eine starke Zeitversetzung bemerkbar wird. Der Datenstrom von dem realen Umfeld auf das virtuelle findet ohne merkliche Verzögerung statt. Von der Simulation zurück auf das reale Umfeld ist der Datenstrom nicht integriert und somit auch nicht überprüfbar.

Bei kollaborativen Anwendungen ist es wichtig zu verstehen, wie die Interaktion zwischen verschiedenen Ressourcen die Gesamtleistung des Systems beeinträchtigen kann, da es aufgrund von Interferenzen zwischen den Ressourcen im Arbeitsumfeld zu einem Not-Stop kommen kann und sich somit die Effizienz des Systems verringert (Boschetti et al. 2023, S. 1). Diese Aussage hat sich im Verlauf der Montage bestätigt, da der Roboter bei sehr knappen Verfahrenswegen entlang des Wahrnehmungsfeldes des Scanners einen Not-Stop auslösen kann, sollte dieser in den Stopp-Bereich des Feldes eintreten. Für diese Art der Kollaboration ist der Scanner nur bedingt vorgesehen, da in den vom Hersteller angedachten Szenarien der Roboter und Mensch nicht statisch am selben Arbeitsplatz tätig sind, sondern beispielsweise fahrerlose Transportsysteme mit den Scannern versehen sind. Dabei sind die Sensoren spezialisiert auf die sichere Navigation und autonomen Transport kollaborierender Roboter (Safety laser scanners | nanoScan3 | SICK 2023). In diesem Szenario findet die zuvor beschriebene Koexistenz statt, bei der Mensch und Roboter schutzzaunlos Seite an Seite arbeiten, sich aber nicht denselben Arbeitsraum teilen (Simões et al. 2022, S. 2). In diesen Szenarien ist ein Eindringen des Menschen in den Arbeitsbereich des Roboters ein Grund für eine Geschwindigkeitsreduzierung oder einen Stopp des Roboters. Für die MRK ist daher darauf zu achten, dass der Roboter nicht selbst einen Stopp auslöst, da diese Situation unweigerlich eine komplette Rücksetzung des Prozesses erfordert.

Effizienz in Bezug auf „Sicherheitsscanner“: Die Gesamteffizienz und Produktivität des Systems kann dadurch erhöht werden, dass Notstopps vermieden werden, wenn sich die beiden Ressourcen, Mensch und Roboter, nur annähern, ohne Schwellwerte zu unterschreiten (Boschetti et al. 2023, S. 2). Bei der Auslegung der MRK Arbeitszelle sollte darauf geachtet werden, dass der Laserscanner den Roboter nicht als Obstruktion wahrnimmt. Dieser Fall kann eintreten, wenn die Roboterbahn durch ein Stoppfeld verläuft und einen Not-Stop auslöst. Hier können sich Probleme ergeben, in Bezug auf die Anwendbarkeit in kollaborativen Anwendungen, falls die Positionierung des Roboters an einer exakten Stelle fordert, welche ein Sicherheitsfeld durchbricht. Mit der Positionierung des Sensors unter dem Roboter wurde dieses potenzielle Problem für den vorliegenden Anwendungsfall gelöst. Die vom Hersteller gezeigten Anwendungsfälle beziehen sich nicht auf eine kollaborative Anwendung, stattdessen wird, sobald ein Mensch den Arbeitsbereich des Roboters betritt, eine Geschwindigkeitsreduktion oder ein Stopp durchgeführt. Dennoch konnte der Sensor sinnvoll integriert werden, indem bei der Auslegung der Sicherheitszonen, der Bewegungsablauf des Roboters berücksichtigt wurde, um kein Sicherheitsfeld bei den konzipierten Montageschritten zu durchbrechen.

6.4 Gesamtübersicht

Die Erkenntnisse der Kapitel 6.1, 6.2, 6.3 sind in der Tabelle 7 zusammengefasst. Dabei wird für jeden Aspekt des DT eine Datenrichtung und Beschreibung der Ausprägung dargelegt.

Tabelle 7: Ausprägungen der Technologien als DS/DT

Aspekt des DT	Datenrichtung (DS oder DT)	Anmerkungen
Roboteranbindung	DS	Die Übertragung in Echtzeit ist nur von dem physischen Roboter per LAN-Verbindung an den virtuellen Roboter möglich. Wegpunkte können in beiden Umgebungen erstellt und übertragen werden, wenn auch mit einem großen Aufwand.
Motion Tracking	DS	Da die Simulation den Menschen nicht direkt beeinflussen kann, ist die Ausprägung eines DS gegeben. Deshalb wurde die Integration der Bewegungsmuster in die Simulation in den Fokus genommen und als vorteilhaft für die Auslegung der Anwendung bestätigt.
Sicherheitsscanner	DS	In der Simulation können Sicherheitslogiken aufgebaut werden, diese sind jedoch nicht auf den PT übertragbar. Die Integration von Sensoren kann allerdings zu einer verbesserten Vorab-Auslegung des Ablaufs führen.
Sequenzieller Schalter	DS	Innerhalb des DT erfolgt bei der Berührung des virtuellen Schalters, durch das digitale Menschmodell, die Aktivierung des nächsten Roboterpfades, wodurch die Funktionalität des Schalters gegeben ist. Das Senden von Start-Signalen ist nicht von der Simulation an den physischen Roboter möglich. Lediglich bei der Programmierung am Teach-Pendant kann der Schalter im physischen Umfeld integriert werden.

Die Tabelle 8 zeigt in welche Richtung Daten übertragen werden und wie die Darstellung der einzelnen Technologien im PT sowie im DT erfolgt.

Tabelle 8: Darstellung der implementierten Technologien in Simulations- und physischem Umfeld

	Darstellung im PT	Richtung	Darstellung im DT
Roboter-Anbindung	Der Bewegungsablauf wird durch das „teach pendant“ programmiert.	→	Bewegungen des reellen Roboters können durch manuelle Übertragung in Kombination mit der LAN Verbindung eingespielt werden.
Motion-Tracking	Aufzeichnung der Bewegungsabläufe durch einen „motion capture suit“.	→	Übertragung der aufgezeichneten Bewegungsabläufe auf das digitale Menschmodell und Erstellung einer Bewegungssequenz durch den „task simulation builder“. Die erstellte Pose wird in den allgemeinen Montage-Ablauf eingegliedert und mit anderen Operationen verknüpft.
Sicherheits-scanner	Implementierung der Sicherheitssensorik, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben.	→	Einspielung der Sicherheitszonen durch die Erstellung von Sensoren im Softwareumfeld.
Sequenzieller Schalter	Der Taktschalter ist an den Schaltkasten des Universal Robot angeschlossen. Dadurch kann in der Programmierung durch das „Teach Pendant“ auf den Input des Schalters eingegangen werden. Beispielsweise, um den Start des nächsten Prozessschritts auszulösen.	→	Der Aufbau des Montage-Prozesses erfolgt durch die Erstellung einzelner Unteraufgaben. Die Unteraufgabe „touch_schalter“ bei der das virtuelle Modell den Taktschalter berührt, ist mit dem Start der nächsten Roboterbewegung verknüpft. Diese Bewegung kann auch durch die Einspielung der Bewegungsdaten aus dem PT erfolgen

7 Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit wurde beschrieben, wie die Auslegung einer MRK Arbeitszelle anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels, unter Einbeziehung des entworfenen DT-Konzepts, erfolgen kann. Dabei wurden gängige Richtlinien zur Auslegung der Anwendung berücksichtigt und gezeigt, welche Schritte und Iterationen zwischen der Simulation und dem realen Aufbau notwendig sind. Die Säulen Ergonomie, Sicherheit und Effizienz wurden zentral in der Betrachtung berücksichtigt, wie auch in dem entworfenen DT-Konzept dargestellt wurde. Durch die Integration von „motion capture“ und Safety-Sensorik konnten Datenströme generiert werden, welche sich für die Betrachtung der DT-Eignung eigneten. Zuletzt wurde dargelegt, dass der Begriff DT nur bedingt zutrifft auf die Integration der Datenströme. Einige Datenströme sind nur einseitig integriert, die Übertragung von der realen Umgebung zur Simulation ist mit gewissem Aufwand möglich, daher werden sie dem Begriff des DS gerecht. Die Einrichtung von Datenströmen zur Rückwärtsmanipulation zwischen Komponenten des DT und dem physischen Aufbau ist eine zentrale Herausforderung, da der DT nicht allein arbeiten kann und für die Interaktion mit Geräten auch Datenströme benötigt (Liu et al. 2022, S. 1–2). Eine Aussage, die sich bewahrheitet hat, ist, dass bereits in der Planungsphase von Produktionsabläufen DT-Richtlinien angewandt werden können und um die Integration der Anwendung zu beschleunigen.

7.1 Diskussion der Ergebnisse

Laut Liu et al. 2022 können die heute verwendeten DT-System für die MRK-Montage aufgrund der Verzögerung bei der Datenübertragung keine Echtzeitsteuerung bei der kollaborativen Montage unterstützen, wodurch eine Vorausführung der Abläufe notwendig ist (Liu et al. 2022, S. 3). Diese Aussage konnte anhand des Montage-Szenarios nicht eindeutig bestätigt oder verworfen werden, da die Datenübertragung nicht zweiseitig ausgeführt ist. Während der „Live Simulation“ werden die Bewegungen des realen Roboters in der Simulation in Echtzeit ausgeführt. Die Arbeit Liu et al. 2022 bezieht sich jedoch nicht nur auf die Ausführung eines Prozesses, sondern auf eine durch Funktionsblöcke gelenkte Logik, die für die MRK Anwendung etabliert wird. Die Möglichkeit durch die Simulationsumgebung virtuelle Abläufe im realen Umfeld ablaufen zu lassen, besteht nicht und unterstützt damit die Aussage der Autoren, dass eine Vorabausführung notwendig ist. Dieser Aspekt zeigt, dass es sich bei der Anbindung des Roboters um einen DS handelt, nicht um einen DT.

Das Layout und der generelle Arbeitsablauf sind wie gezeigt durchaus über eine DT Implementierung optimierbar, dennoch ist die Software zur Prozesssimulation zum derzeitigen Stand darauf ausgelegt, einen realen Aufbau zu digitalisieren oder eine Vorauslegung der Anwendung vorzunehmen. Der Faktor Mensch sollte dabei jeden-

falls Beachtung finden, wie im Kapitel 2.5, Unterpunkt „Auswirkungen der Kollaboration“ dargelegt wurde, da die Interaktionsart Kollaboration Auswirkungen auf den Menschen hat. Dabei sind die fünf meistuntersuchten menschenbezogene Faktoren Stress, Arbeitsbelastung, Akzeptanz, Vertrauen und Benutzerfreundlichkeit sind (Gualtieri et al. 2022, S. 1). Der Stress des Menschen erhöht sich bei der MRK, da die Angst vor Kollision mit dem Roboter besteht. Akzeptanz, Vertrauen und Benutzerfreundlichkeit des Menschen gegenüber dem System beeinflussen zusätzlich die Leistung der Arbeiter*innen (Gualtieri et al. 2022, S. 5). Diese humanen Faktoren sollen in der Konzipierung der MRK Applikation einbezogen werden. Auch deshalb ist für viele Unternehmen eine Teilautomatisierung mit Fokus auf die optimale Nutzung menschlicher Fähigkeiten vorteilhafter als eine Vollautomatisierung. Die Darstellung des Menschen in der Simulation, wurde durch die Technologie „Motion Capture“ bewerkstelligt, welche bei ausreichender Wiederholungshäufigkeit einer Arbeitsaufgabe das menschliche Verhalten ausreichend genau darstellt. Positive Erfahrungen mit MRK werden in Zukunft zu höherer Akzeptanz und einer breiteren Implementierung von kollaborativen Anwendungen führen. Auf diese Weise wird der Roboter zu einem Produktionsassistenten in der Fertigung und kann als solcher den Menschen von fordernden Arbeiten befreien (Papanastasiou et al. 2019, S. 2). Dazu ist es jedoch notwendig, die beschriebenen Datenströme vollständig zu integrieren. Derzeit erfolgt diese Integration nur einseitig und erlaubt die Titulierung als DS.

7.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

In dieser Arbeit wurde auf die spezifische Software „Siemens - Process Simulate Tecnomatix“ eingegangen und geprüft, eine zweiseitige Datenanbindung zur Ausprägung eines DT ermöglicht wird. Andere Simulationsprogramme wie beispielsweise „ema Work Designer“ hätten sich auch geeignet, da es sich um eine wissenschaftlich fundierte Software für die virtuelle Arbeitsplatzgestaltung und Prozessplanung von Produktionsabläufen handelt. Etwaige Abweichungen der beiden Programme wurden nicht untersucht. Laut Hersteller ermöglicht „ema Work Designer“ die ganzheitliche Planung, Bewertung und 3D-Simulation menschlicher Arbeit im Kontext der digitalen Fabrik, um punktuelle Absicherungen oder komplexe durchgängige Fertigungsszenarien mit menschlicher Beteiligung zu simulieren (ema Work Designer - Human Simulation, 3D-Produktionsplanung & virtuelle Ergonomie - ema 2023). Außerdem wurden in der vorliegenden Betrachtung, Auswirkungen auf den Faktor Mensch in der Auslegung berücksichtigt, um die kognitive und physische Arbeitslast nach gängigen Richtlinien zu minimieren, tatsächlich erhoben wurden die Belastungen jedoch nicht, da primär die Datenstrombetrachtung und Abweichungen der MRK-Auslegung von Relevanz waren. Das Modell könnte um eine Einbeziehung und Bewertung der Auswirkungen auf den Faktor Mensch erweitert werden.

In Bezug auf die Sicherheitssensorik wurde ein Laserscanner implementiert, hier sind auch andere Lösungen denkbar wie beispielsweise die Abstandsmessung zwischen Mensch und Roboter durch „motion tracking“. Der Bereich physische MRK auf der linken Seite des vorgestellten Modells in Kapitel 4.3, kann durch die in Kapitel 7.3 vorgestellten Technologien erweitert werden.

7.3 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Die Mensch-Roboter-Kollaboration wird die Grundlage der zukünftigen Roboterfertigung (Liu et al. 2020, S. 1). Durch die fortschreitende Digitalisierung und die damit verbundene Interaktion zwischen Mensch und Maschine ergeben sich eine Vielzahl von weiteren Implementierungsmöglichkeiten. So kann die Interaktion zwischen Mensch und Maschine sehr unterschiedliche Facetten annehmen, da mittlerweile die Robotersteuerung mit Joysticks, direkten Sprachdialog, Handgesten oder sogar über die Mimik des Gesichts möglich ist (Yushenko 2020, S. 10). All diese Interaktionsarten können potenziell über die drei Säulen des vorgestellten Modells erprobt werden. Derzeit ist die Einbindung dieser sehr neuen Technologien noch nicht möglich. Eine Gestensteuerung wäre beispielsweise durch „motion capture“ mit Erfassung der Finger durch zusätzlicher Sensoren möglich. Die zweiseitige Datenanbindung entwickelt sich stetig weiter, wie durch die Patch Notes des Softwareherstellers ersichtlich. Erst seit Beginn des Jahres sind LIDAR Sensor importierbar und mit Funktionsblöcken verknüpfbar. Diese Sensoren ermöglichen die Erfassung der Umwelt und somit die Digitalisierung dessen.

Auch auf den Roboter bezogene Ansätze können noch weiter entwickelt werden. Die möglichen Ansätze sind im DT Modell unter den drei Säulen der MRK Ergonomie, Sicherheit und Effizienz als erweiterte Intelligenz aufgeführt (Bild 36), da sie den Wegdegang des Forschungsgebiets nachhaltig prägen und verändern werden. Jahanmahin et al. 2022 argumentiert, dass in dem Forschungsgebiet noch einige Optimierungen getroffen werden können in Bezug auf: „einfachere Interaktion, Kontextbewusstsein, Mobilität, Sicherheit und Wirksamkeit der Automatisierung“. Außerdem soll der Faktor Vertrauen eine zentralere Rolle spielen, der bei allgemein gültigen Modellen Einzug findet (Jahanmahin et al. 2022, S. 7).

Die Fortschritte im Bereich der erweiterten Intelligenz beider Faktoren Mensch und Roboter erweitern die drei Grundsäulen des Ursprungsmodell in sehr unterschiedlichen Facetten und bereichern die gesamte Basis der MRK Anwendungen. Das Bild 36 hat zur Aussage, dass das zuvor vorgestellt Modell des DT/DS (Bild 8) sich durch Fortschritte des Forschungsgebiets MRK verändern. Die Säulen Ergonomie, Sicherheit und Effizienz werden durch neue Ansätze ergänzt und erweitert:

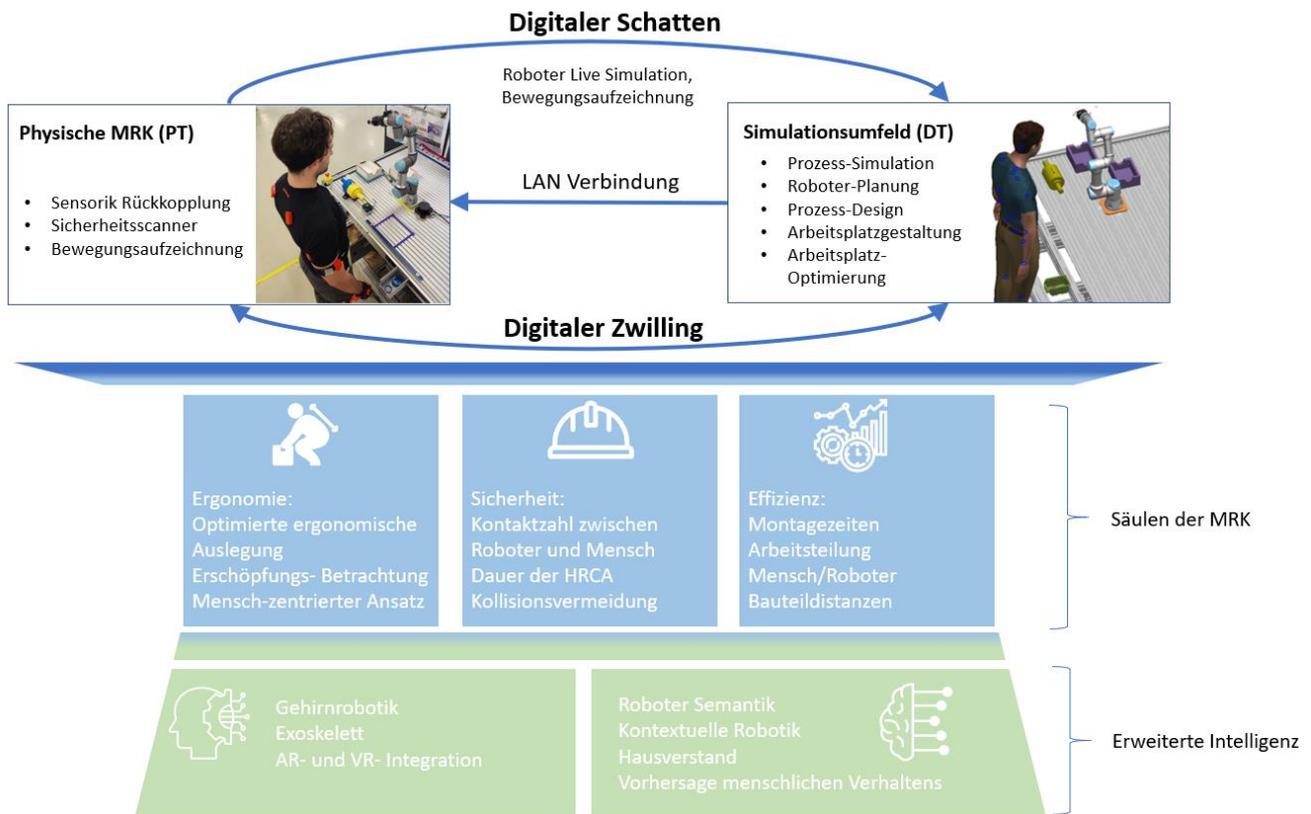


Bild 36: Digital Twin Modell inklusive der Säulen der MRK und erweiterter Intelligenz

Einige der Begriffe in der Sektion erweiterte Intelligenz, werden kurz dargelegt, da diese als nächste mögliche Schritte der Weiterentwicklung herangezogen werden können. Die hier angeführten Technologien sind selbst noch in einer frühen Entwicklungsphase und daher noch nicht in den Simulationsraum integriert. Wie viele dieser Weiterentwicklungen in der Interaktion sich überhaupt digital darstellen lassen ist nicht Teil dieser Arbeit.

Kontextuelle Robotik: Die kontextabhängige Robotik baut auf der Modellierung des menschlichen Verhaltens in der MRK auf. Das menschliche Verhalten folgt trotz seiner Komplexität strukturierten Prinzipien. Ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Konzepte des menschlichen Verhaltens in einem industriellen Umfeld kann helfen, zuverlässigere und effektivere kollaborative Roboterumgebungen zu gestalten (Jahanmahin et al. 2022, S. 1).

Hausverstand: Laut Conti et al. 2022, werden Roboter zukünftig das Wissen, welches derzeit als „Hausverstand“ (common-sense) gewertet wird, nutzen, um effektive Entscheidungen zu treffen, wie beispielsweise das nächste Bauteil auszuwählen und zu bewegen. Roboter werden automatisch schwerere Teile bevorzugen und dem Menschen leichtere Teile zuweisen. Der Mensch kann sich unter Einfluss schwerer Teile langsamer bewegen und senkt somit die Effizienz des Montageprozesses. Der Roboterarm bewegt sich in Zukunft außerdem vorrangig zu Teilen, die weiter entfernt sind,

damit die ergonomische Last des Menschen reduziert wird. Die Gefahr, die von Teilen ausgeht, wird ebenfalls attestiert, um gefährliche Teile sicher zu manipulieren, sowie vorrangig stabile Teile zu transportieren (Conti et al. 2022, S. 5). Diese „Commonsense knowledge“ (CSK) stellt das Verständnis von Objekten, ihren Eigenschaften und wie sie sich zueinander verhalten und miteinander interagieren dar und ist wichtig für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit (Conti et al. 2022, S. 1).

Roboter Semantik: Eine Form der prädiktiven Analytik ist die „Robot Semantics“ bei der Roboter die Bedeutung der Welt interpretieren. Insbesondere geht es bei der Semantik darum, dass die Roboter die Bedeutung von Orten, Objekten und anderen Entitäten verstehen. Die beiden wichtigsten Arten der Semantik sind die vorgegebene Semantik, bei der die Roboter vor dem Einsatz mit Informationen vorprogrammiert werden und die erlernte Semantik, bei der die Roboter die Informationen vor oder während des Einsatzes lernen (Conti et al. 2022, S. 6).

Exoskelette: Ein Exoskelett, dient als tragbare, an der Mitarbeiter*in angebrachte Unterstützung zur Erhöhung der Tragfähigkeit (Wang 2022, S. 15). Menschen könnten zukünftig zunehmend durch Exoskelette mit aktiver oder passiver Betätigung unterstützt werden. Dadurch wäre es möglich über körperliche Grenzen hinaus zu gehen, bei gleichbleibender Arbeitsgenauigkeit und Qualität (Wang 2022, S. 1).

AR und VR Integration: Dieser Ansatz beschreibt die Vermischung der realen und virtuellen Welt beispielsweise über die Verwendung von AR-Implementierungen, wodurch eine Erweiterung der menschlichen Fähigkeiten erfolgt (Wang 2022, S. 1). Das AR-System ist ein Handgerät und kann beispielsweise virtuelle Animation der Roboterbewegungen über den Roboter projizieren, um der Mitarbeiter*in zu vermitteln, wie der Roboter sich bewegen wird. Die Verwendung moderner Technologie wie AR kann dazu beitragen, die menschlich-robotische Kooperation zu verbessern (Conti et al. 2022, S. 3). Die virtuelle Realität (VR) erlaubt die Interaktion der Bedienperson mit einer interaktiven Schnittstelle. Dabei werden realistische Bilder durch Computerberechnungen erstellt. Diese werden als Mittel zur Verbesserung der Benutzererfahrung genutzt, können durch die grafische Simulation aber auch Roboterbefehlen erzeugen. Anwendungen für heute verwendeten VR-Systeme liegen im Bereich der Industrie, Medizin, Bildung und militärischen Anwendungen eingesetzt werden (Yushenko 2020, S. 7).

Gehirnrobotik: Menschlichen Gehirnwellen könnten unter dem Begriff der „Brain Robotics“ zur Steuerung von Robotern in der MRK-Montage genutzt werden. Die menschlichen Gedanken und Steuerbefehle werden nach der Verarbeitung an einen Roboter-Controller für die gewünschte Aktionen gesendet. Der Signalverarbeitungsprozess klassifiziert die Gehirnwellenmuster und formuliert einen Steuerbefehl. Dieser Ansatz erweitert die menschenzentrierte Arbeitsweise und reichert die Bereiche Spra-

che/Gestik-Kommunikation und Steuerung weiter an (Wang 2022, S. 1–3). Dieser Ansatz passt gut zum Konzept der Menschenzentriertheit und ergänzt andere Modalitäten wie Sprache und Gesten für die Mensch-Roboter Kommunikation und Robotersteuerung (Wang 2022, S. 3).

Diese Arbeit zeigt, dass selbst aktuelle Technologien (Motion Capture, Sicherheitssensorik) nicht vollständig in das digitale Umfeld integrierbar sind. Die gegenseitige Beeinflussung von PT und DT, um die Klassifikation als vollständig implementierten digitalen Zwilling gerecht zu werden, hätte zahlreiche Vorteile in den Bereichen der Vorauslegung, Sicherheit und Effizienz. Eine Betrachtung des Arbeitsablaufs, eine Montagetätigkeit hat sich als sinnvolle Anwendung erwiesen, da die Bereiche Effizienz, Sicherheit und Ergonomie des DT-Konzepts betrachtet werden konnten. Die Nutzung eines digitalen Umfelds ist wie in der Arbeit beschrieben sinnvoll, um MRK Anwendungen vorzulegen, optimieren und zu iterieren. Eine Implementierung der in Kapitel 7.3 beschriebenen Weiterentwicklungen könnte die gesamte Funktionalität von DT im Zusammenhang mit MRK verbessern. Durch die Darstellung der Ressource Mensch in Echtzeit könnte beispielsweise eine bessere Integration im Simulationsumfeld erfolgen. Eine beidseitige Darstellung des Sicherheitsscanner würde die Sicherheit insofern erhöhen, als in der Vorauslegung vor der physischen Umsetzung bereits alle sicherheitsrelevanten Szenarien überprüfbar sind. Eine detailliertere Darstellung der am Montageprozess beteiligten Ressourcen verbessert den Gesamtprozess des Montageprozesses, daher hat die weitere Entwicklung der Kombination DT und MRK enormes Potenzial für weitere Verbesserungen der kollaborativen Zusammenarbeit.

8 Abbildungsverzeichnis

<i>Bild 1: Data Flow in Digital Twin and Shadow vgl. (Wang et al. 2022b, S. 5)</i>	7
<i>Bild 2: MRK in vier kooperative Betriebsarten vgl. Galin et al. 2020, S. 5</i>	13
<i>Bild 3: Filterungsverlauf der recherchierten Werke</i>	17
<i>Bild 4: Publikationstrend 2019-2022</i>	18
<i>Bild 5: Schnittmenge der Themengebiete DT und MRK</i>	18
<i>Bild 6: : Beschreibung der Kollaborationsarten nach vgl. Jahanmahin et al. 2022, S. 2</i>	23
<i>Bild 7: Interessensfelder der MRK vgl. (Gualtieri et al. 2020, S. 2).....</i>	25
<i>Bild 8: DT Modell zur Darstellung der Datenflüsse, erweitert durch die Säulen der MRK.....</i>	26
<i>Bild 9: Produktaufbau und Baugruppen des Elektromotors</i>	29
<i>Bild 10: Untere Hälfte des Elektromotor inklusive Rotor</i>	30
<i>Bild 11: Explosionszeichnung Elektromotor</i>	30
<i>Bild 12: Rotorausführung fertig montiert</i>	30
<i>Bild 13: Rotormontage als Explosionsdarstellung</i>	30
<i>Bild 14: Vorbereitung für den Druck - Unteres Gehäuse & Rotor</i>	31
<i>Bild 15: Vorbereitungen für physische Implementierung - Hakenmontage.....</i>	31
<i>Bild 16: Zeitlicher Prozessablauf – Montageprozess Elektromotor.....</i>	33
<i>Bild 17: Bauteilanordnung der MRK Anwendung</i>	37
<i>Bild 18: Erreichbarkeitsanalyse (Swept-Volumen des Roboters und menschliches Bewegungsfeld.....</i>	37
<i>Bild 19: Arbeitsplatzaufbau im DT.....</i>	38
<i>Bild 20: Arbeitsplatzaufbau des physischer Zwillings.....</i>	38
<i>Bild 21: Darstellung unerwünschter Geometrie und beispielhafte ergonomische Auswertung – Arbeitsschritt Get_Lager_rechts - RULA</i>	39
<i>Bild 22: Beispielhafte ergonomische Auswertung – Arbeitsschritt Lagermontage - RULA</i>	39
<i>Bild 23: Ergonomische Auswertung - Szenario ohne MRK mittels RULA</i>	40
<i>Bild 24: SPS Logik Sicherheitsscanner</i>	41
<i>Bild 25: Verkabelung der FLEXI soft XTIO Einheit</i>	42
<i>Bild 26: Überwachungsfalltabelle.....</i>	43
<i>Bild 27: Motion Capture Kalibrierung</i>	45
<i>Bild 28: Task Simulation Builder (TSB).....</i>	45
<i>Bild 29: Wegpunkte des Arbeitsschritts „Unteres Gehäuse“</i>	48
<i>Bild 30: Gelenkwinkel in der definierten Home Position</i>	48
<i>Bild 31: Erreichen desselben Raumpunkts durch unterschiedliche Roboterpositionierung ...</i>	48
<i>Bild 32: Angebrachte Sensoren physisch und nach Übertragung an die Simulation</i>	49
<i>Bild 33: Vergleich eingespielter Bewegungsdaten (links) und programmierter Bewegungsablauf (rechts)</i>	50
<i>Bild 34: Erstellung des LIDAR Sensors auf Basis des zuvor erstellen Überwachungsfalls ...</i>	55
<i>Bild 35: Erstellter LIDAR Sensor im Simulationsumfeld.....</i>	55
<i>Bild 36: Digital Twin Modell inklusive der Säulen der MRK und erweiterter Intelligenz.....</i>	63

9 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Auswirkungen verschiedener Faktoren auf den Menschen vgl. (Simone et al. 2022, S. 7)</i>	14
<i>Tabelle 2: Suchstrategie der Literaturrecherche</i>	16
<i>Tabelle 3: Darlegung der Relevanz gewählter Keywords</i>	17
<i>Tabelle 4: Beschreibung der Kollaborationsarten nach Jahanmahin et al. 2022, S. 1</i>	23
<i>Tabelle 5: Prozessablauf und Aufteilung zwischen Mensch und Roboter</i>	32
<i>Tabelle 6: Auswertung RULA und vergleich der Körperdaten</i>	51
<i>Tabelle 7: Ausprägungen der Technologien als DS/DT</i>	58
<i>Tabelle 8: Darstellung der implementierten Technologien in Simulations- und physischem Umfeld</i>	59

10 Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
d.h.	das heißt
DT	Digital Twin
DS	Digital Shadow
MRI	Mensch Robot Interaktion
MRK	Mensch Roboter Kollaboration
OLP	Offline Programming
PT	Physical Twin
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TSB	Task Simulation Builder
TX	Siemens - Process Simulate Tecnomatix
usw.	und so weiter
VR	Virtual Reality
vgl.	vergleiche
z.B.	Zum Beispiel

11 Literaturverzeichnis

- Baizid, Khelifa; Yousnadj, Ali; Meddahi, Amal; Chellali, Ryad; Iqbal, Jamshed (2015): Time scheduling and optimization of industrial robotized tasks based on genetic algorithms. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 34, S. 140–150. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.003.
- Bergs, Thomas; Gierlings, Sascha; Auerbach, Thomas; Klink, Andreas; Schraknepper, Daniel; Augspurger, Thorsten (2021): The Concept of Digital Twin and Digital Shadow in Manufacturing. In: *Procedia CIRP* 101, S. 81–84. DOI: 10.1016/j.procir.2021.02.010.
- Bilberg; Malik, Ali Ahmad (2019): Digital twin driven human–robot collaborative assembly. In: *CIRP Annals* 68 (1), S. 499–502. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.011.
- Boschetti, Giovanni; Faccio, Maurizio; Granata, Irene; Minto, Riccardo (2023): 3D collision avoidance strategy and performance evaluation for human–robot collaborative systems. In: *Computers & Industrial Engineering* 179, S. 109225. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109225.
- Bullinger-Hoffmann, Angelika C.; Mühlstedt, Jens (Hg.) (2016): Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.
- Cimino, Antonio; Gnoni, Maria Grazia; Longo, Francesco; La Rosa, Angelica (2023): Digital Twin (DT) based methodology to support effective design of industrial production lines. In: *Procedia Computer Science* 217, S. 1896–1907. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.390.
- Conti, Christopher J.; Varde, Aparna S.; Wang, Weitian (2022): Human-Robot Collaboration With Commonsense Reasoning in Smart Manufacturing Contexts. In: *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.* 19 (3), S. 1784–1797. DOI: 10.1109/TASE.2022.3159595.
- de Gea Fernández, José; Mronga, Dennis; Günther, Martin; Knobloch, Tobias; Wirkus, Malte; Schröer, Martin et al. (2017): Multimodal sensor-based whole-body control for human–robot collaboration in industrial settings. In: *Robotics and Autonomous Systems* 94, S. 102–119. DOI: 10.1016/j.robot.2017.04.007.
- DIN EN ISO 10218-1. Industrieroboter - Sicherheitanforderungen - Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2011 (2012).
- DIN EN ISO 10218-2. Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-2:2011 (2012).
- ema Work Designer - Human Simulation, 3D-Produktionsplanung & virtuelle Ergonomie - ema (2023). Online verfügbar unter <https://imk-ema.com/ema-workdesigner.html>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2023, zuletzt geprüft am 04.07.2023.

- Fischer et al. (2023): 1158_Different approaches of conducting the ergonomic assessment worksheet_FischerC_RupprechtP_SchlundS 2023.
- Flacco, Fabrizio; Kroeger, Torsten; Luca, Alessandro de; Khatib, Oussama (2015): A Depth Space Approach for Evaluating Distance to Objects. In: *J Intell Robot Syst* 80 (S1), S. 7–22. DOI: 10.1007/s10846-014-0146-2.
- Galin et al. (Hg.) (2020): Robotics. Human-robot interaction efficiency and human-robot collaboration. Robotics: Industry 4.0 issues & new intelligent control paradigms. Cham: Springer (Studies in Systems, Decision and Control, 272).
- Ganglbauer, M.; Ikeda, M.; Plasch, M.; Pichler, A. (2020): Human in the loop online estimation of robotic speed limits for safe human robot collaboration. In: *Procedia Manufacturing* 51, S. 88–94. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.014.
- Giacomo, Palmieri; Cecilia, Scoccia; Daniele, Costa; Massimo, Callegari (Hg.) (2022): Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2022. 1st ed. 2022. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer (Mechanisms and Machine Science, 120).
- Gualtieri, Luca; Fraboni, Federico; Marchi, Matteo de; Rauch, Erwin (2022): Development and evaluation of design guidelines for cognitive ergonomics in human-robot collaborative assembly systems. In: *Applied ergonomics* 104, S. 103807. DOI: 10.1016/j.apergo.2022.103807.
- Gualtieri, Luca; Rauch, Erwin; Vidoni, Renato; Matt, Dominik T. (2020): Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design Guidelines and Requirements. In: *Procedia CIRP* 91, S. 367–372. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.188.
- Hevner, Alan; Chatterjee, Samir (2010): Design Science Research in Information Systems. In: *Design research in information systems: theory and practice*, S. 9–22.
- ISO/TS 15066: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016) (2016).
- Jahanmahin, Roohollah; Masoud, Sara; Rickli, Jeremy; Djuric, Ana (2022): Human-robot interactions in manufacturing: A survey of human behavior modeling. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 78, S. 102404. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102404.
- Kanazawa, Akira; Kinugawa, Jun; Kosuge, Kazuhiro (2019): Adaptive Motion Planning for a Collaborative Robot Based on Prediction Uncertainty to Enhance Human Safety and Work Efficiency. In: *IEEE Trans. Robot.* 35 (4), S. 817–832. DOI: 10.1109/TRO.2019.2911800.
- Langlotz, Pascal; Klar, Matthias; Yi, Li; Hussong, Marco; Sousa, Fábio J.P.; Aurich, Jan C. (2022): Concept of hybrid modeled digital twins and its application for an

- energy management of manufacturing systems. In: *Procedia CIRP* 112, S. 549–554. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.098.
- Li, Chengxi; Zheng, Pai; Li, Shufei; Pang, Yatming; Lee, Carman K.M. (2022): AR-assisted digital twin-enabled robot collaborative manufacturing system with human-in-the-loop. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 76, S. 102321. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102321.
- Li, Chengxi; Zheng, Pai; Yin, Yue; Pang, Yat Ming; Huo, Shengzeng (2023): An AR-assisted Deep Reinforcement Learning-based approach towards mutual-cognitive safe human-robot interaction. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 80, S. 102471. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102471.
- Lippi 2021: A Mixed-Integer Linear Programming Formulation for Human Multi-Robot Task Allocation. In: 2021 30th IEEE International Conference, S. 1017–1023.
- Liu, Sichao; Wang, Xi Vincent; Wang, Lihui (2022): Digital twin-enabled advance execution for human-robot collaborative assembly. In: *CIRP Annals* 71 (1), S. 25–28. DOI: 10.1016/j.cirp.2022.03.024.
- Liu, Zhihao; Wang, Xinran; Cai, Yijie; Xu, Wenjun; Liu, Quan; Zhou, Zude; Pham, Duc Truong (2020): Dynamic risk assessment and active response strategy for industrial human-robot collaboration. In: *Computers & Industrial Engineering* 141, S. 106302. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106302.
- Löcklin, Andreas; Jung, Tobias; Jazdi, Nasser; Ruppert, Tamás; Weyrich, Michael (2021): Architecture of a Human-Digital Twin as Common Interface for Operator 4.0 Applications. In: *Procedia CIRP* 104, S. 458–463. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.077.
- Malik, Ali Ahmad; Bilberg, Arne (2019): Human centered Lean automation in assembly. In: *Procedia CIRP* 81, S. 659–664. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.172.
- Malik, Ali Ahmad; Brem, Alexander (2021): Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 68, S. 102092. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102092.
- MVN Awinda | Movella.com (2023). Online verfügbar unter <https://www.movella.com/products/motion-capture/xsens-mvn-awinda>, zuletzt aktualisiert am 02.07.2023, zuletzt geprüft am 03.07.2023.
- Papanastasiou, Stergios; Kousi, Niki; Karagiannis, Panagiotis; Gkournelos, Christos; Papavasileiou, Apostolis; Dimoulas, Konstantinos et al. (2019): Towards seamless human robot collaboration: integrating multimodal interaction. In: *Int J Adv Manuf Technol* 105 (9), S. 3881–3897. DOI: 10.1007/s00170-019-03790-3.
- Product portfolio | SICK (2023). Online verfügbar unter <https://www.sick.com/pl/en/c/products>, zuletzt aktualisiert am 03.07.2023, zuletzt geprüft am 03.07.2023.

- Qibing; Zhang, Rong; Sun, Xuemin; Lu, Yuqian; Bao, Jinsong (2021): A digital twin-driven human-robot collaborative assembly approach in the wake of COVID-19. In: *Journal of Manufacturing Systems* 60, S. 837–851. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.02.011.
- Raza, Mohsin; Malik, Ali Ahmad; Bilberg, Arne (2022): Virtual Modeling as a Safety Assessment Tool for a Collaborative Robot (Cobot) Work Cell Based on ISO/TS 15066:2016. In: Ann-Louise Andersen, Rasmus Andersen, Thomas Ditlev Bru-noe, Maria Støttrup Schioenning Larsen, Kjeld Nielsen, Alessia Napoleone und Stefan Kjeldgaard (Hg.): *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 233–241.
- Ren, Weibo; Yang, Xiaonan; Yan, Yan; Hu, Yaoguang; Zhang, Lixiang (2021): A digital twin-based frame work for task planning and robot programming in HRC. In: *Procedia CIRP* 104, S. 370–375. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.062.
- Robotiq (2023): Hand-E Adaptive Gripper - Robotiq. Online verfügbar unter <https://robotiq.com/products/hand-e-adaptive-robot-gripper>, zuletzt aktualisiert am 03.07.2023, zuletzt geprüft am 03.07.2023.
- Rückert, Patrick; Adam, Jannes; Papenberg, Björn; Paulus, Henning; Tracht, Kirsten (2018): Calibration of a modular assembly system for personalized and adaptive human robot collaboration. In: *Procedia CIRP* 76, S. 199–204. DOI: 10.1016/j.procir.2018.01.041.
- Safety laser scanners | nanoScan3 | SICK (2023). Online verfügbar unter <https://www.sick.com/us/en/safety-laser-scanners/safety-laser-scanners/nano-scan3/c/g507056>, zuletzt aktualisiert am 03.07.2023, zuletzt geprüft am 03.07.2023.
- Schleich, Benjamin; Anwer, Nabil; Mathieu, Luc; Wartzack, Sandro (2017): Shaping the digital twin for design and production engineering. In: *CIRP Annals* 66 (1), S. 141–144. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- Scoccia, Cecilia; Ciccarelli, Marianna; Palmieri, Giacomo; Callegari, Massimo: Design of a Human-Robot Collaborative System: Methodology and Case Study. In: Volume 7: 17th IEEE/ASME International 2021.
- Simões, Ana Correia; Pinto, Ana; Santos, Joana; Pinheiro, Sofia; Romero, David (2022): Designing human-robot collaboration (HRC) workspaces in industrial settings: A systematic literature review. In: *Journal of Manufacturing Systems* 62, S. 28–43. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.11.007.
- Simone, Valentina de; Di Pasquale, Valentina; Giubileo, Valeria; Miranda, Salvatore (2022): Human-Robot Collaboration: an analysis of worker’s performance. In: *Procedia Computer Science* 200, S. 1540–1549. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.355.

- Tecnomatix (2022): What's new in Tecnomatix? (January 2022) - Tecnomatix. Online verfügbar unter <https://blogs.sw.siemens.com/tecnomatix/whats-new-in-tecnomatix-january-2022/>, zuletzt aktualisiert am 29.07.2022, zuletzt geprüft am 03.07.2023.
- Wang, Lihui (2022): A futuristic perspective on human-centric assembly. In: *Journal of Manufacturing Systems* 62, S. 199–201. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.11.001.
- Wang, Lihui; Liu, Sichao; Liu, Hongyi; Wang, Xi Vincent (2020): Overview of Human-Robot Collaboration in Manufacturing. In: Lihui Wang, Vidosav D. Majstorovic, Dimitris Mourtzis, Emanuele Carpanzano, Giovanni Moroni und Luigi Maria Galantucci (Hg.): *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 15–58.
- Wang, Xiaodan; Setchi, Rossitza; Mohammed, Abdullah (2022a): Modelling Uncertainties in Human-Robot Industrial Collaborations. In: *Procedia Computer Science* 207, S. 3652–3661. DOI: 10.1016/j.procs.2022.09.425.
- Wang, Yichen; Feng, Jindan; Liu, Jinshan; Liu, Xiaojun; Wang, Junfeng (2021): Case Study of Digital Twin-based Human-robot Collaborative Work-cell for Satellite Assembly. In: *2021 IEEE International Conference*, S. 698–702.
- Wang, Yujie; Kang, Xu; Chen, Zonghai (2022b): A Survey of Digital Twin Techniques in Smart Manufacturing and Management of Energy Applications. In: *Green Energy and Intelligent Transportation* 1 (2), S. 100014. DOI: 10.1016/j.geits.2022.100014.
- Yi, Shuming; Liu, Sichao; Xu, Xiaohu; Wang, Xi Vincent; Yan, Sijie; Wang, Lihui (2022): A vision-based human-robot collaborative system for digital twin. In: *Procedia CIRP* 107, S. 552–557. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.024.
- Yichen Wang; Jindan Feng; Jinshan Liu; Xiaojun Liu; Junfeng Wang (2022): *Digital Twin-based Design and Operation of Human-Robot Collaborative Assembly 2022*.
- Yushenko (2020): *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. Cham: Springer International Publishing (272).