



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Mechatronische Umsetzung und Evaluierung einer adaptiven Höhen- und Winkelverstellung anhand eines 3D-Druck-Modells einer Fan-Cowl-Montagestation

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)

**Dr. techn. Patrick Rupprecht MSc MSc MA**

(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

**Daniel Simma**

01425632 (UE 066 482)

████████████████████

████████

Wien, im April 2022

*Daniel Simma*

\_\_\_\_\_  
Vorname Nachname



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 April 2022

*Daniel Simma*

---

Vorname Nachname

## Danksagung

Hier möchte ich an alle Personen, die mich bei der Umsetzung dieser Diplomarbeit unterstützt haben, meinen Dank aussprechen.

Ich möchte mich zuerst herzlich bei meinen Betreuern Prof. Sebastian Schlund und Patrick Rupprecht vom Institut für Managementwissenschaften für ihre Betreuung bedanken. Bedanken möchte ich mich für die konstruktive Kritik und für die geduldige und verständnisvolle Unterstützung, welche diese Arbeit in der Form erst ermöglicht haben. Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts, die mir meine Bauteile 3D-gedruckt und die benötigten Komponenten bestellt haben, bedanken.

Zusätzlich gilt mein Dank meinen Freunden, die mir mit ihrem Rat zur Seite gestanden sind. Insbesondere möchte ich mich bei meinem Mitbewohner Jonas Moosbrugger bedanken, der durch seinen Rat und das zur Verfügung stellen des benötigten Equipments den Bau des Modells in dieser Form ermöglicht hat. Außerdem möchte ich mich bei Richard Beer und Clemens Nigsch für die Korrekturen der Arbeit bedanken.

Zum Schluss möchte ich mich bei meinen Eltern Markus Simma und Andrea Greber bedanken, die durch ihre Unterstützung das Studium in der Form möglich gemacht haben und bei Sorgen oder Problemen stets ein Rückhalt für mich waren.

## Kurzfassung

Montagearbeitsplätze in der Baustellenmontage werden, damit sie für einen großen Anteil an Menschen passen, nach der Perzentil Methode gestaltet. Diese Methode hat jedoch zum Nachteil, dass die Arbeitsplätze auf einen „durchschnittlichen“ Menschen ausgelegt sind, der in der Realität nicht existiert. Somit ist bei Arbeiten auf den Baustellenmontagearbeitsplätzen mit einem verstärkten Risiko einer Erkrankung im Muskel-Skelett-System zu rechnen.

Durch die aktuelle industrielle Revolution und den damit einhergehenden Innovationen werden neue Möglichkeiten eröffnet, die diesem Problem entgegenwirken. Die Integration dieser innovativen Technologien kann als Grundlage für die Montagestation 4.0 gesehen werden. Diese neue Generation einer Montagestation ist durch die Hauptmerkmale von Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Selbstanpassungsfähigkeit gekennzeichnet. Die selbstkonfigurierende Montagestation passt die Abmessungen der Arbeitsfläche adaptiv an das Montageprodukt und die Mitarbeiter\*innen an.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Themengebiet der selbstkonfigurierenden Montagestation. Hierfür wird in dieser Arbeit ein Modell eines Baustellenmontagearbeitsplatzes für ein „Fan Cowl Tool“ erstellt, welches eine adaptive Höhen- und Winkelverstellung der Arbeitsfläche beinhaltet. Zur Erstellung dieses Modells werden basierend auf der Literatur die beinhaltenden Themen untersucht. Anschließend wird zunächst ein geeigneter Maßstab ermittelt und daraufhin wird dieses Modell konstruktiv und mechatronisch umgesetzt. Das Modell passt die Arbeitshöhe und den Arbeitswinkel automatisch an die Körpergröße der Mitarbeiter\*innen und den aktuellen Arbeitsschritt an. Für die Informationsaufnahme der Körpergröße werden zwei Interaktionsvarianten integriert. In der ersten Variante wird eine adaptive Interaktion simuliert und in der zweiten Variante wird die Informationsaufnahme durch eine grafische Benutzeroberfläche ermöglicht. Das Modell mit den beiden Interaktionsvarianten wird mit einer dem Maßstab entsprechenden Figur getestet und mittels der zuvor definierten Bewertungskriterien evaluiert. Anschließend werden die durch die Recherche und den durchgeführten Versuch ermittelten Vor- und Nachteile der Evaluation mittels eines Modells zusammengefasst dargelegt.

## Abstract

Assembly workplaces in construction site assembly are designed according to the percentile method so that they fit the largest possible number of people. However, this method has the disadvantage that the jobs are designed for an "average" person who does not exist in reality. Therefore, when working at the construction site assembly workstations, there is an increased risk of a disease in the musculoskeletal system.

The current industrial revolution and the associated innovations are opening up new possibilities that counteract this problem. The integration of these innovative technologies can be seen as the basis for the assembly station 4.0. This new generation of assembly station is characterized by the main features of flexibility, reconfigurability and self-adaptability. The self-configuring assembly station adapts the dimensions of the work surface to the assembly product and the employees.

This work deals with the topic of the self-configuring assembly station. For this purpose, a model of a construction site assembly workstation for a "Fan Cowl Tool" is created, which includes an adaptive height and angle adjustment of the work surface. To create this model, the topics included are examined based on the literature. A suitable model scale is then first determined and then this model is implemented constructively and mechatronically. The model automatically adjusts the working height and the working angle to the height of the employee and the current work step. Two interaction variants are integrated for the information acquisition of body size. In the first variant, an adaptive interaction is simulated and in the second variant, information acquisition is made possible by a graphical user interface. The model with the two interaction variants is tested with a figure that corresponds to the scale and evaluated using the previously defined evaluation criteria. Subsequently, the advantages and disadvantages of a model test determined by the research and the test carried out are summarized.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld.....	1
1.2	Forschungsfragen und Ziel der Arbeit .....	3
1.3	Vorgehensweise .....	4
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit .....	4
2	Theoretische Grundlagen.....	6
2.1	Grundlagen Baustellenmontage .....	6
2.2	Grundlagen Individualisierung .....	8
2.2.1	Anthropometrische Daten .....	9
2.2.2	Individualisierungsdimensionen .....	12
2.3	Grundlagen Montagestation 4.0 .....	17
2.3.1	Hauptaspekte der Montagestation 4.0 .....	18
2.3.2	Assistenzsystem .....	20
2.4	Grundlagen mechatronische Steuerungssysteme .....	22
2.4.1	Speicherprogrammierbare Steuerung.....	23
2.4.2	Sensoren und Aktoren .....	25
2.4.3	Kommunikation .....	26
2.5	Grundlagen Mensch-Maschine-Interaktion.....	27
2.5.1	Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	27
2.5.2	Bedienen und Beobachten.....	28
2.5.3	Kamerasystem zur Bilderkennung .....	30
2.6	Grundlagen Modellbildung.....	36
3	State-of-the-Art .....	41
3.1	Existierende selbstkonfigurierende Montagestationen .....	41
3.2	Montagestation 4.0: Baustellenmontage .....	45
4	Umsetzung der adaptiven Höhen- und Winkelverstellung am Modell.....	47
4.1	Modellbildung .....	47
4.1.1	Modellobjekt.....	47
4.1.2	Abstraktion und Idealisierung.....	48
4.1.3	Höhen- und Winkelverstellung in Bezug auf die Körpergröße und den Arbeitsschritt .....	50

4.2	Konstruktion .....	53
4.2.1	Variante 1: Zylinder.....	54
4.2.2	Variante 2: Spindelmotor .....	61
4.2.3	Bewertung und Auswahl .....	67
4.3	Steuerung der Höhen- und Winkeladaption.....	69
4.3.1	Anschlussplan.....	70
4.3.2	Programmierung .....	74
4.3.3	Grafical User Interface .....	75
5	Aufbau, Test und Bewertung des Modells.....	78
5.1	Aufbau .....	78
5.2	Test und Bewertung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells	79
5.2.1	Bewertungskriterien .....	79
5.2.2	Test und Bewertung.....	80
5.3	Vor- und Nachteile der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells .....	83
6	Transfer des Konzepts auf die reale Montagestation.....	86
7	Diskussion und Ausblick .....	88
7.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....	88
7.2	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse.....	91
7.3	Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung.....	92
8	Literaturverzeichnis.....	93
9	Abbildungsverzeichnis .....	101
10	Formelverzeichnis.....	103
11	Tabellenverzeichnis .....	104
12	Abkürzungsverzeichnis.....	105

# 1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine Einleitung in das Themenfeld und ein Überblick über die Forschungsfragen dieser Diplomarbeit vorgenommen. Die Forschungsfrage dieser Arbeit wurde für eine übersichtliche Beantwortung in mehrere Unterfragen aufgeteilt. Daraufhin wird die Vorgangsweise zur Beantwortung der Forschungsfragen erläutert und als letzter Punkt wird der Aufbau der Arbeit dargestellt.

## 1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Der Markt hat sich durch die Globalisierung von einem Anbietermarkt zu einem Käufermarkt entwickelt. Damit wurde das schmale Produktspektrum von früher durch eine immer breitere Angebotspalette mit zahlreichen Varianten abgelöst. Aus dieser Veränderung am Markt folgen wesentliche Entwicklungstendenzen:<sup>1</sup>

- Verkürzung der Produktlebensdauer,
- Anstieg der Produktvarianten und damit Losgrößenreduzierung,
- Zwang zur Just in time-Lieferung, teilweise sogar Just in Sequence,
- Erhöhung der Qualitätsanforderung,
- Reduzierung der Herstellkosten und damit auch der Montagekosten.<sup>2</sup>

Mit der Globalisierung und dem verstärkten Einsatz von Verfahren zur Prozessoptimierung ist in den Unternehmen die Gestaltung von Montagearbeitsplätzen ein relevantes Thema geworden. Ein optimierter Montagearbeitsplatz sollte daher neben der Produktivitätserhöhung auch immer die an ihm arbeitenden Menschen berücksichtigen.<sup>3</sup>

Um den Arbeitsplatz für eine möglichst große Anzahl von Personen passend zu gestalten, wurde dieser nach der Perzentil Methode ausgelegt. Jedoch existiert kein „durchschnittlicher“ Mensch, da geschlechtsspezifische, nationale und Unterschiede des Alters vorliegen.<sup>4,5,6</sup> Neben der Herausforderung, jeden Arbeitsplatz optimal auf die Menschen, die an diesem Arbeiten, anzulegen, werden die zukünftigen Tätigkeiten durch die zunehmende Flexibilisierung und Digitalisierung geprägt sein. Dies zeigt sich durch häufige Produktwechsel, kurzzyklisch wechselnde Arbeitsaufgaben und eine Zunahme an Problemlösungs- und Überwachungsfunktionen. Um diesen neuen Anforderungen gerecht zu werden, ist

---

<sup>1</sup> vgl. Lotter, 2012a, S. 3–4

<sup>2</sup> vgl. Lotter, 2012a, S. 3–4

<sup>3</sup> vgl. Kusserow u. a., 2008, S. 158

<sup>4</sup> vgl. Schlick/Bruder/Luczak, 2018, S. 479–482

<sup>5</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 280

<sup>6</sup> vgl. Bullinger-Hoffmann, 2016, S. 15–16



es notwendig, die Mitarbeiter\*innen durch Assistenzsysteme entsprechend zu unterstützen.<sup>7</sup>

Neue Technologien und die Digitalisierung ermöglichen den Einsatz von Assistenzsystemen (Hebeassistenten, Augmented und Virtual Reality Systeme, ...), die zur Verbesserung der Ergonomie und zur Vereinfachung der komplexer werdenden Arbeit beitragen.<sup>8,9</sup>

Die „selbstkonfigurierende Montagestation“, die sich abhängig von den spezifischen anthropometrischen Daten anpasst, ist eines der Grundmerkmale der Montagestation 4.0. Sie unterstützt Montagevorgänge, reduziert die Prozesszeit und verbessert die Ergonomie. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, das Problem der Gestaltung von Arbeitsplätzen nach dem Prinzip „one-size-fits-all“ zu lösen und ideale Bedingungen für einzelne Benutzer\*innen des Arbeitsplatzes zu schaffen.<sup>10</sup> Somit wird die Arbeitsplatzgestaltung aus arbeitswissenschaftlicher Sicht auf eine neue Stufe gehoben.<sup>11,12</sup>

In Hinblick auf die Montagestation 4.0 besteht jedoch noch Bedarf zur systematischen Bewertung der Verbesserungen, die diese mit sich bringt. Bis jetzt sind nur wenige Arbeiten bekannt, die sich mit einer Bewertung möglicher Individualisierungsdimensionen und -parametern, in Hinblick auf unternehmerische Wirksamkeit, Effizienz, Ergonomie sowie Organisations- und Benutzerakzeptanz, befassen. Für diese Bewertung werden die Individualisierungsparameter in die Individualisierungsdimensionen wie Arbeitsfläche, Informationssysteme/digitale Assistenzsysteme und weitere Dimensionen, wie etwa Beleuchtung, Belüftung und Klima, etc. eingeteilt.<sup>13</sup>

Während bei Einzel- und Fließmontageplätzen die Dimension Informationssysteme/digitale Assistenzsysteme in den Werken von Markus Funk<sup>14,15</sup> untersucht wurde, haben Baustellenmontageplätze in Bezug auf die Ergonomie, insbesondere für die Anpassungsfähigkeit und Individualisierung, wenig Betrachtung bekommen.<sup>16</sup>

---

<sup>7</sup> vgl. Keller u. a., 2019, S. 1

<sup>8</sup> vgl. Rupprecht/Küffner-McCauley/Schlund, 2020, S. 1183

<sup>9</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 2

<sup>10</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 120

<sup>11</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 3

<sup>12</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 277

<sup>13</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 2–3

<sup>14</sup> Funk u. a., 2017

<sup>15</sup> Funk/Kritzler/Michahelles, 2017

<sup>16</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 2

## 1.2 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit

Zur Erprobung der Dimension Arbeitsfläche wird ein Modell erstellt, in dem eine automatische Höhen- und Winkeladaption integriert ist. Die automatische Höhen- und Winkelanpassung an die Mitarbeiter\*innen wird mittels der Daten, die von einer impliziten Umgebung aufgenommen oder die mittels einer grafischen Oberfläche eingegeben werden, ermöglicht. Bei diesem Modell handelt es sich um einen fokussierten Prototyp, der lediglich die adaptive Höhen- und Winkelanpassung im Versuchsmaßstab abbildet.<sup>17</sup>

Ziel der Arbeit ist die Konstruktion und die mechatronische Umsetzung einer adaptiven Höhen- und Winkelverstellung eines Modells der Fan-Cowl-Montagestation, welches als Miniaturmodell mittels 3D-Druck umgesetzt werden soll. Weiteres Ziel der Arbeit ist der Test und die Bewertung der adaptiven Höhen- und Winkelverstellung des Modells der Fan-Cowl-Montagestation.

Für die Erreichung dieser Ziele ergibt sich folgende Forschungsfrage, die mit den Unterfragen strukturiert beantwortet werden soll. Die Forschungsfrage mit den jeweiligen Unterfragen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1 Forschungsfrage mit Unterfragen**

<b>Forschungsfrage:</b>
Wie kann eine individuelle, adaptive Einstellung des Baustellenmontagearbeitsplatzes in Arbeitshöhe und -winkel mit einem Modell getestet und evaluiert werden?
<b>Unterfrage 1:</b>
Welcher Modellmaßstab eignet sich am besten zur Erprobung und Evaluation der Höhen- und Winkeladaption?
<b>Unterfrage 2:</b>
Wie kann die Höhen- und Winkeladaption am Modell verwirklicht werden?
<b>Unterfrage 3:</b>
Welche Bewertungskriterien können zur Evaluierung der adaptiven Höhen- und Winkelanpassung des Modells herangezogen werden?

<sup>17</sup> vgl. Kirchner, 2020, S. 380–382

**Unterfrage 4:**

Was sind die Vor- und Nachteile bei der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells?

### 1.3 Vorgehensweise

**Unterfrage 1:**

Welcher Modellmaßstab eignet sich am besten zur Erprobung und Evaluation der Höhen- und Winkeladaption?

Die Unterfrage 1 soll mit einer Recherche und der Modellierung beantwortet werden. Hier wird darauf geachtet, dass in dem Maßstab eine Konstruktion ermöglicht wird, in der die Höhen- und Winkelverstellung mit am Markt erhältlichen Aktoren realisierbar werden kann.

**Unterfrage 2:**

Wie kann die Höhen- und Winkeladaption am Modell verwirklicht werden?

Für die Beantwortung dieser Unterfrage wird anhand der Recherche evaluiert mit welchen Technologien eine Adaption realisierbar ist. Daraufhin wird die Modellierung mit anschließender Konstruktion des Modelles und die Programmierung der Steuerung durchgeführt.

**Unterfrage 3:**

Welche Bewertungskriterien können zur Evaluierung der adaptiven Höhen- und Winkelanpassung des Modells herangezogen werden?

Zur Beantwortung der Unterfrage 3 wird die Recherche herangezogen.

**Unterfrage 4:**

Was sind die Vor- und Nachteile bei der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells?

Die Unterfrage 4 zu den Vor- und Nachteilen bei der Erprobung sollen durch die Kenntnisse aus der Grundlagenrecherche und aus den Erkenntnissen durch den Aufbau und die Testung beantwortet werden.

### 1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich wie in der Abbildung 1 zu sehen ist in sieben Kapitel. Das Kapitel 1 beinhaltet eine allgemeine Einleitung in das Themenfeld und die

Forschungsfragen. Zusätzlich werden die Vorgehensweise und die Struktur der Arbeit vorgestellt. Daraufhin folgt der Grundlagenteil in Kapitel 2. In diesem werden die Grundlagen zu den Themengebieten, welche diese Arbeit betreffen, vorgestellt. Der Stand der Technik wird in Kapitel 3 erläutert. Dieses Kapitel widmet sich den bereits umgesetzten selbstkonfigurierenden Montagestationen und der Montagestation 4.0 in Bezug auf die Baustellenmontage. Nach diesem theoretischen Abschnitt wird die Umsetzung des Modelles erläutert. Diese beginnt mit der Modellbildung und der Konstruktion und schließt mit der Steuerung ab. Daraufhin wird in Kapitel 5 der Aufbau, der Test und die Bewertung vorgestellt. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die Vor- und Nachteile des Modells erörtert. Nach diesem praktischen Teil der Arbeit wird in Kapitel 6 erklärt, was es bei einem Transfer des Konzeptes in die reale Montagestation zu beachten gilt. Zum Abschluss der Arbeit werden in Kapitel 7 die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick gegeben.

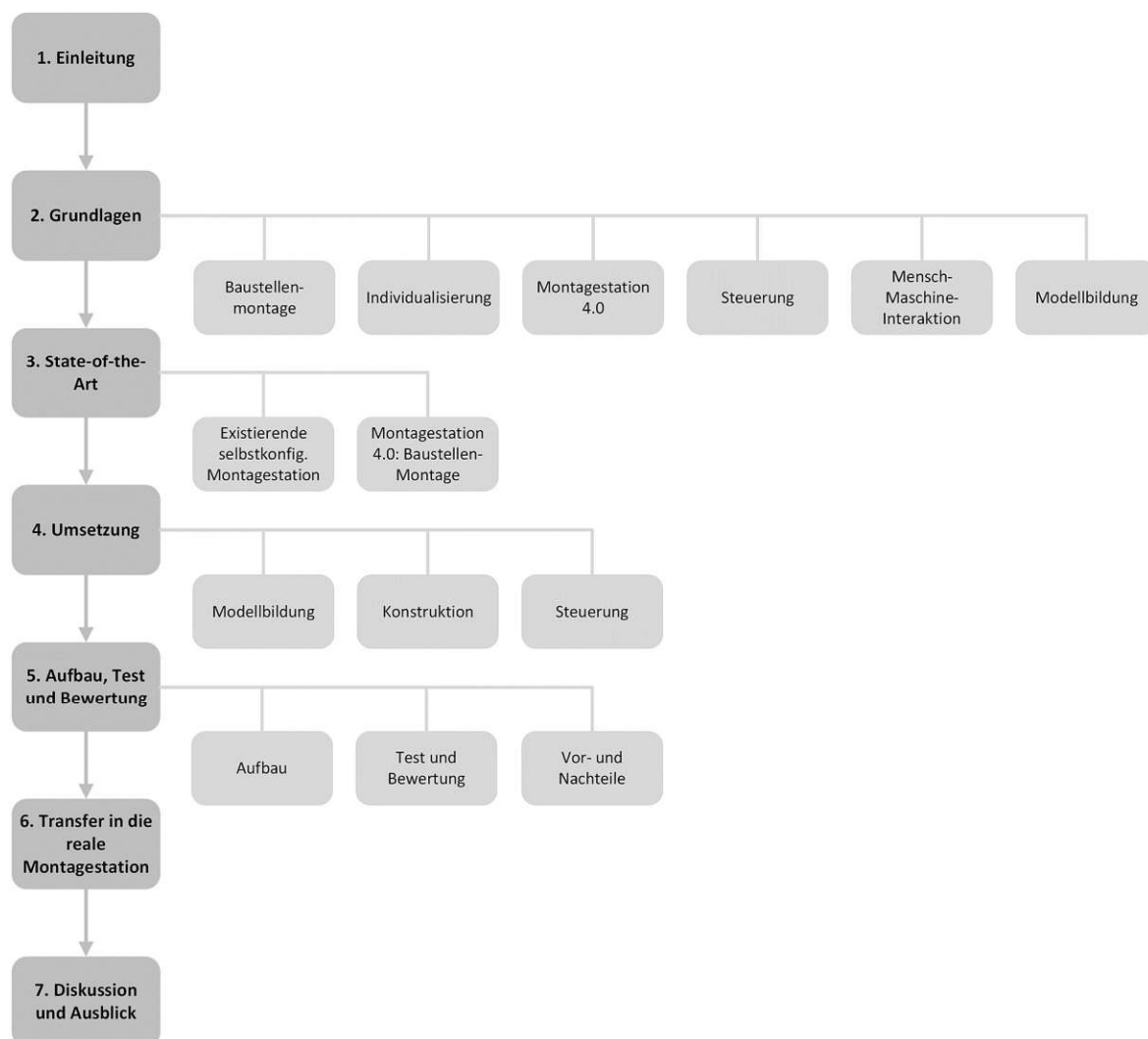


Abbildung 1 Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung)

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagenthemen vorgestellt, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit benötigt werden. Hier werden zuerst die Grundlagen der Baustellenmontage behandelt, da es sich bei der Montage, welche dieser Arbeit zugrunde liegt, um diesen Typ der Montage handelt. Darauf folgt der Punkt der Individualisierung, in dem abgeklärt wird, welche Potentiale eine Verbesserung für den Menschen ermöglichen. Nach der Abklärung der Verbesserungspotentiale wird die Montagestation 4.0 erklärt. Die Montagestation 4.0 dient als Überbegriff für eine Montagestation die vernetzt ist und Optimierungen im Hinblick auf den Menschen enthält. Um diese Optimierungen zu ermöglichen, benötigt die Montagestation eine Steuerung, die im nächsten Grundlagenpunkt behandelt wird. Im darauffolgenden Punkt der Grundlagen wird die Mensch-Maschine Interaktion vorgestellt. Dieser Abschnitt beinhaltet die Interaktionsmöglichkeiten des Menschen mit der Steuerung. Da es sich in dieser Arbeit um ein Modell der Montagestation handelt, wird im letzten Grundlagenpunkt die Modellbildung vorgestellt.

### 2.1 Grundlagen Baustellenmontage

Zu Beginn dieses Abschnittes werden die Grundbegriffe der Montage vorgestellt und daraufhin die Baustellenmontagearbeitsplätze näher betrachtet.

Montieren ist die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von Körpern, die geometrisch bestimmt sind, dienen. Die Kernfunktionen des Montierens umfassen die Vorgänge des Fügens, der Handhabung, des Kontrollierens, des Justierens und einiger Sonderoperationen.<sup>18</sup>

Industriell hergestellte Produkte bestehen in der Regel aus einer Vielzahl von Einzelteilen, welche durch die Montage zu einem Produkt höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen und in einer bestimmten Zeit zusammengebaut werden. Verglichen mit den Fortschritten in der Teilefertigung hat sich die Arbeit in der Montage durch bessere Fließbandsysteme, mechanisierte Werkzeuge, nach ergonomischen Gesichtspunkten gestaltete Arbeitsplätze und die teilweise Mechanisierung kraftaufwendiger Vorgänge relativ wenig verbessert bzw. erleichtert.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> vgl. Lotter, 2012a, S. 2

<sup>19</sup> vgl. Lotter, 2012a, S. 1

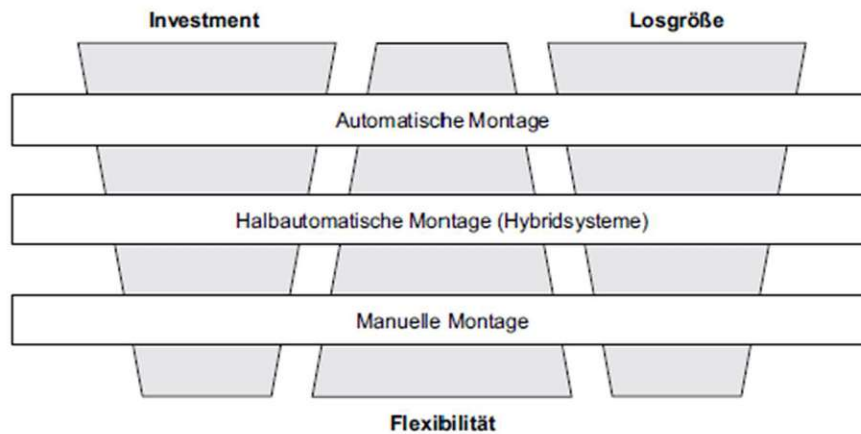


Abbildung 2 Auswahlkriterien für Montagesysteme<sup>20</sup>

In der Abbildung 2 sind die Auswahlkriterien der unterschiedlichen Montagesysteme grob dargestellt. Die manuelle Montage, zu welcher die Baustellenmontage angehört zeichnet sich durch hohe Flexibilität und geringen Investitionsbedarf aus, jedoch ist diese für große Stückzahlen nicht wirtschaftlich, da mit dem Prinzip der Baustellenmontage meist großvolumige, komplexe Produkte mit hohem Montageumfängen montiert werden.<sup>21, 22</sup>

Baustellenmontagearbeitsplätze kommen in der Regel bei einer Einzelstückmontage zum Einsatz, bei der Großgeräte, wie zum Beispiel Maschinen, Schaltschränke usw. zusammengebaut werden.<sup>23, 24</sup> Im Vergleich mit anderen Montagetypen erfordert die Baustellenmontage einen hohen manuellen Arbeitsaufwand und hat somit einen geringeren Automatisierungsgrad.<sup>25</sup>

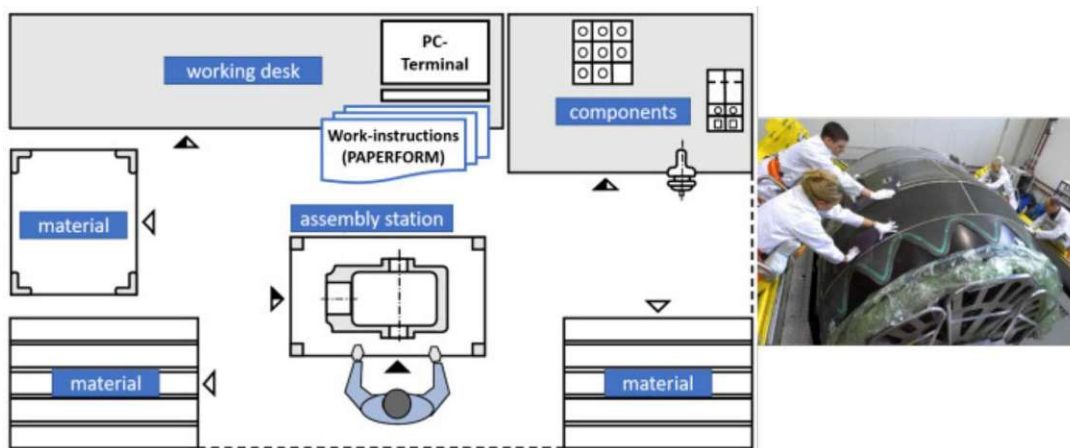


Abbildung 3 Schematische Darstellung eines Baustellenmontagearbeitsplatzes<sup>26</sup>

<sup>20</sup> Lotter, 2012a, S. 3

<sup>21</sup> vgl. Lotter, 2012a, S. 3

<sup>22</sup> vgl. Richter, 2006, S. 104

<sup>23</sup> vgl. Lotter, 2012b, 247-148

<sup>24</sup> vgl. Richter, 2006, S. 104

<sup>25</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 119

<sup>26</sup> Rupprecht/Küffner-McCauley/Schlund, 2020, S. 1182

Diese Arbeitsplätze sind oft durch einen großen Arbeitsbereich, mehrere Bereitstellungsflächen und eine unübersichtliche Informationsbereitstellung gekennzeichnet, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist.<sup>27</sup>

In dieser Situation ist die Montagevorrichtung stationär. Somit muss das Personal für die Ausführung der Arbeitsschritte um die Vorrichtung gehen und für manche Arbeitsschritte eine ergonomisch ungünstige Arbeitsposition einnehmen. Außerdem werden die für die Montage benötigten Informationen an einem stationären PC-Terminal bereitgestellt, was wiederum einen zusätzlichen Weg verursacht.<sup>28,29</sup> Die Baustellenmontage hat durch die Bereitstellung einer großen Anzahl von Einzelteilen und vormontierten Baugruppen einen hohen Platzbedarf. Zudem ist die Zugänglichkeit von allen Seiten zum Montageobjekt notwendig, da eine Montage von allen Seiten aus notwendig sein kann. Ein hoher Sekundäraufwand wird durch hierfür notwendige Körperbewegungen wie Drehen, Gehen, Beugen, Bücken und Aufrichten verursacht. Wenn große Baugruppen in das Endprodukt eingehen, sollten diese nicht an dessen Montageplatz vormontiert werden, sondern auf einem separaten Vormontageplatz in räumlicher Nähe. Kleine Baugruppen mit kleinem Arbeitsinhalt können auf einer separaten Arbeitsstelle, welche im Bereich des Montageobjektes liegt, vormontiert werden.<sup>30</sup>

Für Kleinteile wie Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben wird ein fahrbarer Materialwagen empfohlen, wodurch die Materialentnahme jeweils griffbereit an der Baustelle erfolgen kann.<sup>31</sup> Die Montagebetriebsmittel werden von den Werker\*innen an den Baustellenmontageplatz gebracht und sollten mobil ausgelegt und möglichst universell sein. Ebenso müssen die Montagewerker\*innen ein umfassendes Produktverständnis haben, da die Anforderungen sehr hoch sind.<sup>32</sup>

Empirische Daten zeigen, dass sich Mitarbeiter\*innen in Baustellenmontagesituationen häufig über das herausfordernde Umfeld, die körperliche Belastung und die daraus folgenden gesundheitlichen Probleme beschweren, was zu Fehlzeiten und einer hohen Fluktuation des Personals führt.<sup>33</sup>

## 2.2 Grundlagen Individualisierung

In Unternehmen ist die Gestaltung von Montagearbeitsplätzen ein bedeutendes Thema geworden, da durch Gestaltungsmängel von Arbeitsplätzen mit verstärkten Beeinträchtigungen und Erkrankungen im Muskel-Skelett-System zu rechnen ist. Somit sollte der optimierte Montagearbeitsplatz neben der Produktivitätserhöhung

<sup>27</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 2

<sup>28</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 283–284

<sup>29</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 5

<sup>30</sup> vgl. Lotter, 2012b, S. 148

<sup>31</sup> vgl. Lotter, 2012b, S. 149–150

<sup>32</sup> vgl. Richter, 2006, S. 104

<sup>33</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 2

auch immer die an ihm arbeitenden Menschen berücksichtigen.<sup>34</sup> Zusätzlich zu der physischen Belastungen ergibt sich durch den Wechsel zur Losgröße eins und kundenindividuellen Produkten eine immer größer werdende mentale Belastung, welche jedoch in dieser Arbeit nicht näher erörtert wird.<sup>35</sup>

### 2.2.1 Anthropometrische Daten

Arbeitsplätze werden, damit sie für einen möglichst großen Teil der Menschen passen, nach der Perzentilmethode gestaltet. Männer und Frauen werden in der Regel getrennt erfasst, um den durchschnittlich bestehenden physiologischen Unterschied Rechnung zu tragen. Als untere Grenze wird das 5. Perzentil der Frauen und als obere Grenze das 95. Perzentil der Männer herangezogen. Damit sind ungefähr 95% der Bevölkerung abgedeckt.<sup>36, 37</sup> Neben den geschlechtsspezifischen Unterschieden wird aus der Datenmenge noch zwischen Nationalität und Alter differenziert. Wenn die anthropometrische Variable Nationalität betrachtet wird, kann ein Unterschied der durchschnittlichen Körperhöhe festgestellt werden. Zudem kann mit zunehmendem Alter eine Abnahme der Körperhöhe betrachtet werden.<sup>38</sup> Die anthropometrischen Daten werden auf nationaler Ebene ermittelt, statistisch ausgewertet und in Normen wie beispielsweise der DIN 33 402 1/2 veröffentlicht.<sup>39</sup> In Abbildung 4 ist diese statistische Verteilung der Körpermaße dargestellt. Hier wird das Perzentil der Frauen und Männer mit der Abkürzung FP bzw. MP bezeichnet, wobei die nachgestellte Zahl das entsprechende Perzentil beschreibt. Beispielsweise wird das 5. Perzentil der Frauen mit der Abkürzung FP05 bezeichnet. Zwischen dem FP05 und dem MP95 liegt ein Körperhöhenunterschied von 40cm, wie in der Abbildung 4 zu erkennen ist.

<sup>34</sup> vgl. Kusserow u. a., 2008, S. 158

<sup>35</sup> vgl. Bläsing/Bornwasser/Hinrichsen, 2021

<sup>36</sup> vgl. Schlick/Bruder/Luczak, 2018, S. 479–482

<sup>37</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 280

<sup>38</sup> vgl. Mühlstedt, 2016, S. 15–16

<sup>39</sup> vgl. Neudörfer, 2020, S. 561



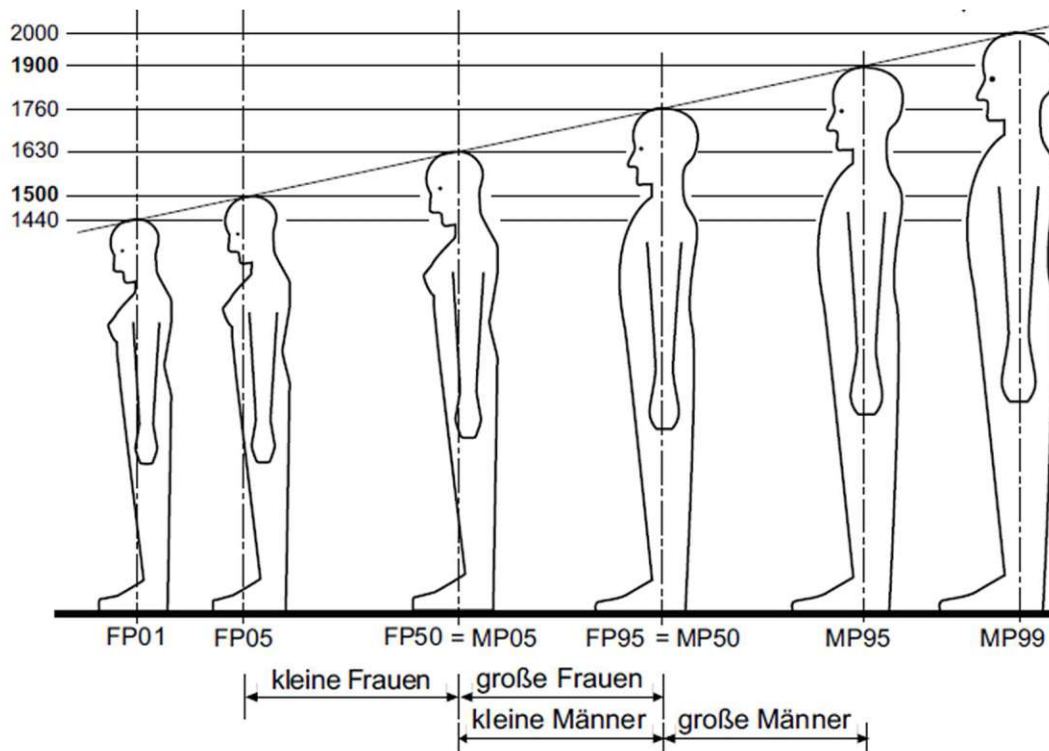


Abbildung 4 Statistische Verteilung der Körpermaße in mm<sup>40</sup>

In der Abbildung 5 sind die Körpermaße eines sogenannten „Europamenschen“ aus der BAuA-Veröffentlichung<sup>41</sup> dargelegt. Bei dieser Darlegung wird davon ausgegangen, dass die europäische Union eine wirtschaftliche Einheit darstellt. Somit würde es sich anbieten das Perzentilierungsverfahren über die gesamte europäische Erwachsenen-Population auszudehnen. Bei dieser Erhebung wurde jedoch für die Grenzperzentile P5 und P95 die Länder herangezogen, welche die insgesamt kleinsten bzw. größten Körpermaße vorweisen.<sup>42</sup>

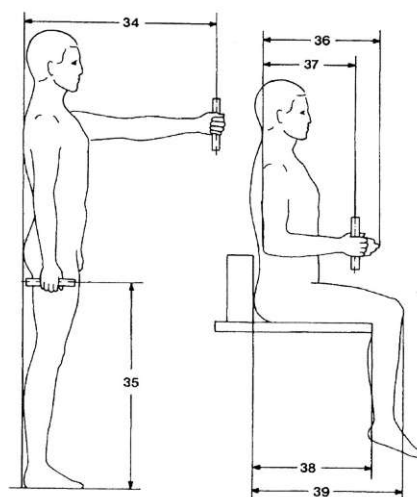
<sup>40</sup> Neudörfer, 2020, S. 563

<sup>41</sup> Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998

<sup>42</sup> vgl. Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998, S. 4–5

Maß-Nr. (lt. Abb.)	Beschreibung des Maßes	Perzentile		
		5	50	95
1	Körperhöhe	1530	1719	1880
2	Augenhöhe	1420	1603	1750
3	Schulterhöhe	1260	1424	1570
4	Ellenbogenhöhe	960	1078	1190
5	Brustkorbtiefe (Brustbein bis Wirbelsäule)	170	215	250
6	Schritthöhe (entspricht dem Schneidermaß »im Schritt«)	709	816	890
7	Tibialhöhe	397	472	530
8	Hüftbreite	300	359	400

Abbildung 5 Körpermaße aus der BAuA-Veröffentlichung zum "Europamensch"<sup>43, 44</sup>Abbildung 6 Körpermaße aus der BAuA-Veröffentlichung zum "Europamensch"<sup>45</sup>

<sup>43</sup> Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998, S. 7

<sup>44</sup> Mühlstedt, 2016, S. 24

<sup>45</sup> Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998, S. 10

Tabelle 2 Körpermesswerte des Europamenschen<sup>46</sup>

Maß-Nr. (lt Abb.)	Beschreibung des Maßes	Perzentile		
		5	50	95
34	Reichweite nach vorn (Abstand Wand-Griffachse)	640	728	820
35	Fausthöhe (Griffachse)	660	764	845
36	Unterarm-Fingerspitzen-Länge	410	457	498
37	Ellenbogen-Griffachsen-Länge	298	338	403

Die Körpermaße mit den Maß-Nummern 34 - 37 der Abbildung 6 sind in der Tabelle 2 dargestellt, wobei die Körpermaße für das 5, 50 und 95 Perzentil herangezogen wurden. Die Körpermaße mit den Nummern 38 und 39 sind für diese Arbeit nicht relevant und wurden deshalb nicht in der Tabelle 2 aufgelistet.

## 2.2.2 Individualisierungsdimensionen

Für die Individualisierung eines Baustellenmontagearbeitsplatzes wurden die Individualisierungsparameter, mit welchen ein Montagearbeitsplatz angepasst werden kann, in Individualisierungsdimensionen eingeteilt. In der Tabelle 3 werden die Individualisierungsdimensionen mit den dazu gehörigen Individualisierungsparametern dargestellt.<sup>47</sup>

Tabelle 3 Individualisierungsdimensionen und -parameter<sup>48, 49</sup>

Dimension	Veränderbare Parameter
1) Arbeitsfläche	- Arbeitshöhe - Arbeitswinkel
2) Anordnung von physischen Objekten und Bereitstellung von Materialien	- Physische Objekte am Arbeitsplatz (Werkzeuge, Behälter, Hilfsmittel, ...) - Material- und Werkzeugbereitstellung
3) Anordnung und Gestaltung von digitalen Elementen / Benutzeroberfläche	- Struktur / Anordnung / Design der Benutzeroberfläche - Softwareauswahl
4) Beleuchtung	- Beleuchtungsstärke - Art der Beleuchtung (passiv / aktiv / natürlich / künstlich) - Lichtfarbe und -temperatur - Anordnung der Lichtquellen
5) Klima	- Temperatur - Luftfeuchtigkeit - Belüftungsparameter (Richtung, Stärke, Strömungstyp)
6) Akustik	- Rauschpegel (dB), Frequenz - Musik / akustische Informationen

<sup>46</sup> Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998, S. 10

<sup>47</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021

<sup>48</sup> Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018

<sup>49</sup> Rupprecht/Schlund, 2021

7) (Arbeits-) Informationssysteme / digitale Assistenzsysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informationsgehalt</li> <li>- Art der Informationen (visuell, akustisch, kinästhetisch, olfaktorisch)</li> <li>- Ort der Informationsbereitstellung (Bildschirm, wearables, Datenbrille, ...)</li> <li>- Umfang / Granularität der Informationen (Häufigkeit, Detailtiefe, ...)</li> </ul>
8) Körperliche Assistenzsysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dauer der Unterstützung (Häufigkeit, Intervall)</li> <li>- Verwendung der Hilfe (Ja / Nein)</li> <li>- Stärke der Unterstützung</li> <li>- Art der Assistenzsysteme</li> </ul>
9) Mensch-System Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Art der Interaktion (Eingabe / Ausgabe)</li> <li>- Gestaltung der Interaktion</li> <li>- Höhe der Systemvorgabe</li> <li>- Grad der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine</li> </ul>
10) Arbeitsorganisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zykluslänge / Zykluszeit</li> <li>- Arbeitszeit</li> <li>- Arbeitsaktivität / Arbeitsinhalt</li> <li>- Arbeitsteilung im Allgemeinen</li> </ul>

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Dimension Arbeitsfläche, deshalb wird in diesem Abschnitt nur diese Dimension erläutert.

### Arbeitsfläche

Die Dimension Arbeitsfläche beinhaltet, wie in Tabelle 3 beschrieben, die Arbeitshöhe und den Arbeitswinkel. Die Arbeitshöhe wird als die senkrechte Entfernung von der Standfläche zum manuellen oder visuellen Kontaktort des Einwirkens auf den Arbeitsgegenstand definiert.<sup>50</sup> Der Arbeitswinkel hängt von dem Blick- und Greifbereich sowie der Händigkeit ab.<sup>51</sup>

Das in der Abbildung 7 dargestellte Nomogramm stellt ein Hilfsmittel für die Bestimmung der wesentlichen Maße der Höhe von Arbeitsflächen dar. Das Nomogramm wurde ausgehend von zwei Extremkörperhöhen, für welche die wichtigsten Maße eines Arbeitsplatzes ermittelt wurden, durch lineare Interpolation erstellt. In der Abbildung 7 sind die Höhen bei unterschiedlich schweren Arbeiten abgebildet und die Arbeitshöhe bei unterschiedlich feinen Arbeiten. Bei einer feinen Arbeit wird ein geringerer Sehabstand (c) benötigt, was zwangsläufig eine hohe Arbeitshöhe für die Hände zur Folge hat. Zudem ist ein Wechsel zwischen Stehen und Sitzen gegenüber dauerndem Stehen oder Sitzen zu bevorzugen.<sup>52</sup>

<sup>50</sup> vgl. Neudörfer, 2020, S. 573

<sup>51</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 280

<sup>52</sup> vgl. Neudörfer, 2020, S. 574–575

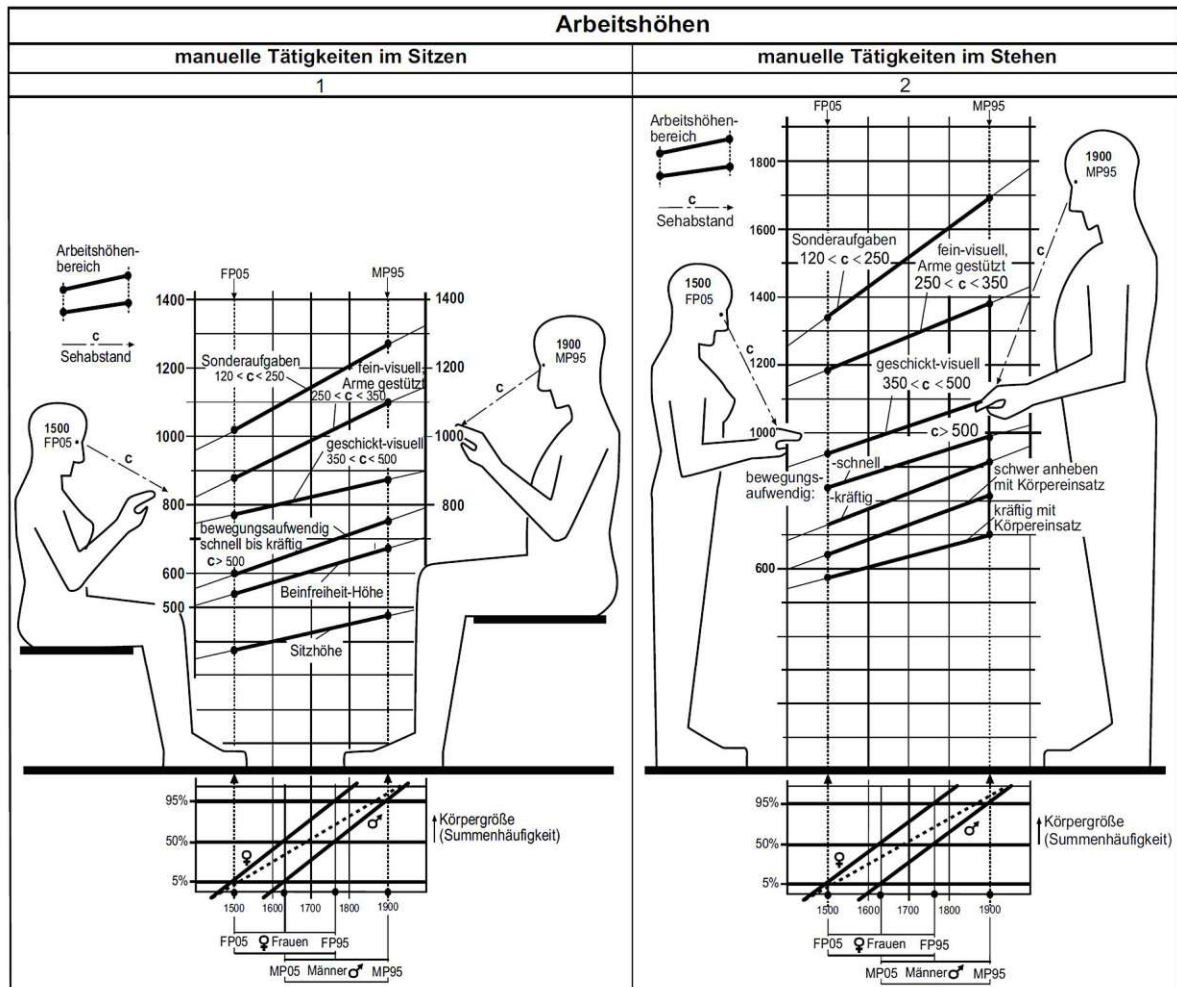


Abbildung 7 Arbeitshöhen für überwiegend manuelle Tätigkeiten<sup>53</sup>

Die Arbeitsflächen sollten so ausgelegt sein, dass eine aufrechte Körperhaltung im Stehen oder Sitzen ermöglicht wird. Der Anteil an gebeugter Haltung und Überkopfarbeiten sollten möglichst geringgehalten werden, damit eine geringe Beanspruchung der betroffenen Person ermöglicht wird. Bei Montagearbeiten über der Herzhöhe wird die Blutzirkulation beansprucht, weshalb diese vermieden werden sollten. Somit ist es anzustreben, die Arbeitsflächen höhenverstellbar auszuführen, damit die Belastung verringert werden kann.<sup>54</sup> Kraftaufwendige Tätigkeiten eignen sich besser für Steharbeitsplätze, da im Sitzen die Größe der Funktionsräume abnimmt.<sup>55</sup>

Betroffene kompensieren ergonomisch ungünstige Konstellationen im Arbeitsbereich mit unnatürlichen Körperhaltungen, auch Zwangshaltungen genannt. Diese Zwangshaltungen (Bücken, Knien, Überkopfarbeiten, ...) können Beschwerden nach

<sup>53</sup> Neudörfer, 2020, S. 574

<sup>54</sup> vgl. Neudörfer, 2020, S. 573

<sup>55</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 280

sich ziehen, welche vor allem dann auftreten, wenn aus Positionen mit extremen Gelenkstellungen heraus eine dynamische Muskelarbeit verrichtet werden muss.<sup>56</sup>

Um das Gefährdungspotenzial einzelner Tätigkeiten bzw. Körperhaltungen festzustellen, kann das RULA-Verfahren angewendet werden.<sup>57</sup>

### Rapid Upper Limb Assessment (RULA)

Mit dem RULA-Verfahren können Arbeitsplätze einer schnellen ergonomischen Begutachtung unterzogen werden. Mittels Durchführung dieses Verfahrens wird aufgezeigt, wie notwendig eine ergonomische Verbesserung ist. Bei der Durchführung dieses Verfahrens wird ein Arbeitsbogen am Arbeitsplatz ausgefüllt. Ausschnitte dieses Arbeitsbogens sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. In Teil 1 des Arbeitsbogens werden zunächst die Haltung des Ober- und Unterarms sowie des Handgelenks erfasst und mit Punkten bewertet. Aus der Tabelle A<sup>58</sup> des Teil 1 kann daraufhin ein Gesamtpunktwert für die Haltung der oberen Extremitäten abgelesen werden. Analog zu diesem Vorgehen wird der Teil 2 des Arbeitsbogens der in der Abbildung 9 dargestellt ist durchgeführt. Zu diesem Haltungswert werden noch Zusatzpunkte für die Muskelarbeit und Kraft/Last addiert.<sup>59</sup> Für die Muskelarbeit wird bei statischer Körperhaltung (länger als eine Minute) oder bei Repetition (4 x oder mehr pro Minute) ein Punkt addiert.

Tabelle 4 RULA - Kraft/Last<sup>60</sup>

Kraft/Last	<2 kg (zeitweilig)	2kg – 10kg (zeitweilig)	2kg – 10kg (statisch o. wiederholt)	>10kg oder wiederholt o. plötzlich
Punkte	0	1	2	3

Zur Bewertung der Kraft/Last werden Punkte, wie in der Tabelle 4 aufgelistet, zur Gesamtbewertung addiert.<sup>61</sup>

<sup>56</sup> vgl. Neudörfer, 2020, S. 555

<sup>57</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 44

<sup>58</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 54

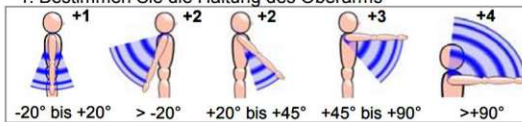
<sup>59</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 44

<sup>60</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 56

<sup>61</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 56

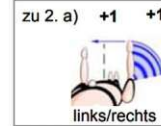
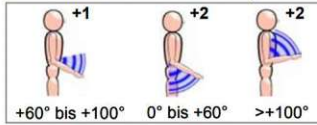
**A. Analyse der Arm- und Handgelenkhaltung**

1. Bestimmen Sie die Haltung des Oberarms



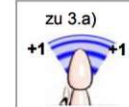
- 1.a) Addieren Sie  
 wenn die Schulter angehoben ist \_\_\_\_\_ +1  
 wenn der Oberarm abduziert ist \_\_\_\_\_ +1  
 wenn der Arm unterstützt oder die Person angelehnt ist \_\_\_\_\_ -1

2. Bestimmen Sie die Haltung des Unterarms



- 2.a) Addieren Sie  
 wenn der Unterarm über die Mitte des Körper hinaus arbeitet \_\_\_\_\_ +1  
 wenn der Unterarm zur Seite des Körpers gedreht ist \_\_\_\_\_ +1

3. Bestimmen Sie die Haltung des Handgelenks



3. a) Addieren Sie  
 wenn das Handgelenk seitlich gekrümmt gehalten wird \_\_\_\_\_ +1

4. Bestimmen Sie die Umwendung des Unterarms bzw. der Hand

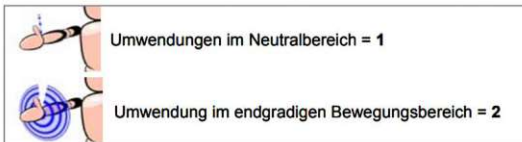
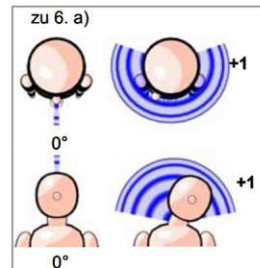
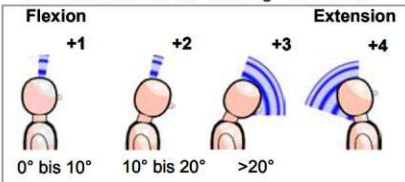


Abbildung 8 RULA: Obere Gliedmaßen Teil 1<sup>62</sup>

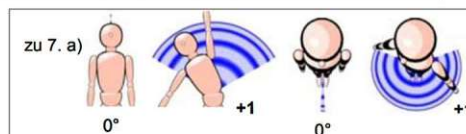
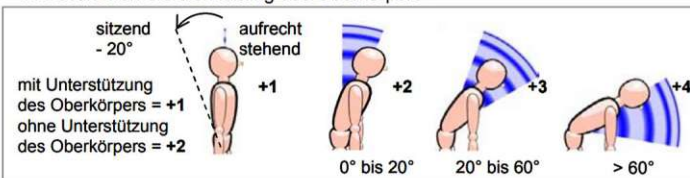
**B. Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung**

6. Bestimmen Sie die Haltung des Halses



6. a) Addieren Sie,  
 wenn der Hals gedreht ist \_\_\_\_\_ +1  
 wenn der Hals seitlich geneigt ist \_\_\_\_\_ +1

7. Bestimmen Sie die Haltung des Oberkörpers



7. a) Addieren Sie,  
 wenn der Oberkörper gedreht ist \_\_\_\_\_ +1  
 wenn der Oberkörper seitlich geneigt ist \_\_\_\_\_ +1

Abbildung 9 RULA: Obere Gliedmaßen Teil 2<sup>63</sup>

<sup>62</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 54

<sup>63</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 55

In Teil 3 des Arbeitsbogens<sup>64</sup> kann aus den Gesamtwerten des ersten und zweiten Teils eine Gesamtpunktzahl ermittelt werden.

**Tabelle 5 RULA - Bewertung<sup>65</sup>**

Gesamtpunktzahl	Bewertung
1 bis 2	akzeptabel
3 bis 4	In naher Zukunft weitere Maßnahmen einleiten
5 bis 6	In Kürze weitere Maßnahmen einleiten
7	Sofort weitere Maßnahmen einleiten

Mit der Gesamtpunktzahl kann anhand der Tabelle 5 eine Bewertung vorgenommen werden, welche eine Empfehlung für das weitere Vorgehen enthält.<sup>66</sup>

## 2.3 Grundlagen Montagestation 4.0

Die aktuelle industrielle Revolution und die damit einhergehenden Innovationen (Cyber Physical System, Internet of Things, Cobot, ...) gelten als Ermöglicher einer neuen Generation von Montagestationen, welche durch die Hauptaspekte von Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Selbstanpassungsfähigkeit gekennzeichnet sind.<sup>67</sup> Durch die Integration dieser innovativen Technologien in die Montagesysteme werden Verbesserungen im technischen, wirtschaftlichen und ergonomischen Bereich ermöglicht, was wiederum die Grundlagen für die Montagestation 4.0 darstellt.<sup>68,69</sup> Solche fortgeschrittenen Montagesysteme sind in der Lage Marktherausforderungen wie die dynamische Marktnachfrage, kurze Produktlebenszyklen und den Bedarf an Flexibilität zu bewältigen.<sup>70</sup> Der Grundstein der Montagestation 4.0 ist die Anwendung der IoT-Technologien auf die Montageprozesse. Jede Einheit des Montagesystems ist für die Kommunikation in Echtzeit mit Sensoren ausgestattet. Das Montagesteuerungssystem nutzt die erhaltenen Daten, um geeignete Modelle und Methoden zur automatischen Verwaltung und Konfiguration zu implementieren.<sup>71</sup> Der Montagestation 4.0 können nach Bartolini<sup>72</sup> die in Abbildung 10 ersichtlichen Hauptaspekte zugeordnet werden.

<sup>64</sup> Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 56

<sup>65</sup> Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 56

<sup>66</sup> vgl. Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 44

<sup>67</sup> vgl. Bortolini u. a., 2019, S. 90

<sup>68</sup> vgl. Rupprecht/Küffner-McCauley/Schlund, 2020, S. 1183

<sup>69</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 2

<sup>70</sup> vgl. Bortolini u. a., 2019, S. 90

<sup>71</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5702–5704

<sup>72</sup> Bortolini u. a., 2017



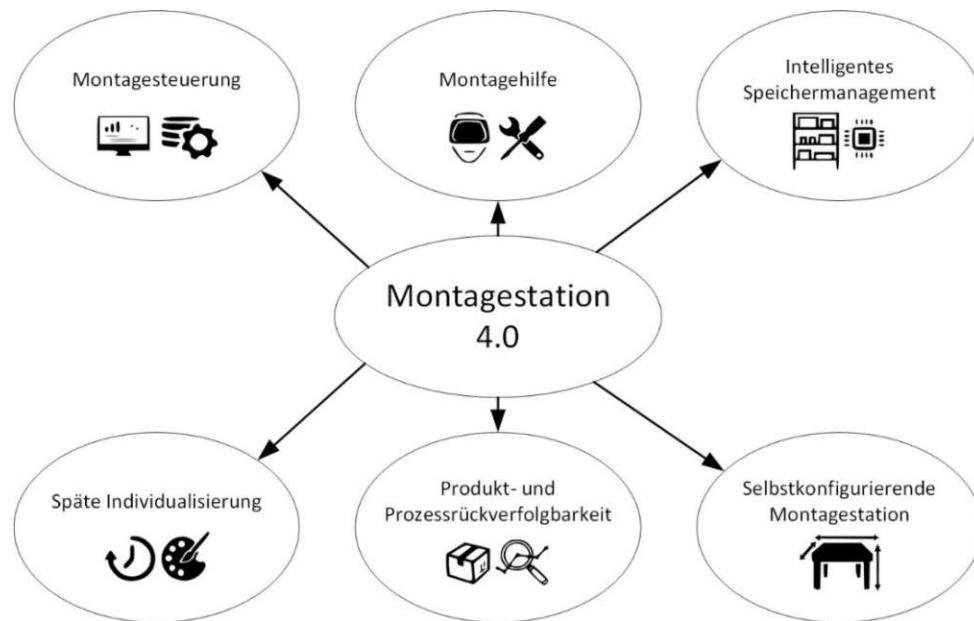


Abbildung 10 Hauptaspekte der Montagestation 4.0 (eigene Darstellung in Anlehnung an <sup>73)</sup>)

### 2.3.1 Hauptaspekte der Montagestation 4.0

#### Montagehilfe

Die Montagehilfe umfasst verschiedene Technologien zur Unterstützung der Befestigungs- und Aufnahmetätigkeiten. Dadurch wird die Dauer dieser Tätigkeiten reduziert und sichere Arbeitsbedingungen gewährleistet. Pick-by-Light Assistenten zeigen automatisch die Bauteile in der jeweiligen Reihenfolge an und minimieren somit den Arbeitsaufwand. Durch AR-Systeme<sup>74</sup> wird eine Unterstützung bei Befestigungstätigkeiten zur Verfügung gestellt, womit die Montageaufgabe unter der Berücksichtigung der Kundenpersonalisierung erleichtert wird. Die Montagetätigkeiten werden zusätzlich durch Cobots<sup>75</sup> unterstützt. Diese passen Ihre Konfiguration automatisch an den Körper der Montagewerker\*innen und der Befestigungsaufgabe an unterstützen die Arbeiter\*innen durch eine zusätzliche Kraft. Dadurch kann das ergonomische Risiko verringert werden.<sup>76</sup>

#### Intelligentes Speichermanagement

Durch ein intelligentes Speichermanagement bei der Materialzuführung können wirtschaftliche Einsparungen verwirklicht werden. Dieses erkennt durch Sensoren an Lagerplätzen den Lagerbestand und sendet automatisch Nachfüllaufträge an das Zentrallager.<sup>77</sup>

<sup>73</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

<sup>74</sup> Kosch u. a., 2018; Büttner u. a., 2017; Funk u. a., 2017

<sup>75</sup> Rusch u. a., 2021

<sup>76</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5703

<sup>77</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

## Produkt- und Prozessrückverfolgbarkeit

Eine vollständige Produkt- und Prozessrückverfolgbarkeit wird durch Montageeinheiten ermöglicht, die mit Sensoren ausgestattet sind. Durch diese Sensoren wird jede Montageaufgabe überwacht, womit mögliche Fehler in Echtzeit erkannt werden können. Dadurch wird die statistische Fehleranalyse durch die Einzelartikelkontrolle ersetzt und die Produktqualität enorm verbessert. Außerdem werden die Arbeitsaufgaben kontinuierlich überwacht, um die montierten Komponenten und Arbeitszeiten zu verfolgen. All diese Daten werden vom Montagekontrollsystem gesammelt und gespeichert. Somit kann durch die Implementierung des beschriebenen Systems eine lückenlose Produktrückverfolgung garantiert werden.<sup>78</sup>

## Späte Anpassungen

Eine wichtige Funktion der Montagestation 4.0 ist die späte Anpassung der zu montierenden Produkte. Dies wird durch die immer größere Zunahme der Personalisierung von Produkten erforderlich. Späte Änderungen von Produktspezifikationen sind unter der Nutzung der Cloud-Datenbank zulässig. Diese späten Änderungen können durch additive Fertigungsmaschinen verwirklicht werden. Diese Anlagen stellen unter Verwendung computergestützter Volumenmodelle, die von den Kunden bereitgestellt werden, personalisierte Komponenten her.<sup>79</sup>

## Montagesteuerung

Die enorme Datenmenge, die mit den Sensoren aus dem Montagesystem gesammelt wird, stellt den Mehrwert für das Unternehmen dar. Jedoch sind diese Daten unstrukturiert und stammen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen. Diese Daten werden durch das Montagesteuerungssystem in aussagekräftige Informationen umgewandelt. Für die Umwandlung sind in das Montagesteuerungssystem Echtzeit-Optimierungsmodelle und maschinelle Lernalgorithmen zur automatischen Konfiguration der Montagestation 4.0 implementiert.<sup>80</sup>

## Selbstkonfigurierende Montagestation

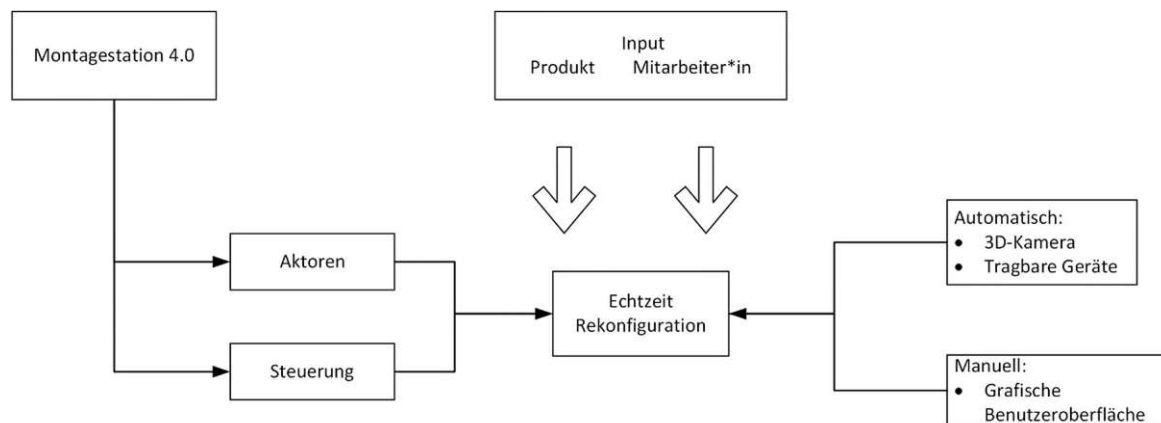
In der Abbildung 11 ist das schematische Konzept einer selbstkonfigurierenden Montagestation dargestellt. Die selbstkonfigurierende Montagestation passt die Abmessungen der Werkbank und Regale automatisch an das Montageprodukt und die Mitarbeiter\*innen an. In dem Arbeitsplatz sind Sensoren und Aktoren eingebettet,

<sup>78</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

<sup>79</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

<sup>80</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

die diese Adaptionen ermöglichen.<sup>81</sup> Außerdem können die anthropometrischen Daten der Mitarbeiter\*innen automatisch durch eine 3D-Kamera oder durch tragbare Geräte erfasst werden. Diese Art der Datenaufnahme ermöglicht eine Echtzeitkonfiguration der Montagestation. Zudem kann durch eine grafische Benutzeroberfläche die Montagestation manuell konfiguriert werden.<sup>82</sup> Dadurch bietet sich die Möglichkeit, das Problem der Gestaltung von Arbeitsplätzen nach dem Prinzip „one-size-fits-all“ zu lösen und ideale Bedingungen für einzelne Benutzer\*innen des Arbeitsplatzes zu schaffen.<sup>83</sup> Dies wird durch die Integration von Assistenzsystemen ermöglicht, wodurch die Arbeitsplatzgestaltung aus arbeitswissenschaftlicher Sicht auf eine neue Stufe gehievt wird, da die Kommissionier- und Befestigungszeiten minimiert und die ergonomischen Arbeitsbedingungen verbessert werden.<sup>84, 85, 86</sup>



**Abbildung 11 Schematisches Konzept: Selbstkonfigurierende Montagestation (eigene Darstellung in Anlehnung an <sup>87</sup>)**

### 2.3.2 Assistenzsystem

Ein Modell der Zusammenarbeit des Menschen mit einem Assistenzsystem ist in der Abbildung 12 zu sehen. Folgend wird zuerst der Kreislauf des Menschen erklärt und daraufhin wird das Assistenzsystem betrachtet.

<sup>81</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

<sup>82</sup> vgl. Bortolini u. a., 2019, S. 92

<sup>83</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 120

<sup>84</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 3

<sup>85</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 277

<sup>86</sup> vgl. Bortolini u. a., 2017, S. 5704

<sup>87</sup> vgl. Bortolini u. a., 2019, S. 92

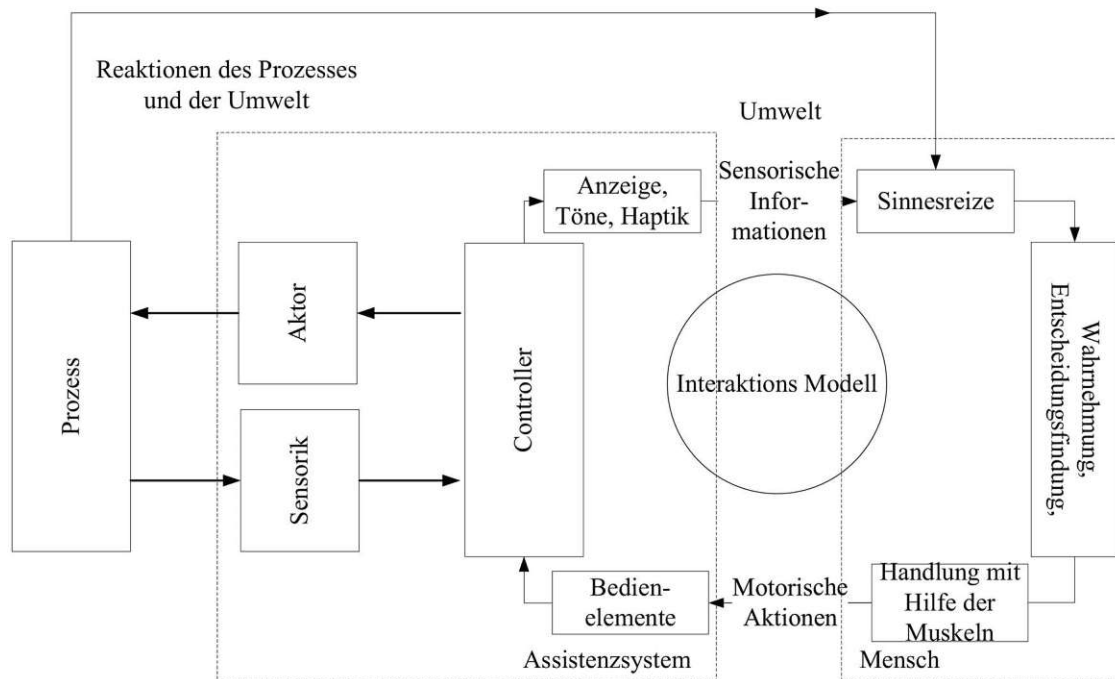


Abbildung 12 Modell der Interaktion des Menschen mit einem Assistenzsystem<sup>88</sup>

Der Mensch erfasst über die Sinneswahrnehmungen Informationen, die der Arbeitsprozess in Form verschiedener Arten der bildlichen Anzeigen, akustischen Signalen oder haptischen Informationen liefert. In manchen Fällen kann der Mensch zusätzlich direkt aus dem Prozess Informationen aufnehmen. Der Mensch wertet die Informationen aus und analysiert sie mit seinem Langzeit- und Arbeitsgedächtnis. Daraufhin entscheidet er sich für eine Handlung und führt diese aus. Die Ausführung erfolgt meist über eine Betätigung von Bedienelementen mit den Händen oder Füßen. Als Bedienelemente werden Hebel, Schalter, Touchscreens, usw. verwendet. Wenn das System Gesten oder Stimmen erkennen kann, können auch diese Arten der Betätigung für die Bedienung verwendet werden. Der Controller des Assistenzsystems verarbeitet die Informationen, speichert und lädt Daten und übermittelt Aktionen an den Prozess. Die Rückkopplung an den Menschen erfolgt über Anzeigen, Sprache oder taktil.<sup>89</sup>

Mit Sensoren erfasst das Assistenzsystem Prozessgrößen und verarbeitet diese in einer Steuerung. Ereignisse des Prozesses werden über die Sensorinformationen wahrgenommen.<sup>90</sup> Assistenzsysteme können Menschen, wie in Tabelle 6 ersichtlich, auf unterschiedliche Arten unterstützen.

<sup>88</sup> Gerke, 2014, S. 64

<sup>89</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 63–64

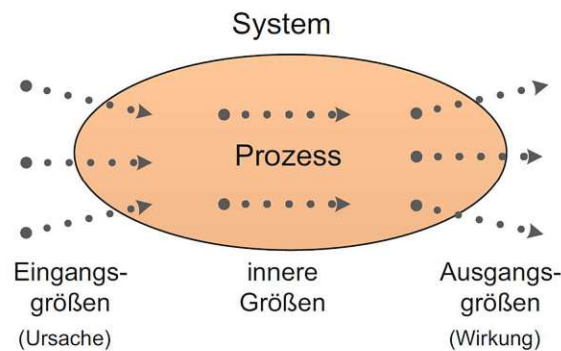
<sup>90</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 64

Tabelle 6 Arten der Unterstützung durch Assistenzsysteme<sup>91</sup>

Art der Unterstützung	Beispiel
physisch	Verbesserungen in Bezug auf Krafteinleitung, Kraftumleitung, Verbesserung der Ergonomie oder Präzision der Arbeitsausführung
kognitiv	Überwachung von Arbeitstätigkeiten, Belastung, Kompensation von Leistungs- und Gefühlsschwankungen, Zeitmanagement, Verteilung von Aktivitäten, Sicherheit am Arbeitsplatz
kommunikativ	Kontakterleichterung, Glättung von Hierarchien, Teamarbeit, Aktivitätenverteilung, Verbesserung des Kommunikationsflusses, Förderung des Arbeitsklimas und Ermunterung der Mitarbeiter
organisatorisch	Bessere Überwachung von Systemzuständen, Arbeitsreihenfolgen, Prozessen, Management von Verbesserungsvorschlägen, Anregungen und Ideen, Teilen und Verbreitung von Wissen

## 2.4 Grundlagen mechatronische Steuerungssysteme

Bei einer Steuerung beeinflussen eine oder mehrere Eingangsgrößen auf Grund der Gesetzmäßigkeiten des Systems die Ausgangsgrößen, wie in der Abbildung 13 ersichtlich ist.<sup>92</sup> So wird von einem offenen Wirkungskreislauf gesprochen bei welchem es aber auch zu einer Rückkopplung kommen kann, welche im Gegensatz zu einem geregelten Prozess nicht fortlaufend verglichen wird.<sup>93</sup>

Abbildung 13 Definition Steuern<sup>94</sup>

Steuerungen können anhand folgender Kriterien eingeteilt werden:<sup>95</sup>

- Steuerungsart (Führungssteuerung, Ablaufsteuerung, Verknüpfungssteuerung)
- Steuerungsmittel (mechanisch, hydraulisch, pneumatisch, elektrisch)

<sup>91</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 279–280

<sup>92</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 218

<sup>93</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 218

<sup>94</sup> Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 218

<sup>95</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 219

- Steuerungsebene (Unternehmensleit-, Betriebsleit-, Produktionsleit-, Prozessleit-, Feldebene)
- Steuerungsfunktionen (Informationen aufnehmen, verarbeiten, weiterleiten, ausgeben)

In der Abbildung 14 ist der Aufbau eines Steuerkreises dargestellt. Hier werden die Gesetzmäßigkeiten in einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) programmiert. Zu diskreten Abtastzeitpunkten  $k$  werden die Soll-, Mess- und Stellwerte eingelesen und ausgegeben.<sup>96</sup> Die elektrischen Stellsignale werden durch Aktoren in Prozessstellgrößen umgewandelt.<sup>97</sup>

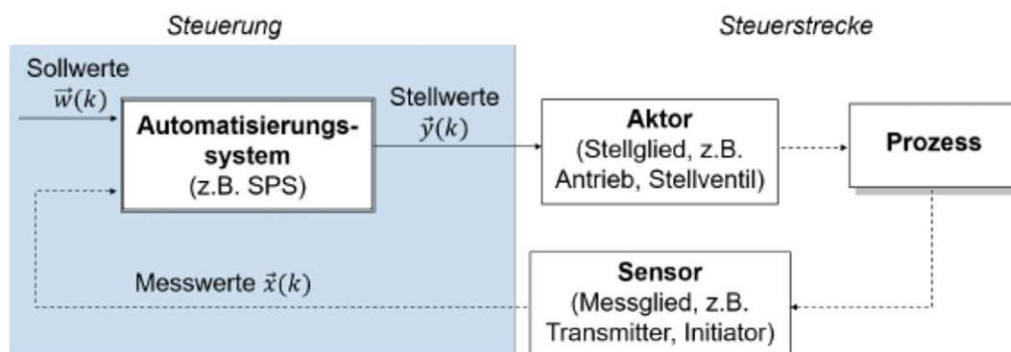


Abbildung 14 Aufbau eines Steuerkreises<sup>98</sup>

### 2.4.1 Speicherprogrammierbare Steuerung

In der Abbildung 15 ist der Hardwareaufbau einer SPS dargestellt, bei der die Zentralbaugruppe (CPU) das Kernstück darstellt. Spezielle Ein- und Ausgangsbaugruppen machen das Einlesen von Sensorsignalen und das Ausgeben von Befehlen an die Aktoren besonders einfach. Mittels LAN/WLAN wird die Ankoppelung an das Programmiergerät (PG), an andere SPSen und an ein Visualisierungssystem (HMI) ermöglicht. Die Ankopplung von Sensoren und Aktoren erfolgt mittels zwei Kupferdrähten an einen binären bzw. analogen Ein-/Ausgangskanal. Busfähige Sensoren und Aktoren können über Feldbusschnittstellen angeschlossen werden.<sup>99</sup>

<sup>96</sup> vgl. Seitz, 2021, S. 20–21

<sup>97</sup> vgl. Göhlich/Lehr/Hummel, 2020, S. 797

<sup>98</sup> Seitz, 2021, S. 21

<sup>99</sup> vgl. Seitz, 2021, S. 24–25

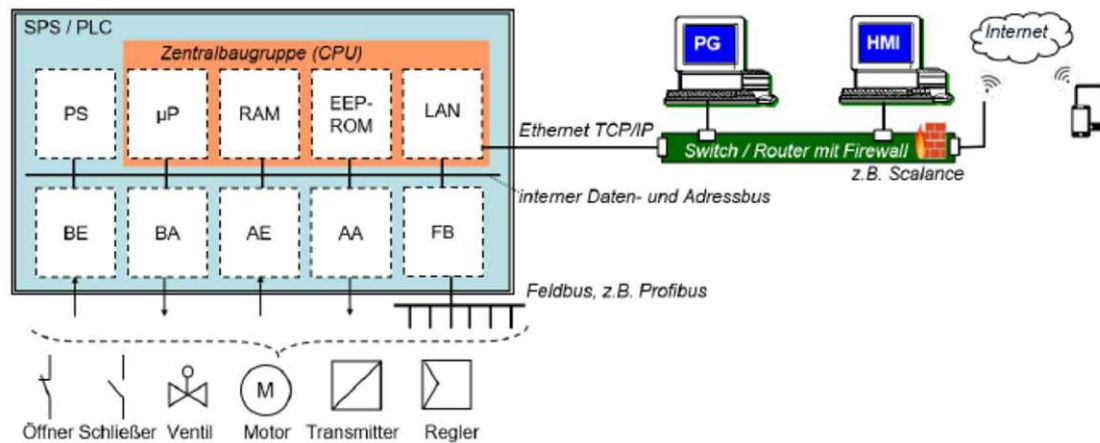


Abbildung 15 Hardwareaufbau einer SPS<sup>100</sup>

Speicherprogrammierbare Steuerungen können in drei verschiedene Arten unterteilt werden. Sie können in Hardware-, Slot- oder Soft-SPS unterschieden werden. Die Hardware-SPS stellt die klassische Aufbauform einer SPS dar. Diese Art der SPS benötigt immer einen externen PC für die Programmierung. Die heutzutage kaum noch eingesetzte Slot-SPS ist eine Einsteckkarte für einen PC. Dagegen ist die Soft-SPS, welche eine PC-basierte Steuerung darstellt, auf dem Vormarsch, da diese als IoT-Gerät eingesetzt werden kann. Diese SPS ist eine reine Software, welche auf handelsüblichen Industrie-PCs, Notebooks oder Mini-PCs, wie dem Raspberry-Pi betrieben werden kann.<sup>101</sup>

## Programmierung

Zur Programmierung der SPS wird ein PC oder Notebook verwendet, welches zur Erstellung des Anwenderprogrammes dient. Zur Erstellung des Programmes wird eine spezielle Programmiersoftware verwendet wie z.B. Step 7 oder Codesys. Dadurch wird die Programmierung in einer Programmiersprache ermöglicht. Nach der Programmierung werden die Programme in einen SPS-spezifischen Code übersetzt. Bevor die Programme auf die SPS geladen werden, können sie auf dem Programmiergerät simuliert werden.<sup>102</sup>

SPSen können durch unterschiedliche Fachsprachen programmiert werden. Diese sind in der Tabelle 7 dargestellt und werden in textbasierte und grafische Sprachen unterteilt.<sup>103</sup>

<sup>100</sup> Seitz, 2021, S. 25

<sup>101</sup> vgl. Seitz, 2021, S. 27

<sup>102</sup> vgl. Seitz, 2021, S. 25

<sup>103</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 319

Tabelle 7 SPS-Programmiersprachen<sup>104</sup>

Text	Grafik
Anweisungsliste (AWL)	Kontaktplan (KOP)
Strukturierter Text (ST)	Funktionsbausteinsprache (FBS)
	Ablaufsprache (AS)

Mit diesen Fachsprachen kann ein Anwendungsprogramm erstellt werden in welchem festgelegt wird, welche Anweisungen durch die Steuerung ausgeführt werden. Die Anweisungen werden zyklisch abgearbeitet. Zu Beginn eines jeden Zyklus werden die aktuellen Signalzustände der Eingänge in das Prozessabbild eingelesen. Mit der Übergabe der aktuellen Zustände der Ausgänge endet der Zyklus. Aus der Anzahl und der Art der Anweisungen ergibt sich die Länge der Zykluszeit. Für einen Echtzeitbetrieb muss bei Änderungen an den Eingängen eine rechtzeitige Reaktion an den Ausgängen erfolgen. Die Zykluszeit muss somit kurz genug sein, um dies zu ermöglichen.<sup>105</sup>

## 2.4.2 Sensoren und Aktoren

### Sensoren

Mit Sensoren werden die benötigten Informationen, die den Systemzustand beschreiben und Informationen der Umwelt erfasst.<sup>106</sup> Die Umwelteigenschaften können mit den Sensortypen aus Tabelle 10 erfasst werden. Mittels der Umwandlung der Informationen in elektrische Signale werden diese für die Steuerung nutzbar gemacht.<sup>107</sup>

### Aktoren

Die elektrischen Stellsignale werden durch Aktoren in Prozessstellgrößen umgewandelt. Die Hilfsenergie wird über ein elektrisches Stellsignal mit dem Energiesteller gesteuert, wie in Abbildung 16 dargestellt ist. Die Hilfsenergie wird in Form von elektrischer, pneumatischer oder hydraulischer Energie zugeführt. Der Energiesteller wirkt in diesem Zusammenhang als Verstärker. Diesem wird meist noch ein Energiewandler nachgeschaltet, der die Energie des Energiestellers in mechanische Energie umwandelt.<sup>108</sup>

<sup>104</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 319

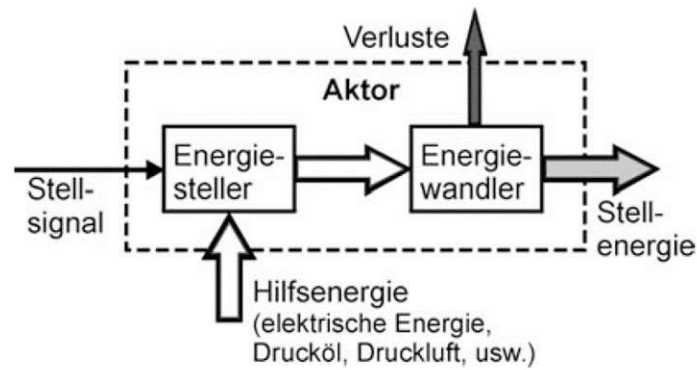
<sup>105</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 315–316

<sup>106</sup> vgl. Roddeck, 2017, S. 676

<sup>107</sup> vgl. Heinrich/Linke/Glückler, 2017, S. 29

<sup>108</sup> vgl. Göhlich/Lehr/Hummel, 2020, S. 797



Abbildung 16 Prinzipieller Aufbau eines Aktors<sup>109</sup>

Aktoren, die mit elektrischer oder Fluidenergie betrieben werden, sind am weitesten verbreitet und werden auch als klassische Aktoren bezeichnet.<sup>110</sup> Diese klassischen physikalischen Wandlungsprinzipien mit den darauf beruhenden Aktoren sind in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Klassische Aktoren und Energiewandlungsprinzip<sup>111, 112</sup>

Wandlertyp	Physikalisches Prinzip	Aktoren
Elektrodynamisch	Kraft auf stromdurchflossene Leitung im Magnetfeld (Lorenzkraft)	Gleich-, Wechselstrommotor, Tauchspule, Linearmotor
Elektromagnetisch	Kraftwirkung an Grenzflächen mit unterschiedlicher magnetischer Leitfähigkeit	Reluktanzmotor, Hubmagnet, Dreh- und Schwingmagnete
Pneumatisch	Druckdifferenz, Verdrängungsströmung	Schubmotor, Membranantrieb
Hydraulisch	Druckdifferenz, Verdrängungsströmung	Translations-, Rotationsmotor

Neben den klassischen Aktoren gibt es noch die sogenannten unkonventionellen Aktoren (piezoelektrische, magnetostriktive, thermobimetall, ...),<sup>113,114</sup> die auf speziellen Werkstoffeigenschaften und Fertigungstechnologien beruhen. Diese Aktoren sind jedoch nur beschränkt einsetzbar.<sup>115</sup> Für die Kommunikation zwischen den Aktoren, Sensoren und der Steuerung werden Daten ausgetauscht.

### 2.4.3 Kommunikation

Die Datenübertragung kann analog oder digital durchgeführt werden. Eine Analogübertragung erfolgt wertkontinuierlich, wobei jeder Wert innerhalb eines Wertebereichs angenommen werden kann. Dies geschieht in der Automatisierung

<sup>109</sup> Roddeck, 2017, S. 692

<sup>110</sup> vgl. Roddeck, 2017, S. 692

<sup>111</sup> vgl. Roddeck, 2017, S. 692

<sup>112</sup> vgl. Göhlich/Lehr/Hummel, 2020, S. 798

<sup>113</sup> vgl. Roddeck, 2017, S. 692–700

<sup>114</sup> vgl. Isermann, 2008, S. 503

<sup>115</sup> vgl. Isermann, 2008, S. 501

normalerweise zwischen 0-24 V. Eine digitale Übertragung erfolgt wertdiskret. Bei der Übertragung von mehreren Daten muss eine Einigkeit über die Formalitäten mit der Gegenseite herrschen. Diese Einigkeit wird als Protokoll bezeichnet. Mit der Bus-Kommunikation können mehrere Teilnehmer über eine gemeinsame Leitung kommunizieren. Durch den Master/Slave Ansatz wird eine deterministische Kommunikation, welche auch als echtzeitfähige Kommunikation bezeichnet wird, ermöglicht. Dadurch können die Antriebe synchronisiert werden, was in der Automatisierungstechnik unabdingbar ist. Beispiele für echtzeitfähige Bus-Protokolle, sind beispielsweise Modbus-TCP, Profinet oder EtherCAT.<sup>116</sup>

## 2.5 Grundlagen Mensch-Maschine-Interaktion

Unter einem Mensch-Maschine-System versteht man das Zusammenwirken eines technischen Systems (Maschine) mit einem oder mehreren Menschen. Die daraus resultierenden Arbeitsergebnisse des Gesamtsystems werden bestmöglich erreicht, wenn der Mensch zielgerichtet mit der Maschine zusammenarbeitet.<sup>117</sup>

### 2.5.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird die Kommunikation zwischen dem Menschen und der Maschine abgewickelt.<sup>118</sup>

Die Informationsaufnahme des Menschen erfolgt über die Sinneswahrnehmungen, welche auch als Modalitäten bezeichnet werden. Die Wahrnehmungsmodalitäten werden über bestimmte Organe realisiert.<sup>119</sup> In Tabelle 9 sind die Modalitäten mit den Organen und Empfindungen dargestellt.

**Tabelle 9 Übersicht der sensorischen Modalitäten<sup>120</sup>**

Modalität	Organ	Empfindung
visuell	Auge	Farbe, Helligkeit
auditiv	Innenohr	Tonhöhe, Lautstärke
vestibulär	Vestibulärapparat (Mittelohr)	Lineare- und Winkelbeschleunigung
olfaktorisch	Schleimhautstück im Nasenraum	Geruch
gustatorisch	Zungenoberfläche	Geschmack
taktil	Haut	Druck, Berührung, Vibration
kinetisch/propriozeptiv	Muskelspindel	Stellung der Körperteile
thermisch	Haut	Temperatur
Schmerzwahrnehmung	unspezifisch	Schmerz

<sup>116</sup> vgl. Hammerstingl, 2020, S. 20–24

<sup>117</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 7

<sup>118</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 8

<sup>119</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 13–14

<sup>120</sup> vgl. Schlick/Bruder/Luczak, 2018, S. 203

Mit Sensoren kann die Wahrnehmung des Menschen auf Maschinen übertragen werden. Somit können Maschinen durch die Sensoren auf Reize aus der Umwelt reagieren.

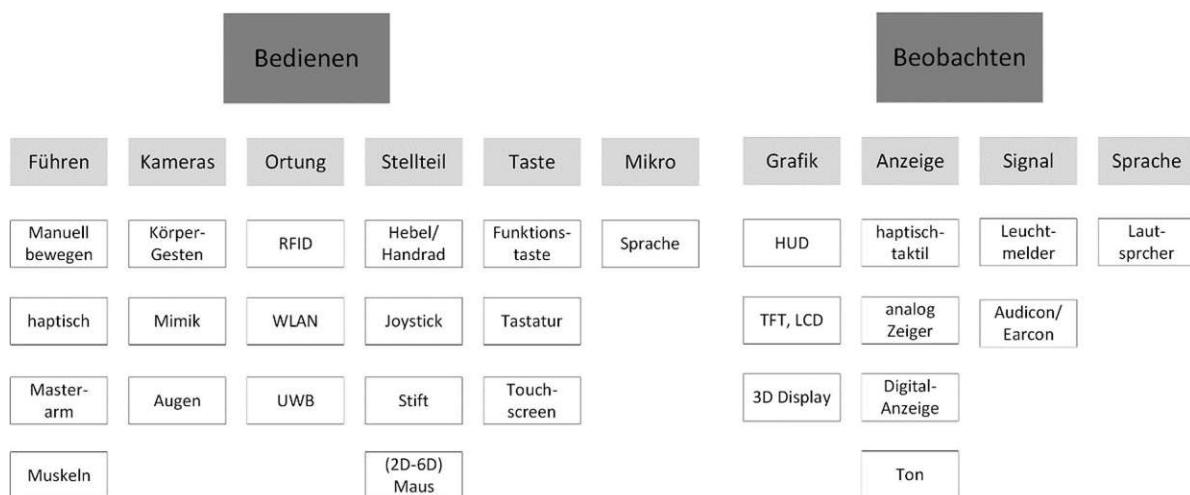
**Tabelle 10 Wahrnehmungsvermögen von Menschen und Maschine<sup>121</sup>**

Mensch	Organ	Sensorik	Erfassen von
Hören	Ohr	Mikrofon	Schall
Sehen	Auge	Fotозelle, Kamera	Licht, Konturen, Szenen
Fühlen	Haut Muskel  Nerven	Thermometer Waage Dehnungsmessstreifen Fühler, Schalter	Wärme Masse Kraft, Drehmoment Form, Lage
Riechen	Nase	Rauchmelder	Rauch, Gasen
Schmecken	Zunge/Gaumen	Künstliche Zunge	Inhaltsstoffen

Laut Hesse und Schnell<sup>122</sup> können zu den fünf Sinnen des Menschen Sensortypen zugeordnet werden. Diese Zuordnung ist in der Tabelle 10 ersichtlich. Zudem können mit Sensoren noch weitere chemische, physikalische oder auch biologische Messgrößen erfasst werden, die der Mensch mit seinen Sinnen nicht erfassen kann.<sup>123</sup>

## 2.5.2 Bedienen und Beobachten

In der Abbildung 17 sind Geräte dargestellt, mit der die Kommunikation zwischen dem Menschen und der Maschinen stattfinden kann.



**Abbildung 17 Geräte zum Bedienen und Beobachten (eigene Darstellung in Anlehnung an<sup>124,125</sup>)**

<sup>121</sup> vgl. Hesse/Schnell, 2012, S. 1

<sup>122</sup> Hesse/Schnell, 2012

<sup>123</sup> vgl. Hesse/Schnell, 2012, S. 1

<sup>124</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 92

<sup>125</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 97; vgl. Gorecky/Schmitt/Loskyll, 2014, S. 535

Bei den Geräten wird zwischen Geräten für die Bedienung und für die Beobachtung unterschieden.<sup>126</sup> Mittels dieser bietet sich die Möglichkeit zur Überwachung des Prozesses. Zudem kann in besonderen Fällen in den Prozess eingegriffen werden. Die Bedienung kann unmittelbar vor Ort mittels Taster und Leuchten vorgenommen werden. Heutzutage erfolgt die Bedienung jedoch oft durch eine grafische Benutzeroberfläche<sup>127</sup> (GUI), die auf einem PC, Smartphone oder Touch-Panel läuft. Mobile Geräte wie Smartphones und Tablets bieten den Vorteil, dass sie die Bedienung mittels Touchscreen, Spracherkennung und Gestenerkennung vereinen. Bei Verwendung eines GUI ist die Touchscreen-Bedienung die wichtigste Interaktionsform.<sup>128</sup> Ein Vorteil der grafischen Benutzeroberfläche ist, dass sie bereits als klassische und bekannte Interaktion angesehen werden kann. Zudem ist diese Interaktion einfach zu lernen und bietet eine übersichtliche Darstellungsmöglichkeit der Funktionalitäten. Dem steht der Nachteil gegenüber, dass diese Interaktion gegebenenfalls ortsgebunden ist oder ein anstrengendes Halten eines mobilen Eingabegeräts erfordert. Zudem weist ein Eingabegerät mit kleinem Bildschirm eine niedrige Präzision auf.<sup>129</sup> Die Verbindung zwischen den HMI-Systemen und der SPS erfolgt über Ethernet oder WLAN.<sup>130</sup>

Zwischen Mensch und Maschine kann die Interaktion explizit und implizit stattfinden. Eine Interaktion wird als explizit bezeichnet, wenn der Mensch dem System seine Wünsche direkt und offen mitteilt. Dies beinhaltet beispielsweise das Betätigen von Tasten oder Sprachbefehle. Eine Interaktion wird als implizit bezeichnet, wenn ein Prozess unausweichlich und automatisch auftritt.<sup>131</sup> Wenn die Umgebungen implizit reagiert, wird diese als adaptiv bezeichnet. Adaptive Umgebungen adaptieren sich an die vorherrschende Situation als auch an die Bedürfnisse und Präferenzen des Benutzers. Dies wird auch als Ambient Intelligence bezeichnet.<sup>132</sup> Die Umgebung ist dadurch in der Lage, dem Menschen die mechanische Kontroll- und Steuerleistung abzunehmen. Gleichzeitig stellt sie, angepasst auf seine aktuellen Ziele, ihr volles Potential zur Verfügung.<sup>133</sup> Die beiden Formen der Interaktion können auch koexistieren. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise ein explizites Assistenzsystem in einer adaptiven Umgebung verwendet wird.<sup>134</sup> Die Interaktion kann zusätzlich nach dem Automatisierungsgrad klassifiziert werden. Ein System, dass sich von selbst an den Benutzer anpasst, wird adaptiv genannt. Wenn der Benutzer das System hingegen nach seinen Wünschen einrichten kann, wird es als adaptierbar

---

<sup>126</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 91

<sup>127</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 97

<sup>128</sup> vgl. Gorecky/Schmitt/Loskyll, 2017, S. 222–223

<sup>129</sup> vgl. Schleicher, 2019, S. 59

<sup>130</sup> vgl. Seitz, 2021, S. 42

<sup>131</sup> vgl. Eisenhauer/Oppermann/Prinz, 2007, S. 52

<sup>132</sup> vgl. Nazari Shirehjini, 2009, S. 5

<sup>133</sup> vgl. Nazari Shirehjini, 2009, S. 5

<sup>134</sup> vgl. Nazari Shirehjini, 2009, S. 17

bezeichnet.<sup>135</sup> Mit Ortungstechnologien (RFID, WLAN, UWB) oder einer integrierten Kamera mit Objekterkennung<sup>136, 137</sup> kann die Position der Arbeiter\*innen zu Objekten der impliziten Interaktion dienen. Mit Bilderkennungsalgorithmen können die Bewegungen, Gesten und anthropometrische Merkmale analysiert werden. Dadurch ermöglicht sich eine Live-Einstellung des Systems an die Mitarbeiter. Jedoch können dadurch keine persönlichen Einstellungen erfolgen. Für persönliche Einstellungen wird eine Identifizierung der Mitarbeiter\*innen benötigt. Die Identifizierung kann über RFID-Chips oder durch Gesichts-, Iris- und Fingerabdruckscanner erfolgen.<sup>138</sup>

### 2.5.3 Kamerasystem zur Bilderkennung

Informationen, die mit Hilfe von Kameras aufgenommen werden, können von Assistenzsystemen genutzt werden. Sie können als Augen der Maschine bezeichnet werden. Körperbewegungen wie Fingergesten, Mimik oder Handgesten können somit erkannt und zu einer Interaktionsform in einem System werden. Die Kamerabilder werden mit den Methoden der Bildverarbeitung in Computerprogrammen ausgewertet, was auch als Computer-Vision bezeichnet wird. Computer-Vision beinhaltet Methoden zur Bildaufnahme und -auswertung, damit Merkmale, Farben sowie geometrische Anordnungen erkannt werden können.<sup>139</sup>

#### Kamerasensoren

Sensoren, die für die Bildaufnahme verwendet werden, sind der CCD (Charge Coupled Device) -Chip und der CMOS (Complementary Metaloxid Semiconductor) -Chip die in digitalen Kameras verbaut sind. Die Bildelemente des Sensors sind in einem rechteckigen Muster angeordnet, den sogenannten Picture-Elements-Pixel. Durch den photoelektrischen Effekt überträgt das Licht Energie auf die Elektronen des Halbleiters der Bildelemente, wodurch eine elektrische Ladung entsteht. Die durch das Licht generierten Ladungsträger werden mit dem CCD-Sensor gezählt. Der CMOS-Sensor erfasst die Veränderung der Leitfähigkeit und damit den Photostrom, der durch das einfallende Licht erzeugt wird.<sup>140</sup> Die Lichtenergie hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab. Durch die Bildaufnahmezeit oder Belichtungszeit wird die Größe der elektrischen Ladung bestimmt. Die durch einen CCD-Sensor erfassten Ladungen werden zeilenweise an einen Verstärker weitergeleitet. Der Verstärker erstellt daraus einen zeitlich veränderlichen elektrischen Spannungsverlauf. Durch einen Analog-Digitalwandler wird das Spannungssignal schließlich in ein digitales umgewandelt. Die Umwandlung erfolgt

<sup>135</sup> vgl. Nazari Shirehjini, 2009, S. 24

<sup>136</sup> vgl. Gorecky/Schmitt/Loskyll, 2014, S. 535

<sup>137</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 97

<sup>138</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 122–123

<sup>139</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 317

<sup>140</sup> vgl. Correns, 2011, S. 9

durch eine räumliche und zeitliche Abtastung der Pixel.<sup>141</sup> Jedes Pixel eines CMOS-Sensors besitzt eine Verstärkerschaltung, wodurch es möglich ist, einzelne Pixel direkt ohne Verschiebung auszulesen.<sup>142</sup>

Durch einen speziellen Farbfilter, der vor jedem Pixel angeordnet ist, wird die Farbe des Lichtes erfasst. Dieser Filter wird auch als Bayer-Filter bezeichnet. Die Filtermatrix nach Bayer besteht aus vier Filtern mit einem Rot- und einem Blaufilter sowie zwei Grünfilter in der Diagonale, wie in Abbildung 18 zu sehen ist. Es werden doppelt so viele Pixel mit einem Grünfilter ausgestattet, da das menschliche Auge für den grünen Spektralanteil des Lichts empfindlicher ist. Durch die Farbfilter kann zu jedem Pixel nur ein Farbanteil ermittelt werden, deshalb werden die zwei anderen Anteile durch die Nachpixel geschätzt.<sup>143</sup>

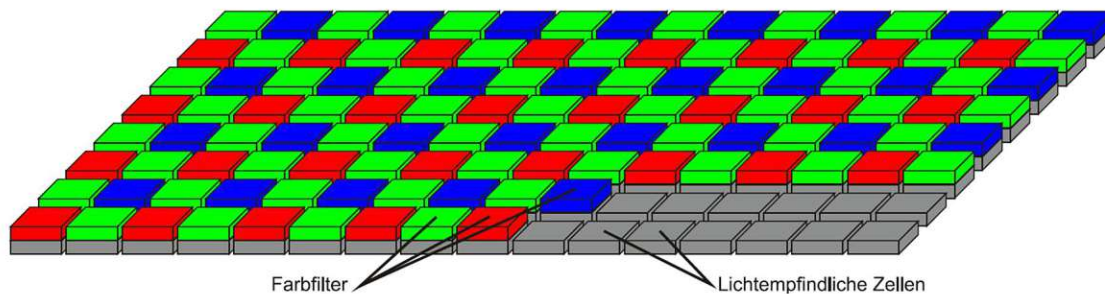


Abbildung 18 Filteranordnung nach Bayer<sup>144</sup>

## Das Pinhole-Modell

Das Pinhole-Modell, auch Lochkamera-Modell genannt, ist das am häufigsten verwendete Modell<sup>145</sup> für die Rekonstruktion von dreidimensionalen Objekten auf eine zweidimensionale Ebene. Es bildet ein Objekt in der Gegenstandsebene über das Kameraobjektiv auf die Bildebene ab, wodurch ein spiegelverkehrtes Bild des Objektes entsteht. Zusätzlich befindet sich ein lichtempfindlicher Sensor auf der Bildebene, der die zur Bildaufnahme notwendigen Pixel enthält.<sup>146, 147, 148</sup>

In der Abbildung 19 ist das Pinhole-Modell samt dem Weltkoordinatensystem  $W$  ( $x,y,z$ ), dem Kamerakoordinatensystem  $C$  ( $x,y,z$ ), dem Bildkoordinatensystem  $I$  ( $\hat{u}, \hat{v}$ ) und dem Sensorkoordinatensystem  $S$  ( $u,v$ ) zu sehen.

<sup>141</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 318

<sup>142</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 319

<sup>143</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 320–321

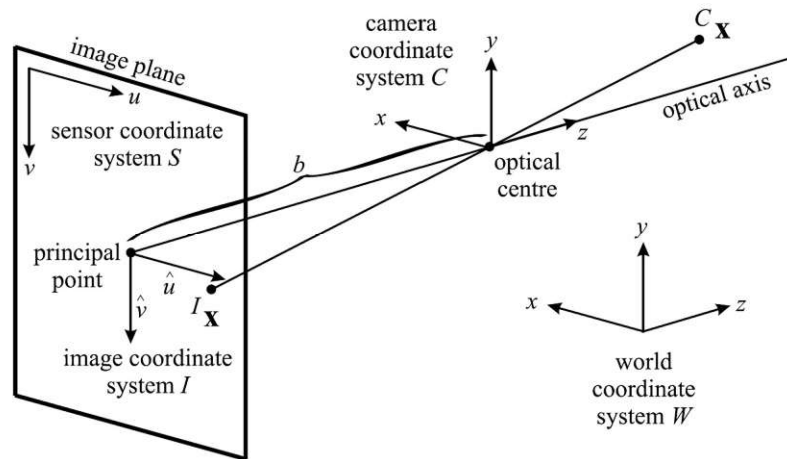
<sup>144</sup> Correns, 2011, S. 20

<sup>145</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 3

<sup>146</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 324–325

<sup>147</sup> vgl. Wu u. a., 2019, S. 86

<sup>148</sup> vgl. Schreer, 2005, S. 41

Abbildung 19 Pinhole-Modell<sup>149</sup>

Das optische Zentrum befindet sich auf der Kameralinse und entspricht einem Punkt zwischen der dreidimensionalen Szene und der zweidimensionalen Bildebene. Das optische Zentrum befindet sich zudem auf der optischen Achse, welche senkrecht zur Bildebene definiert ist. Der Schnittpunkt der Bildebene und der optischen Achse wird auch Kamerahauptpunkt (engl. principal point) genannt.<sup>150</sup> Der normale Abstand auf der optischen Achse zwischen der Bildebene und dem Kamerahauptpunkt wird als  $b$  bezeichnet.<sup>151</sup>

Ein Punkt  $x$  wird im Kamerakoordinatensystem mit  ${}^C x$  bezeichnet. Eine Transformation eines Punktes im Weltkoordinatensystem  $W$  in das Kamerakoordinatensystem  $C$  wird durch eine Multiplikation des Punktes  ${}^W x$  mit einer Transformation  ${}^C T_W$  abgebildet. Der untere Index stellt das ursprüngliche Koordinatensystem dar und der obere Index das Koordinatensystem, in das der Punkt transformiert wird. Die Transformation  ${}^C T_W$  entspricht einer beliebigen Rotation und Translation.<sup>152</sup>

Somit erhält man den Punkt  $x$  in dem Kamerakoordinatensystem mit  ${}^C x = {}^C T_W {}^W x$ . Der Punkt  ${}^C x$  wird auf die Bildfläche in den Punkt  ${}^I x$  projiziert, sodass der Szenepunkt  ${}^C x$ , das optische Zentrum und der Bildpunkt  ${}^I x$  durch eine gerade Linie im dreidimensionalen Raum verbunden sind. Die Tiefe des Punktes geht verloren, da alle Punkte in der Szene, die auf dieser Geraden liegen, in denselben Bildpunkt projiziert werden. Durch die geometrischen Beziehungen der ähnlichen Dreiecke ergeben sich für den Punkt  ${}^I x$  folgende Zusammenhänge.<sup>153</sup>

<sup>149</sup> Wöhler, 2013, S. 4

<sup>150</sup> vgl. Schreer, 2005, S. 44

<sup>151</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 3–5

<sup>152</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 3–5

<sup>153</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 3–5

$$\frac{\hat{u}}{b} = \frac{x}{z}$$

$$\frac{\hat{v}}{b} = \frac{y}{z}$$
(1)

Der Kamerahauptpunkt ist mit den Koordinaten  $\hat{u} = \hat{v} = 0$  bereits bekannt und die Pixel-Koordinaten des Sensors werden mit  $u$  und  $v$  beschrieben. Wenn nur eine Kamera verwendet wird, ist es am einfachsten, die Weltkoordinaten und die Koordinaten der Kamera identisch zu beschreiben. Allerdings ist es bei der Verwendung von mehreren Kameras nötig, ein Weltkoordinatensystem zu definieren, womit die Position und die Winkelstellung der Kameras  $i$  mit der Transformation  ${}^{Ci}T_W$  beschrieben werden können. Die Transformation  ${}^{Ci}T_W$  besteht aus einem Rotationsanteil  $R_i$  und einem Translationsanteil  $t_i$ . Der Rotationsanteil  $R_i$  besteht aus einer orthonormalen  $3 \times 3$  Matrix, welche durch drei unabhängige Parameter (z.B. Euler-Drehwinkel) bestimmt wird. Der translatorische Anteil besteht aus einem Vektor und bildet den Versatz zwischen den Koordinatensystemen ab. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Transformation von Weltkoordinaten in Kamerakoordinaten.

154

$${}^{Ci}x = {}^{Ci}T_W({}^Wx) = R_i{}^Wx + t_i$$
(2)

Der Bilderzeugungsprozess wird zudem noch durch die intrinsischen Parameter jeder Kamera bestimmt. Diese Parameter sind zum einen lensenspezifisch und zum anderen sensorspezifisch. Die Parameter umfassen bei einer Kamera mit einem Sensor den Abstand  $b$  und die effektive Anzahl an Pixel pro Längeneinheit  $k_u$  bzw.  $k_v$  entlang der horizontalen und vertikalen Achse sowie den Pixelversatzwinkel  $\theta$  und die Koordinaten  $u_0$  und  $v_0$  des Kamerahauptpunktes. Bei den meisten Kameras beträgt der Pixelversatzwinkel  $90^\circ$  und die Pixel sind quadratisch ( $k_u = k_v$ ) ausgeführt.<sup>155</sup>

Durch die Linsen- und die radiale Verzerrung weichen die durch (2) erhaltenen Koordinaten von den realen Koordinaten ab. Die verzerrten Koordinaten können mit folgender Formel nach Brown<sup>156</sup> (3) aus den unverzerrten Koordinaten berechnet werden.<sup>157</sup>

$${}^I x_d = (1 + k_1 r^2 + k_3 r^4 + k_5 r^6) \begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2k_2 \hat{u} \hat{v} + k_4 (r^2 + 2\hat{u}^2) \\ k_2 (r^2 + 2\hat{v}^2) + 2k_4 \hat{u} \hat{v} \end{pmatrix}$$
(3)

<sup>154</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 3–5

<sup>155</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 5

<sup>156</sup> Brown, 1971

<sup>157</sup> vgl. Wöhler, 2013, S. 5



Die Variable  $r^2$  ergibt sich aus  $r^2 = \hat{u}^2 + \hat{v}^2$ . Bei der Verwendung eines digitalen Kamerasensors ergeben sich die Sensorkoordinaten aus den Bildkoordinaten mit folgender Transformation (4).

$${}^s x = {}^s T({}^l x) \quad (4)$$

### Dreidimensionale Objekterkennung

Die Verfahren der dreidimensionalen Objekterkennung können unterschieden werden in Verfahren, die mehrere Bilder auswerten und Verfahren, die mit strukturiertem Licht arbeiten. Das Prinzip der Triangulation wird in einigen Methoden, die zur Erstellung einer dreidimensionalen Punktwolke herangezogen werden, verwendet. In der Triangulation werden Berechnungen mit Strecken und Winkel in Dreiecken ausgewertet.<sup>158</sup>

### Lasertriangulation

In der Abbildung 20 ist das Prinzip der Lasertriangulation dargestellt. Dies ermöglicht die Erfassung der 3D-Koordinaten eines Punktes mit einer Kamera und einer Laser-/Lichtquelle, was auch als aktive Triangulation bekannt ist. Mit dem Dreieck aus der Kamera, dem Laser und dem Punkt besteht, kann die Entfernung zwischen Punkt und Kamera berechnet werden. Für diese Berechnung muss der Abstand  $b$ , also die Distanz zwischen Laser und Kamera, wie auch der Einfallswinkel  $\alpha$  des Lasers bekannt sein. Der Winkel auf der Kameraseite  $\beta$  kann mithilfe des Sensors der Kamera errechnet werden. Dieses Verfahren kann auch für eine Laserebene angewendet werden, was auch als Streifenlichtprojektion bekannt ist.<sup>159, 160, 161, 162</sup>

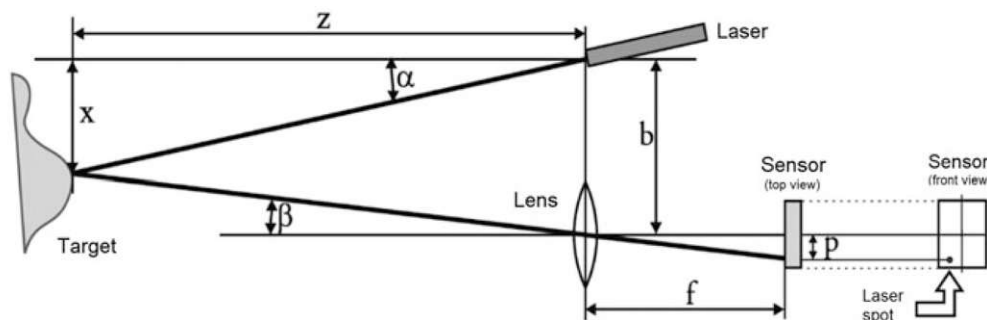


Abbildung 20 Lasertriangulation<sup>163</sup>

<sup>158</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 335

<sup>159</sup> vgl. Kalová/Lisztwan, 2006, S. 258–260

<sup>160</sup> vgl. Acosta/Garcia/Aponte, 2006, S. 14–16

<sup>161</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 335–337

<sup>162</sup> vgl. Kostolani, 2021, S. 15–17

<sup>163</sup> Giancola/Valenti/Sala, 2018, S. 18

## Stereo-Vision

Kamerasysteme mit zwei unterschiedlichen Kameras werden Stereosysteme genannt. Sie verwenden das Prinzip der passiven Triangulation<sup>164</sup>. Sie lassen sich aufgrund ihrer räumlichen Anordnung in zwei unterschiedliche Klassen einteilen, wie in Abbildung 21 zu erkennen ist. Zum einen in Systeme mit einer parallelen Ausrichtung der optischen Achse und zum anderen in konvergente Systeme. In konvergenten Systemen wird die optische Achse der beiden Kameras auf einen Konvergenzpunkt ausgerichtet. Achsparallele Systeme haben einfachere mathematische Zusammenhänge. Jedoch ergibt die achsparallele Ausrichtung einen kleineren Bildüberschneidungsbereich, der erfasst werden kann und die beiden Kameras sind nicht auf ein bestimmtes Objekt ausgerichtet.<sup>165</sup> In achsparallelen Systemen können die 3D-Punkte mithilfe der Triangulation berechnet werden.<sup>166, 167</sup>

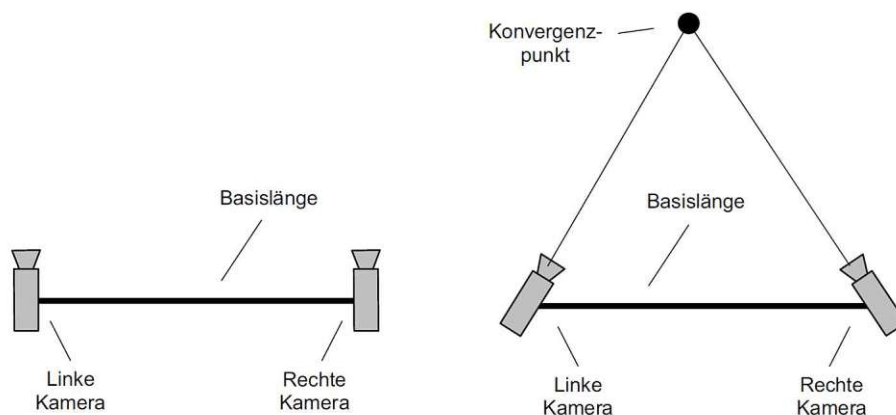


Abbildung 21 Stereosysteme: Achsparallel (links), konvergente Anordnung (rechts)<sup>168</sup>

Die 3D-Punkte können bei der konventionellen Anordnung mit Hilfe der Epipolargeometrie berechnet werden. Die Epipolarebene wird zwischen einem Punkt und den beiden Brennpunkten der Kameras aufgespannt. Die inneren und äußeren Kamera-Parameter können in einer sogenannten Fundamentalmatrix dargestellt werden.<sup>169</sup>

## Time of Flight

Time of Flight Kameras nutzen die Laufzeitmethode, welche anhand der Messzeit die Entfernung berechnet. Infrarot- oder Laserimpulse werden erzeugt und zum Zielobjekt übertragen. Die Impulse werden von dem Ziel reflektiert und gelangen so wieder zurück zum Empfänger, wie in Abbildung 22 dargestellt. Die Zeit, die diese

<sup>164</sup> vgl. Giancola/Valenti/Sala, 2018, S. 12

<sup>165</sup> vgl. Schreer, 2005, S. 65–66

<sup>166</sup> vgl. Schreer, 2005, S. 67–68

<sup>167</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 340–341

<sup>168</sup> Schreer, 2005, S. 66

<sup>169</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 341–342

Impulse benötigen, um zu dem Objekt und wieder zurückzukommen, wird für jeden Pixel genau gemessen. Wenn ein periodisches Signal verwendet wird, kann die Phasenverschiebung zur Berechnung der Zeit herangezogen werden.<sup>170</sup> Aus dieser Zeit kann für jedes Pixel die Entfernung errechnet werden und somit ein 3D-Abbild des Objektes erstellt werden.<sup>171, 172</sup> Typischerweise werden Infrarot (IR) oder Nahinfrarot (NIR) Lichtsignale verwendet, diese Lichtsignale reduzieren natürliche Lichtstörungen der Umwelt.<sup>173</sup>

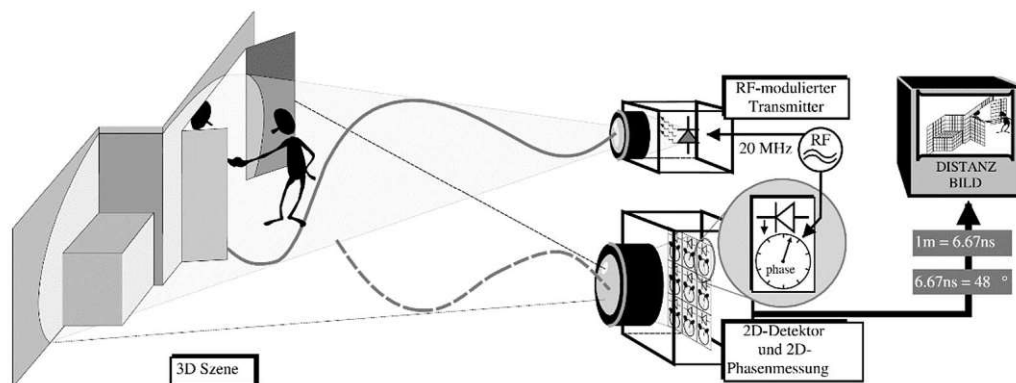


Abbildung 22 Time-of-Flight Prinzip<sup>174</sup>

## 2.6 Grundlagen Modellbildung

Ein reales System zu beschreiben ist oftmals nicht möglich oder mit hohem Aufwand verbunden. Daher sind Modelle für den erleichterten Umgang mit dem realen System ein wesentliches Hilfsmittel.<sup>175</sup>

Aufgrund seines Zwecks können jedem Modell drei Merkmale zugeordnet werden. Diese Merkmale sind das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das Pragmatismusmerkmal, welche in Abbildung 23 ersichtlich sind. Modelle sind stets Abbildungen von Originalen, wobei auch das Original selbst ein Modell sein kann (Abbildungsmerkmal).<sup>176, 177</sup>

<sup>170</sup> vgl. Giancola/Valenti/Sala, 2018, S. 20

<sup>171</sup> vgl. Gerke, 2014, S. 338

<sup>172</sup> vgl. Hansard u. a., 2013, S. 1–2

<sup>173</sup> vgl. Giancola/Valenti/Sala, 2018, S. 20

<sup>174</sup> Seitz/Oggier/Blanc, 2004, S. 539

<sup>175</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 5

<sup>176</sup> vgl. Kirchner, 2020, S. 108

<sup>177</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 8

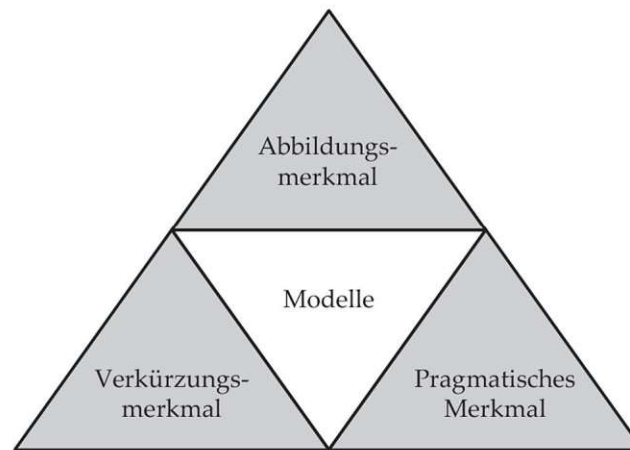


Abbildung 23 Allgemeine Merkmale von Modellen<sup>178</sup>

Nicht alle Attribute des Originals werden durch ein Modell erfasst. So werden nur jene Attribute erfasst, die für die Ersteller\*innen und die Benutzer\*innen auch relevant sind (Verkürzungsmerkmal). Für begrenzte Zeit ersetzen Modelle die Originale, da sie verschiedenen Personen für unterschiedliche Zwecke dienen. Allerdings bleiben bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen durch die Verwendung von Modellen eingeschränkt. Daraus folgt, dass Modelle und Originale einander nicht immer eindeutig zugeordnet sind. (Pragmatisches Merkmal).<sup>179, 180</sup>

Im Beziehungssystem eines Modells nach Neugebauer<sup>181</sup> steht ein Modell zum einen in Relation zum Original (Bezugssystem) und zum anderen zu einem „Verendersystem“. Die Beziehung zwischen der modellierenden und der verwendeten Person wird durch die Zielsetzung gekennzeichnet. Wird die Modellierung und Verwendung jedoch von derselben Person durchgeführt, entsteht ein System aus drei Elementen. Wie in der Abbildung 24 ersichtlich, werden die drei Elemente des Systems durch Aktivitäten miteinander in Beziehung gesetzt. Das Abbildungsmerkmal kennzeichnet die Beziehung zwischen einem Modell und seinem Original.<sup>182</sup>

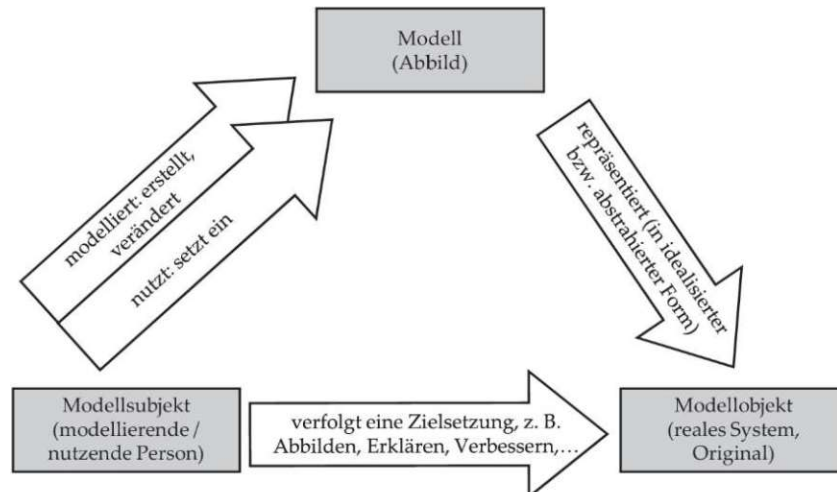
<sup>178</sup> Töllner u. a., 2009, S. 9

<sup>179</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 8–9

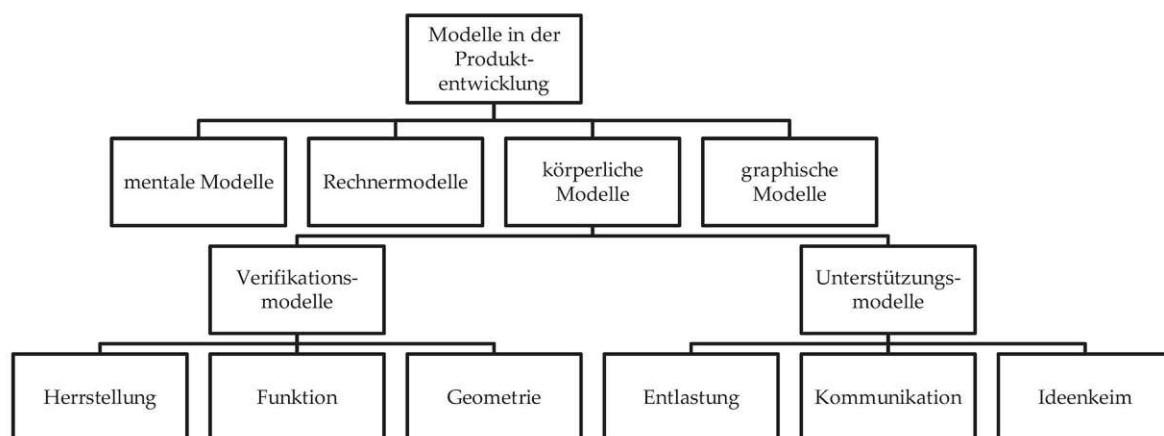
<sup>180</sup> vgl. Kirchner, 2020, S. 108

<sup>181</sup> Neugebauer, 1980

<sup>182</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 10

Abbildung 24 Beziehungsdreieck eines Modells<sup>183</sup>

Die Abgrenzung des zu modellierenden Systems, innerhalb der Relationen der drei Elemente, ist für die spätere Verwendung eines Modells von großer Bedeutung. Damit das Modell seinen bestimmten Zweck erfüllen kann und die Zielsetzung des Modellsubjektes erfüllt, ist das Modellobjekt dementsprechend zu wählen und abzugrenzen.<sup>184</sup> In der Entstehung eines Produktes kommen eine große Anzahl an verschiedenen Modellen für verschiedene Zwecke zum Einsatz.<sup>185</sup> Aufgrund der großen Anzahl an verschiedenen Modellen und Einsatzzwecken gibt es auch eine große Anzahl an unterschiedlichen Klassifikationen für die Einteilung von Modellen.<sup>186</sup> Eine Klassifikation nach Stetter und Pache<sup>187</sup>, welche Modelle in der Produktentwicklung klassifiziert, ist in Abbildung 25 ersichtlich.

Abbildung 25 Modelle in der Produktentwicklung<sup>188</sup>

<sup>183</sup> Töllner u. a., 2009, S. 10

<sup>184</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 11

<sup>185</sup> vgl. Kirchner, 2020, S. 108–110

<sup>186</sup> Jockisch/Rosendahl, 2009

<sup>187</sup> Setter/Pache, 1998

<sup>188</sup> Setter/Pache, 1998

Das Verändern eines bestehenden Modells oder die Erstellung eines neuen Modells wird nach VDI 2249<sup>189</sup> als „modellieren“ bezeichnet. Das Modell als Repräsentant eines realen Systems wird durch die modellierende Person erstellt, wie Abbildung 24 darstellt. Einflussfaktoren bei der Modellierung sind das Modellobjekt und das Ziel des Modellierenden. Je nach Verwendungszweck werden während der Modellierung bestimmte Aspekte weggelassen oder hervorgehoben. Somit sind die Vorgänge des Modellierens das Abstrahieren und das Idealisieren.<sup>190</sup>

Unter Abstrahieren wird das Reduzieren eines Problems durch die Trennung der für bestimmte Aspekte der Problemlösung wichtigen und unwichtigen Details verstanden. Die Idealisierung ist eine Vereinfachung des Systems, wobei die wesentlichen Eigenschaften des Systems durch das Weglassen untergeordneter Eigenschaften und Einflüsse hervorgehoben werden.<sup>191</sup>

Durch die Zielsetzung des Modellsubjekts und durch den Zweck des Modells wird festgelegt, wie stark das Modell vom Modellobjekt abstrahiert werden soll und welche Idealisierungen vorgenommen werden dürfen. Es ist notwendig, die Systemgrenzen vor der Erstellung des Modells eindeutig zu bestimmen.

In der Modellierung wird als erster Schritt ein verbales Model erstellt. Daraufhin werden die relevanten Zusammenhänge ermittelt und in ein weiteres Modell, beispielsweise ein mathematisches oder graphisches Modell, überführt. Werkzeuge, mit deren Hilfe ein Modell erstellt werden kann, können von einem Stift und Papier bis hin zu einer Softwareanwendung reichen. Im Bereich des Maschinenbaus werden CAD- und FEM-Software als Werkzeuge eingesetzt.<sup>192, 193</sup> Daraufhin kann zum Testen und Evaluieren der Funktionen und des Modells ein Prototyp erstellt werden. Prototypen für den Funktionstest fallen beispielsweise in die Klasse der körperlichen Verifikationsmodelle.<sup>194</sup> Mit diesen Funktionsmodellen, welche eine vereinfachte Nachbildung eines Produktes darstellen, können die wichtigsten Funktionen des Originals überprüft werden. Insbesondere dienen sie zur Überprüfung von neuen Funktions- und Bedienmöglichkeiten.<sup>195</sup> Diese Art von Prototypen haben eine zentrale Rolle bei der Erarbeitung und Kommunikation von neuen Lösungskonzepten.<sup>196</sup> Durch Prototypen kann das Gesamtprodukt hinsichtlich seiner Proportionen, ästhetischen Ausprägung und Teilaspekten des Funktionsspektrums gut bewertet werden.<sup>197</sup> Mit Prototypen kann das Risiko gegen Ende des Entwicklungsprozesses minimiert werden. Sie sind somit eine Art Versicherung. Mit

<sup>189</sup> VDI-Richtlinie 2249

<sup>190</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 18

<sup>191</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 18

<sup>192</sup> vgl. Salvinetti, 2016, S. 12–13

<sup>193</sup> vgl. Töllner u. a., 2009, S. 18–20

<sup>194</sup> vgl. Jockisch/Rosendahl, 2009, S. 39–40

<sup>195</sup> vgl. Bühler u. a., 2019, S. 64

<sup>196</sup> vgl. Böhmer u. a., 2017, S. 3

<sup>197</sup> vgl. Krzywinski/Lorenz/Klemm, 2017, S. 89

einem einfachen Aufbau ermöglichen sie ein schnelles Testen eines Lösungskonzepts.<sup>198</sup> Zudem ergibt sich durch die Einbindung von Prototypen in der frühen Phase der Produktgestaltung ein Vorteil in der Anpassungsmöglichkeit, da in den späteren Phasen die Anpassung nur mehr begrenzt möglich ist.<sup>199</sup> Ein weiterer Vorteil von physischen Prototypen ist, dass die Chance besteht, verborgene Anforderungen zu identifizieren, welche ohne eine physische Interaktion unsichtbar blieben.<sup>200</sup> Mit Hilfe von Funktionsprototypen kann die Evaluierung anhand eines Use-Case erfolgen.<sup>201</sup> Damit können Usability-Evaluationen schon frühzeitig stattfinden, wodurch eine hohe Gebrauchstauglichkeit des Endprodukts erzielt werden kann. Sie haben somit eine positive Auswirkung auf die Gesamtkosten des Produkts<sup>202</sup>, da Entwicklungskosten und Ressourcen eingespart werden können.<sup>203</sup>

<sup>198</sup> vgl. Böhmer u. a., 2017, S. 3

<sup>199</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 32

<sup>200</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 57

<sup>201</sup> vgl. Wächter/Bullinger, 2015, S. 167–168

<sup>202</sup> vgl. Böhmer u. a., 2017, S. 3

<sup>203</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 78

### 3 State-of-the-Art

In diesem Kapitel werden die existierenden selbstkonfigurierenden Montagesysteme vorgestellt. Daraufhin wird die Montagestation 4.0 anhand eines Baustellenmontagearbeitsplatzes behandelt.

#### 3.1 Existierende selbstkonfigurierende Montagestationen

Abbildung 26 zeigt einen methodischen Rahmen einer selbstkonfigurierenden Montagestation. Es werden die in der Recherche gefundenen Arbeiten anhand der Komponenten des methodischen Rahmens vorgestellt.

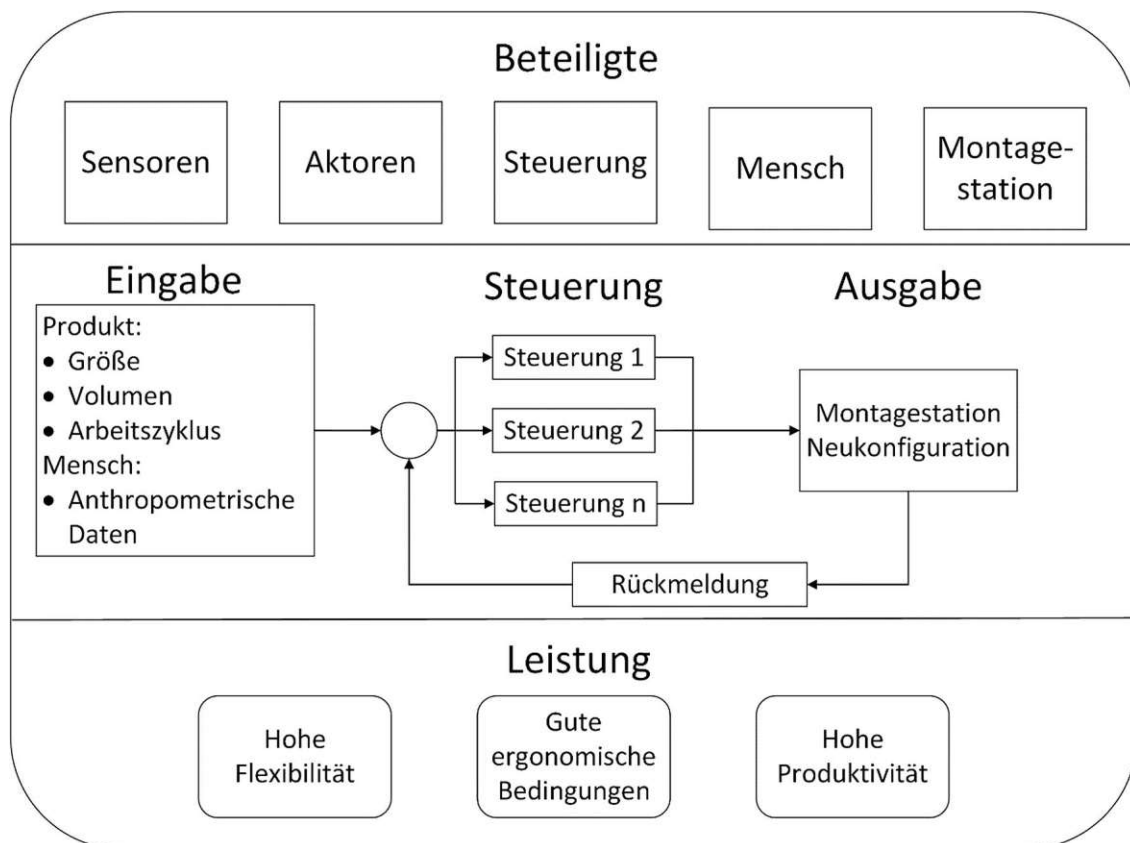


Abbildung 26 Methodischer Rahmen für eine selbstkonfigurierende Montagestation (eigene Darstellung in Anlehnung an <sup>204</sup>)

Die Arbeiten von Rönick<sup>205</sup> und Bartolini et al.<sup>206</sup> beinhalten eine Montagestation, die für klein- und mittelgroße Geräte ausgelegt ist. In den Arbeiten von Beuß et al.<sup>207</sup> und Jagusch et al.<sup>208</sup> wird die Montage von Großgeräten behandelt und in der Arbeit von

<sup>204</sup> vgl. Bortolini u. a., 2021, S. 5

<sup>205</sup> Rönick, 2020

<sup>206</sup> Bortolini u. a., 2021; Bortolini u. a., 2020a; Bortolini u. a., 2019

<sup>207</sup> Beuß u. a., 2017

<sup>208</sup> Jagusch u. a., 2018



Beuß et al.<sup>209</sup> wurde die Entwicklung der Montagestation in einem Virtual-Reality Mock-Up durchgeführt. Aufgrund der virtuellen Simulation wurden für die Aktoren nur translatorische und rotatorische Antriebe angeführt. In den anderen Arbeiten, die untersucht wurden, wurden elektrische Antriebe verwendet. In den recherchierten Arbeiten, in denen nur klein- und mittelgroße Geräte montiert werden, wurde auf die Winkelanpassung verzichtet. Die Höhenadaption erfolgte zum einen mit Hubsäulen<sup>210</sup> und zum anderen mittels zwei Spindelmotoren<sup>211</sup>. Bei der Montagestation für Großgeräte wurde für die translatorische Bewegung eine längenkonstante Lineareinheit verwendet, da eine längenvariable Lineareinheit eine geringe Aufnahme von Querkräften hat und eine erhebliche Ausgangsgröße für große Verstellbereiche benötigt.<sup>212</sup> Zur Anpassung der Aktoren auf die Arbeitsschritte und Personen wurde in den Arbeiten von Bartolini et al.<sup>213</sup> eine SPS der Firma Bosch verwendet. Diese Steuerung wurde mittels IntraWorks Engineering programmiert und durch ein Motion Logic Programming Interface mit dem Programm Matlab verbunden. Die Steuerung ermöglicht eine Synchronisation der Bewegungsachsen mit der die Arbeitspositionen angefahren werden können. Die optimalen Positionen werden aus einer externen Datenbank entnommen. Daraufhin werden die Positionen Aufgabe für Aufgabe angefahren und entsprechend den Bedienermerkmalen (Körper, Fähigkeiten) eingestellt. Die Echtzeiteinstellung der Arbeitspositionen wird über eine grafische Benutzeroberfläche ermöglicht, die mittels Matlab erstellt wurde. Dieser beschriebene Rahmen ist in der Abbildung 27 schematisch dargestellt.<sup>214,215</sup>

---

<sup>209</sup> Beuß u. a., 2017

<sup>210</sup> Rönick, 2020

<sup>211</sup> Bortolini u. a., 2020a

<sup>212</sup> vgl. Jagusch u. a., 2018, S. 370

<sup>213</sup> Bortolini u. a., 2021; Bortolini u. a., 2020a; Bortolini u. a., 2019

<sup>214</sup> vgl. Bortolini u. a., 2019, S. 93

<sup>215</sup> vgl. Bortolini u. a., 2020a, S. 533–534

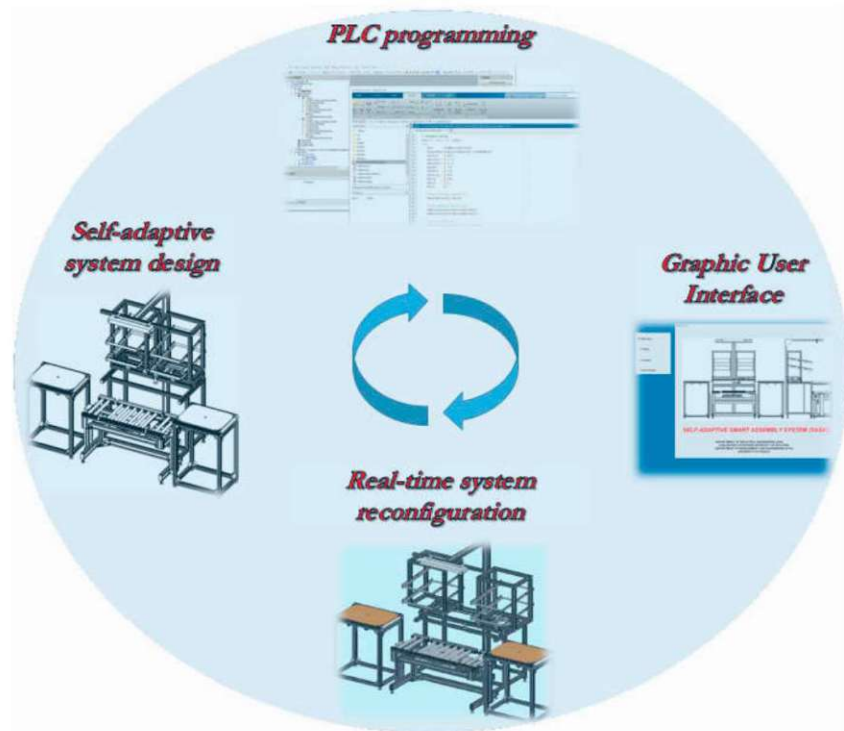


Abbildung 27 Schematischer Rahmen für die Selbstkonfiguration<sup>216</sup>

Die grafische Benutzeroberfläche, welche in dieser Arbeit verwendet wurde, ist in 4 Sektionen gegliedert. Die erste Sektion ist der Startbildschirm, in welchem das CAD-Modell der Montagestation dargestellt ist. In diesem Startbildschirm ist die Navigation zu den anderen Sektionen integriert. Die Höhe der Arbeitsfläche kann in der Sektion „Einstellungen“ verändert werden. In der Sektion „Produkt“ können die jeweiligen Produkte, die zur Montage kommen, ausgewählt werden und die Montagestation stellt die entsprechenden Höhen ein. Neue Produkte können mittels der gleichnamigen Sektion angelegt werden. Damit werden die Flexibilität der Montagestation maßgeblich erhöht und die Bediener\*innen im Produktmanagement effizient unterstützt.<sup>217, 218</sup> In der Arbeit von Rönick<sup>219</sup> wurde für die Steuerung und Benutzeroberfläche ein Laptop mit Touch-Bildschirm verwendet. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgte mittels RFID-Karte, auf der die persönlichen Daten gespeichert sind.<sup>220</sup> Die Steuerung der Aktoren in der Arbeit von Jagusch et al.<sup>221</sup> wurde mit einem Industrie-PC mit installierter Soft-SPS umgesetzt. Diese Kombination ermöglicht die Visualisierung auf einem Bildschirm und die Installation zusätzlicher Software. Für die Mitarbeiteridentifikation und die Erkennung des Prozessschritts, der für die optimale Arbeitsweise essenziell ist, wurde auf Barcodes und RFID-Karten gesetzt. Als übergeordnete Schnittstelle diente ein Open Plattform

<sup>216</sup> Bortolini u. a., 2019, S. 93

<sup>217</sup> vgl. Bortolini u. a., 2019, S. 93–96

<sup>218</sup> vgl. Bortolini u. a., 2021, S. 7–8

<sup>219</sup> Rönick, 2020

<sup>220</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 21

<sup>221</sup> Jagusch u. a., 2018

Communicator Server.<sup>222</sup> Die Informationsbereitstellung wurde in der Arbeit von Beuß et al.<sup>223</sup> mittels 1D-Barcodes und RFID-Tags ermöglicht. Dadurch werden die Mitarbeiter und die Montageaufträge erkannt. Durch vordefinierte Winkel- und Höheneinstellungen, kombiniert mit den physischen Eigenschaften der Werker\*innen wurde die Anpassung des Montagesystems ermöglicht. Zusätzlich konnten durch SmartDevices individuelle Anpassungen gesteuert und durch eine grafische Oberfläche die für die angemeldete Person benötigten Daten für den aktuellen Arbeitsgang zur Verfügung gestellt und visualisiert werden.<sup>224</sup> Die Bewegungen der Mitarbeiter\*innen wurden über ein markerbasiertes Trackingsystem in die VR-Umgebung übertragen. Zudem wurde, um das Gesamtsystem flexibel zu gestalten, bei der Konzeptentwicklung der Modularitätsgedanke berücksichtigt.<sup>225</sup>

Mit dem flexibel adaptierbaren, intelligenten Arbeitssystem in der VR-Umgebung wurde eine nahezu dauerhafte ergonomische Ausführung der Montageschritte ermöglicht.<sup>226</sup> In der Arbeit von Rönick<sup>227</sup> wurde für die Aufnahme der Belastung ein Motion-Capture-System Captiv der Firma TEA verwendet. Die Aufnahme erfolgte durch Inertialsensoren, die mittels eines Haltegurtes an dem Körper befestigt wurden.<sup>228</sup> In dieser Arbeit konnte durch die Höhenanpassung eine Belastungsreduzierung festgestellt werden.<sup>229</sup> In den Arbeiten von Bartolini et al.<sup>230</sup> wurde für die Evaluation der Ergonomie- und Produktivitätsverbesserung ein Bewegungserfassungssystem ohne Marker (MOCAP) verwendet. Dieses System setzt sich aus vier Tiefenkameras des Typs Microsoft Kinect v.2™ zusammen.<sup>231</sup> Damit ist eine digitale Erfassung der anthropometrischen Daten wie der Körperhöhe möglich. Ergonomie und Prozesszeit werden dadurch evaluiert.<sup>232</sup> Mittels dieser Technik konnte eine Reduzierung der Zykluszeit von ca. 30% und eine Steigerung der Produktivität von 40 - 60 % erfasst werden. Zudem konnte laut Aussagen der Montagearbeiter\*innen eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen festgestellt werden.<sup>233</sup> Der Montagearbeitsplatz, in der Arbeit von Jagusch et al.<sup>234</sup>, hatte vor der Implementierung einen Anteil von ca. 35 % an ungünstigen Arbeitspositionen und lediglich ein bis zwei Prozent der Körperhaltungen waren unbedenklich. Mit der Implementierung des Assistenzsystems konnte ein Anteil von ergonomisch günstigen

---

<sup>222</sup> vgl. Jagusch u. a., 2018, S. 371

<sup>223</sup> Beuß u. a., 2017

<sup>224</sup> vgl. Beuß u. a., 2017, S. 67

<sup>225</sup> vgl. Beuß u. a., 2017, S. 66

<sup>226</sup> vgl. Beuß u. a., 2017, S. 68

<sup>227</sup> Rönick, 2020

<sup>228</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 42–44

<sup>229</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 101

<sup>230</sup> Bortolini u. a., 2021; Bortolini u. a., 2020a; Bortolini u. a., 2020b

<sup>231</sup> Bortolini u. a., 2021, S. 8

<sup>232</sup> vgl. Bortolini u. a., 2020b, S. 7–12

<sup>233</sup> vgl. Bortolini u. a., 2020a, S. 536–537

<sup>234</sup> Jagusch u. a., 2018

Arbeitspositionen von ca. 95 % ermöglicht werden. Zudem ergab sich eine Reduzierung der Planzeit von ca. 20 %.<sup>235</sup>

### 3.2 Montagestation 4.0: Baustellenmontage

Die Implementierung der Individualisierungsdimensionen, die in Kapitel 2.2.2 vorgestellt wurden, sind in der Abbildung 28 anhand eines Baustellenmontagearbeitsplatzes dargestellt. Die Individualisierungsdimensionen und -parameter dienen, im Hinblick auf die Montagestation 4.0, als Grundlage für die Bewertung der Verbesserungen durch die Integration von Assistenzsystemen.<sup>236, 237</sup>

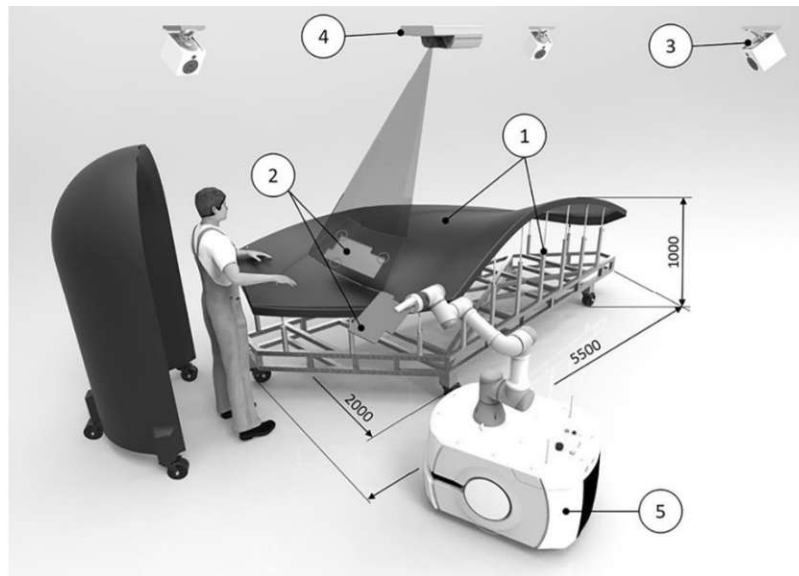


Abbildung 28 Anwendung der Individualisierungsdimensionen anhand eines Baustellenmontagearbeitsplatzes<sup>238</sup>

In der Abbildung 28 sind 3D-Kameras (3) über dem Bauteil angeordnet. Diese Kameras können Translationen, Höhendifferenzen sowie optische Merkmale erfassen, wie in Kapitel 2.5.3 erklärt wurde. Die durch die 3D-Kameras aufgenommenen Informationen werden für die weitere Steuerung, die in Kapitel 2.4 behandelt wurde, softwaretechnisch analysiert und an Assistenzsysteme weitergegeben. Mit den Assistenzsystemen wird eine Individualisierung, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ermöglicht.<sup>239, 240</sup> Die Assistenzsysteme, die für die Realisierung der Montagestation 4.0 infrage kommen, sind einerseits ein AR-Projektor<sup>241, 242, 243</sup> (4), der die Arbeitsinformationen direkt auf das Werkzeug projiziert

<sup>235</sup> vgl. Jagusch u. a., 2018, S. 371

<sup>236</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021

<sup>237</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018

<sup>238</sup> Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 284

<sup>239</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 284

<sup>240</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 7

<sup>241</sup> Rupprecht/Küffner-McCauley/Schlund, 2020

<sup>242</sup> Kosch u. a., 2018; Büttner u. a., 2017; Jeffri/Rambli, 2020

<sup>243</sup> Funk u. a., 2017; Funk/Kritzler/Michahelles, 2017

und andererseits ein „Fahrerloses Transportsystem“ (FTS) mit einem aufgebauten Roboterarm<sup>244</sup> (5), mit dem Bauteile angereicht werden, um unnötige Wegzeiten zu vermeiden.<sup>245,246</sup>

Die Reduktion von ergonomisch ungünstigen Positionen wird durch eine Höhen- und Winkelverstellung ermöglicht. Diese Einstellungen können beispielsweise, wie in Abbildung 28 dargestellt, durch Hydraulikzylinder (1) umgesetzt werden. Durch die mit den 3D-Kameras aufgenommenen Höhendaten kann die Arbeitsfläche adaptiv an die Mitarbeiter\*innen und die durchzuführenden Arbeitsschritte angepasst werden. Adaptive Einstellungen werden automatisch durch das System selbst vorgenommen.<sup>247</sup> Somit stellt die adaptive Verstellung der Arbeitsfläche ein physisches Assistenzsystem zur Verbesserung der Ergonomie dar.<sup>248, 249</sup> Zur Erprobung der Dimension Arbeitsfläche wird im folgenden Kapitel ein Modell der Baustellenmontagestation erstellt, in dem eine automatische Höhen- und Winkeladaption verwirklicht wird.

---

<sup>244</sup> Rusch u. a., 2021, S. 293

<sup>245</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 284

<sup>246</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 7

<sup>247</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 6

<sup>248</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 284

<sup>249</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 7

## 4 Umsetzung der adaptiven Höhen- und Winkelverstellung am Modell

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Modells erklärt, mit welchem eine adaptive Höhen- und Winkelverstellung realisiert werden kann. Hierfür wird unter dem Punkt Modellbildung ein verbales Modell formuliert, welches die Zielsetzung und die Idealisierungen enthält. Zudem wird unter diesem Punkt die Modellierung der Person und die Herleitung der geometrischen Zusammenhänge für die Höhen- und Winkeladaptation vorgenommen. Im nächsten Schritt werden, unter dem Punkt Konstruktion, Varianten der Höhen- und Winkelverstellung konstruiert und evaluiert. Daraufhin wird die Steuerung, mit welcher die adaptive Höhen- und Winkelverstellung realisiert wird, erstellt und das Modell getestet.

### 4.1 Modellbildung

Bei dem Modell, das in dieser Arbeit erstellt wird, handelt es sich um ein Verifikationsmodell, mit dem die Höhen- und Winkeladaptation erprobt werden kann. Für die Erstellung des Modells wird zunächst das Modellobjekt und daraufhin die möglichen Abstraktionen und Idealisierungen betrachtet.

#### 4.1.1 Modellobjekt

Das Modellobjekt, welches durch das Verifikationsmodell abgebildet wird, ist eine Fan-Cowl-Montagestation, die in Abbildung 29 ersichtlich ist.



Abbildung 29 Fan-Cowl - Turbinengehäuse<sup>250</sup>

Anhand eines Pilotarbeitsplatzes für die variantenreiche Großgeräte- und Baustellenmontage in der Pilotfabrik der TU Wien werden die Individualisierungsdimensionen untersucht und konzipiert. An dem Pilotarbeitsplatz

<sup>250</sup> Pilotfabrik Industrie 4.0 - <https://www.pilotfabrik.at/>

wird ein Produkt nach dem Prinzip Baustellenmontage stationär montiert. Bei diesem Produkt handelt es sich um ein „Fan Cowl Tool“ (Flugzeugturbinengehäuse) aus der Flugzeugzulieferindustrie. Der Anwendungsfall ist die Montage einer Verbundstruktur, bei der mehrere hundert speziell geschnittene, vorimprägnierte Fasermatten (sogenannte „Bänder“) in einer bestimmten Reihenfolge mit hohen Positions- und Faserorientierungsanforderungen auf ein Kohlenstoffwerkzeug gelegt werden. Die Montageposition, auf welcher die Fasermatten montiert werden, kann auf der gesamten Oberfläche des Werkzeuges liegen. Das Werkzeug liefert die Form für das Verbundteil und hat eine Abmessung von 2.000 x 2.000 x 1.500 mm sowie ein Gewicht von ca. 200 kg. Die Höhe des Werkzeuges ist in Abbildung 30 dargestellt. Dieses Werkzeug samt den Anforderungen und Prozesskenntnissen wurde von einem Partnerunternehmen aus der Flugzeugzulieferindustrie zur Verfügung gestellt.<sup>251,252</sup>

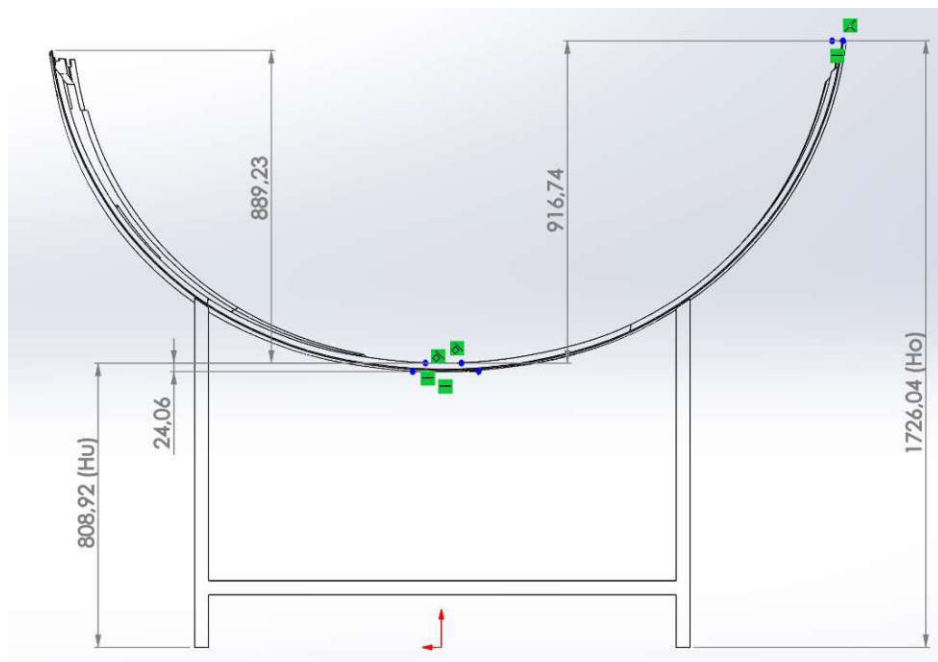


Abbildung 30 Höhen der Montagestation (eigene Darstellung)

#### 4.1.2 Abstraktion und Idealisierung

Die Zielsetzung des Modells ist die Realisierung und die Evaluierung der adaptiven Höhen- und Winkeleinstellung, die unter die Individualisierungsdimension Arbeitsfläche fallen und im Kapitel 2.2.2 vorgestellt wurden. Für die Erstellung des Modells können bestimmte Aspekte des Modellobjektes abstrahiert und idealisiert werden.

<sup>251</sup> vgl. Schlund/Mayrhofer/Rupprecht, 2018, S. 283

<sup>252</sup> vgl. Mayrhofer/Rupprecht/Schlund, 2019, S. 5

Eine Vereinfachung kann bei der Größe des Modells getroffen werden, diese kann mittels eines geeigneten Maßstabes umgesetzt werden. Damit werden die Kosten aufgrund eines geringeren Material- und Platzbedarfes reduziert. Zudem verringert sich das Gewicht des Modells, weshalb weniger leistungsfähige Antriebe verwendet werden können.

Für die Ermittlung eines geeigneten Maßstabes des Modells wird die Arbeitshöhe für manuelle Tätigkeiten im Stehen herangezogen. Die Tätigkeiten können wie in Tabelle 11 nach unterschiedlichen Aspekten unterteilt werden. Mittels der Höhenverstellung sollte die Arbeitsfläche auf die kleinste und größte Arbeitshöhe aus der Tabelle 11 eingestellt werden können.

**Tabelle 11 Arbeitshöhen nach Manipulationsart und Perzentil<sup>253</sup>**

Art der Manipulation	FP05	MP95	Höhenunterschied
fein-visuell	1180 mm	1380 mm	200 mm
geschickt-visuell	940 mm	1100 mm	160 mm
bewegungsaufwendig-schnell	820 mm	990 mm	170 mm
bewegungsaufwendig-kräftig	730 mm	910 mm	180 mm
Schwer anheben mit Körpereinsatz	650 mm	780 mm	160 mm
Kräftig mit Körpereinsatz	580 mm	700 mm	120 mm

Aus der kleinsten und größten Arbeitshöhe, welche in Tabelle 11 dargestellt ist, ergeben sich, unter Berücksichtigung der Abmaße des Werkzeuges, die in Tabelle 12 ersichtlichen minimalen und maximalen Höhen der Montagestation (Abbildung 30).

**Tabelle 12 Maximale und minimale Höhen der Montagestation**

	Hu	Ho
FP05 unten	580 mm	1496 mm
MP95 unten	1380 mm	2296 mm
FP05 oben	124 mm	1040 mm
MP 95 oben	464 mm	1380 mm

Durch die Höhe des Werkzeuges von 940 mm kann für den oberen Punkt des Werkzeuges die minimale Arbeitshöhe von 580 mm nicht erreicht werden. Deshalb wurde die minimale Arbeitshöhe im höchsten Punkt des Werkzeuges mit einem minimalen Bodenabstand von 100mm berechnet. Damit ergibt sich eine minimale Höhe der Montagestation, bei der die optimalen Höhen für Arbeitsschritte mit schwerem Körpereinsatz am oberen Punkt des Werkzeuges nicht mehr erreicht werden können. Aus der maximalen Höhe (MP95 unten) und der minimalen Höhe (FP05 oben) ergibt sich ein maximaler Verstellbereich der Arbeitshöhe von 1256 mm.

<sup>253</sup> vgl. Neudörfer, 2020, S. 574



Dieser Verstellbereich der Höhe ist in der Tabelle 13 mit den Abmessungen der Montagestation in unterschiedlichen Maßstäben ersichtlich.

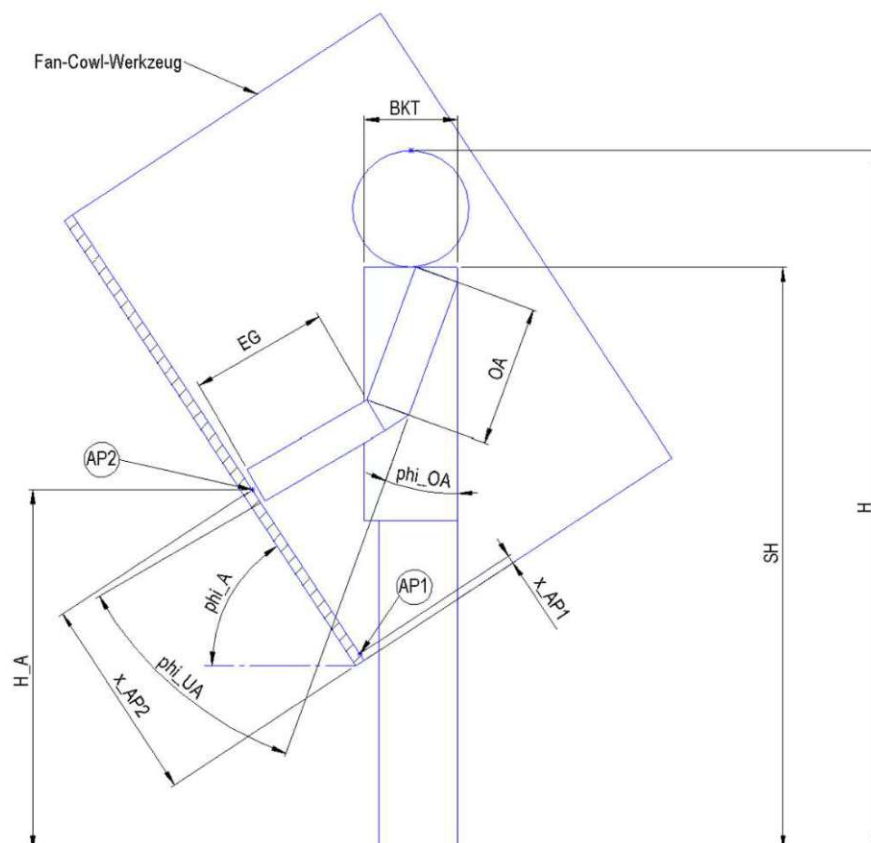
**Tabelle 13 Maßstab, Abmessungen und Verstellbereich des Modells**

Maßstab	Abmessungen	Maximaler Verstellbereich
1:1	2000x2000 mm	1256 mm
1:2	1000x1000 mm	628 mm
1:5	400x400 mm	251,2 mm
1:10	200x200 mm	125,6 mm

Der Hauptfaktor für die Wahl des Maßstabes sind die erhältlichen Aktoren, mit welchen die Adaptionen verwirklicht werden können. Deshalb wird die Auswahl des Modellmaßstabes im nächsten Abschnitt vorgenommen.

### 4.1.3 Höhen- und Winkelverstellung in Bezug auf die Körpergröße und den Arbeitsschritt

In diesem Abschnitt werden zu Beginn die Arbeitshöhe und der Arbeitswinkel in Bezug auf die Körpergröße und den Arbeitsschritt erstellt.



**Abbildung 31 Schematische Darstellung der geometrischen Beziehungen (eigene Darstellung in Anlehnung an<sup>254</sup>)**

<sup>254</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 26

## Höhenverstellung

Um die ergonomisch beste Arbeitshöhe einzustellen, werden demonstrativ zwei Arten der Manipulation verwendet. Zum einen wird ein Arbeitsschritt mit kräftigem Körpereinsatz an dem Arbeitspunkt 1 (AP1) verwendet und zum anderen ein Arbeitsschritt mit einer geschickten-visuellen Tätigkeit an dem Arbeitspunkt 2 (AP2). Die zwei Arbeitspunkte haben unterschiedliche Arbeitspositionen  $x_{AP1}$  und  $x_{AP2}$ , welche 20 mm und 350 mm betragen. Der Zusammenhang zwischen der Körpergröße und der optimalen Arbeitshöhe für die unterschiedlichen Tätigkeiten wurde wie in Abbildung 7 nach Neudörfer<sup>255</sup> linear angenommen. Es wurden für zwei Tätigkeiten mit variablen Körpergrößen und Arbeitshöhen aus Tabelle 11 zwei lineare Gleichungen (5) und (10) aufgestellt. Diese Gleichungen geben den Zusammenhang zwischen Körpergröße (H) und Arbeitshöhe ( $H_A$ ) an.

Kräftig mit Körpereinsatz:

$$H_{A1}(H) = \frac{3}{10} * H + 130mm \quad (5)$$

Geschickt-visuell:

$$H_{A2}(H) = \frac{2}{5} * H + 340mm \quad (6)$$

## Winkelverstellung

Bei der Winkelverstellung wurde darauf geachtet, dass die montierende Person möglichst wenig ungünstige Stellungen laut RULA, wie in der Abbildung 8 dargestellt, einnehmen muss. Somit wurde der Arbeitswinkel so berechnet, dass die Werker\*innen für die Erreichung des Arbeitspunktes sich nicht über das Fan-Cowl Werkzeug lehnen müssen, wie in Abbildung 31 schematisch dargestellt ist. Dadurch werden hohe Gesamtwerte des zweiten Abschnitts der RULA-Bewertung, welche in Abbildung 9 dargestellt ist, vermieden. Außerdem wurde die Berechnung mit einem Winkel zwischen Oberarm und Körper ( $\phi_{OA}$ ) von  $20^\circ$  und einem Winkel zwischen Unterarm und Oberarm ( $\phi_{UA}$ ) von  $60^\circ$  durchgeführt. Die Winkel von  $20^\circ$  und  $60^\circ$  wurden herangezogen um laut RULA in der Abbildung 8 eine möglichst schonende Haltung zu ermöglichen. Für die Berechnung des Arbeitswinkels (10) wird die Länge des Oberarms (OA), die Länge der Ellenbogen-Griffachse (EG) und die Brustkorbtiefe (BKT) benötigt. Zudem fließt die Position des Arbeitspunktes ( $x_{AP}$ ) in die Berechnung mit ein.

<sup>255</sup> Neudörfer, 2020, S. 574

$$\varphi_A = \cos^{-1}\left(\frac{\sin 20^\circ * OA + \sin 60^\circ * EG - BKT}{x_{AP}}\right) \quad (7)$$

Für die Berechnung der Oberarmlänge wird die Schulterhöhe (SH) und die Ellenbogenhöhe (EH) benötigt. Die Körperabmessungen wurden aus der Abbildung 5 und der Abbildung 6 mit Tabelle 2 des „Europamenschen“ laut BAuA<sup>256</sup> herangezogen und sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Um den Demonstrator möglichst einfach zu gestalten und die Anzahl der Eingabeparameter zu verringern, wurden alle benötigten Körpermaße in Abhängigkeit der Körpergröße berechnet. Hierfür wurde in Tabelle 15 ein durchschnittliches Verhältnis der Einzelnen Körpermaße zur Körpergröße berechnet. Somit kann der Arbeitswinkel in Abhängigkeit von der Körpergröße und der Position des Arbeitspunktes wie in der Formel (8) berechnet werden. Die Berechnung des Arbeitswinkels ist jedoch nur gültig, wenn der Abstand zu dem Arbeitspunkt größer ist als die erreichbare Greifweite unter den ergonomischen Armwinkeln, d.h. wenn die Bedingung (9) erfüllt ist.

**Tabelle 14 Körpermaße für die Arbeitswinkelberechnung in mm<sup>257</sup>**

Körpermaße	MP05	MP50	MP95
H	1530	1719	1880
SH	1260	1424	1570
EH	960	1078	1190
OA (SH-EH)	300	346	380
EG	298	338	403
BKT	170	215	250

**Tabelle 15 Verhältnis der benötigten Körpermaße zur Körpergröße**

Verhältnis	MP05	MP50	MP95	Durchschnitt
OA/H	0,196	0,201	0,202	0,200
EG/H	0,195	0,197	0,214	0,202
BKT/H	0,111	0,125	0,133	0,123

$$\varphi_A = \cos^{-1}\left(\frac{H}{x_{AP}} * (0,2 * \sin 20^\circ + 0,202 * \sin 60^\circ - 0,123)\right) \quad (8)$$

$$x_{AP} > H * (0,2 * \sin 20^\circ + 0,202 * \sin 60^\circ - 0,123) \quad (9)$$

### Bodenabstand:

Bei der Einstellung der Höhe und des Winkels wurde darauf geachtet, dass mindestens ein Bodenabstand von 100 mm erhalten bleibt. Mit diesem

<sup>256</sup> Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998

<sup>257</sup> vgl. Jürgens/Matzdorff/Windberg, 1998

Mindestabstand und der Arbeitshöhe kann der maximale Winkel berechnet werden, mit dem kein Kontakt zwischen Boden und Fan-Cowl Modell entsteht. Die Formel (10), die den Zusammenhang abbildet, wurde mit dem geometrischen Zusammenhang laut Abbildung 32 erstellt.

$$H_A = 100 + 670 * \sin \varphi_A \quad (10)$$

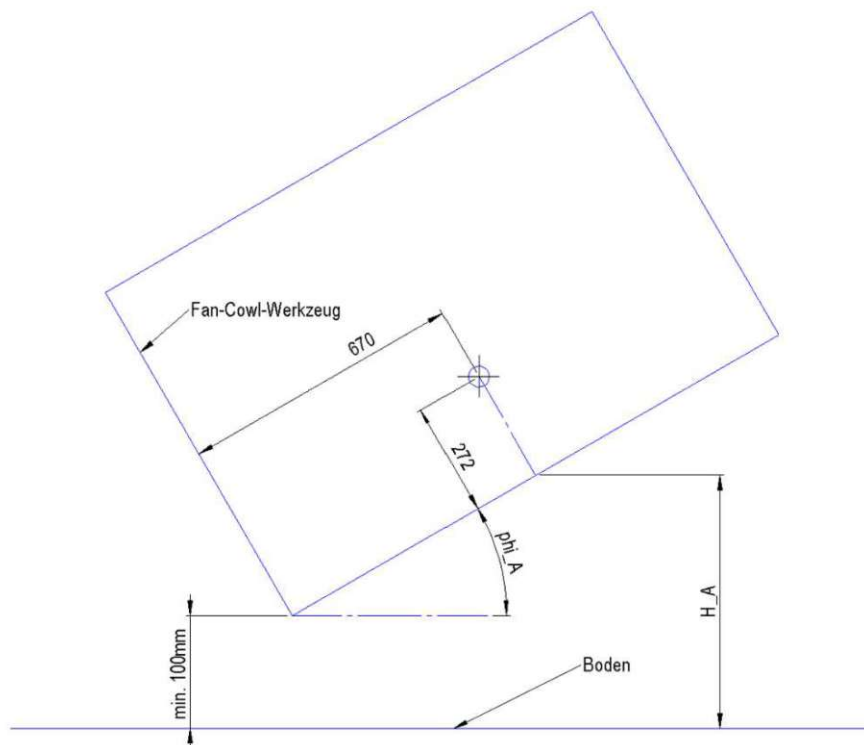


Abbildung 32 Abhängigkeit Bodenabstand von Winkel und Höhe (eigene Darstellung)

## 4.2 Konstruktion

In diesem Kapitel werden zwei Varianten der Montagestation mit der Höhen- und Winkelverstellung konstruiert. Für die Varianten wird jeweils eine andere Art von Aktoren verwendet. Die Höhen- und Winkelverstellung der ersten Variante wird mit Zylindern konstruiert. Bei der zweiten Variante werden für die Höhenverstellung Spindelmotoren verwendet und die Winkelverstellung wird über einen Schrittmotor ermöglicht. Durch die unterschiedlichen Aktoren der beiden Varianten werden unterschiedliche Modellmaßstäbe benötigt. Bei der Konstruktion der Varianten wurde das Ziel, die Arbeitshöhen, die in Tabelle 12 dargestellt sind, unter Berücksichtigung des in der Variante verwendeten Maßstabes zu erreichen, verfolgt. Nach der Konstruktion werden die beiden Varianten in dem Abschnitt 4.2.3 bewertet. Anhand dieser Bewertung wird schließlich die Variante ausgewählt, die realisiert werden soll. Durch die Auswahl der zu realisierenden Variante wird auch der Modellmaßstab des Modells gewählt. Nach der Auswahl wird die Steuerung mit dem elektrischen Anschlussplan für die zu realisierende Variante erstellt.

### 4.2.1 Variante 1: Zylinder

Die Variante 1 nutzt für die Höhen- und Winkelverstellung auf beiden Seiten zwei gekreuzte Zylinder (Abbildung 33).

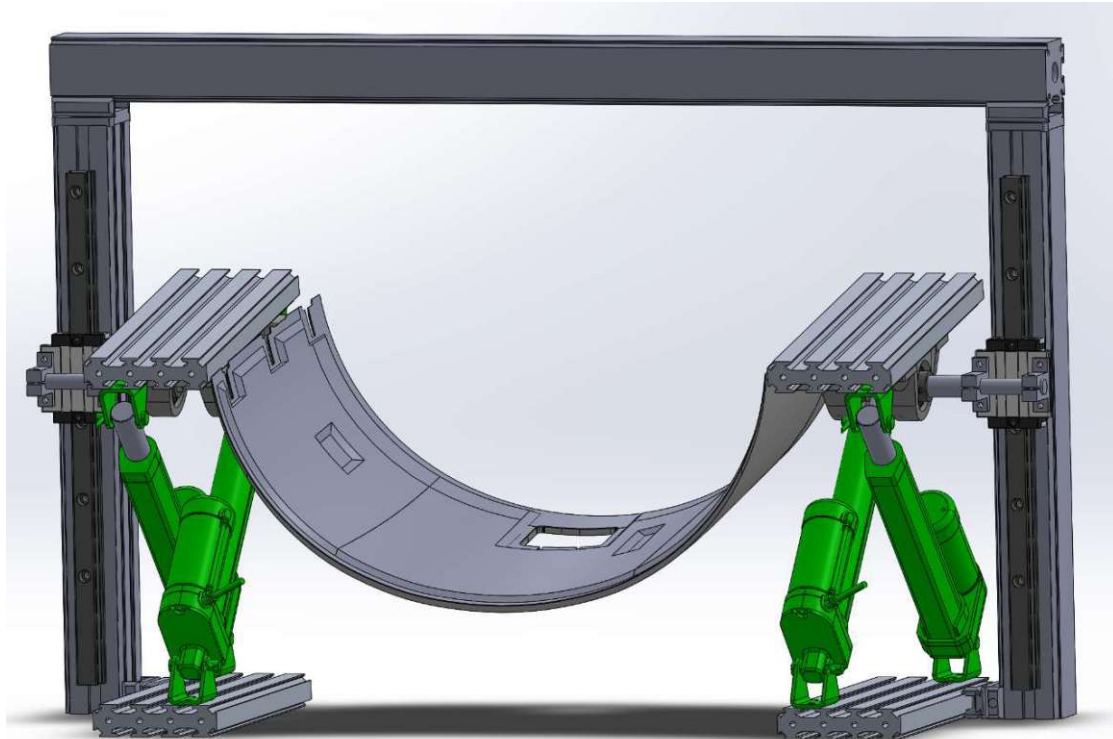


Abbildung 33 Variante 1: Zylinder (eigene Darstellung)

Die Zylinder, die je Seite parallel zueinanderstehen, werden synchron betrieben, sodass ein Kippen des Fan-Cowl-Werkzeuges nur um eine Achse möglich ist. In dieser Variante ist aufgrund der Zylinderabmessungen ein Maßstab von 1 zu 5 erforderlich, da keine Zylinder gefunden wurden, die den benötigten Hub verrichten können und gleichzeitig eine ausreichend kleine minimale Länge vorweisen. Der benötigte Hub ergibt sich aus der minimalen und der maximalen Arbeitshöhe, welche die Montagestation laut Tabelle 12 einstellen können sollte. Aus diesen Arbeitshöhen ergibt sich unter der Berücksichtigung des Maßstabes eine minimale und maximale Arbeitshöhe von 208 mm und 460 mm. Der Abstand, in dem die Zylinder gelagert werden, wurde mit einer Länge von 220 mm festgelegt, da die Breite des Fan-Cowl-Werkzeuges 260 mm beträgt und die Lagerung aufgrund der Zugänglichkeit nicht über das Werkzeug ragen sollte. Diese Variante kommt auf ein Gesamtgewicht von etwa 13 kg mit einer Breite von 800 mm, einer Höhe von 500 mm und einer Tiefe von 260 mm.

#### Fan-Cowl

Das Fan-Cowl-Werkzeug wurde mittels des Modellmaßstabes verkleinert. Durch diese Skalierung ergibt sich an manchen Stellen eine Wandstärke von nur 0,6 mm, weshalb die Stabilität des Modells folglich nicht mehr gewährleistet werden kann.

Deshalb wurde die Wandstärke um 5 mm erhöht, wie in Abbildung 34 ersichtlich ist. Für die Befestigung der Aluprofile wurde eine Halterung an das Werkzeug angebracht, mit welcher eine Verschraubung ermöglicht wird. Diese Halterung wurde möglichst hoch an dem Bauteil vorgesehen, wodurch mehr Höhe für die Zylinder zwischen der Halterung am Fan-Cowl und dem Boden zur Verfügung steht.

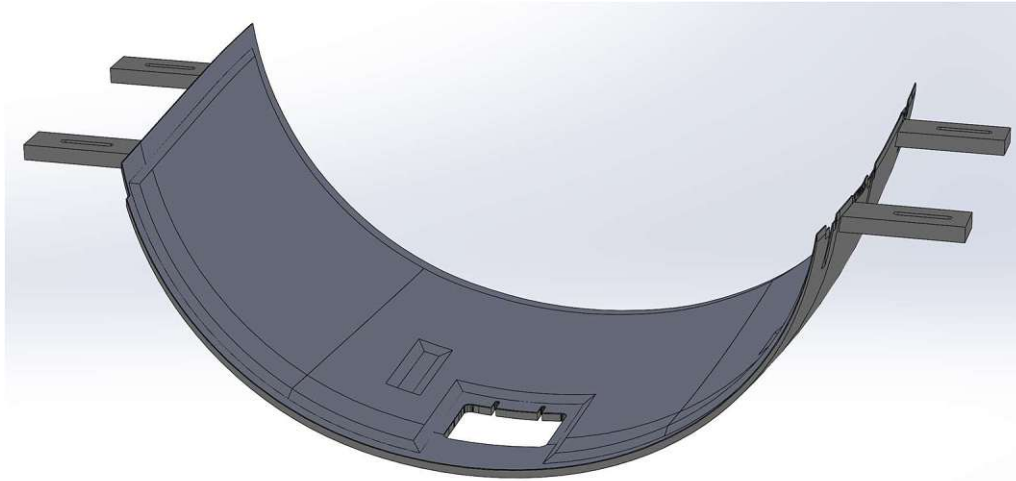


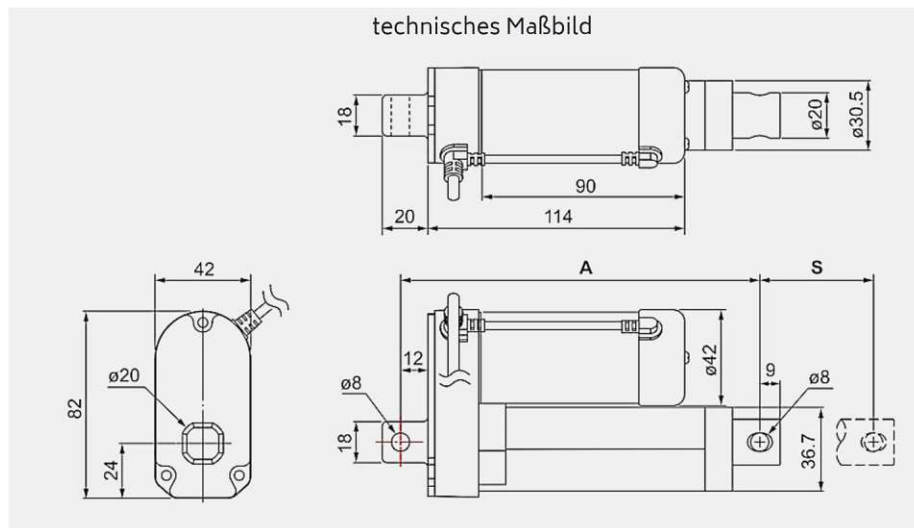
Abbildung 34 Variante 1: Fan-Cowl mit Halterung (eigene Darstellung)

## Zylinder

In dieser Arbeit wurden elektrisch angetriebene Zylinder gewählt. Diese haben den Vorteil, dass sie schon mit einer Positionsrückführung erworben werden können und im Vergleich zu Hydraulikzylindern in kleineren Baugrößen verfügbar sind. Außerdem müssen die Zylinder nicht in der Lage sein, große Kräfte aufzubringen. Jedoch haben auch diese Zylinder eine gewisse Länge. Aufgrund dieser Länge wurden die Zylinder gekreuzt angeordnet. Mit dieser Anordnung kann im Vergleich zu einer vertikalen Anordnung eine kleinere Arbeitshöhe angefahren werden. Außerdem wird durch die gekreuzte Anordnung ein geringerer Hub benötigt und es können Zylinder mit einer größeren minimalen Länge verwendet werden. Mit dem Abstand zwischen den Zylindern und den erforderlichen Arbeitshöhen wurde die vorläufige minimale und maximale Länge des benötigten Zylinders von 302 mm und 510 mm mit folgender Formel (11) berechnet.

$$L = \sqrt{B^2 + H^2} \quad (11)$$

Diese Längen werden zur Auswahl der Zylinder herangezogen. Nach der Auswahl der Zylinder werden unter Berücksichtigung der verwendeten Bauteile die exakten Abmaße berechnet.

Abbildung 35 Elektrozyylinder mit Hallsensor<sup>258</sup>Tabelle 16 Abmaße Elektrozyylinder<sup>259</sup>

Hub	Einspannlänge eingefahren (A)	Einspannlänge ausgefahren (A+S)
150mm	260 mm	410 mm
200mm	311 mm	511 mm
250mm	362 mm	612 mm

Für die weitere Planung wurden Elektrozyylinder des Unternehmens MSW Motion Control GmbH herangezogen. Die Elektrozyylinder können laut Hersteller die gewünschte Position mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  mm und einer Geschwindigkeit von 4 mm/s anfahren. Diese haben, wie in Abbildung 35 und Tabelle 16 dargestellt, eine maximale Breite von 42 mm, weshalb die zwei sich kreuzenden Zylinder um 50 mm versetzt werden. Die Zylinder werden mit einer Halterung desselben Herstellers drehbar gelagert. Diese Halterung wird mittels Nutsteinen und Schrauben an den Aluprofilen befestigt. Auf der unteren Seite wird das Aluprofil als Fuß verwendet und auf der oberen Seite wird es mit dem Fan-Cowl verschraubt.

## Führung

Für die Bestimmung der genauen Position und zur Erhöhung der Stabilität wurde eine Linearführung des Unternehmens DOLT Mechatronik verwendet, welche in Abbildung 36 dargestellt ist. Diese kann sowohl Momente in alle Richtungen als auch Kräfte in alle bis auf die Richtung des Vorschubes aufnehmen. Die Linearführung wird auf ein Aluprofil verschraubt, welches mittels Verbinder an dem Fuß-Aluprofil befestigt wird. Auf dem Führungswagen werden zwei Wellenböcke befestigt, mit denen eine Welle eingespannt wird. Diese Welle wird auf dem oberen Aluprofil

<sup>258</sup> MSW Motion Control (Hrsg.)

<sup>259</sup> MSW Motion Control (Hrsg.)

mittels Rillenkugellagern drehbar gelagert und aufgrund der hohen Belastung aus Stahl gefertigt.

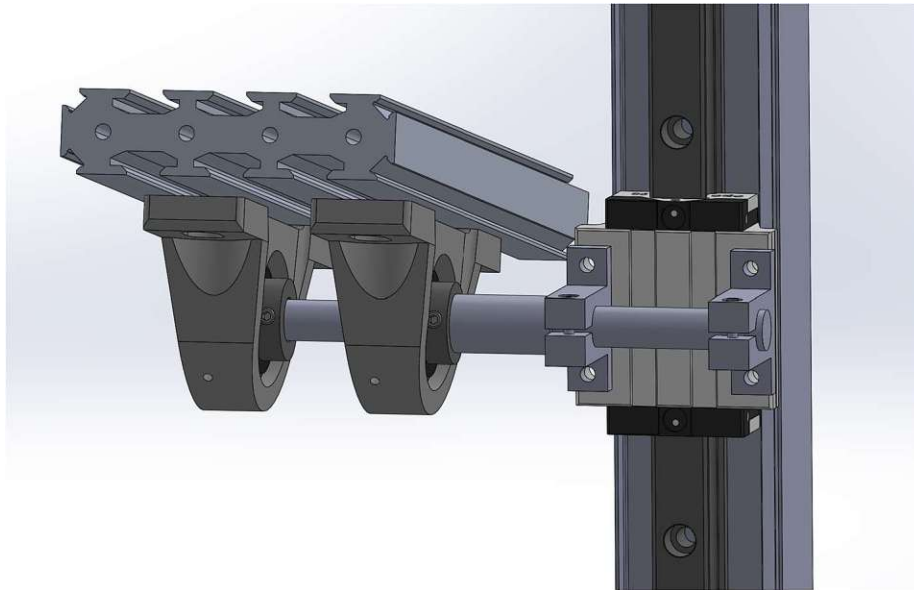


Abbildung 36 Variante 1: Führung (eigene Darstellung)

## Höhen- und Winkelverstellung

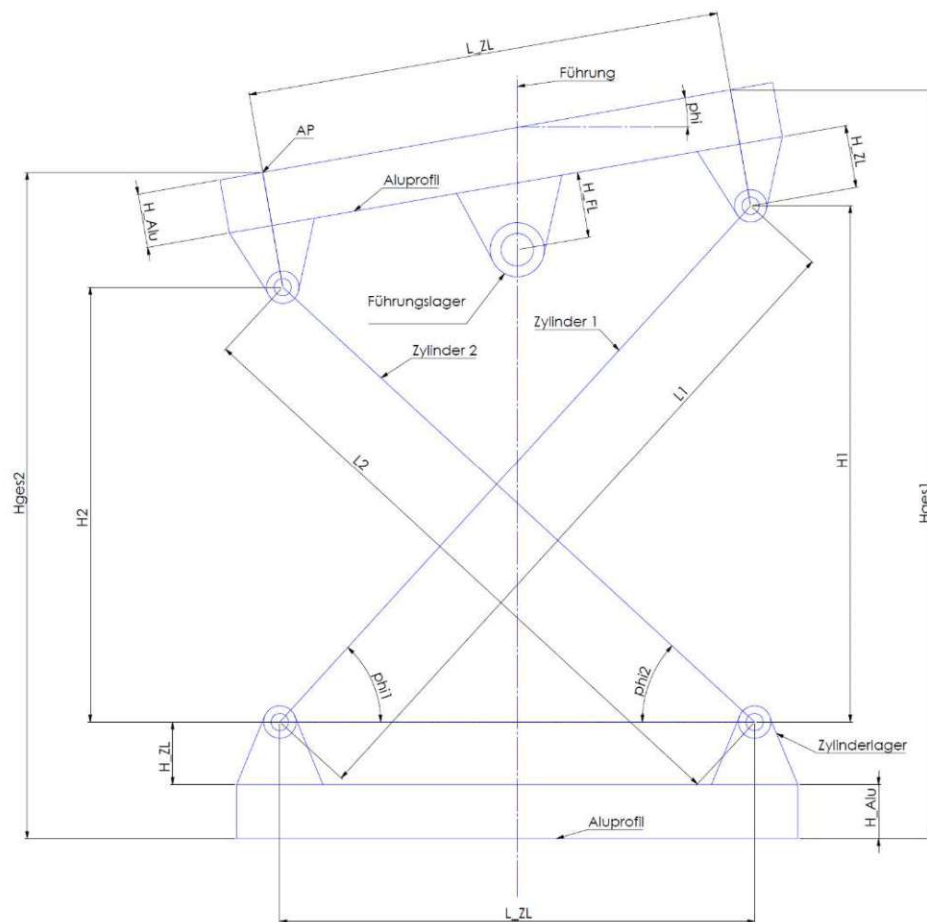
In der Abbildung 37 ist eine Skizze der Montagestation dargestellt, die zur Berechnung des benötigten Hubes der Zylinder, der für die gewünschte Arbeitshöhe und Arbeitswinkel erforderlich ist, herangezogen wird.

Tabelle 17 Parameter für die Hubberechnung

Konstante Bauteilabmessungen		
Bauteil	Parameter	Wert
Höhe Aluprofile	H_Alu	25 mm
Höhe Zylinderhalterung	H_ZL	29 mm
Abstand zwischen den Zylindern	L_Zyl	220 mm
Höhe Führungslager	H_FL	30,2 mm
Eingabe Parameter		
Arbeitshöhe	H	
Arbeitswinkel	phi	
Veränderliche Parameter		
Länge Zylinder 1	L1	
Höhe Zylinder 1	H1	
Länge Zylinder 2	L2	
Höhe Zylinder 2	H2	
Gesamte Höhe Zylinder 2	Hges2	
Höhenunterschied durch Schrägstellung	$\Delta H$	
Horizontale Verschiebung Zylinder 1	$\Delta x1$	
Horizontale Länge Zylinder 1	X1	
Horizontale Verschiebung Zylinder 2	$\Delta x2$	
Horizontale Länge Zylinder 2	X2	



Die konstanten Bauteilabmessungen und die veränderlichen Parameter, welche für die genaue Berechnung benötigt werden, sind in der Tabelle 17 aufgelistet.



**Abbildung 37 Variante 1: Höhen- und Winkelberechnung (eigene Darstellung)**

Die Arbeitshöhe und der Arbeitswinkel werden für den Arbeitspunkt (AP) angegeben, wie in der Abbildung 37 ersichtlich ist. Da der Arbeitspunkt mit dem Punkt über dem Lager des zweiten Zylinders übereinstimmt, kann die Höhe (Hges2) mit der Arbeitshöhe gleichgesetzt werden (12). Somit kann die Ausfahrlänge der Zylinder mit Hilfe geometrischer Zusammenhänge bestimmt werden. Zunächst wird ausgehend von der geforderten Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels die vertikale Höhe der Zylinder (12)-(15) berechnet.

$$H_{ges2} = H \quad (12)$$

$$H_2 = H_{ges2} - H_{Alu} - H_{ZL} - \cos(\phi) * (H_{Alu} + H_{ZL}) \quad (13)$$

$$\Delta H = \sin(\phi) * L_{Zyl} \quad (14)$$

$$H_1 = H_2 + \Delta H \quad (15)$$

Da sich die oberen Zylinderlager bei einer Winkelverstellung der Arbeitsfläche horizontal verschieben, wird diese Verschiebung über die Variablen  $\Delta x_1$  und  $\Delta x_2$  (16)-(17) ermittelt. Mit Hilfe des Satzes von Pythagoras kann anschließend die gesamte Länge der Zylinder (20)-(21) berechnet werden.

$$\Delta x_1 = \frac{L_{Zyl} - \cos(\phi) * L_{Zyl}}{2} - \sin(\phi) * (H_{Alu} + H_{ZL}) + \sin(\phi) * (H_{Alu} + H_{FL}) \quad (16)$$

$$\Delta x_2 = \frac{L_{Zyl} - \cos(\phi) * L_{Zyl}}{2} + \sin(\phi) * (H_{Alu} + H_{ZL}) - \sin(\phi) * (H_{Alu} + H_{FL}) \quad (17)$$

$$x_1 = L_{Zyl} - \Delta x_1 \quad (18)$$

$$x_2 = L_{Zyl} - \Delta x_2 \quad (19)$$

$$L_1 = \sqrt{H_1^2 + x_1^2} \quad (20)$$

$$L_2 = \sqrt{H_2^2 + x_2^2} \quad (21)$$

Mit diesen Zusammenhängen kann die benötigte minimale und maximale Einspannlänge des Zylinders von 242 mm und 415 mm berechnet werden, was einem Hub von 173 mm entspricht. Anhand dieser Auswahlkriterien passt der Elektrozyylinder mit einem Hub von 150 mm aus Tabelle 16 am besten. Dieser Zylinder kann eine minimale und maximale untere Arbeitshöhe von 64 mm und 271 mm anfahren, was im Modellobjekt den Arbeitshöhen von 320 mm und 1355 mm entspricht. Mit dieser Anordnung kann ein maximaler Arbeitswinkel von  $54^\circ$  eingestellt werden, sofern die Zylinder auf der Vorder- oder Rückseite voll ausgefahren werden.

### Belastung

Aufgrund der geringen Massen der Bauteile und der für das Modell hohen Kraft von 500 N, die der Zylinder aufbringen kann<sup>260</sup>, wurde lediglich die Belastung des Aluprofiles und der Welle betrachtet. Die größte Zugbelastung des Aluprofiles tritt auf, wenn das Werkzeug am tiefsten Punkt steht und sich nach oben bewegt. In dieser Lage ist der horizontale Kraftanteil der Zylinder am größten. In dieser Position haben die Zylinder einen Winkel von  $32,2^\circ$  und einen horizontalen Kraftanteil von 423 N. Daraus resultiert mit der Querschnittsfläche der Aluprofile von  $11,27 \text{ cm}^2$  eine Spannung von  $0,75 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund dieser geringen Spannung, die bei dem Aluprofil auftritt, kann die Festigkeit gewährleistet werden. Aus den horizontalen Kräften der Zylinder und einer fixierten Einspannung der Welle auf dem Führungswagen resultiert die in Abbildung 38 dargestellt Spannung der Welle.

<sup>260</sup> MSW Motion Control (Hrsg.)

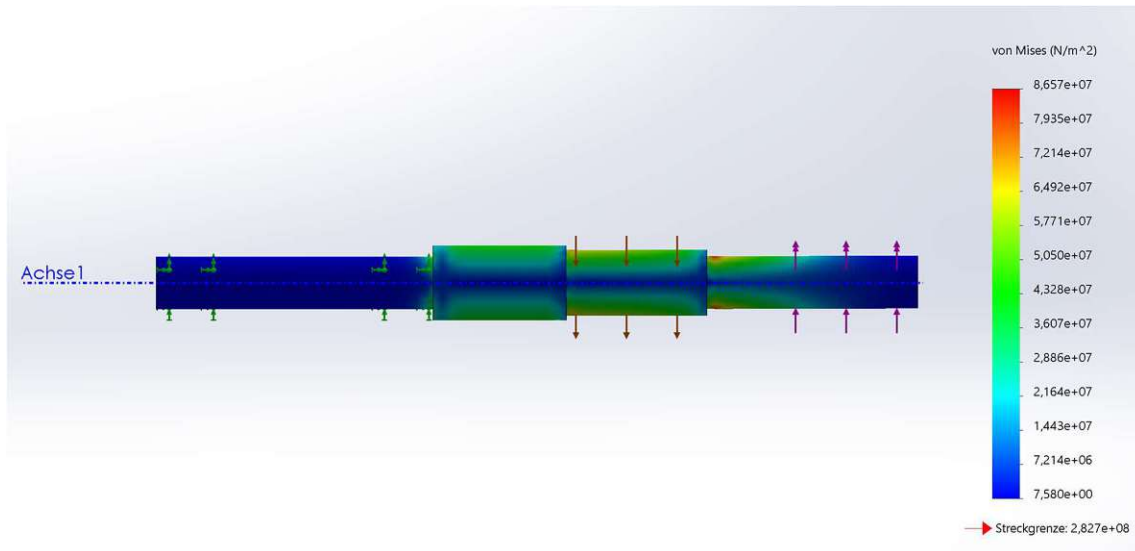


Abbildung 38 Variante 1: Spannung Welle (eigene Darstellung)

## Komponenten und Kosten

In der Tabelle 18 werden die Kosten und die Lieferanten der Komponenten, dieser Variante, aufgelistet. Die Bauteile, die mittels 3D-Druck gefertigt werden, sind nicht in dieser Tabelle enthalten. Für Kleinteile wie Schrauben, Kabel, etc. wurde ein Betrag von 200 € veranschlagt. Somit belaufen sich die ungefähren Kosten für die Bauteile dieser Variante auf etwa 2000 €.

Tabelle 18 Variante 1: Kosten und Lieferanten der Komponenten

Bauteil	Lieferant	Artikelnummer	Stk.	Kosten/Stk.	Gesamtkosten
Elektrozylinder	MSW Motion Control	DSZY1Q-HS2 mit 150mm Hub	4	216,5€ <sup>261</sup>	866€
Halterung Elektrozylinder	MSW Motion Control	DSZY1-H02	8	17,8€ <sup>261</sup>	142,4€
Motor-Controller	MSW Motion Control	DRDC-1008-24-6	2	161,75€ <sup>261</sup>	323,5€
Führungsschiene ARC 20 400mm	DOLD Mechatronik	78072-400	2	33,6€ <sup>262</sup>	67,2€
Führungswagen ARC 20 FN	DOLD Mechatronik	78348	2	37€ <sup>262</sup>	74€
Lager	Mercateo	140A-RASEY15-XL	2	25,27€ <sup>263</sup>	50,54€
	Mercateo	140A-Rasey12-XL	2	25,27€ <sup>263</sup>	50,54€
Wellenbock	Mercateo	5304-10174617	4	20,14€ <sup>263</sup>	80,56€
Konstruktionsprofil Alu 100x260	MonTech	68274/0260	4	10,42€ <sup>264</sup>	41,69€

<sup>261</sup> Angebot: E-Mail am 07.07.2021; MSW Motion Control GmbH <https://www.msw-motion.de/>

<sup>262</sup> Angebot am 07.07.2021; Dold Mechatronik GmbH <https://www.dold-mechatronik.de/>

<sup>263</sup> Angebot am 07.07.2021; Mercateo Austria GmbH

<https://www.mercateo.at/c/?viewOptions=secureMode>

<sup>264</sup> Angebot am 07.07.2021; Montech AG <https://montech.com/ch/de/>

Steher	MonTech	68057/0400	2	11,59€ <sup>265</sup>	23,18€
Konstruktionsprofil Alu Verbindung oben	MonTech	68057/0807	1	20,68€ <sup>265</sup>	20,68€
Div. Verbindungselemen te	MonTech				48,9€ <sup>265</sup>
Kleinteile (Schrauben, Kabel, etc.)					200€
Gesamt					1989,19€

In der Variante 1 wurde die Höhen- und Winkelverstellung mit vier elektrisch angetriebenen Zylindern ausgeführt. Aufgrund der Größe, der am Markt erhältlichen Zylinder, wurde in dieser Variante der Modellmaßstab 1 zu 5 gewählt. In diesem Maßstab kommt das Modell auf eine Breite von 800 mm, eine Höhe von 500 mm und eine Tiefe von 260 mm mit einem Gesamtgewicht von etwa 13 kg. Die Zylinder haben im eingefahrenen Zustand eine Mindestlänge von mindestens einer Hublänge. Aufgrund dieser Mindestlänge wurden die Zylinder gekreuzt angeordnet, womit ein größerer Höhenbereich eingestellt werden kann. Mit dieser gekreuzten Anordnung und den gewählten Zylindern kann eine untere Arbeitshöhe umgerechnet auf die Originalgröße im Bereich von 320 mm bis 1355 mm eingestellt werden. Zudem kann das Werkzeug bis zu einem maximalen Arbeitswinkel von 54° gekippt werden. Die Kosten für diese Variante belaufen sich auf etwa 2000 €. Im nächsten Abschnitt wird die zweite Variante des Modelles vorgestellt.

#### 4.2.2 Variante 2: Spindelmotor

In der Abbildung 39 ist die Variante 2 dargestellt. Die Höhenverstellung wurde in dieser Variante über einen Motor, der eine Spindel antreibt, umgesetzt. Die Variante 2 wurde im Maßstab 1 zu 10 umgesetzt, welcher sich durch die Verfügbarkeit der benötigten Aktuatoren ermöglichte. Die Konstruktion des Modells in diesem Maßstab kommt auf eine Breite von 420 mm, eine Höhe von 210 mm und eine Tiefe von 130 mm. Das Gesamtgewicht des Modelles der Variante 2 ergab sich zu etwa einem kg.

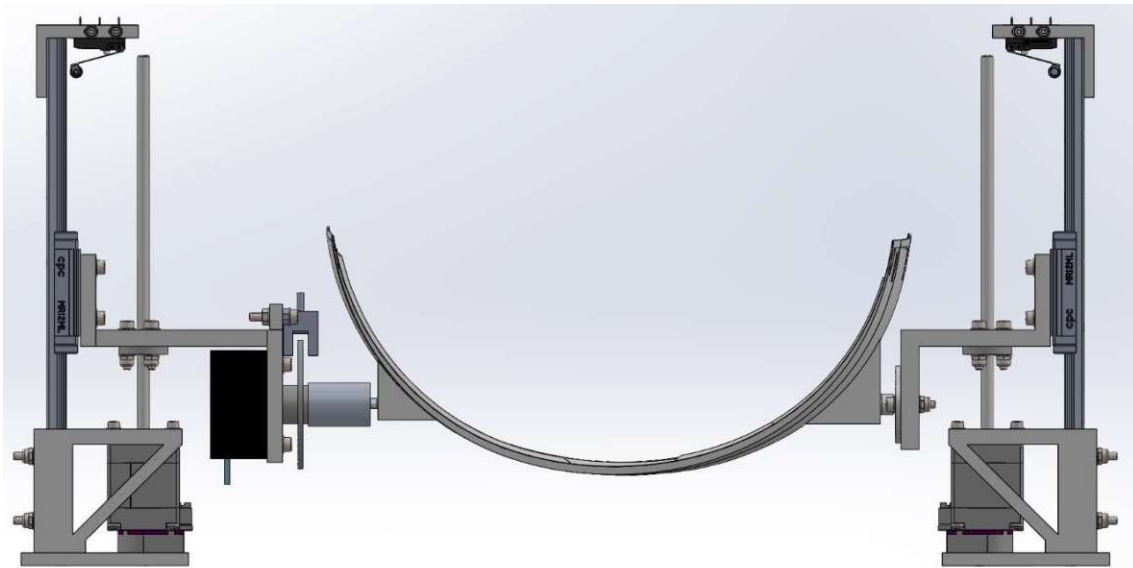


Abbildung 39 Variante 2: Spindelmotor (eigene Darstellung)

Die Höhenverstellung wird bei dieser Variante mittels zwei Spindelmotoren umgesetzt. Dabei sind die Motoren fest eingespannt und über eine Spindelmutter wird die Höhenverstellung verwirklicht. Für die Absicherung gegen Verdrehung sind die beiden Einspannungen der Spindelmuttern linear geführt. Die Winkelverstellung wird mittels eines Schrittmotors umgesetzt. Für diese Variante werden Produkte des Unternehmens Nanotec verwendet, da das Unternehmen zusätzlich zu den Schrittmotoren passende Motor-Controller und Encoder anbietet. Die Schrittmotoren zeichnen sich durch ihre geringe Baugröße und hohe Genauigkeit aus und sind durch ihre Funktionsweise in Kombination mit einem Encoder eine gute Alternative zu Servomotoren. Aufgrund des geringen Gewichts der Bauteile von rund 200 g und keinen externen Belastungen kann die Festigkeitsberechnung in dieser Variante vernachlässigt werden.

### Fan-Cowl

Analog zu Variante 1 wurde das Fan-Cowl-Modell dem verwendeten Maßstab angepasst. Bei dieser Anpassung ergab sich eine minimale Wandstärke von 0,3 mm, mit der keine ausreichende Stabilität erreicht wird. Daher wurde die Wandstärke in dieser Modellvariante um 3 mm erhöht. Das Werkzeug wird um die in der Abbildung 40 sichtbaren Achse 1, welche durch den Schwerpunkt verläuft, drehbar gelagert. Die Welle auf der linken Seite wird mittels einer Hülsenkupplung mit dem Schrittmotor verbunden, der für die Winkeleinstellung verwendet wird. Auf der anderen Seite wird die Welle mit einem Rillenkugellager gelagert.

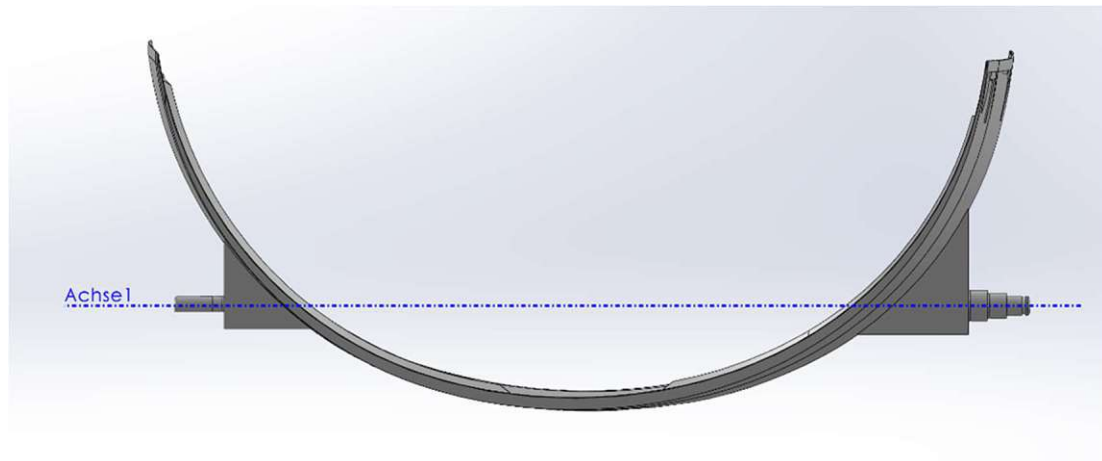


Abbildung 40 Variante 2: Fan-Cowl (eigene Darstellung)

### Schrittmotor für die Winkelverstellung

Für die Winkelverstellung wird ein Schrittmotor des Unternehmens Nanotec verwendet. Betrieben wird der Schrittmotor mit einer Spannung von 24 V. Dieser Motor zeichnet sich durch eine geringe Breite von 22 mm aus, was eine kompakte Bauweise ermöglicht. Zudem verfügt der Schrittmotor über ein Haltemoment von 17 Ncm und eine Auflösung von  $0,9^\circ/\text{step}$ . Mit dieser hohen Auflösung können alle benötigten Arbeitswinkel präzise angefahren werden. Für das Halten des Fan-Cowl benötigt der Schrittmotor kein großes Haltemoment, da die Drehachse durch den Schwerpunkt verläuft und das Gewicht des Fan-Cowl gering ist. Zur Erreichung des gewünschten Winkels darf der Schrittmotor keinen Schritt überspringen. Deshalb wurde bei der Auswahl des Schrittmotors die Baugröße NEMA 17 gewählt. Somit wird kein Encoder benötigt, der einen größeren Platzbedarf hat und zudem kann ein günstigerer Motor-Controller verwendet werden. Der Schrittmotor kann außerdem eine Radiallast von 20 N aufnehmen, weshalb dieser direkt als Lager verwendet werden kann. Befestigt wird der Schrittmotor mittels Schrauben an einem 3D-Druck-Bauteil, welches mit der Linearführung und der Spindel verbunden ist. Die Welle des Motors wird abgeflacht ausgeführt, was mithilfe einer geeigneten Kupplung eine drehsichere Verbindung zum Fan-Cowl ermöglicht.

### Führung

Die Führung wird über zwei Linearführungswagen des Unternehmens DOLD Mechatronik verwirklicht. Diese Linearführung ist bis auf die Größe analog zu der Führung in Variante 1. Die Verbindung zwischen Linearführung, Spindel und Lagerung/Schrittmotor wird über zwei 3D-Druck Komponenten ermöglicht. Diese Komponenten werden an den Führungswagen der Linearführung mittels Schrauben befestigt. Somit sind die beiden Halterungen gegen Verdrehungen gesichert. An beiden Halterungen wird eine Spindelmutter befestigt, welche in Kombination mit dem Linearaktuator eine Höhenverstellung ermöglicht. Die beiden Halterungen

werden unterschiedlich ausgeführt, da auf der einen Seite der Schrittmotor für die Winkelverstellung angebracht ist und auf der anderen Seite eine Lagerung eingebaut wird. Die lagerseitige Halterung ist in der Abbildung 41 ersichtlich und die motorseitige in Abbildung 42.

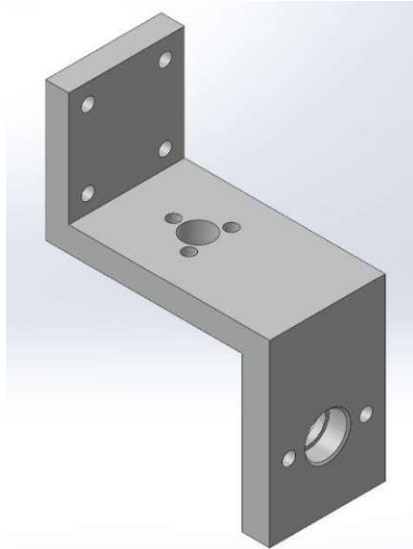


Abbildung 41 Variante 2: Führungswagen lagerseitig (eigene Darstellung)

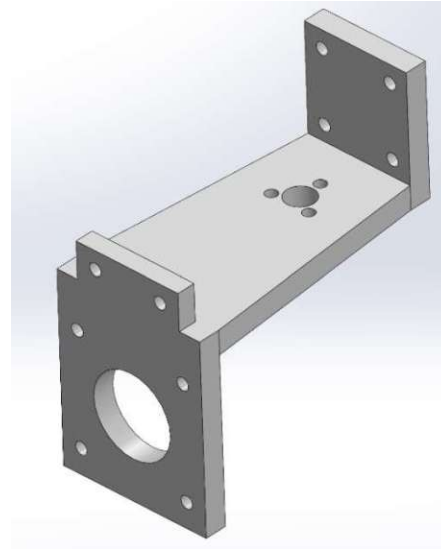


Abbildung 42 Variante 2: Führungswagen motorseitig (eigene Darstellung)

Die Linearführungen mit den jeweiligen Halterungen werden auf jeder Seite an einen Fuß (Abbildung 43), der 3D gedruckt wird, befestigt. An beiden Füßen werden zusätzlich die Spindelmotoren für die Höhenverstellung angebracht. Die Füße können auf einer Oberfläche befestigt werden.

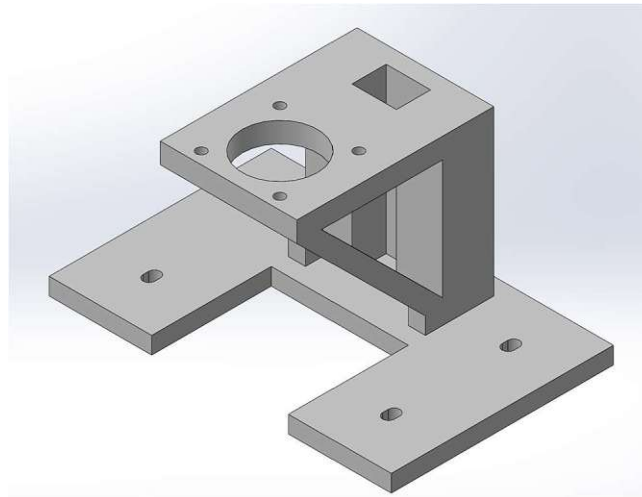


Abbildung 43 Variante 2: Fuß (eigene Darstellung)

## Spindelmotor

Für die Höhenverstellung werden Linearaktuatoren des Typs LSA281S10-B-THCA-152 verwendet. Als Schrittmotor wird die Baugröße NEMA 11 ausgewählt, die eine Spannung von 24 V benötigt. Dieser Linearaktuator hat ein Trapezgewinde mit einer

Spindellänge von 152 mm und einer Gewindesteigung von 2 mm. Der Linearaktuator kann eine Auflösung von 10  $\mu\text{m}/\text{step}$  und eine Geschwindigkeit von 40 mm/s vorweisen. Zudem kann der Aktuator eine axiale Kraft von 130 N aufbringen, was für diese Variante bei einem Gewicht von 0,5 kg je Seite ausreicht. Zur Sicherstellung, dass beide Schrittmotoren sich immer in der gleichen Stellung befinden und kein Schritt ausgelassen wird, wird an beiden Schrittmotoren ein Encoder des Typs NOE1 verbaut. Dies ist ein optisch reflektierender Encoder. Die Motoren werden auf beiden Seiten an einem Fuß verschraubt, auf dem auch die Führungsschiene befestigt ist.

## Referenzierung

Die verwendeten Schrittmotoren benötigen nach dem Einschalten eine Referenz, um die aktuelle Position zu bestimmen. Hierfür wird für die Höhenverstellung ein Endschalter verwendet, der über ein 3D-Druck Bauteil mit der Linearführung verschraubt wird. Dieser ist in der Abbildung 44 dargestellt.

Die Positionsbestimmung des Winkelmotors erfolgt, wie in der Abbildung 45 dargestellt, über eine Lichtschranke mit Referenzscheibe. Die Lichtschranke wird auf dem motorseitigen Führungswagen mittels Schrauben befestigt. Die Referenzscheibe wird auf der Welle des Schrittmotors angebracht. Da die Welle abgeflacht ausgeführt wurde, ist die Scheibe gegen eine Verdrehung gegenüber der Motorwelle gesichert. Diese Scheibe kann zwischen der Kupplung und dem Motor angebracht werden und benötigt somit keine gesonderte Befestigung.

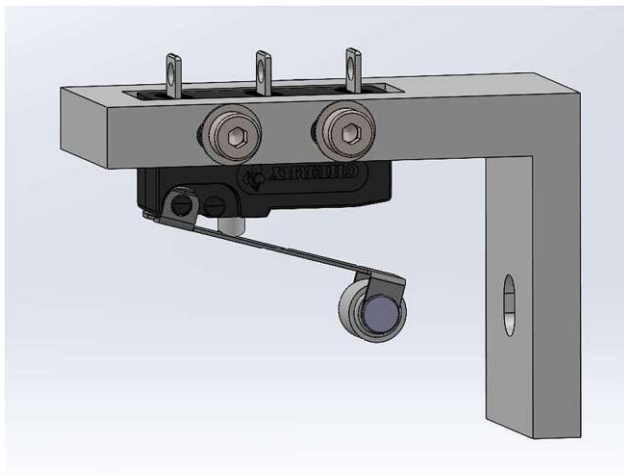


Abbildung 44 Variante 2: Endschalter mit Befestigung (eigene Darstellung)

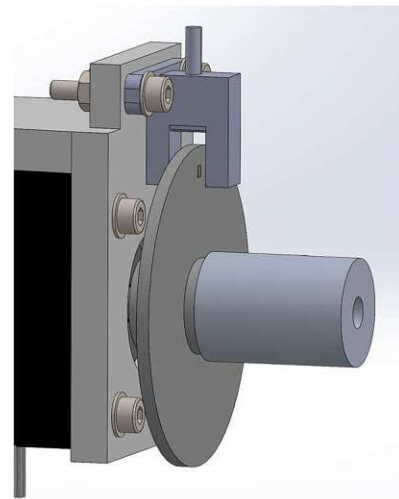


Abbildung 45 Variante 2: Lichtschranke mit Referenzscheibe (eigene Darstellung)

## Höhen- und Winkelverstellung

Die einstellbare Arbeitshöhe wird aufgrund von den Abmessungen des Fußes, des Führungswagens und des Endschalters begrenzt. Aufgrund der Bauteilabmessungen kann eine untere Arbeitshöhe im Bereich von 13,5 mm bis 98 mm eingestellt werden.



Diese Arbeitshöhen entsprechen in der Originalgröße einem Wertebereich von 135 mm bis 980 mm. Die Winkelverstellung kann jeden Arbeitswinkel, der die Gleichung (10) erfüllt, einstellen. Somit können alle Arbeitswinkel, mit denen keine Kollision zwischen Fan-Cowl-Werkzeug und Boden auftritt, angefahren werden.

### Komponenten und Kosten

In der Tabelle 19 sind die benötigten Komponenten mit den Kosten und Lieferanten aufgelistet. Die Komponenten, welche mittels 3D-Druck hergestellt werden, sind nicht in der Auflistung enthalten. Zudem wurde für Schrauben und Kleinteile ein entsprechender Betrag angenommen. Die vorläufigen Gesamtkosten der aufgelisteten Komponenten belaufen sich etwa 1500 €.

**Tabelle 19 Variante 2: Komponenten**

Bauteil	Lieferant	Artikelnummer	Stk.	Kosten/Stk.	Gesamtkosten
Spindelmotor mit Encoder	Nanotec	LSA281S10-B-THCA-152 NOE1-05-B14	2	162,20€ <sup>266</sup>	324,40€
Gewindemutter	Nanotec	LSNUT-AAAA-THCA	2	10,50€ <sup>266</sup>	21,00€
Motor-Controller	Nanotec	C5-E-1-09	2	221,70€ <sup>266</sup>	443,40
Schrittmotor	Nanotec	ST4209X1004-A	1	52,50€ <sup>266</sup>	52,50€
Motor-Controller	Nanotec	C5-01	1	152,60€ <sup>266</sup>	152,60€
Kondensator	Nanotec	Z-K4700/50	3	4,30€ <sup>266</sup>	12,90€
Micro-USB-Kabel	Nanotec	ZK-MICROUSB	1	8,70€ <sup>266</sup>	8,70€
Kabel	Nanotec		5	60€ <sup>266</sup>	60€
Netzteil	Nanotec	NDR-120-24	1	50,10€ <sup>266</sup>	50,10€
Schmiermittel	Nanotec	NANOLUBE-50G	1	16,30€ <sup>266</sup>	16,30€
Linearführungswagen	DOLD Mechatronik	78669	2	30,00€ <sup>267</sup>	60,00€
Linearführungsschiene	DOLD Mechatronik	78621-SZ-200	2	28,80€ <sup>267</sup>	57,60€
Kupplung	Norelem	07815,05	1	20,81€ <sup>268</sup>	20,81€
Rillenkugellager	Conrad	0107410	1	2,99€ <sup>269</sup>	2,99€
Sicherungsring	Conrad	1060890 - U3	1	14,96€ <sup>269</sup>	14,96€
Kleinteile (Schrauben, Muttern, Kabel...)	Conrad				200€ <sup>269</sup>
<b>Gesamt</b>					<b>1498,26€</b>

In der Variante 2 wurde die Höhenverstellung mit zwei Spindelmotoren und die Winkelverstellung mit einem Schrittmotor im Maßstab 1 zu 10 ausgeführt. In diesem

<sup>266</sup> Angebot am 20.09.2021; Nanotec Electronic GmbH & Co. KG <https://de.nanotec.com/>

<sup>267</sup> Angebot am 20.09.2021; Dold Mechatronik GmbH <https://www.dold-mechatronik.de/>

<sup>268</sup> Angebot am 20.09.2021; norelem Normelemente GmbH & Co. KG <https://www.norelem.at/at/de/Home.html>

<sup>269</sup> Angebot am 20.09.2021; Conrad Electronic GmbH & Co. KG <https://www.conrad.at/>

Maßstab kommt das Modell auf eine Breite von 420 mm, eine Höhe von 210 mm und eine Tiefe von 130 mm mit einem Gesamtgewicht von etwa einem kg. Zu jedem Spindelmotor wurde zur Höhenverstellung eine Spindelmutter verwendet, welche an einem Führungswagen befestigt wurde. Beide Führungswagen wurden über die Linearführung mit einem Fuß verbunden und sind somit gegen Verdrehen gesichert. An einem der beiden Führungswagen wurde der Schrittmotor für die Winkelverstellung angebracht. An diesem Schrittmotor wurde über eine Kupplung das Fan-Cowl-Werkzeug befestigt. Das Fan-Cowl-Werkzeug wurde außerdem über eine Welle mit dem Führungswagen auf der Seite gegenüber verbunden. Mit der in Variante 2 umgesetzten Höhenverstellung kann eine obere Arbeitshöhe, umgerechnet auf die Originalgröße, im Bereich von 1060 mm bis 1900 mm eingestellt werden. In der Variante 2 können alle Arbeitswinkel, die zu keiner Kollision führen, eingestellt werden. Die Kosten der Variante 2 betragen etwa 1500 €.

Für die Auswahl der Variante, die weiterverfolgt und umgesetzt wird, wird im nächsten Abschnitt eine Bewertung der beiden Varianten vorgenommen.

### 4.2.3 Bewertung und Auswahl

In diesem Punkt werden die Bewertungskriterien erklärt, mit denen die beiden Varianten bewertet werden. Die Variante, die besser abschneidet, wird für die Realisierung ausgewählt. Kriterien für die Bewertung sind der mögliche Höhen- und Winkelbereich, die Modellgröße und -gewicht und die Kosten. Diesen Kriterien wird eine Gewichtung zugeordnet. Der Einstellbereich ist dabei das wichtigste Bewertungskriterium, da die Höhen- und Winkelverstellung darauf abzielt, die Arbeitspositionen für einen großen Bereich bestmöglich einstellen zu können. Aus diesem Grund wird diesem Kriterium eine Gewichtung von 50 % zugeordnet. Die anderen Kriterien erhalten jeweils eine Gewichtung von 25 %.

#### Einstellbereich

Von diesen 50 % der Gewichtung werden 30 % für die Arbeitshöhen verwendet und die restlichen 20 % für die Winkelverstellung. Da die beiden Varianten einen unterschiedlichen Maßstab verwenden, werden zur Bewertung der Höhenverstellung die erreichbaren Arbeitshöhen aus Tabelle 11 herangezogen.

Aufgrund der Fan-Cowl Abmessungen können für die maximale Höhe des Fan-Cowl nicht alle Arbeitshöhen eingestellt werden. Für die Gruppe FP05 kann oben nur die Arbeitshöhe für fein-visuelle Arten der Arbeit eingestellt werden. Bei der MP95-Gruppe kann die Arbeitshöhe für eine fein- und geschickt-visuelle Arbeit eingestellt werden. Somit können für den oberen Punkt nur drei Einstellungen vorgenommen werden und für den unteren Punkt sind alle zwölf Einstellungen der Arbeitshöhe aus der Tabelle 11 möglich, was gesamt 15 Einstellungen ergibt.

## Modellgröße und -gewicht

Die Modellgröße und das Modellgewicht werden anhand des Platzbedarfs und Handhabung bewertet. Die Bewertung des Platzbedarfs erfolgt über die Abmessungen im aufgebauten Zustand und der Möglichkeit für die Lagerung. Die Handhabung wird anhand der Aspekte Transport und Zusammenbau bewertet.

## Kosten

Für die Auswahl der zu realisierenden Variante spielen auch die Kosten eine Rolle. In diesem Kriterium werden die gesamten Kosten der gekauften Bauteile bewertet. Für die 3D-gedruckten Komponenten werden keine Kosten veranschlagt, da diese mit einem handelsüblichen 3D-Drucker hergestellt werden konnten.

## Bewertung

Wie in Tabelle 20 zu sehen ist, wurden die beiden Varianten mit einer Gewichtung bewertet.

**Tabelle 20 Bewertung und Auswahl der Varianten**

Bewertungskriterien	Gewichtung	Variante 1		Variante 2	
		Bewertung je Kriterium	Gew. Wert	Bewertung je Kriterium	Gew. Wert
Einstellbereich: Höhe	30 %	80 %	24 %	80 %	24 %
Einstellbereich: Winkel	20 %	60 %	12 %	100 %	20 %
Modellgröße und -gewicht	25 %	20 %	5 %	80 %	20 %
Kosten	25 %	60 %	15 %	80 %	20 %
Gesamtbewertung	100 %		56 %		84 %

Die Variante 1 kann für die obere Höhe des Werkzeuges nur die Einstellung der fein-visuellen Arbeit für die Gruppe MP95 vornehmen. Jedoch kann für den unteren Punkt diese Einstellung nicht angefahren werden. Die Variante 2 kann für die obere Werkzeughöhe alle drei Einstellungen der Arbeitshöhe anfahren. Bei dem unteren Punkt kann für die Gruppe FP05 die Arbeitshöhe für fein-visuelle Arbeiten nicht eingestellt werden. Außerdem können die fein- und geschickt-visuellen Arbeitshöhen des unteren Punktes für die Gruppe MP95 nicht eingestellt werden. Zusammengefasst können beide Varianten jeweils zwölf von 15 Einstellungen bedienen, was 80 % der möglichen Arbeitshöheneinstellungen entspricht.

Für die optimale Einstellung des Arbeitswinkels wird eine Verstellbarkeit bis zu 90° gefordert. Die Variante 1 kann einen maximalen Arbeitswinkel von 54° erreichen, was 60 % des maximalen Einstellwinkels entspricht. Die Variante 2 kann jeden Arbeitswinkel einstellen.

Die Gesamtabmessungen (Breite x Höhe x Tiefe) der Variante 1 betragen 800 mm x 500 mm x 260 mm und die Abmessungen der Variante 2 betragen 420 mm x 210 mm x 130 mm. Somit lässt sich Variante 2 aufgrund der geringeren Abmessungen auf kleinerem Platz aufbauen und lagern. Zudem kommen die Variante 1 und die Variante 2 auf ein Gesamtgewicht von etwa 13 kg bzw. 1 kg. Im Vergleich der beiden Varianten hat die Variante 2 hinsichtlich der Handhabung Vorteile, da die Abmessungen und das Gewicht geringer sind und somit der Transport und der Zusammenbau für eine Person leichter umsetzbar ist. Deshalb wird der Variante 1 eine Bewertung von 20 % zugeordnet und der Variante 2 eine Bewertung von 80 %.

Die Kosten der Variante 1 belaufen sich auf ungefähr 2000 € und die der Variante 2 auf 1500 €. Hier kann ein Kostenvorteil für die Variante 2 festgestellt werden. Es werden bei der Variante 2 mehr Bauteile mittels 3D-Druck gefertigt, welche nicht in den Kosten inbegriffen sind. Deshalb wird in diesem Punkt der Variante 1 eine Bewertung von 60 % und der Variante 2 eine Bewertung von 80 % zugeschrieben.

In dieser Bewertung schneidet die Variante 1 und die Variante 2 mit einer Gesamtbewertung von 56 % bzw. 84 % ab. Hier ist eindeutig zu sehen, dass sich die Variante 2 besser für die Realisierung eignet. Somit wird für die genauere Planung der Steuerung der Höhen- und Winkeladaption nur mehr die Variante 2 betrachtet.

### 4.3 Steuerung der Höhen- und Winkeladaption

In diesem Abschnitt wird die Steuerung beschrieben, welche für die Höhen- und Winkeladaption verwendet wurde. Zu Beginn wird der Anschlussplan mit den verwendeten Komponenten vorgestellt. Daraufhin wird die Programmierung mit der grafischen Benutzeroberfläche behandelt. Für die Mensch-Maschine-Interaktion wurden zwei Varianten erstellt. Bei der ersten Variante findet die Interaktion mittels Drucktastern statt. Diese Drucktaster werden jedoch bei der Erprobung von einer anderen Person betätigt und sollen somit eine Umgebung, die implizit reagiert, simulieren. Diese implizite Umgebung könnte wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben eine Ortungstechnologie bzw. ein Kamerasystem mit Bilderkennung sein. Die Interaktion in der zweiten Variante erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, wodurch individuelle Benutzereinstellungen vorgenommen und dadurch ideale Bedingungen für einzelne Benutzer\*innen geschaffen werden können. Dabei werden die individuellen Einstellungen der Mitarbeiter\*innen erfasst und in digitale Personenprofile gespeichert. Nach der Identifizierung des Mitarbeiters am Arbeitsplatz werden die entsprechenden gespeicherten Daten aus den Personenprofilen abgerufen und das Modell passt sich an die gespeicherten Daten

an.<sup>270</sup> Für die Erstellung dieser Oberfläche und des Programmes wurde die Software Codesys verwendet.

### 4.3.1 Anschlussplan

In der Abbildung 46 ist der Anschlussplan mit den Hauptkomponenten der Steuerung schematisch dargestellt.

---

<sup>270</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 122–123

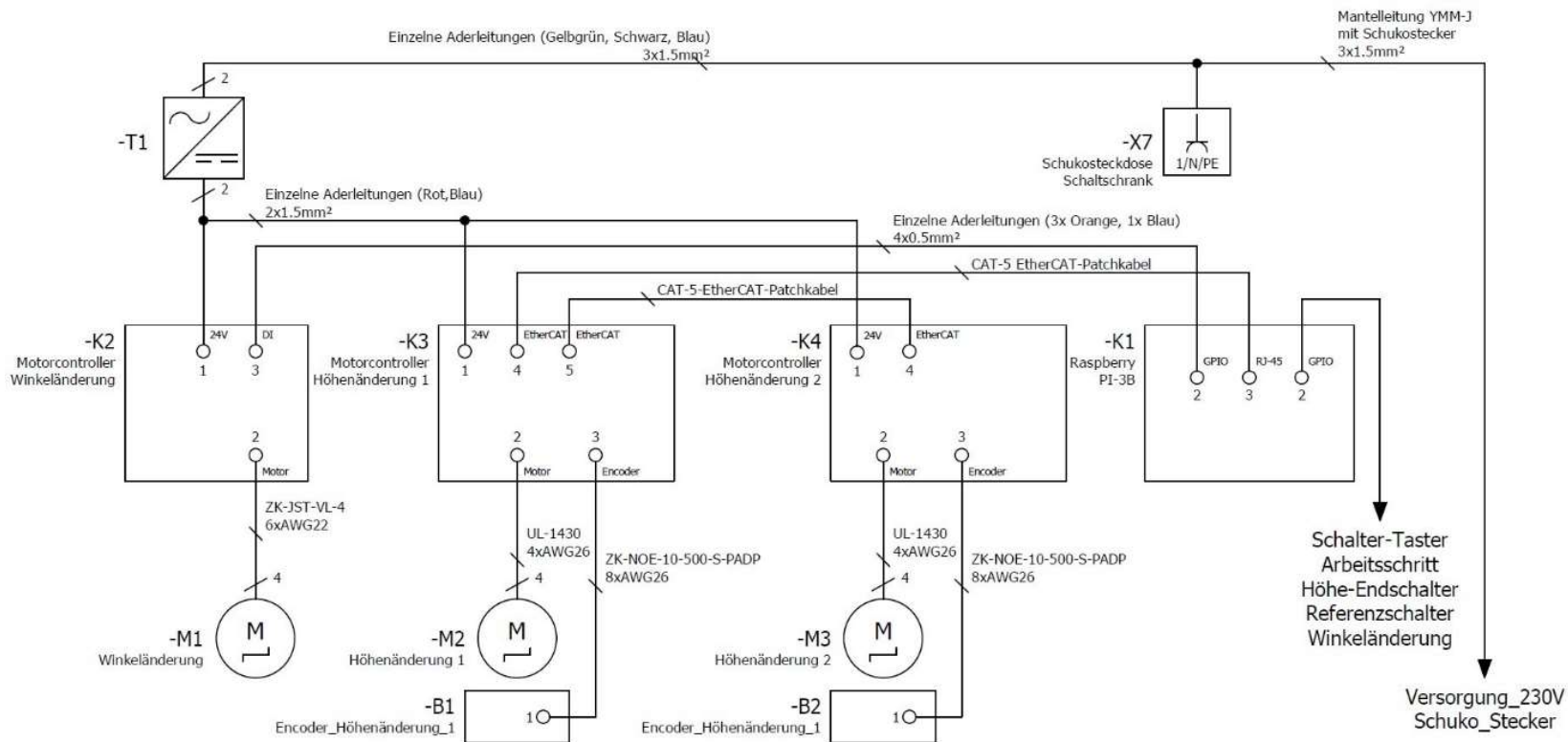


Abbildung 46 Schematischer Anschlussplan (eigene Darstellung)

Die Stromversorgung der Motoren und Controller erfolgt über ein Netzteil, welches die 230 V AC in 24 V DC umwandelt und bis zu 10 A zur Verfügung stellt. Dieses Netzteil stammt, wie auch die Schrittmotoren und die Motor-Controller, von dem Unternehmen Nanotec. Zwischen Schaltnetzteil und Motorcontroller wird ein Kondensator angeschlossen. Dieser wird zur Glättung der Spannungsspitzen eingesetzt, wenn der Motor im Generatorbetrieb ist. Die Glättung ist zum Schutz der SMD-Bauteile auf der Motor-Controller Platine notwendig. Zusätzlich werden zum Schutz der Motor-Controller 6,3 A Sicherungen seriell in den Stromkreis eingebaut.

Als Steuerungsmittel wird ein Raspberry Pi Einplatinenrechner verwendet. Für die Stromversorgung des Raspberry Pi wird das mitgelieferte Netzteil verwendet. Dieses wird an eine Schaltschranksteckdose angeschlossen.

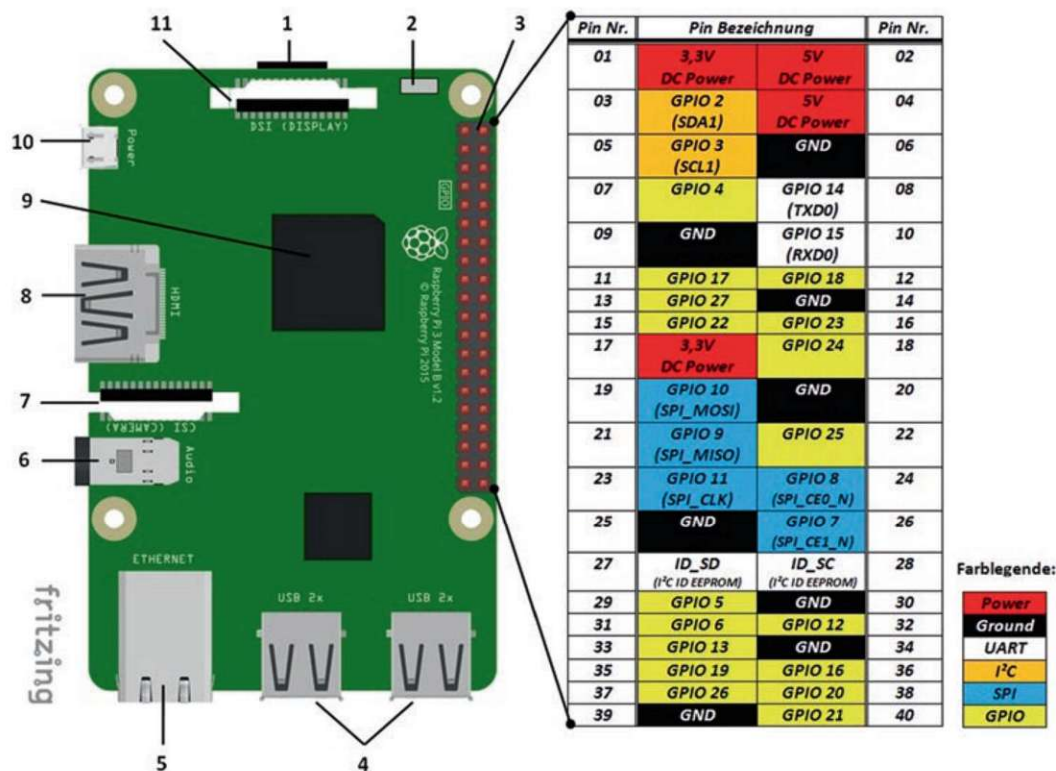
Dieser Einplatinenrechner ist leistungsstark und kostengünstig. Die Anwendungsgebiete, in denen er eingesetzt werden kann, sind vielfältig: von Robotersteuerungen über voll automatisierte Bierbrauanlagen bis hin zur Datenerfassung und -analyse.<sup>271</sup>

Der Raspberry Pi besteht aus einem Prozessor- und Graphikchip (9), einem Speicher (1) und verschiedenen Anschlüssen und Schnittstellen für externe Geräte (3,4,5,6,7,8,10,11), wie in Abbildung 47 anhand eines Raspberry Pi 3 Modell B zu sehen ist. Als Betriebssystem des Raspberry Pi kann Linux oder Raspbian verwendet werden.<sup>272, 273</sup>

<sup>271</sup> vgl. Schnirch/Ridinger/Weschenfelder, 2020, S. 35–36

<sup>272</sup> vgl. Nayak/Praneeth Reddy/Adla, 2020, S. 136

<sup>273</sup> vgl. Schnirch/Ridinger/Weschenfelder, 2020, S. 36–38

Abbildung 47 Aufbau und Anschlüsse des Raspberry Pi 3 Modell B<sup>274</sup>

Die Pin-Stiftleiste (3) ist einer der größten Vorteile des Raspberry Pi und besteht aus insgesamt 40 Pins.<sup>275</sup> Von diesen 40 Pins sind 26 sogenannte GPIO-Pins (General Purpose Input Output). Mit diesen lassen sich Sensoren, Aktoren und weitere Ausgabegeräte ansteuern. Über installierte Programme wie Scratch oder Python können die GPIO-Pins als Eingang/Input oder Ausgang/Output konfiguriert und programmiert werden. Bauteile, die einen unzulässig hohen Strom ziehen, wie beispielsweise Motoren, Relais, usw. sollten nicht direkt an einen GPIO-Ausgang angeschlossen werden, sondern nur über eine entsprechende Zwischenstufe (Transistor, Operationsverstärker, Motortreiber-IC, usw.).<sup>276</sup>

Die Kommunikation zwischen dem Raspberry Pi und den Motor-Controllern erfolgt auf zwei unterschiedlichen Arten. Die zwei Controller (C5-E-1-21) für die Höhenverstellung werden mit dem Bus-Protokoll EtherCAT angesteuert. Dieses Protokoll wurde gewählt, da es eine gute Übertragungszeit vorweist, was für den synchronen Betrieb der Höhenverstellungsmotoren benötigt wird. Aufgrund des vorhandenen RJ-45 Anschlusses (5) wird kein zusätzlicher Bus-Adapter benötigt. Um zu Beginn eines Modellversuches die Position zu bestimmen, werden die beiden Endschalter an das Raspberry Pi angeschlossen. Der Motor-Controller (C5-01) für die Winkelverstellung wird mit den GPIO-Pins angesteuert und an den digitalen Eingängen des Controllers angeschlossen. Die Lichtschranke zur Referenz wird auch

<sup>274</sup> Schnirch/Ridinger/Weschenfelder, 2020, S. 37

<sup>275</sup> vgl. Nayak/Praneeth Reddy/Adla, 2020, S. 136–137

<sup>276</sup> vgl. Schnirch/Ridinger/Weschenfelder, 2020, S. 38–40



an einen digitalen Eingang angeschlossen. Hierfür wird ein Freigabe-, ein Richtungs- und ein Taktsignal benötigt. Das Taktsignal wird mittels PWM auf Pin Nr. 18 bereitgestellt. Die Signale über die GPIO-Pins werden mit einer Spannung von 3,3 V übertragen. Die untere Schaltschwelle des Motor-Controllers beträgt 3 V.

Mittels zwei Interaktionsvarianten kann die Körpergröße, die für die Steuerung der Höhen- und Winkeladaption benötigt wird, eingegeben werden. In der ersten Variante werden vier Drucktaster verwendet, welche mit den GPIO-Pins verbunden sind. Bei drei Drucktastern (GPIO 25, 24 und 23) ist eine Körpergröße (FP05, MP50 und MP95) hinterlegt und der vierte Drucktaster (GPIO 22) dient zur Freigabe. Diese Drucktaster sollen eine implizite Umgebung simulieren. Um eine implizite Umgebung zu simulieren, werden die Drucktaster von einer weiteren Person betätigt. Somit müssen die Montagemitarbeiter\*innen keine explizite Interaktion vornehmen. Die Interaktionsvariante zwei wird über eine grafische Benutzeroberfläche ermöglicht. Hier können die Mitarbeiter\*innen ihre Körpergröße direkt eingeben. Dieses Interface kann mittels des Smartphones, PCs oder Tablets bedient werden und wird im Kapitel 4.3.3 vorgestellt. Die Auswahl des vorzunehmenden Arbeitsschrittes erfolgt in beiden Varianten über einen Drehschalter. Dieser Drehschalter wird über den GPIO-Pin 27 mit der SPS verbunden.

### 4.3.2 Programmierung

Das Hauptprogramm für die Steuerung wurde mit der Software Codesys erstellt und in drei Abschnitte unterteilt. Diese Abschnitte sind das Lesen und Speichern der Benutzerdaten, die Berechnung der Standardeinstellungen für die vorliegende Körpergröße und Arbeitsschritte und die Erstellung der Ausgabesignale für die Motor-Controller.

Das Lesen und Speichern der Benutzerdaten erfolgt über ein CSV-Dokument auf dem Raspberry Pi. In dem dazugehörigen Benutzermanagement werden die auf Codesys angemeldeten Benutzer\*innen mit den Daten auf dem Dokument verglichen. Existieren die angemeldeten Benutzer\*innen noch nicht, werden sie neu angelegt. Ansonsten werden die bereits vorhandenen Daten herangezogen. Für die drei Körpergrößen, welche in der Interaktionsvariante 1 verwendet werden, wurde jeweils ein Benutzer angelegt. Somit benötigt der Übergang zwischen den Interaktionsvarianten keine gesonderte Einstellung. Die Benutzerdaten bestehen aus dem Benutzernamen, der Körpergröße und aus den Arbeitshöhen- und Arbeitswinkeldaten des jeweiligen Arbeitsschrittes. Für die Arbeitshöhe und den Arbeitswinkel werden zunächst Standardwerte hinterlegt. Diese Standardeinstellungen für die Körpergröße und den jeweiligen Arbeitsschritten wurden mit den in Kapitel 4.1.3 hergeleiteten Zusammenhängen und Grenzen berechnet. Bei der Interaktionsvariante 2 wird es den Benutzern möglich sein, über

die grafische Benutzeroberfläche, welche in dem nächsten Abschnitt vorgestellt wird, individuelle Arbeitshöhen und Winkel zu hinterlegen. Die aktuellen Arbeitshöhen und -winkel des vorliegenden Benutzers werden im nächsten Abschnitt den Motorcontrollern übergeben. Die Winkeldaten werden dem Motorcontroller im Takt-Richtungsmodus übergeben. Hierfür wird ein Freigabe-, ein PWM- und ein Richtungssignal benötigt. Mit dem PWM-Signal wird dem Controller die benötigte Anzahl an Schritten übermittelt und über den EtherCAT-Feldbus erhalten die beiden Motorcontroller der Höhenverstellung die Arbeitshöhe. Somit können die Motoren synchron betrieben werden.

### 4.3.3 Grafical User Interface

Für die Interaktionsvariante 2 wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) erstellt. Das Hauptmenü der Oberfläche ist in der Abbildung 48 ersichtlich und wird beim Start angezeigt.

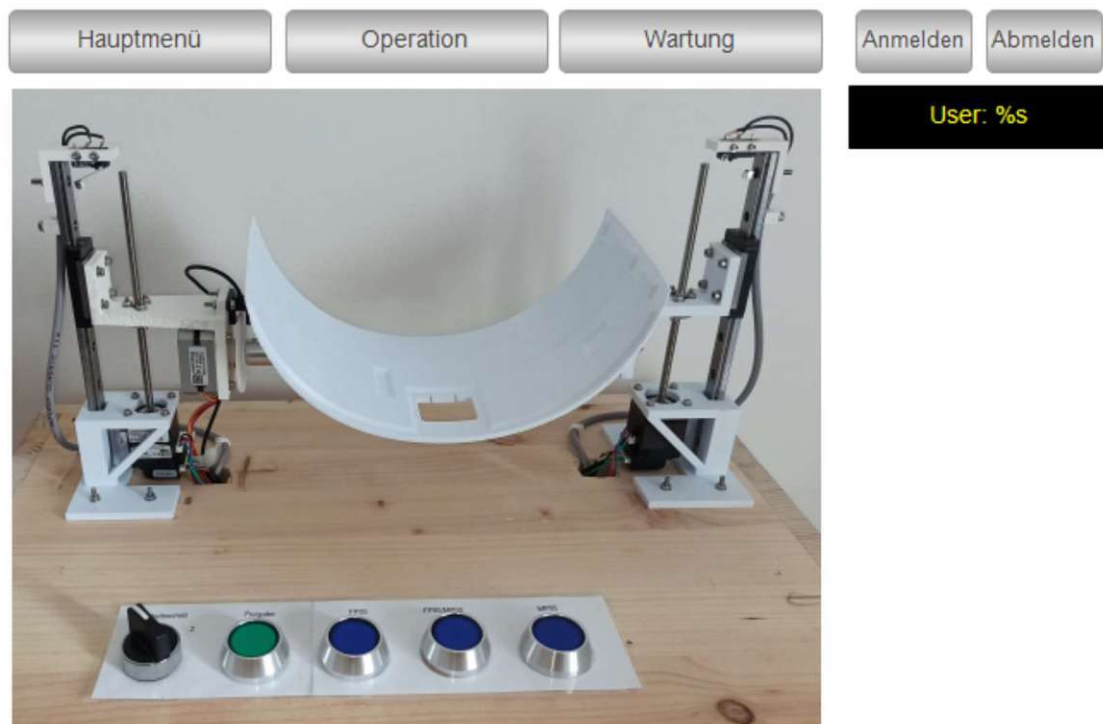


Abbildung 48 GUI: Hauptmenü (eigene Darstellung)

Ausgehend von dieser Oberfläche kann zu den Punkten Operation und Wartung navigiert werden. Diese Punkte sind jedoch nur für Benutzer verfügbar. Wurde ein Benutzer bereits erstellt, kann sich dieser hier An- und Abmelden. Ist noch kein Codesys-Benutzer angelegt, muss der Administrator diesen anlegen. Dafür ist der Punkt „Benutzerverwaltung“, der in der Abbildung 49 dargestellt ist, vorgesehen.



Abbildung 49 GUI: Wartung (eigene Darstellung)



Abbildung 50 GUI: Operation (eigene Darstellung)

Ist ein Benutzer angelegt, kann dieser sich Anmelden und den Abschnitt „Operation“ (Abbildung 50) öffnen. Hier wird dem User die Arbeitshöhe und der Arbeitswinkel für den aktuellen Arbeitsschritt angezeigt. Zudem kann über die Plus- und Minus-Buttons eine individuelle Einstellung hinterlegt werden. Die Änderungsrate wurde für das Beispiel auf 50 mm und 5° gesetzt, kann jedoch in dem Steuerungsprogramm mit den Variablen `Delta_AH` und `Delta_W` angepasst werden. Die individuell eingestellten Werte werden auf dem CSV-Dokument gespeichert und bei der nächsten Anmeldung des Users wieder aufgerufen. Handelt es sich bei der Anmeldung um einen neuen User, muss dieser zuerst den Punkt „Benutzereinstellungen“ aufrufen. In diesem Punkt kann der User seine Körpergröße eingeben und bei Betätigen des Default-Buttons werden die Standardeinstellungen berechnet und eingestellt. Der Punkt „Benutzereinstellungen“ ist in der Abbildung 51 ersichtlich.

Hauptmenü	Operation	Wartung	Anmelden	Abmelden
Körpergröße:	<input type="text" value="%s mm"/>	Default	User: %s	
	Arbeitshöhe:	Arbeitswinkel:	Speichern	
Arbeitsschritt 1:	<input type="text" value="%i mm"/>	<input type="text" value="%i°"/>		
Arbeitsschritt 2:	<input type="text" value="%i mm"/>	<input type="text" value="%i°"/>		

Abbildung 51 GUI: Benutzereinstellungen (eigene Darstellung)

Das GUI kann mittels einen PCs, Tablets oder Smartphones verwendet werden. Das verwendete Gerät muss in dem gleichen Netzwerk sein wie die Steuerung und wird über die Adresse ([http://\(IP-AdresseRaspberryPi\):8080/webvisu.htm](http://(IP-AdresseRaspberryPi):8080/webvisu.htm)), welche die IP-Adresse des Raspberry PI enthält, und über den QR-Code der Abbildung 52 erreicht.

Grafische Benutzeroberfläche:



<http://raspberrypi:8080/webvisu.htm>

Abbildung 52 GUI: QR-Code (eigene Darstellung)

Für die Variante 2 wurde die Steuerung geplant und ein Programm zur adaptiven Höhen- und Winkelverstellung erstellt. Dieses Programm beinhaltet zwei Interaktionsformen. Zum einen wird eine adaptive Umgebung durch drei Drucktaster simuliert und andererseits wird eine grafische Benutzeroberfläche verwendet. Diese grafische Benutzeroberfläche ermöglicht eine individuelle Adaption der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels wie in der Abbildung 50 dargestellt ist. Anschließend zur Planung des Modells wird dieses im folgenden Abschnitt aufgebaut, getestet und bewertet.

## 5 Aufbau, Test und Bewertung des Modells

In diesem Kapitel wird zuerst der Aufbau der Montagestation vorgestellt und daraufhin ermittelt, wie das Modell getestet und bewertet werden kann. Zudem werden im Anschluss die Vor- und Nachteile der Erprobung des Modells erläutert.

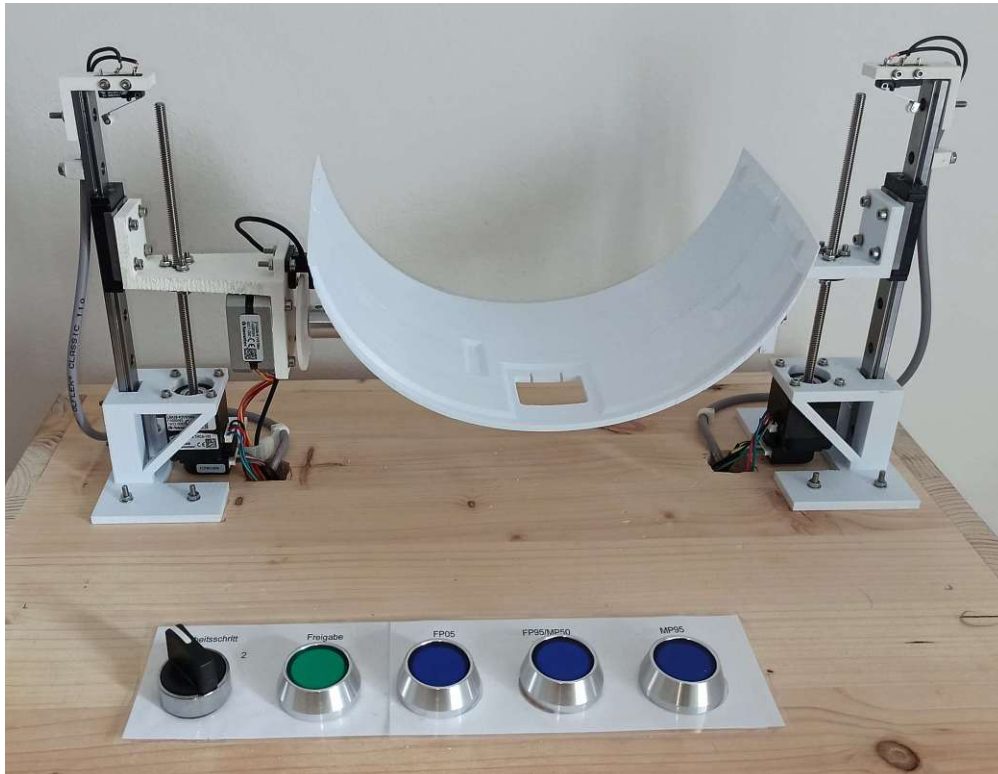


Abbildung 53 Modell der Montagestation (eigene Darstellung)

### 5.1 Aufbau

Das in Abbildung 53 ersichtliche Modell wurde wie in Kapitel 4 beschrieben aufgebaut und setzt sich aus dem Modell mit den Aktoren und der Steuerung zusammen. Für das Modell wurde ein Holzschrank gebaut, der auch als Schaltschrank dient. Auf diesem Schrank wurde das Modell befestigt und wie in dem Kapitel 4.2.2 beschrieben aufgebaut. Die benötigten Komponenten wurden mittels 3D-Druck angefertigt. Die Winkelverstellung erfolgt über einen Schrittmotor und die Höhenverstellung erfolgt über zwei Spindelmotoren die linear geführt sind. Bei den Schrittmotoren für die Höhenverstellung ist ein Encoder verbaut, damit sichergestellt werden kann, dass kein Schritt übersprungen wird. Die Motoren werden von den dazu gehörigen Motor-Controllern gesteuert. Diese Controller erhalten die Befehle von einer Mastersteuerung. Die Übertragung der Daten vom Master zu den Controllern erfolgt bei der Winkelverstellung über ein PWM-Signal und bei der Höhenverstellung über den EtherCAT Feldbus. Für die Höhenverstellung wurde ein Feldbus verwendet, da die zwei Motoren synchron laufen müssen, um die Funktion

des Modells zu gewährleisten. Mit diesem Feldbus wird eine schnelle Übertragung der Daten von dem Master zu den zwei Controllern gewährleistet. Als Master wird ein Raspberry Pi mit SoftSPS verwendet, was mittels der Software von Codesys ermöglicht wird. In der Steuerung wurden zwei Interaktionsmöglichkeiten integriert. Die Interaktion der ersten Variante erfolgt über Taster, welche vor dem Modell verbaut sind. Mit dem grünen Taster wird die Freigabe und das Laden der Daten betätigt und die blauen Taster dienen zur Auswahl der Körpergröße. Für jeden dieser drei Taster ist eine Körpergröße hinterlegt. Die zweite Interaktionsvariante erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche. Mit dieser Oberfläche wird eine Eingabe der Körpergröße und eine individuelle Einstellung der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels ermöglicht. Für die Demonstration wurden zwei Arbeitsschritte angelegt, welche mit dem Drehschalter eingestellt werden können. Dieser Drehschalter dient somit zur Bestätigung des Arbeitsschrittes.

## 5.2 Test und Bewertung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells

In diesem Abschnitt wird das Modell bezüglich der Höhen- und Winkeladaption getestet und bewertet. Für die Bewertung werden zunächst Kriterien hergeleitet und das Modell daraufhin bezüglich dieser getestet.

### 5.2.1 Bewertungskriterien

Das Hauptaugenmerk der Bewertung liegt in der Adaptivität, da die Erreichung einer adaptiven Höhen- und Winkelverstellung ein Hauptziel dieser Arbeit ist. Eine Adaptivität liegt dann vor, wenn sich das Modell automatisch an den Benutzer anpasst,<sup>277</sup> wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben wird. Im Fall des Modelles kann zwischen der Adaptivität bezüglich der Informationsaufnahme und der Adaptivität bezüglich der Anpassung der Arbeitshöhe und des -winkels für den jeweiligen Arbeitsschritt unterschieden werden.<sup>278</sup> Somit sind für den Modelltest zum einen die adaptive Informationsaufnahme und zum anderen die adaptive Anpassung der Arbeitsparameter an den Arbeitsschritt relevante Bewertungskriterien. Außerdem wird in der Bewertung die Möglichkeit einer individuellen Anpassung der Höhe und des Winkels miteinbezogen. Für die Erprobung der individuell adaptierten Arbeitshöhen und Arbeitswinkel wird eine dem Maßstab entsprechende Figur verwendet, welche die Montagemitarbeiter\*innen darstellt. Die Einstellungen der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels kann mittels dieser Figur bewertet werden. Daraus ergeben sich für das Modell nachfolgende Kriterien, die getestet und bewertet werden:

---

<sup>277</sup> vgl. Nazari Shirehjini, 2009, S. 5

<sup>278</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 123–125

- Adaptive Informationsaufnahme
- Adaptive Anpassung der Arbeitshöhe und -winkel an den Arbeitsschritt
- Möglichkeit einer individuellen Adaption
- Bewertung der Höhen- und Winkeleinstellungen mittels Figur

## 5.2.2 Test und Bewertung

Das Modell wird in diesem Abschnitt getestet und anhand der angeführten Bewertungskriterien evaluiert. Es werden beide Interaktionsvarianten getestet und die Höhen- und Winkeleinstellungen anhand einer Figur erprobt. Die Figur für den Modelltest ist 176 mm groß, was dem FP95/MP50 entspricht. Zur Erreichung der geforderten Körpergröße wurde die Figur mit einem „Roboter“-Anzug ausgestattet. Dieser Anzug dient ausschließlich zur Erhöhung der Körpergröße, damit die Einstellungen der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels demonstriert werden können.

Durch das Betätigen der Taster bzw. das Anmelden auf dem GUI werden die Startwerte für die Körpergröße und den Arbeitsschritt eingestellt. Die Startarbeitshöhe und der Startarbeitswinkel werden mit den Gleichungen aus Kapitel 4.1.3 berechnet.

Zuerst wurde die Interaktionsvariante 1 mit der adaptiven Körpergrößenaufnahme getestet. Nach dem Betätigen des FP95/MP50-Tasters wurde die Arbeitshöhe (65,8 mm) und der Arbeitswinkel ( $0^\circ$ ) für den ersten Arbeitsschritt eingestellt. Durch den Drehschalter kann zwischen den Arbeitsschritten gewechselt werden. Durch die Betätigung des zweiten Arbeitsschrittes wird die Arbeitshöhe (98 mm) und der Arbeitswinkel ( $54^\circ$ ) auf diesen adaptiert. Für den Test der zweiten Interaktionsvariante wurde ein Benutzer angelegt mit der Körpergröße der Figur. Die Arbeitshöhe und der Arbeitswinkel haben sich analog zu der Interaktionsvariante 1 auf die für diese Körpergröße vorgesehenen Höhen und Winkel adaptiert und sind für die beiden Arbeitsschritte in der Abbildung 54 und der Abbildung 55 ersichtlich.



Abbildung 54 Modelltest: Arbeitsschritt 1 (eigene Darstellung)

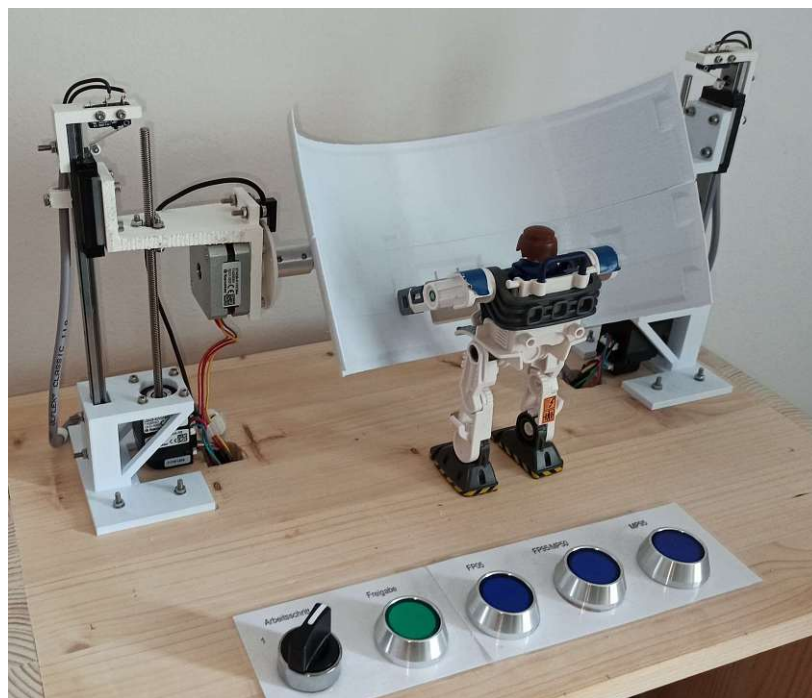


Abbildung 55 Modelltest: Arbeitsschritt 2 (eigene Darstellung)

Zudem konnte die Arbeitshöhe und der Arbeitswinkel für jeden Arbeitsschritt individuell angepasst werden, wie in der Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt ist. Hier wurde der Arbeitswinkel des Arbeitsschrittes 2 auf 90° adaptiert.





Abbildung 56 Modelltest: GUI - Individuelle Einstellungen (eigene Darstellung)

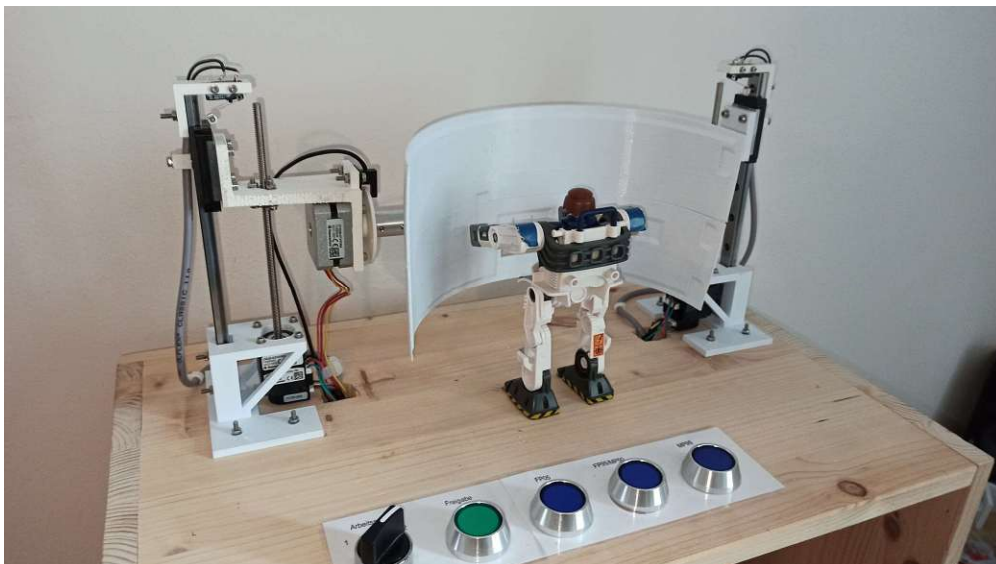


Abbildung 57 Modelltest: Arbeitsschritt 2 - Individuelle Einstellung (eigene Darstellung)

Anhand der maßstabsgetreuen Figur konnten die Höhen- und Winkeladaptionen hinsichtlich der Stellung zur Figur demonstriert werden. Der Arbeitspunkt 1, für den die Parameter in der Abbildung 54 eingestellt werden, liegt mit wie in Abbildung 31 ersichtlich nur 30 mm im inneren des Fan-Cowl. Diesen Arbeitspunkt kann die Figur erreichen, ohne dass sie ungünstige Körperhaltungen einnehmen muss. Der Arbeitspunkt 2 in der Abbildung 55 liegt mit 350 mm in der Mitte des Fan-Cowl. Aufgrund der Lage dieses Arbeitspunktes wurde der Winkel auf 53° adaptiert. Mit dieser Adaption ist es der Figur möglich den Arbeitspunkt zu erreichen, ohne sich über das Werkzeug beugen zu müssen.

Durch das Modell konnte eine Höhen- und Winkeladaption hinsichtlich des Arbeitsschrittes und der Körpergröße umgesetzt und erprobt werden. Die adaptive Informationsaufnahme wurde in der Interaktionsvariante 1 simuliert. Die Interaktionsvariante 2 erfordert zur Eingabe der Körpergröße eine Anmeldung auf der

grafischen Benutzeroberfläche, welche einmal zu Beginn der Arbeit erfolgen muss. Durch die grafische Benutzeroberfläche wird eine individuelle Einstellung der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels für jeden Arbeitsschritt ermöglicht, dies ist in der Interaktionsvariante 1 nicht möglich. Die Höhen- und Winkeladaptionen konnten durch die Figur demonstriert werden. Es wurde veranschaulicht, dass keine ungünstigen Körperhaltungen zur Erreichung des Arbeitspunktes notwendig sind. Eine genaue Bewertung der Einstellungen ist durch die Figur und die Vereinfachungen des digitalen Mensch-Modelles jedoch nicht möglich. Die Vor- und Nachteile, die durch die Recherche und die Erprobung ersichtlich wurden, werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

### 5.3 Vor- und Nachteile der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells

Aus dem Aufbau und Test des Modells ergeben sich Vor- und Nachteile, die für beide Interaktionsvarianten gelten. Einige treffen jedoch auch auf nur die jeweiligen Varianten zu. In diesem Abschnitt werden daher zuerst die Vor- und Nachteile, die für beide Varianten gelten und daraufhin die individuellen Vor- und Nachteile der einzelnen Interaktionsvarianten behandelt.

#### Generelle Vor- und Nachteile:

Durch das Modell wird eine kostengünstige Erprobung von Funktions- und Bedienkonzepten<sup>279</sup> bezüglich der Höhen- und Winkeladaption ermöglicht. Durch den Maßstab des Modells und die dadurch kleinen Abmessungen der Bauteile wird die Fertigung der erforderlichen Bauteile mittels eines handelsüblichen 3D-Drucker ermöglicht. Zusätzlich kann eine gute Bewertung hinsichtlich Proportionen und Teilaspekten des Funktionsspektrums vorgenommen werden.<sup>280</sup> Durch den Aufbau des Modells können weitere Interaktionsvarianten integriert und erprobt werden. Als Nachteil kann die Annahme einer linearen Abhängigkeit der Größe von Gliedmaßen und Körpergröße angesehen werden. Ein individuell abweichendes Verhältnis der Gliedmaßen zur Körpergröße bleibt unberücksichtigt. Zudem wird der Mensch in dem Modell durch eine Spielzeugfigur dargestellt. Deshalb ist auf dem Modell nur eine begrenzte Bewertung der Ergonomie und der Akzeptanz der Mitarbeiter möglich.

#### Interaktionsvariante 1: Vor- und Nachteile

In der Variante 1 wurde die implizite Umgebung mittels Taster, die von einer externen Person betätigt werden, simuliert. Dadurch ist keine Interaktion zur Eingabe der Körpergröße des Mitarbeiters notwendig. Jedoch existiert dadurch auch keine Möglichkeit für eine direkte individuelle Anpassung der Arbeitshöhe oder des

<sup>279</sup> vgl. Bühler u. a., 2019, S. 64

<sup>280</sup> vgl. Krzywinski/Lorenz/Klemm, 2017, S. 89

Arbeitswinkels durch die Mitarbeiter\*innen. Es ist in dieser Variante auch keine Visualisierung vorhanden, mit der die aktuelle Arbeitshöhe und -winkel eingesehen werden können. Außerdem ist es, ohne die Steuerung neu zu laden, nicht möglich, neue User anzulegen. Außerdem ist die Anzahl an gleichzeitig angelegten Benutzern auf die Anzahl der Taster limitiert.

**Interaktionsvariante 2: Vor- und Nachteile**

In dieser Variante ist eine individuelle Anpassung der Parameter durch den Benutzer auf der grafischen Oberfläche vor Ort möglich.<sup>281</sup> Durch diese Möglichkeit der Nachjustierung ergibt sich eine größere Technikakzeptanz.<sup>282</sup> Diese Anpassung kann über das Smartphone, ein Tablet oder den PC erfolgen. Zudem können die aktuelle Arbeitshöhe und -winkel auf der Visualisierung eingesehen werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass eine Interaktion mittels einer grafische Benutzeroberfläche für die meisten Personen eine bekannte Methode ist.<sup>283</sup> Außerdem ist es mit der Interaktionsvariante möglich, eine große Anzahl an Benutzern mit ihren individuell angegebenen Arbeitsparametern anzulegen. Jedoch erfordert diese Variante eine Anmeldung des Benutzers auf der grafischen Oberfläche, da keine implizite Umgebung vorhanden ist oder simuliert wird.

Zur Übersicht der Vor- und Nachteile wurden diese für das Gesamtsystem und für die einzelnen Interaktionsvarianten in der Tabelle 21 dargestellt.

**Tabelle 21 Vor- und Nachteile der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels Modells**

<b>Gesamtsystem</b>	
<b>Vorteile:</b>	<b>Nachteile:</b>
Kostengünstige Erprobung von Funktions- und Bedienkonzepten <sup>284</sup>	Lineares Verhältnis Gliedmaßen-Körpergröße
Bewertung hinsichtlich Proportionen <sup>285</sup>	Eingeschränkte Bewertung der Ergonomie und Nutzerakzeptanz
Durch kleine Bauteil Abmessungen 3D-Druck möglich	
Möglichkeit zur Integration und Erprobung anderer Interaktionsvarianten	
<b>Interaktionsvariante 1</b>	
<b>Vorteile:</b>	<b>Nachteile:</b>
Keine Interaktion zur Eingabe der Körpergröße notwendig	Keine Möglichkeit zur direkten Eingabe individueller Einstellungen durch die Benutzer*in
	Keine Visualisierung zur Einsicht der Parameter vorhanden

<sup>281</sup> vgl. Beuß/Jagusch/Sender, S. 4  
<sup>282</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 102  
<sup>283</sup> vgl. Schleicher, 2019, S. 59  
<sup>284</sup> vgl. Bühler u. a., 2019, S. 64  
<sup>285</sup> vgl. Krzywinski/Lorenz/Klemm, 2017, S. 89

	Anlegen neuer Benutzer*innen nur im Steuerungsprogramm möglich
	Limitierte Anzahl an Benutzer*innen durch Taster
<b>Interaktionsvariante 2</b>	
<b>Vorteile:</b>	<b>Nachteile:</b>
Individuelle Anpassung durch die Benutzer*innen möglich	Anmeldung zu Beginn Erforderlich
Durch Individuelle Anpassung größere Technikakzeptanz <sup>286</sup>	
Eingabe durch Smartphone, Tablet oder PC	
Einsicht der Parameter	
Grafische Benutzeroberfläche ist bereits eine bekannte Interaktion <sup>287</sup>	
Große Anzahl an Benutzer*innen möglich	

Als Vorteile der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells, kann das kostengünstige Testen von Funktions- und Bedienkonzepten hervorgehoben werden. Zudem wird durch das Modell eine einfache Integration zusätzlicher Interaktionsvarianten ermöglicht. Die getroffene Vereinfachung in der Modellierung des Menschen und die damit einhergehende eingeschränkte Evaluation der Ergonomie kann als Nachteil angesehen werden. Zudem ist eine Bewertung der Nutzerakzeptanz nur eingeschränkt möglich, da nur die Interaktionsform bewertet werden kann. Die Vor- und Nachteile der beide Varianten zur Interaktion unterscheiden sich vor allem in der Anmeldung, der Individualisierung und der Visualisierung. Eine Kombination von einer adaptiven Umgebung mit einer grafischen Benutzeroberfläche hat das Potential die jeweiligen Nachteile zu eliminieren.

<sup>286</sup> vgl. Rönick, 2020, S. 105

<sup>287</sup> vgl. Schleicher, 2019, S. 59

## 6 Transfer des Konzepts auf die reale Montagestation

Da sich diese Arbeit mit der Umsetzung und der Erprobung der Adaptivität mittels eines Modells befasst hat und mit diesem in der Praxis keine Anwendung möglich ist, werden in diesem Kapitel die Aspekte für den Transfer auf die reale Montagestation behandelt.

In dem Modell wurden bei der Modellierung des Menschen Vereinfachungen getroffen. Zum einen wurde die Länge der Gliedmaßen in ein lineares Verhältnis zur Körpergröße gestellt, was in der Realität nicht für jeden Menschen zutrifft. Somit sollten die Abmaße in der realen Montagestation bestenfalls mittels eines Kamerasystems mit Bildverarbeitung erfasst werden. Ansonsten können die Maße von den Personen, die an der Station arbeiten, vermessen und aufgenommen werden.

In dieser Arbeit wurden demonstrativ zwei Arbeitsschritte mit unterschiedlicher Art der Manipulation und unterschiedlichem Arbeitspunkt dargestellt. In der realen Situation sollten alle Arbeitsschritte mit den jeweiligen Manipulationsarten dargestellt werden. Um eine ergonomisch vorteilhafte Arbeitshaltung einzunehmen, wurde versucht, mittels der Winkelanpassung belastende Stellungen der Gliedmaßen nach RULA<sup>288</sup> zu vermeiden. Bei der Ermittlung des Arbeitswinkels sollte darauf geachtet werden, dass dieser auch den praktischen Anforderungen zur Durchführbarkeit genügt.

Außerdem wurde bei dem Modell die Festigkeitsberechnung vernachlässigt, da keine äußeren Belastungen auftreten und das Gewicht der Bauteile durch die Größe und das Material vernachlässigbar klein ist. Für den Transfer gilt es, die Abmaße der Bauteile auf die bei den Arbeitsschritten auftretenden äußeren Belastungen und auf das erhöhte Gewicht anzupassen. Zudem sollte die dynamische Berechnung in der Auslegung berücksichtigt werden. Diese konnte durch das geringe Gewicht der Bauteile in dieser Arbeit vernachlässigt werden. Zusätzlich zur Auslegung der Bauteile müssen die Aktoren an die höhere Belastung und die geforderten dynamischen Anforderungen angepasst werden.

Für die Steuerung dieser Aktoren wird empfohlen, das Raspberry Pi durch eine industrielle SPS zu ersetzen, da das Raspberry Pi durch die GPIO Anschlüsse mit 3,3V nur begrenzt mit den industriell verwendeten Steuerungsbauteilen kompatibel ist. Zudem hat eine SPS den Vorteil, dass mehr unterschiedliche Feldbus Anschlüsse vorhanden sind. Als standardisierte Software-Schnittstelle für den Datenaustausch

---

<sup>288</sup> Hoehne-Hückstädt, 2005, S. 54–55

kann eine Open Plattform Communication Unified Architecture (OPC UA) Server genutzt werden.<sup>289</sup> Für die Datenaufnahme der Mitarbeiter\*innen sollte in der realen Montagestation eine implizite Umgebung integriert werden, die eine adaptive Informationsaufnahme ermöglicht. Dies kann mittels eines Kamerasystems mit Bildverarbeitung oder durch eine Ortungstechnologie wie beispielsweise RFID verwirklicht werden. Durch die Bildverarbeitung des Kamerasystems könnten die Daten der Körpergröße und die Abmaße der Gliedmaßen direkt aufgenommen werden. Mittels einer anderen Ortungstechnologie wäre dies nicht möglich, da bei hierbei lediglich die Position des Mitarbeiters erkannt wird. Zusätzlich kann durch das Kamerasystem eine Analyse der Ergonomie durchgeführt werden.<sup>290, 291</sup> Außerdem ist zusätzlich zu der adaptiven Datenaufnahme eine Visualisierung vorteilhaft, da es den Mitarbeitern\*innen dadurch ermöglicht wird, individuelle Einstellungen vorzunehmen. Diese Visualisierung könnte in Kombination mit der Darstellung der Arbeitsanweisungen erfolgen.<sup>292</sup>

Die Evaluation der Ergonomie kann mehrstufig erfolgen. Der Arbeitsplatz könnte zu Beginn mit einem digitalen Menschmodell hinsichtlich der Ausführbarkeit und Ergonomie der Montageprozesse bewertet werden.<sup>293</sup> Daraufhin kann zur Evaluation des Gesamtsystems eine summative Evaluierung mittels eines Usability Tests durchgeführt werden.<sup>294</sup> Durch eine Simulation eines realen Anwendungsszenarios wird die Messung der Anwenderleistung und deren Zufriedenheit ermöglicht. Zudem können Usability-Probleme identifiziert werden. Somit kann in Kombination mit einem anderen Verfahren (Lautes Denken, Fragebögen, ...) die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit ermittelt werden.<sup>295</sup> Diese beinhaltet die Dimensionen Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit, die alle erfüllt werden sollten, um eine hohe Gebrauchstauglichkeit zu erlangen. Um die Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen, wurden standardisierte Fragebögen entwickelt. Diesen Fragebögen ermöglichen einen Vergleich zwischen verschiedenen Mensch-Maschine-Schnittstellen und lassen sich einfach anwenden.<sup>296</sup> Mit den Fragenbögen (AttrakDiff, USE und meCUE) lässt sich die pragmatische und hedonische Qualität zum großen Teil erfassen.<sup>297</sup> Die pragmatische Qualität (Usability) setzt sich aus Effektivität, Effizienz, Benutzbarkeit und Nützlichkeit zusammen. Die hedonische Qualität (User Experience) beinhaltet die Lernförderlichkeit, Attraktivität, Identifikation, usw..<sup>298</sup>

---

<sup>289</sup> vgl. Beuß/Jagusch/Sender, S. 4

<sup>290</sup> vgl. Brandl u. a., 2016

<sup>291</sup> Haggag u. a., 2013

<sup>292</sup> Batchuluun u. a., 2018

<sup>293</sup> vgl. Beuß/Jagusch/Sender, S. 4

<sup>294</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 91–92

<sup>295</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 91–92

<sup>296</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 93

<sup>297</sup> vgl. Schleicher, 2019, S. 65

<sup>298</sup> vgl. Wächter, 2019, S. 101

## 7 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus dem Modell der Montagestation mit adaptiver Höhen- und Winkelverstellung in Bezug auf die Forschungsfrage zusammengefasst und diskutiert. Daraufhin werden die Einschränkungen der Ergebnisse dargelegt und mögliche Schritte zur Weiterentwicklung vorgeschlagen.

### 7.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Arbeit hat sich mit der mechatronischen/konstruktiven Umsetzung einer adaptiven Höhen- und Winkelverstellung anhand eines Modells einer Fan Cowl Montagestation befasst. Für die Erreichung der Ziele hat sich diese Arbeit mit folgender Forschungsfrage befasst:

**„Wie kann eine individuelle, adaptive Einstellung des Baustellenmontagearbeitsplatzes in Arbeitshöhe und -winkel mit einem Modell getestet und evaluiert werden?“**

Um diese Frage strukturiert zu beantworten, werden die Ergebnisse zunächst anhand der Unterfragen zusammengefasst und diskutiert.

Als erster Schritt wurde eine Recherche zu den für diese Arbeit relevanten Themen durchgeführt. Daraufhin wurde der für das Modell am besten passende Modellmaßstab bestimmt und ausgewählt. Für die Auswahl des Modellmaßstabes wurden die erforderlichen Arbeitshöhen für die unterschiedlichen Arten der Manipulation und die jeweiligen Körpergrößen ermittelt und modelliert. Den Zusammenhang der Arbeitshöhe, der Art der Manipulation und der Körpergröße wurde in dieser Arbeit nach Neudörfer<sup>299</sup> modelliert. Bei der Modellierung des Arbeitswinkels wurde darauf geachtet, dass keine ungünstigen Körperhaltungen nach dem RULA-Verfahren wie beispielsweise über das Werkzeug gebeugtes Arbeiten notwendig sind. Zur Demonstration wurden in dieser Arbeit zwei Arten der Manipulation verwendet. Durch den modellierten Zusammenhang der Arbeitshöhen und der Körpergröße wurde der erforderliche Verstellbereich des Werkzeuges ermittelt. Der Verstellbereich wurde in der Tabelle 13 mit einer Reihe von unterschiedlichen Maßstäben skaliert. Daraufhin wurden zwei Konzepte zur Umsetzung der Höhen- und Winkelverstellung erstellt. Nach der Erstellung wurden die auf dem Markt erhältlichen Aktoren für die Höhen- und Winkelverstellung ermittelt. Anhand der verfügbaren Aktoren wurde jener Maßstab gewählt, mit dem der Verstellbereich am besten abgedeckt werden kann. Für das erste Konzept wurde ein Maßstab von 1 zu 5 gewählt, da die benötigten Zylinder nicht in kleineren Ausführungen verfügbar waren. Für die Umsetzung der zweite Variante wurde der

---

<sup>299</sup> Neudörfer, 2020, S. 574

Maßstab von 1 zu 10 gewählt. Mit diesem Maßstab ergab sich für das Modell eine geeignete Größe, um dieses mittels einer Figur zu testen.

Nach der Wahl des Maßstabes wurden die beiden Varianten konstruiert. Die Höhen- und Winkelverstellung erfolgte in der ersten Variante über elektrisch angetriebene Zylinder. In der zweiten Variante wurde die Höhenverstellung mittels zwei Spindelmotoren und die Winkelverstellung anhand eines Schrittmotors verwirklicht. Nach der Konstruktion beider Varianten wurden diese anhand von Kriterien wie dem möglichen Einstellbereich der Höhe und des Winkels, der Gesamtgröße und des -gewichts und der Kosten bewertet. In dieser Bewertung hat sich herausgestellt, dass die Variante 2 für die Umsetzung besser geeignet ist, da mit dieser der Platzbedarf und die Kosten geringer sind. Somit wurde für die weitere Umsetzung der Höhen- und Winkeladaption nur mehr die Variante 2 betrachtet. Die benötigten Bauteile für diese Variante wurden mit einem 3D-Drucker angefertigt.

Anschließend an die Konstruktion und Auswahl der Variante wurde die Steuerung geplant und erstellt, bei der als Master ein Raspberry Pi verwendet wurde. Die Steuerung wurde mit der Software Codesys umgesetzt. Dieses Programm hatte zum Vorteil, dass bereits eine Laufzeit für das Raspberry Pi existiert und dass mit diesem Programm eine einfache Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche ermöglicht wird. Die Planung der Steuerung gliederte sich in drei Hauptabschnitte. Diese Abschnitte sind zum einen die Interaktionsmöglichkeit zwischen den Benutzern und der Steuerung, das Benutzermanagement und die Ansteuerung der Motoren zur Erreichung der Arbeitsparameter. Um eine Adaptivität der Informationsaufnahme zu erhalten, ist eine implizite Umgebung notwendig. Eine implizite Umgebung ermöglicht eine Informationsaufnahme ohne eine explizite Interaktion des Benutzers, was auch als adaptiv bezeichnet wird.<sup>300</sup> Diese Umgebung könnte beispielsweise mittels einem Kamerasystem mit Bildverarbeitung oder mittels einer Ortungstechnologie wie RFID verwirklicht werden.

In der ersten Interaktionsvariante wurde in dieser Arbeit die implizite Umgebung durch drei Taster simuliert. Die implizite Umgebung wurde aufgrund des Arbeitsumfanges der Integrierung simuliert, da es ansonsten den Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Die Simulation wird durch die Betätigung der Taster durch eine externe Person verwirklicht. Die Betätigung der Taster stellt das Erfassen der Körpergröße dar. Die zweite Interaktionsmöglichkeit verwendet zur Eingabe der Daten eine grafische Benutzeroberfläche, auf der sich die Mitarbeiter\*innen anmelden und individuelle Einstellungen der Arbeitsparameter vornehmen können. Durch diese Variante der Interaktion wurde ein Benutzermanagement notwendig, welches über eine CSV-Datei auf dem Raspberry Pi verwirklicht wurde. Das Ansteuern der Motoren zur Verwirklichung der Höhen- und Winkelveränderungen

---

<sup>300</sup> vgl. Nazari Shirehjini, 2009, S. 5



erfolgte über die zugehörigen Motor-Controller. Diese wurden zum einen über ein PWM-Signal zur Winkeladaption und zum anderen über den EtherCAT-Feldbus zur Höhenadaption gesteuert. Der EtherCAT-Feldbus wurde aufgrund der notwendigen Synchronität der beiden Spindelmotoren verwendet.

Nach der Umsetzung der Höhen- und Winkeladaption im Modell wurden Kriterien ermittelt, mit denen das Modell evaluiert werden konnte. Bei der Adaptivität des Modells kann zwischen einer adaptiven Informationsaufnahme und einer adaptiven Anpassung der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels an den Arbeitsschritt unterschieden werden. Bei der adaptiven Informationsaufnahme wird die Körpergröße automatisch von dem System aufgenommen. Bei der adaptiven Anpassung der Arbeitshöhe und -winkel an den Arbeitsschritt und die erfasste Körpergröße werden die Arbeitsparameter automatisch beim Wechseln des Arbeitsschritts angepasst. Die Anpassungen der Arbeitsparameter erfolgte anhand der Modellierung der Arbeitshöhe und -winkel. Somit wurden als Bewertungskriterien die adaptive Informationsaufnahme und das adaptive Anpassen der Arbeitsparameter an den Arbeitsschritt herangezogen. Zusätzlich wurde als Bewertungskriterium die Möglichkeit einer individuellen Adaption der Arbeitsparameter und die Bewertung der Höhen- und Winkeleinstellungen anhand einer Figur gewählt.

Die Bewertungskriterien wurden im Modelltest erprobt. Zunächst wurde die Eingabe der Körpergröße mit beiden Interaktionsvarianten durchgeführt. Nach der Eingabe wurden die Arbeitshöhe und der Arbeitswinkel automatisch an die vorgegebenen Werte eingestellt und beim Wechsel des Arbeitsschrittes wurden die Arbeitsparameter adaptiv angepasst. Durch die grafische Benutzeroberfläche wurde daraufhin eine individuelle Einstellung vorgenommen, welche auch nach dem Neustart erhalten blieb. Die Einstellungen der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels wurden mit einer Figur getestet. Zur Erreichung der Arbeitspunkte benötigte die Figur durch die Einstellungen keine ungünstigen Körperhaltungen.

Nach dem Testen und Bewerten des Modells wurden die Vor- und Nachteile der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels eines Modells zusammengefasst. Diese wurden in generelle und interaktionsvariantenspezifische Vor- und Nachteile gegliedert. Ein Vorteil eines Modells liegt in der kostengünstigen Erprobung von Funktions- und Bedienkonzepten, was zum einen durch den Einsatz von 3D-gedruckten Teilen und zum anderen durch die geringere Baugröße der benötigten Teile ermöglicht wird. Zudem können die Proportionen durch den Maßstab gut bewertet werden. Ein weiterer Vorteil des Modelles ist die Möglichkeit zur Integration anderer Interaktionsvarianten. Demgegenüber kann als Nachteil das lineare Verhältnis der Gliedmaßen zur Körpergröße angeführt werden. Dieses wurde zur Vereinfachung der Modellierung der Arbeitsparameter herangezogen. Ein weiterer

Nachteil der Erprobung durch das Modell ist die eingeschränkte Bewertungsmöglichkeit der Ergonomie und Nutzerakzeptanz zu nennen, da die Adaption anhand einer Figur getestet wurde.

Der Vorteil der ersten Interaktionsvariante liegt darin, dass keine Interaktion zur Eingabe der Körpergröße notwendig ist. Allerdings können keine individuellen Anpassungen der Arbeitsparameter durch den Nutzer erfolgen. Zudem ist keine Visualisierung der Arbeitsparameter vorhanden und neue Nutzer können nur durch das Ändern der auf den Tastern hinterlegten Benutzern angelegt werden, wodurch die Zahl der aktiven Benutzer auf drei begrenzt wird.

Die Vorteile der Interaktionsvariante 2 sind zum einen die Möglichkeit für individuelle Anpassungen, die Möglichkeit zur Bedienung über das Smartphone, Tablet oder PC, die Einsicht der Parameter und die Möglichkeit einer großen Anzahl an Benutzern. Zudem ist eine grafische Benutzeroberfläche für die meisten Benutze\*innen bereits eine bekannte Interaktionsart, was zu einer höheren Technikakzeptanz führt.<sup>301</sup> Als Nachteil dieser Variante ist die Anmeldung des Benutzers bei Arbeitsbeginn anzuführen. Diese kann jedoch bereits vor Arbeitsbeginn erfolgen und stellt somit keinen großen Mehraufwand dar. Zudem könnten sich einige Nachteile der Varianten durch die Kombination der beiden Interaktionsvarianten aufheben.

## 7.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze und Ergebnisse unterliegen gewissen Einschränkungen, auf die in diesem Abschnitt eingegangen wird.

Da es sich in dieser Arbeit um ein Maßstabsmodell handelt, sind die Aussagen und Ergebnisse nicht direkt auf die reale Montagestation zutreffend. Als Einschränkung kann die Berechnung der Arbeitshöhe und des Arbeitswinkels durch die Annahme einer linearen Abhängigkeit der Gliedmaßen- zur Körpergröße angesehen werden. Dies ist in der Realität nicht immer zutreffend. Zudem wurde bei der Berechnung des Arbeitswinkels ausschließlich darauf geachtet, dass zur Ausführung keine ungünstigen Körperstellungen notwendig sind. Dabei wurde jedoch nicht auf die praktische Ausführbarkeit der Arbeitsschritte geachtet. Eine Einschränkung des Ansatzes besteht in der Anzahl an Arbeitsschritten, da zur Demonstration nur zwei Arbeitsschritte dargestellt wurden. Zudem ist die Bewertung der adaptiven Informationsaufnahme mittels der Simulation beschränkt, da diese durch eine externe Person ausgeführt wird. Auch die Bewertung der Ergonomie und der Nutzerakzeptanz ist durch den Test mittels einer Figur nur begrenzt aussagekräftig.

---

<sup>301</sup> vgl. Schleicher, 2019, S. 59

### 7.3 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Für die Weiterentwicklung dieser Arbeit könnte als nächster Schritt die Integrierung einer impliziten Umgebung beispielsweise durch ein Kamerasystem mit Bildverarbeitung erfolgen. Mit diesem System könnten die Körpergröße und die Größe der Gliedmaßen automatisch erfasst werden. Diesbezüglich besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Für eine individuelle Einstellung mit diesem System ist eine Benutzererkennung notwendig, da allein aus der Körpergröße keine eindeutige Zuordnung an einen Benutzer möglich ist. Diese Identifikation könnte über eine Gesichtserkennung<sup>302</sup> oder eine körperbewegungs-basierte Erkennung<sup>303,304</sup> erfolgen. Die Mitarbeiteridentifikation könnte außerdem mittels eines RFID-Chips oder mit einem Iris- oder Fingerabdruckscanner erfolgen.<sup>305</sup>

Durch eine Reihe von unterschiedlichen Schnittstellen des Raspberry Pi könnten die eben genannten Identifikationsmöglichkeiten in das System eingebunden und evaluiert werden. Des Weiteren könnte das Konzept dieses Modelles für die adaptive Höhen- und Winkelverstellung als Grundlage für die Konzepterstellung zur Umsetzung der Höhen- und Winkelverstellung in der realen Montagestation dienen. Für den Transfer der Selbstkonfiguration auf die reale Montagestation wurden in Kapitel 6 die Aspekte, die es bei der Transformation des Konzeptes zu beachten gilt, beschrieben. Die Selbstkonfiguration der Montagestation mit der Adaption der Arbeitsfläche an die Mitarbeiter\*innen ist nach Bartolini<sup>306</sup> ein Hauptaspekt der Montagestation 4.0, bei dem im Bereich der Baustellenmontage noch Forschungsbedarf besteht.

---

<sup>302</sup> Taigman u. a., 2014

<sup>303</sup> Batchuluun u. a., 2018

<sup>304</sup> Yamada u. a., 2020

<sup>305</sup> vgl. Rupprecht/Schlund, 2021, S. 122–123

<sup>306</sup> Bortolini u. a., 2017

## 8 Literaturverzeichnis

Acosta, David/Garcia, Olmer/Aponte, Jorge (2006): Laser Triangulation for Shape Acquisition in a 3D Scanner Plus Scan, in: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico u. a. (Hrsg.), 2006, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2006: 26 - 29 September 2006, Cuernavaca, Morelos, Mexico, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'06), Cuernavaca, Morelos, 9/26/2006 - 9/26/2006, S. 14–19

Batchuluun, Ganbayar u. a. (2018): Body-movement-based human identification using convolutional neural network, in: Expert Systems with Applications, 101, 2018, S. 56–77

Beuß, Florian u. a. (2017): Flexibel adaptierbare, intelligente Arbeitsplatzsysteme für große Bauteile, in: Winkler, Herwig u. a. (Hrsg.), Flexibilisierung der Fabrik im Kontext von Industrie 4.0, Anwendungsorientierte Beiträge zum industriellen Management, Berlin, 2017, S. 61–72

Beuß, Florian/Jagusch, Konrad/Sender, Jan: Nutzerzentriertes, adaptierbares Arbeitsplatzsystem für die manuelle Montage von großen Bauteilen

Bläsing, Dominic/Bornewasser, Manfred/Hinrichsen, Sven (2021): Informatrische Assistenzsysteme: Steigerung der Produktivität durch Minderung der mentalen Beanspruchung, in: Bauer, Wilhelm u. a. (Hrsg.), Arbeit in der digitalisierten Welt: Praxisbeispiele und Gestaltungslösungen aus dem BMBF-Förderschwerpunkt, Berlin/Heidelberg/Cham, 2021, S. 257–271

Böhmer, Annette Isabel u. a. (2017): Towards Agile Product Development - The Role of Prototyping, in: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 4: Design Methods and Tools, 2017, S. 1–10

Bortolini, Marco u. a. (2017): Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework, in: IFAC-PapersOnLine, 50, 2017, Nr. 1, S. 5700–5705

Bortolini, Marco u. a. (2019): Toward a Real-Time Reconfiguration of Self-Adaptive Smart Assembly Systems, in: Procedia Manufacturing, 39, 2019, S. 90–97

Bortolini, Marco u. a. (2020a): Design, engineering and testing of an innovative adaptive automation assembly system, in: Assembly Automation, 40, 2020, Nr. 3, S. 531–540

Bortolini, Marco u. a. (2020b): Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes, in: Computers & Industrial Engineering, 139, 2020, Nr. 1–4, S. 1–13

Bortolini, Marco u. a. (2021): Adaptive Automation Assembly Systems in the Industry 4.0 Era: A Reference Framework and Full-Scale Prototype, in: Applied Sciences, 11, 2021, Nr. 3

Brandl, Christopher u. a. (2016): Digitalisierungsansätze ergonomischer Analysen und Interventionen am Beispiel der markerlosen Erfassung von Körperhaltungen bei Arbeitstätigkeiten in der Produktion, in: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 70, 2016, Nr. 2, S. 89–98

Brown, L. D. (1971): Admissible Estimators, Recurrent Diffusions, and Insoluble Boundary Value Problems, in: The Annals of Mathematical Statistics, 42, 1971, Nr. 3, S. 855–903

Bühler, Peter u. a. (2019): Produktdesign: Konzeption – Entwurf – Technologie, Bibliothek der Mediengestaltung, Berlin/Heidelberg, 2019, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55511-8>

Bullinger-Hoffmann, Angelika C. (2016): Homo Sapiens Digitalis - virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle, [1. Aufl.], Berlin, Germany, 2016

Büttner, Sebastian u. a. (2017): The Design Space of Augmented and Virtual Reality Applications for Assistive Environments in Manufacturing, in: ACM (Hrsg.), 2017, Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '17: 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, Island of Rhodes Greece, 21.-23.06.2017, S. 433–440

Eisenhauer, Markus/Oppermann, Reinhard/Prinz, Wolfgang (2007): Internet der Dinge — Anwendung von RFID- und Tracking-Technologien zur intelligenten kooperativen Assistenz im Arbeitsprozess, in: Bullinger, Hans-Jörg u. a. (Hrsg.), Internet der Dinge: [Www.internet-der-dinge.de](http://www.internet-der-dinge.de), VDI-Buch, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 49–62

Funk, Markus u. a. (2017): Working with Augmented Reality?, in: ACM (Hrsg.), 2017, Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '17: 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, Island of Rhodes Greece, 21.-23.06.2017, S. 222–229

Funk, Markus/Kritzler, Mareike/Michahelles, Florian (2017): HoloCollab: A Shared Virtual Platform for Physical Assembly Training using Spatially-Aware Head-Mounted Displays, in: , 2017, Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things, IoT '17: 7th International Conference on the Internet of Things, Linz Austria, 22.-25.10.2017, S. 1–7

Gerke, Wolfgang (2014): Technische Assistenzsysteme, 2014

Giancola, Silvio/Valenti, Matteo/Sala, Remo (2018): A Survey on 3D Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies, SpringerBriefs in Computer Science, Cham, 2018, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-91761-0>

Göhlich, Dietmar/Lehr, Heinz/Hummel, Jan (2020): Mechatronische und regelungstechnische Systeme, in: Bender, Beate u. a. (Hrsg.), DUBBEL: Taschenbuch für den Maschinenbau Anwendungen, 26., überarbeitete Auflage, Berlin, 2020, S. 795–804

Gorecky, Dominic/Schmitt, Mathias/Loskyll, Matthias (2014): Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter, in: Bauernhansl, Thomas u. a. (Hrsg.), Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration, SpringerLink, Wiesbaden, 2014, S. 525–542

Gorecky, Dominic/Schmitt, Mathias/Loskyll, Matthias (2017): Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter, in: Vogel-Heuser, Birgit u. a. (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd.4, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 219–236

Haggag, H. u. a. (10.-12.04.2013): Real Time Ergonomic Assessment for Assembly Operations Using Kinect, in: , 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim 2013), Cambridge, 10.-12.04.2013, S. 495–500

Hansard, Miles u. a. (2013): Time-of-flight cameras: Principles, methods and applications, Springer-briefs in computer science, London, 2013

Heinrich, Berthold/Linke, Petra/Glöckler, Michael (2017): Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Lehrbuch, Wiesbaden, 2017, <http://www.springer.com/>

Hesse, Stefan/Schnell, Gerhard (2012): Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung; mit 35 Tabellen, 5., korrigierte und verbesserte Auflage, Praxis, Wiesbaden, 2012

Hoehne-Hückstädt, Ulrike (2005): Verfahren zur Bewertung repetitiver Tätigkeiten, in: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.), 2005, Fachgespräch Ergonomie 2004: Zusammenfassung der Vorträge, gehalten während des Fachgespräches "Ergonomie", Dresden, 15.-16.11.2004, S. 39–87

Isermann, Rolf (2008): Mechatronische Systeme: Grundlagen, 2., vollst. neu bearb. Aufl., Berlin, 2008,

<http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10218006>

Jagusch, Konrad u. a. (2018): Intelligente Montageassistenz, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113, 2018, Nr. 6, S. 369–372

Jeffri, Nor Farzana Syaza/Rambli, Dayang Rohaya Awang (February 14-16, 2020): Guidelines for the Interface Design of AR Systems for Manual Assembly, in: Association for Computing Machinery (Hrsg.), Proceedings of the 2020 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations, New York, February 14-16, 2020, S. 70–77

Jockisch, Maike/Rosendahl, Jens (2009): Klassifikation von Modellen, in: Bandow, Gerhard u. a. (Hrsg.), „Das ist gar kein Modell!“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, Wiesbaden, 2009, S. 23–52

Jürgens, H./Matzdorff, I./Windberg, J. (1998): Internationale anthropometrische Daten als Voraussetzung für die Gestaltung von Arbeitsplätzen und Maschinen: Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse 108, 1998

Kalová, Ilona/Lisztwan, Marek (2006): Industrial applications of triangulation technique, in: IFAC Proceedings Volumes, 39, 2006, Nr. 21, S. 258–263, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017301945>

Keller, Thimo u. a. (2019): Evaluationskonzept zur Nutzenbewertung digitaler Assistenzsysteme am Montagearbeitsplatz, in: Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, 65, 2019

Kirchner, Eckhard (2020): Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung, Berlin, Heidelberg, 2020

Kosch, Thomas u. a. (2018): Identifying Cognitive Assistance with Mobile Electroencephalography, in: Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 2, 2018, Nr. EICS, S. 1–20

Krzywinski, Jens/Lorenz, Sebastian/Klemm, Maria (2017): Hybride Prototypen für agrartechnische Systemkonzepte, in: Ruckelshausen, Arno u. a. (Hrsg.), Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft: Fokus: Digitale Transformation - Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft: Referate der 37. GIL-Jahrestagung 06.-07. März 2017, Dresden, Germany, Lecture notes in informatics, 268, Bonn, 2017, S. 89–92

Kusserow, Heiko u. a. (2008): Ergonomie an Montagearbeitsplätzen, in: BGAG-Report, 3, 2008, S. 158–170

- Lotter, Bruno (2012a): Einführung, in: Lotter, Bruno u. a. (Hrsg.), Montage in der industriellen Produktion, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, 2012, S. 1–8
- Lotter, Bruno (2012b): Manuelle Montage von Großgeräten, in: Lotter, Bruno u. a. (Hrsg.), Montage in der industriellen Produktion, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, 2012, S. 147–165
- Mayrhofer, Walter/Rupprecht, Patrick/Schlund, Sebastian (2019): One-fits-all vs. tailor-made: user-centered workstations for field assembly with an application in aircraft parts manufacturing, in: International Conference on Production Research Manufacturing Innovation, 25, 2019
- Mühlstedt, Jens (2016): Grundlagen virtueller Ergonomie, in: Mühlstedt, Jens (Hrsg.), Homo Sapiens Digitalis - virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle, [1. Aufl.], Berlin, Germany, 2016, S. 7–40
- Nayak, Padmalaya/Praneeth Reddy, Chintakindi/Adla, Devakishan (2020): Applications of Raspberry Pi and Arduino to Monitor Water Quality Using Fuzzy Logic, in: Solanki, Vijender Kumar u. a. (Hrsg.), Intelligent Computing in Engineering: Select Proceedings of RICE 2019, 1st ed. 2020, Advances in Intelligent Systems and Computing, 1125, Singapore, 2020, S. 135–143
- Neudörfer, Alfred (2020): Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie, 8th ed. 2020, VDI-Buch, Berlin/Heidelberg, 2020
- Neugebauer, Wilfried (1980): Modelle und Modelldenken im Unterricht, in: Stachowiak (Hrsg.), Modelle und Modelldenken im Unterricht, Bad Heilbrunn, 1980, S. 50–73
- Richter, Michael (2006): Gestaltung der Montageorganisation, in: Lotter, Bruno u. a. (Hrsg.), Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis, VDI-Buch, Berlin, Heidelberg, 2006, S. 95–126
- Roddeck, Werner (2017): Sensoren und Aktoren, in: Böge, Alfred u. a. (Hrsg.), Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 23., überarbeitete Auflage, Wiesbaden, 2017, S. 675–700
- Rupprecht, Patrick/Küffner-McCauley, Hans/Schlund, Sebastian (2020): Information provision utilizing a dynamic projection system in industrial site assembly, in: Procedia CIRP, 93, 2020, S. 1182–1187
- Rupprecht, Patrick/Schlund, Sebastian (2021): Taxonomy for Individualized and Adaptive Human-Centred Workplace Design in Industrial Site Assembly, in: Russo, Dario u. a. (Hrsg.), 2021, Intelligent Human Systems Integration 2021, Proceedings



of the 4th International Conference on Intelligent Human System Integration (IHSI 2021), Palermo, Italy, February 22-24, 2021, S. 119–126

Rusch, Tobias u. a. (2021): SynDiQuAss - Synchronisierung von Digitalisierung, Qualitätssicherung und Assistenzsystem, in: Bauer, Wilhelm u. a. (Hrsg.), Arbeit in der digitalisierten Welt: Praxisbeispiele und Gestaltungslösungen aus dem BMBF-Förderschwerpunkt, Berlin/Heidelberg/Cham, 2021, S. 289–303

Schleicher, Tim (2019): Kollaborierende Roboter anweisen: Gestaltungsempfehlungen für ergonomische Mensch-Roboter-Schnittstellen, Gestaltung hybrider Mensch-Maschine-Systeme = Designing hybrid societies, 2019

Schlick, Christopher/Bruder, Ralph/Luczak, Holger (2018): Arbeitswissenschaft, Berlin, Heidelberg, 2018

Schlund, Sebastian/Mayrhofer, Walter/Rupprecht, Patrick (2018): Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen, in: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 72, 2018, Nr. 4, S. 276–286

Schnirch, Andreas/Ridinger, Nadine/Weschenfelder, Felix (2020): Raspberry Pi im Informatik- und Technikunterricht: Konzeption eines handlungs- und problemorientierten Unterrichts mit der MicroBerry-Lernumgebung, 1st ed. 2020, Wiesbaden, 2020, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28793-1>

Schreer, Oliver (2005): Stereoanalyse und Bildsynthese: Mit 6 Tabellen, Berlin, Heidelberg, 2005, <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27473-1>

Seitz, Matthias (2021): Speicherprogrammierbare Steuerungen in der Industrie 4.0: Objektorientierter System- und Programmentwurf, Motion Control, Sicherheit, Industrial IoT, 5., aktualisierte und erweiterte Auflage, München, 2021, <https://doi.org/10.3139/9783446470026>

Seitz, Peter/Oggier, Thierry/Blanc, Nicolas (2004): Optische 3D-Halbleiter-Kameras nach dem Flugzeitprinzip (All-Solid-State Optical Time-of-Flight 3D Range Imaging), in: tm - Technisches Messen, 71, 2004, Nr. 10-2004, S. 538–544

Setter, R./Pache, M. (1998): Körperliche Modelle in der Produktentwicklung, in: Reinhart, G. u. a. (Hrsg.), Rapid Prototyping-Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung, München, 1998

Taigman, Yaniv u. a. (23.-28.06.2014): DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification, in: , 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Columbus, OH, USA, 23.-28.06.2014, S. 1701–1708

Töllner, Alke u. a. (2009): Modelle und Modellierung: Terminologie, Funktion und Nutzen, in: Bandow, Gerhard u. a. (Hrsg.), „Das ist gar kein Modell!“: Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, Wiesbaden, 2009, S. 3–21

Wächter, Michael (2019): Gestaltung tangibler Mensch-Maschine-Schnittstellen, Wiesbaden, 2019

Wächter, Michael/Bullinger, Angelika C. (2015): Gestaltung gebrauchstauglicher Assistenzsysteme für Industrie 4.0, in: Weisbecker, Anette u. a. (Hrsg.), Mensch und Computer 2015 – Workshopband, 2015, S. 165–170

Wöhler, Christian (2013): 3D computer vision: Efficient methods and applications, 2. ed., X.media.publishing, London, 2013

Wu, Jiachen u. a. (2019): Unsupervised texture reconstruction method using bidirectional similarity function for 3-D measurements, in: Optics Communications, 439, 2019, S. 85–93

Yamada, Hiroyuki u. a. (2020): Gait-based person identification using 3D LiDAR and long short-term memory deep networks, in: Advanced Robotics, 34, 2020, Nr. 18, S. 1201–1211

MSW Motion Control (Hrsg.): Elektrozyylinder DSZY1Q-HS2 (mit 2-Kanal-Hallsensor), <https://www.msw-motion.de/produkt/dszy1q-hs2/>, 20.06.2021

Correns, Martin (2011): Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern, dargestellt am Beispiel von Sensoren mit Bayer Pattern Color Filter Array, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2011, [https://www.db-thueringen.de/servlets/mcrfilenodeservlet/dbt\\_derivate\\_00023501/ilm1-2011000030.pdf](https://www.db-thueringen.de/servlets/mcrfilenodeservlet/dbt_derivate_00023501/ilm1-2011000030.pdf)

Hammerstingl, Veit Georg Josef (2020): Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte, Dissertation, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, München, 2020

Kostolani, David (2021): Markerloses 3D-Tracking von Menschen und Bauteil zur Ansteuerung eines Spatial Augmented Reality Assistenzsystems, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften, Wien, 2021

Nazari Shirehjini, Ali Asghar (2009): Interaktion in ambient intelligence, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2009

Rönick, Katharina (2020): Analyse des Einflusses unterschiedlicher Individualisierungsgrade eines Montagearbeitsplatzes, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2020

Salvinetti, Christian (2016): Entwicklung einer Methode zur Modellierung von Industrie 4.0 Anwendungen, sowie zur Identifikation von Potentialen bei der Datennutzung in der Montage, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2016

VDI-Richtlinie 2249: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung CAD-Benutzerfunktionen

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufbau und Struktur der Arbeit .....	5
Abbildung 2 Auswahlkriterien für Montagesysteme .....	7
Abbildung 3 Schematische Darstellung eines Baustellenmontagearbeitsplatzes .....	7
Abbildung 4 Statistische Verteilung der Körpermaße in mm .....	10
Abbildung 5 Körpermaße aus der BAuA-Veröffentlichung zum "Europamensch" .....	11
Abbildung 6 Körpermaße aus der BAuA-Veröffentlichung zum "Europamensch" .....	11
Abbildung 7 Arbeitshöhen für überwiegend manuelle Tätigkeiten .....	14
Abbildung 8 RULA: Obere Gliedmaßen Teil 1 .....	16
Abbildung 9 RULA: Obere Gliedmaßen Teil 2 .....	16
Abbildung 10 Hauptaspekte der Montagestation 4.0 .....	18
Abbildung 11 Schematisches Konzept: Selbstkonfigurierende Montagestation .....	20
Abbildung 12 Modell der Interaktion des Menschen mit einem Assistenzsystem .....	21
Abbildung 13 Definition Steuern .....	22
Abbildung 14 Aufbau eines Steuerkreises .....	23
Abbildung 15 Hardwareaufbau einer SPS .....	24
Abbildung 16 Prinzipieller Aufbau eines Aktors .....	26
Abbildung 17 Geräte zum Bedienen und Beobachten .....	28
Abbildung 18 Filteranordnung nach Bayer .....	31
Abbildung 19 Pinhole-Modell .....	32
Abbildung 20 Lasertriangulation .....	34
Abbildung 21 Stereosysteme: Achsparallel (links), konvergente Anordnung (rechts)	35
Abbildung 22 Time-of-Flight Prinzip .....	36
Abbildung 23 Allgemeine Merkmale von Modellen .....	37
Abbildung 24 Beziehungsdreieck eines Modells .....	38
Abbildung 25 Modelle in der Produktentwicklung .....	38
Abbildung 26 Methodischer Rahmen für eine selbstkonfigurierende Montagestation .....	41
Abbildung 27 Schematischer Rahmen für die Selbstkonfiguration .....	43
Abbildung 28 Anwendung der Individualisierungsdimensionen anhand eines Baustellenmontagearbeitsplatzes .....	45
Abbildung 29 Fan-Cowl - Turbinengehäuse .....	47
Abbildung 30 Höhen der Montagestation .....	48
Abbildung 31 Schematische Darstellung der geometrischen Beziehungen .....	50
Abbildung 32 Abhängigkeit Bodenabstand von Winkel und Höhe .....	53
Abbildung 33 Variante 1: Zylinder .....	54
Abbildung 34 Variante 1: Fan-Cowl mit Halterung .....	55
Abbildung 35 Elektrozyylinder mit Hallsensor .....	56
Abbildung 36 Variante 1: Führung .....	57

Abbildung 37 Variante 1: Höhen- und Winkelberechnung .....	58
Abbildung 38 Variante 1: Spannung Welle .....	60
Abbildung 39 Variante 2: Spindelmotor .....	62
Abbildung 40 Variante 2: Fan-Cowl .....	63
Abbildung 41 Variante 2: Führungswagen lagerseitig .....	64
Abbildung 42 Variante 2: Führungswagen motorseitig .....	64
Abbildung 43 Variante 2: Fuß .....	64
Abbildung 44 Variante 2: Endschalter mit Befestigung .....	65
Abbildung 45 Variante 2: Lichtschranke mit Referenzscheibe .....	65
Abbildung 46 Schematischer Anschlussplan .....	71
Abbildung 47 Aufbau und Anschlüsse des Raspberry Pi 3 Modell B .....	73
Abbildung 48 GUI: Hauptmenü .....	75
Abbildung 49 GUI: Wartung .....	76
Abbildung 50 GUI: Operation .....	76
Abbildung 51 GUI: Benutzereinstellungen .....	77
Abbildung 52 GUI: QR-Code .....	77
Abbildung 53 Modell der Montagestation .....	78
Abbildung 54 Modelltest: Arbeitsschritt 1 .....	81
Abbildung 55 Modelltest: Arbeitsschritt 2 .....	81
Abbildung 56 Modelltest: GUI - Individuelle Einstellungen .....	82
Abbildung 57 Modelltest: Arbeitsschritt 2 - Individuelle Einstellung .....	82

## 10 Formelverzeichnis

(1) Bildpunkt $I_x$ .....	33
(2) Transformationsmatrix.....	33
(3) Verzerrungstransformation.....	33
(4) Sensor-Bildkoordinaten Transformation.....	34
(5) Arbeitshöhe: kräftig mit Körpereinsatz .....	51
(6) Arbeitshöhe: geschickt-visuell .....	51
(10) Arbeitswinkel .....	52
(8) Arbeitswinkel .....	52
(9) Bedingung für die Gültigkeit der Winkelberechnung .....	52
(10) Zusammenhang Bodenabstand, Arbeitshöhe und -winkel .....	53
(11) Vorläufige Zylinderlänge.....	55
(12) Gesamte Höhe Seite 2.....	58
(13) Vertikale Länge Zylinder 2.....	58
(14) Höhenunterschied der Zylinder .....	58
(15) Vertikale Länge Zylinder 1.....	58
(16) Horizontale Verschiebung Zylinder 1 .....	59
(17) Horizontale Verschiebung Zylinder 2 .....	59
(18) Horizontale Länge Zylinder 1 .....	59
(19) Horizontale Länge Zylinder 2 .....	59
(20) Länge Zylinder 1 .....	59
(21) Länge Zylinder 2 .....	59

# 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Forschungsfrage mit Unterfragen .....	3
Tabelle 2 Körpermesswerte des Europamenschen .....	12
Tabelle 3 Individualisierungsdimensionen und -parameter.....	12
Tabelle 4 RULA - Kraft/Last.....	15
Tabelle 5 RULA - Bewertung .....	17
Tabelle 6 Arten der Unterstützung durch Assistenzsysteme .....	22
Tabelle 7 SPS-Programmiersprachen .....	25
Tabelle 8 Klassische Aktoren und Energiewandlungsprinzip .....	26
Tabelle 9 Übersicht der sensorischen Modalitäten .....	27
Tabelle 10 Wahrnehmungsvermögen von Menschen und Maschine .....	28
Tabelle 11 Arbeitshöhen nach Manipulationsart und Perzentil.....	49
Tabelle 12 Maximale und minimale Höhen der Montagestation .....	49
Tabelle 13 Maßstab, Abmessungen und Verstellbereich des Modells .....	50
Tabelle 14 Körpermaße für die Arbeitswinkelberechnung in mm .....	52
Tabelle 15 Verhältnis der benötigten Körpermaße zur Körpergröße .....	52
Tabelle 16 Abmaße Elektrozyylinder.....	56
Tabelle 17 Parameter für die Hubberechnung.....	57
Tabelle 18 Variante 1: Kosten und Lieferanten der Komponenten .....	60
Tabelle 19 Variante 2: Komponenten .....	66
Tabelle 20 Bewertung und Auswahl der Varianten.....	68
Tabelle 21 Vor- und Nachteile der Erprobung der Höhen- und Winkeladaption mittels Modells .....	84

## 12 Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
AP1	Arbeitspunkt 1
AP2	Arbeitspunkt 2
AR	Augmented Reality
AS	Ablaufsprache
AWL	Anweisungsliste
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund
BKT	Brustkorbtiefe
$C(x,y,z)$	Kamerakoordinatensystem
${}^c_w T$	Transformation Weltkoordinaten zu Kamerakoordinaten
CAD	Computer-aided design
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metaloxid Semiconductor
CPU	Central processing unit
$c_x$	Punkt x im Kamerakoordinatensystem
DIN	Deutsches Institut für Norming
EG	Ellenbogen-Griffachse
EH	Ellenbogenhöhe
FBS	Funktionsbausteinsprache
FEM	Finite-Elemente-Methode
FP	Perzentil Frauen
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GPIO	General Purpose Input/Output
GUI	Grafical User Interface
H	Körpergröße
H_A	Arbeitshöhe
HMI	Human Machine Interface
$I((u,)\hat{v})$	Bildkoordinatensystem
IoT	Internet of Things
IR	Infrarot
$i_x$	Punkt x im Bildkoordinatensystem
KOP	Kontaktplan
LAN	Local Area Network
MOCAP	Motion Capture
MP	Perzentil Mann
NIR	Nahinfrarot
OA	Oberarm
PC	Personal Computer



PG	Programmiergerät
PWM	Pulsweitenmodulation
QR	Quick Response
RFID	Radio-frequency identification
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
S (u,v)	Sensorkoordinaten
SH	Schulterhöhe
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ST	Strukturierter Text
TU	Technische Universität
UWB	Ultra-Wideband
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
W (x,y,z)	Weltkoordinatensystem
WLAN	Wireless Local Area Network
$^w x$	Punkt x im Weltkoordinatensystem