



Bojan Maljuric, B.Sc.

Konzeptentwicklung zum Einsatz von hybriden Arbeitssystemen in der Hochvoltpeicher-Herstellung

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Individuelles Masterstudium

Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

Schwerpunkt: Produktionstechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas

Institut für Fertigungstechnik

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Zu Beginn möchte ich allen danken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben, sowie allen, die mich auf andere Weise unterstützt haben. Diese Arbeit hat mir eine schöne und lehrreiche Erfahrung geboten, die mir auch helfen wird, zukünftige Herausforderungen leichter zu meistern.

Besonders danken möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas für sein Vertrauen sowie die motivierenden Gespräche während der Realisierung dieser Arbeit.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Weinzerl von der AVL List GmbH bedanken. Ohne seine Hilfe durch Informationen und Erklärungen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

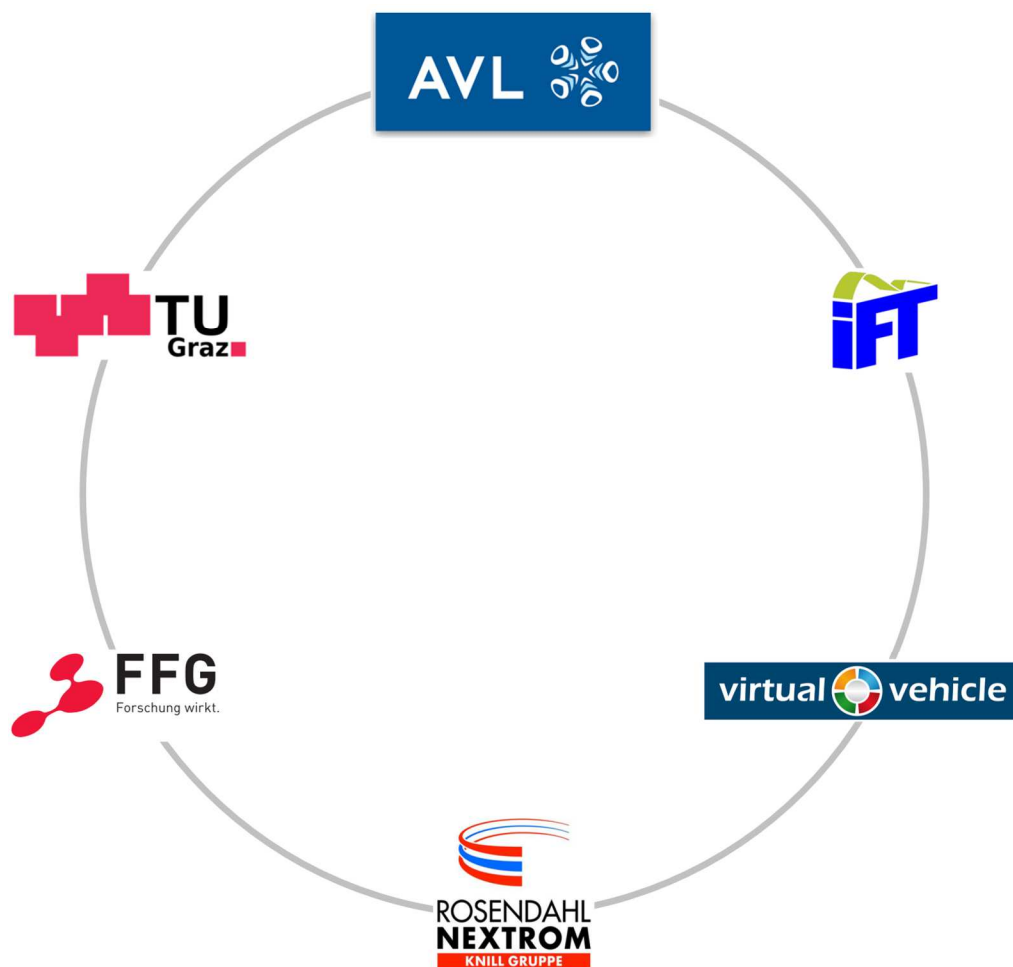
Außerdem möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Mathias Prectl und Herrn Dipl.-Ing. Gernot Schlögl für ihre enorme Hilfe, ihre Ratschläge sowie ihr Verständnis danken, die es mir ermöglicht haben, diese Arbeit erfolgreich abzuschließen. Ich möchte mich auch bei allen Angestellten des IFTs für die herzlichen und hilfreichen Gespräche und die angenehme Atmosphäre bedanken.

Auch möchte mich bei meiner Familie, meinen Freunden und allen bedanken, die an mich geglaubt und mich in all den Jahren meines Studiums unterstützt haben. Danke!

Projektteam

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Projektes „Battery Innovation Center“ entstanden. Diese wird infolge des Programmes „Mobilität der Zukunft“ von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft gefördert und steht unter der Leitung der AVL List GmbH.

Das Projektteam wird ergänzt durch das Institut für Fertigungstechnik (IFT) der Technischen Universität Graz, die Virtual Vehicle Research GmbH, AVL List GmbH und Rosendahl Nextrom GmbH.



Kurzfassung

Wir leben in einer Zeit, in der sich Technologie, Wissenschaft sowie Wissen exponentiell weiterentwickeln und die Welt um uns herum drastisch ändern. Um mögliche negative Auswirkungen dieses schnellen Wandels zu vermeiden und jene zu beheben, die in unserer Geschichte entstanden sind, müssen viele Schritte stattfinden, um eine gute und nachhaltige Zukunft aufzubauen.

Einer dieser entscheidenden Schritte betrifft die Senkung der Treibhausgasemissionen, um die globale Erwärmung zu stoppen. Das Ziel der EU ist es, die vollständige Klimaneutralität bis 2035 im Straßenverkehr zu verwirklichen. Personenkraftwagen sind verantwortlich für 60,6 % aller CO₂-Emissionen im Straßenverkehrssystem der EU. Um dieses Ziel zu erreichen, ist der Umstieg auf Elektrofahrzeuge notwendig, da diese schon heute mit dem durchschnittlichen Energiemix in Europa sauberer als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind.¹

Als Reaktion auf diese Entwicklungen hat die AVL List GmbH das Projekt „Battery Innovation Center“ (BIC) initiiert. Ziel dieses Projektes ist es, neue Methoden und Wege zur Herstellung des modernen Energiespeichers eines Elektroautos zu entwickeln. Die Produktion soll in einer neuen Forschungsfabrik erfolgen, um den gesamten Produktionsprozess abzubilden. Angefangen bei der Lieferung der Batteriezellen über die Montage von Batteriemodulen bis hin zum fertigen Batteriepack wird der gesamte Produktionsprozess mit sämtlichen Schritten und relevanten Informationen beschrieben.

Um auf Veränderungen rasch zu reagieren, ist eine neue und flexiblere Produktionsweise erforderlich. Dies wird mit kollaborationsfähigen Robotern erreicht, die nicht nur an neue Anforderungen anpassbar sind, sondern zudem die nötigen Sicherheitsfunktionen besitzen, um zusammen mit dem Menschen arbeiten zu können.

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Methodik, welche die Auswahl von geeigneten Stellen zur Implementierung von kollaborationsfähigen Robotern leichter machen soll. Die Zusammenarbeit von Robotern und Menschen muss so geplant werden, dass ihre Vorteile aus Sicht der Ergonomie, Wirtschaftlichkeit und Zeitersparnis optimal kombiniert werden können. Mit dem Ziel, die geeigneten Prozessschritte für den Einsatz kollaborationsfähiger Roboter zu finden, soll die entwickelte Methode anschließend auf die Produktion von Elektroautobatterien angewendet werden. Somit wird eine Grobplanung von hybriden Arbeitssystemen ermöglicht, wobei Mensch und Roboter sinnvoll zusammenarbeiten können.

¹ Vgl. Europäisches Parlament, Onlinequelle [10.09.2022]

Abstract

We live in an era where technology, science and knowledge exponentially move forward, drastically changing the world around us. In order to avoid possible negative effects of this rapid change and to remedy those that have arisen in our history, many steps must be taken to build a prosperous and sustainable future.

One of those crucial steps is reducing greenhouse gas emissions to stop global warming. The EU's goal is to achieve complete climate neutrality in road traffic by 2035. Passenger cars are responsible for 60.6% of all CO₂ emissions in the EU road transport system. In order to achieve the goal, one should therefore switch to electric vehicles, which are already cleaner than internal combustion engine vehicles with the average energy mix in Europe.²

In response to these developments, AVL List GmbH launched the “Battery Innovation Center” (BIC) project. The aim of this project is to develop new methods and ways of manufacturing the modern energy storage system of an electric car. The production, which is described in this master's thesis, should take place in a new research factory in order to map the entire production process. Starting with the delivery of the battery cells through the assembly of battery modules to the finished battery pack, the entire production process is described with all steps and relevant information.

In order to react to those rapid changes, a new and more flexible way of production is required. This is achieved with collaboration-capable robots, which are not only adaptable to new requirements, but also have the necessary safety functions to be able to work together with humans.

This master thesis deals with the development of a methodology that should make the selection of suitable places and the implementation of collaborative robots easier. The cooperation between robots and humans should be planned in such a way that their advantages can be optimally combined from the point of ergonomics, economy and time saving. With the aim of finding suitable places for the use of collaborative robots, the developed method should then be applied to the production of electric car batteries. Thus, a rough planning of hybrid work systems is made possible where people and robots can work together.

² Vgl. Europäisches Parlament, Onlinequelle [10.09.2022]

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Motivation.....	2
1.3 Zielsetzung der Arbeit	2
2 MRI-Arbeitssysteme.....	3
2.1 Hybride Arbeitssysteme.....	3
2.2 Mensch-Roboter-Interaktion.....	6
2.2.1 Arten der Mensch-Roboter-Interaktion	6
2.3 Grundlagen der Industrierobotik	10
2.3.1 Historische Hintergründe.....	10
2.3.2 Begriffe & Definitionen.....	12
2.3.3 Robotersystem.....	18
2.3.4 Kollaborationsfähige Roboter	24
2.4 Mensch-Roboter-Kollaboration	31
2.4.1 Realisierung der MRK-Arbeitssysteme	33
2.5 Sicherheit bei MRK-Systemen	36
2.5.1 Risikobeurteilung.....	37
2.5.2 Maßnahmen zur Risikominderung	41
2.5.3 Normen.....	43
3 Konzeptentwicklung zum Einsatz von MRI-Arbeitssystemen	46
3.1 Darstellung des Konzepts	46
3.1.1 Anforderungen an das Konzept	48
3.1.2 Ablaufübersicht	49
3.2 MRK-Implementierungsziele.....	52
3.2.1 Einführungsgründe für MRK-Systeme.....	52
3.2.2 Einführungshindernisse für MRK-Systeme	55
3.2.3 Erhöhung der Wirtschaftlichkeit	56
3.2.4 Verbesserung der Ergonomie	60
3.2.5 Verkürzung der Montagezeit	61
3.2.6 Verbesserung der Qualität.....	61

3.3	Aufgabenbeschreibung.....	62
3.4	Identifikation des Potenzials für die Implementierung von MRI-Systemen ...	62
3.4.1	Kriterien zur Auswahl von MRI-geeigneten Arbeitssystemen.....	64
3.5	Auswahl der Mensch-Roboter-Interaktionsart	66
3.6	Auswahl von Arbeitssystemen für die Grobplanung.....	66
3.7	Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme	67
3.7.1	Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben.....	68
3.7.2	Implementierung der Sicherheit bei MRK-Arbeitssystemen	76
3.7.3	Ablaufplanung.....	77
3.8	Auswahl des Robotersystems für das MRI-Arbeitssystem	82
4	Hochvoltspeicherproduktion	84
4.1	Batteriezelle.....	84
4.1.1	Primär- und Sekundärzelle	84
4.1.2	Aufbau der Lithium-Ionen-Batteriezelle	85
4.1.3	Kenngößen der Lithium-Ionen-Batteriezelle	86
4.1.4	Aufbau und Arten von Batteriezellen.....	89
4.1.5	Gegenwärtige Sachlagen und zukünftige Entwicklung.....	93
4.2	Batteriemodulproduktion.....	94
4.2.1	Blockaufbau und modularer Aufbau von Batteriesystemen.....	94
4.2.2	Serien- und Parallelschaltungen.....	94
4.2.3	Funktionsweise und Aufbau eines Batteriemoduls.....	96
4.2.4	Batteriemodulproduktion	97
4.3	Batterie-Pack.....	103
4.3.1	Funktionsweise und Aufbau eines Batterie-Packs	103
4.3.2	Batterie-Pack-Produktion.....	107
5	MRI-Arbeitssysteme in der Produktion von Hochvoltspeichern	111
5.1	Auswahl der Arbeitsplätze für MRI-Implementierung.....	111
5.1.1	Einleitende Überlegungen und Einschränkungen.....	111
5.1.2	Feststellen der Ziele und MRI-Systemanforderungen	112
5.1.3	Aufgabenbeschreibung.....	112
5.1.4	Identifikation des Potenzials für die MRI-Implementierung.....	115
5.1.5	Auswahl von potenziellen Arbeitsplätzen für die MRI-Implementierung	115
5.2	Auswahl von MRI	118
5.3	Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme	118
5.3.1	Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben.....	119
5.3.2	Implementierung der Sicherheit.....	124

5.3.3	Ablaufplanung.....	124
5.3.4	Bewertung & Auswahl des Industrieroboters für das MRK-System .	126
5.3.5	Feinplanung und Umsetzung.....	127
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	128
6.1	Zusammenfassung.....	128
6.2	Ausblick.....	130
	Literaturverzeichnis.....	131
	Abbildungsverzeichnis.....	137
	Tabellenverzeichnis.....	141
	Anhang.....	144
Anhang A.....		144
Anhang B.....		145
Anhang C.....		146
Anhang D.....		155
Anhang E.....		158

Abkürzungsverzeichnis

AS	Arbeitssystem
BCU	Battery Control Unit
BEV	Battery Electric Vehicle
BIC	Battery Innovation Center
BJB	Battery Junction Box
BMS	Battery Management System
BMU	Battery Monitoring Unit
BoL	Begin of Life
CSC	Cell Supervision Circuit
DIN	Deutsche Institut für Normung
DMC	Data Matrix Code
EEU	Electrical Emergency Unit
EN	Europäische Norm
EoL	End of Life
HdH	Handhabung
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HV	Hochvolt
HVS	Hochvoltspeicher
IAO	Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
ID	Identifikation
IEA	International Ergonomics Association
IFT	Institut für Fertigungstechnik
IR	Industrieroboter
ISO	International Organisation for Standardisation
KMU	Kleine- und Mittelunternehmen
LBR	Leichtbauroboter
LCC	Life Cycle Costing
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MTM	Methods Time Measurement

NV	Niedervolt
PDU	Power Distribution Unit
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
QS	Qualitätssicherung
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung
SvZ	System vorbestimmter Zeiten
TMU	Time Measurement Unit
TS	Technical Specifications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

Am Anfang dieser Arbeit erfolgt eine Einführung in die Robotik und ihren Platz in der Industrie. Hier werden verschiedene Robotertypen mit ihren Eigenschaften und Einsatzgebieten vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf den Einsatz in der Montage von Traktionsbatterien liegt. Besonderes Augenmerk wird auf den Knickarmroboter gelegt, auf denen moderne kollaborationsfähige Roboter basieren.

1.1 Ausgangssituation

Der Klimawandel, dessen negativen Auswirkungen auf die Umwelt sowie begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen erfordern bestimmte Maßnahmen, insbesondere im Energiesektor, um eine sichere und nachhaltige Zukunft zu ermöglichen. Einer der Schlüsselfaktoren zur Erreichung dieser Ziele ist die Verringerung des Ausstoßes schädlicher Gase im Straßenverkehr, der ansonsten 72 % der verkehrsbedingten Emissionen ausmacht, wobei 60,7 % auf Autos entfallen.³

Obwohl die Herstellung und Entsorgung von Elektroautos im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor höhere CO₂-Emissionen verursacht (im Durchschnitt zusätzlich 15–20 g/km), erweist sich die Emission über die gesamte Lebensdauer hinweg als geringer und hängt von der Art der Stromerzeugung ab. Mit der aktuellen Kombination aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energiequellen beträgt sie etwa 170 g/km, was in Vergleich mit herkömmlichen Antriebsarten von 215 g/km deutlich weniger ist.⁴

Einer der Gründe für diesen Emissionsunterschied ist die hohe Effizienz von Elektroautos. Bei herkömmlichen Antriebsarten gehen etwa 80 % der Energie durch verschiedene Ineffizienzen verloren. Bei Elektroautos beträgt der Energieverlust im Optimalfall lediglich 11 %. Solche geringen Verluste werden unter anderem durch Rekuperation als Energierückgewinnung beim Bremsen erzielt.⁵

Daraus lässt sich eindeutig schließen, dass ein Elektroauto auch bei der aktuellen Energiestruktur, eine bessere Wahl ist. Durch die Weiterentwicklung und Verbesserung der Technologie von Elektroautos sowie den Übergang zu vollständig erneuerbaren Quellen der elektrischen Energieerzeugung erscheint die Erreichung der gesetzten Ziele zur Reduzierung der Emissionen zunehmend optimistischer und realisierbar.

³ Vgl. Europäisches Parlament, Onlinequelle [10.09.2022]

⁴ Vgl. Europäisches Parlament, Onlinequelle [10.09.2022]

⁵ Vgl. Kirk, Onlinequelle [12.09.2022]

1.2 Motivation

Einige Gründe, die für die Inakzeptanz von Elektrofahrzeugen verantwortlich sind – beispielsweise geringere Reichweite, längere Ladezeiten sowie der höhere Preis im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen –, werden direkt von der Batterietechnologie beeinflusst. Daher wird erwartet, dass sich die Batterietechnologie in den kommenden Jahren als wichtigster Verbesserungspunkt in einem Elektrofahrzeug stark verändern wird.

Als Antwort auf die notwendigen Veränderungen in der Autobatteriefertigung und damit auf die allgemeinen Veränderungen in der Mobilität hat die AVL List GmbH das Projekt Battery Innovation Center (BIC) initiiert, in dessen Rahmen neben Design und Entwicklung moderner Energiespeicher eine hochmoderne Forschungsfabrik entwickelt und gebaut wird. Das Institut für Fertigungstechnik (IFT), die Virtual Vehicle Research GmbH und Rosendahl Nextrom GmbH fungieren dabei als Projektpartner. Das IFT soll als Experte eine Untersuchung des Produktionsprozesses mit Anwendung von Automatisierung sowie additiver Fertigung durchführen, um die beste Strategie für eine optimale Batterieproduktion zu erstellen.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die Autobatterieproduktion, die sich grob in zwei Schritte teilen lässt, beginnt mit den Batteriezellen, die sich in Fertigungstechnologie, Form und Abmessungen voneinander unterscheiden. Die Batteriezellen werden zunächst zu einem Batteriemodul verbunden. Danach werden die Batteriemodule zu einem Batteriepack assembliert. Durch diese zwei Schritte, die die Forschungsfabrik in zwei Bereiche teilen – den Niedervoltbereich (Batterie-Modul-Fertigung) und den Hochvoltbereich (Batterie-Pack-Fertigung) –, soll der Produktionsprozess analysiert, verbessert sowie durch neue Innovationen weiterentwickelt werden.

Die hohe Vielfalt an Batteriezellen und ständige Veränderungen in der Batterieproduktion erfordern schnelle und flexible Lösungen des Produktionsprozesses. Kollaborative Roboter als flexible, sichere und einfacher zu bedienende Alternative zu den klassischen Robotern sollen eine Antwort auf die Anforderung der Batterieproduktion sein.

Das Ziel dieser Masterarbeit umfasst die Entwicklung eines Konzepts zur Implementierung von kollaborativen Robotern im Produktionsprozess sowie die Anwendung dieses Konzepts auf die Produktion von Hochvoltspeichern. Mit dem Ziel der Erforschung und Verbesserung des Hochvoltspeicher-Produktionsprozesses sollen die Einsatzmöglichkeiten kollaborativer Roboter überprüft werden.

2 MRI-Arbeitssysteme

Der Mensch hat stets nach einem Weg gesucht, das Leben durch Fortschritt leichter und akzeptabler zu machen. Dieser Wunsch nach ständigem Fortschritt zieht sich durch sämtliche Bereiche des menschlichen Lebens, insbesondere in Bezug auf Technik und Produktion. Durch der industrielle Revolutionen – von Dampfmaschinen, über den Einsatz von elektrischer Energie bis zur Einführung von Robotern und Rechnern – hat diese Produktion erstaunliche Ausmaße erreicht. Von allen Produktionsweisen gab es bis vor Kurzem nur eine in der Science-Fiction: nämlich, dass Mensch und Roboter Seite an Seite arbeiten und sich denselben Arbeitsbereich teilen. Doch technologische Fortschritt hat diese Fiktion Wirklichkeit werden lassen, und diese Produktionsweise hat in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewonnen. In den folgenden Kapiteln werden alle Aspekte dieser neuen Produktionsmethode dargelegt sowie alle Vor-, Nachteile und Herausforderungen erläutert, die diese Technologie mit sich bringt. Auf diese Weise kann sich ein Bild von den Möglichkeiten dieser Technologie gemacht werden, ebenso von den Stellen im Produktionsprozess, an denen sie eingesetzt werden kann.

2.1 Hybride Arbeitssysteme

Die einfachste Form der Produktion ist die manuelle Produktion. Mit einem optimal aufgebauten manuellen Arbeitsplatz, mit guter Organisation sowie Qualitätswerkzeugen lässt sich ein höheres Qualitätsniveau der Produktion erreichen, das dem Menschen die Arbeit erleichtern kann. Um die Produktivität weiter zu steigern und die Ergonomie zu verbessern, ist es notwendig, einige Teile des Arbeitsplatzes zu automatisieren, was zu einem Arbeitssystem führt, das aus manuellen und automatisierten Arbeitssystemen besteht. Solch ein Arbeitssystem bezeichnet man als hybrid.

Arbeitssysteme

Nach DIN EN ISO 6385:2004 ist ein Arbeitssystem definiert als „*System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen*“⁶. Er bezeichnet also ein System, das durch die Wechselwirkung zwischen Mensch und Arbeitsmittel zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe führt.

⁶ Deutsches Institut für Normung 2016, S. 7

Das Arbeitssystem ist nach REFA durch folgende sieben Systemelemente beschrieben (Abbildung 2.1):⁷

1. **Arbeitsaufgabe:** Diese kennzeichnet den Zweck des Arbeitssystems bzw. die Aufgabe, die zu erfüllen ist, beispielsweise „Stacking der Batteriezellen“ oder „Schließen des Gehäuses“.
2. **Arbeitsablauf:** Dieser ist gekennzeichnet durch die räumliche und zeitliche Abfolge der Interaktion von Menschen und Arbeitsmittel mit der Eingabe, diese entsprechend der Arbeitsaufgabe zu verändern oder zu nutzen.
3. **Eingabe:** Die Eingabe besteht im Allgemeinen aus Elementen (Arbeitsgegenständen, Personen, Informationen, Energie), die für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe verändert oder verwendet werden sollen.
4. **Ausgabe:** Die Ausgabe besteht im Allgemeinen aus Elementen (Arbeitsgegenständen, Personen, Informationen, Energie), die als Ergebnisse der Arbeitsaufgabe verändert oder benutzt werden.
5. **Mensch:** Der Mensch verändert, im Zusammenwirken mit den Betriebsmitteln, die Aufgabe in die Ausgabe.
6. **Betriebs- und Arbeitsmittel:** Als Betriebs- und Arbeitsmittel gelten Geräte sowie Maschinen, die an der Erfüllung der Arbeitsaufgabe beteiligt sind.
7. **Umgebungseinflüsse:** Die Umgebungseinflüsse umfassen alle auf das Arbeitssystem wirkende Einflüsse (physikalische, organisatorische, soziale).

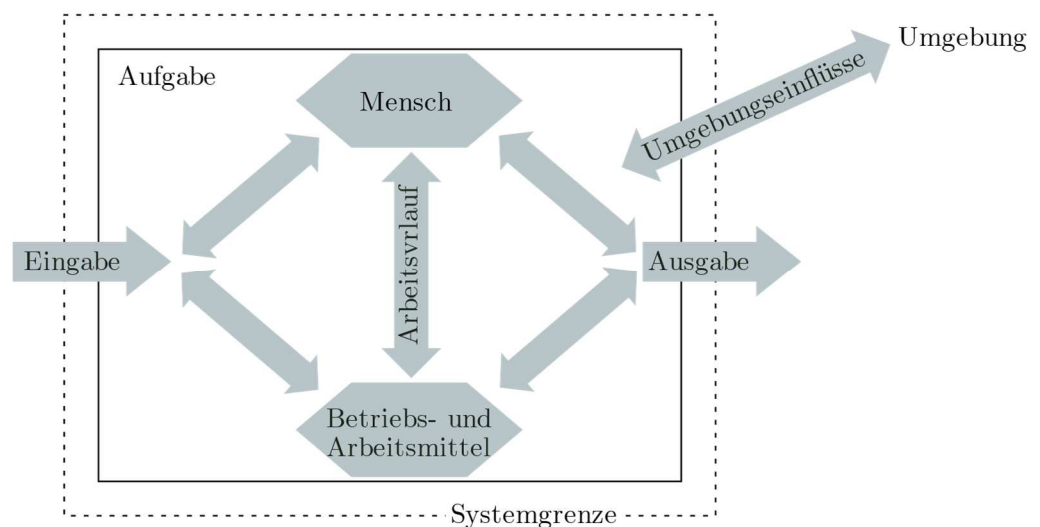


Abbildung 2.1: Arbeitssystem nach REFA, Quelle: REFA Fachverband e.V. 2021, S. 1 (leicht modifiziert)

⁷ Vgl. REFA: Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung 2002, zitiert nach Böge 2011, S. 28 ff.

Hybride Arbeitssysteme

Unter „hybrid“ wird im Allgemeinen etwas verstanden, das aus zwei oder mehreren Komponenten besteht, was im Sinne dieser Arbeit zu einer Kombination zweier verschiedener Arbeitssysteme führt: den manuellen und automatisierten. Da der Fokus der Arbeit auf der Montage liegt, werden weiter unter Arbeitssysteme die hybriden Montagesysteme verstanden.

Hybride Montagesysteme

Gemäß DIN 8593 und VDI 2860 wird unter Montage das Handhaben und Fügen von verschiedenen Bauteilen verstanden. Im Maschinenbau entfallen auf die Montage 20 % bis 45 % der Gesamtfertigungszeit. Im Fahrzeugbau liegt, je nach Fertigungstiefe, der Zeitanteil zwischen 30 % und 50 %.⁸ Aus diesen Zahlen lässt sich schließen, dass die Montage ein wichtiges Element im Produktionsprozess darstellt, durch deren Verbesserung sich ein höherer Optimierungsgrad der gesamten Produktion erreichen lässt.

Hybride Montagesysteme sind Arbeitssysteme zur Montage von Produkten, in denen manuelle Arbeitssysteme mit automatisierten Arbeitssystemen kombiniert sind. Damit liegen sie hinsichtlich Stückzahl, Flexibilität, Produktivität und Variantenvielfalt zwischen den manuellen und automatisierten Montagesystemen (Abbildung 2.2).⁹

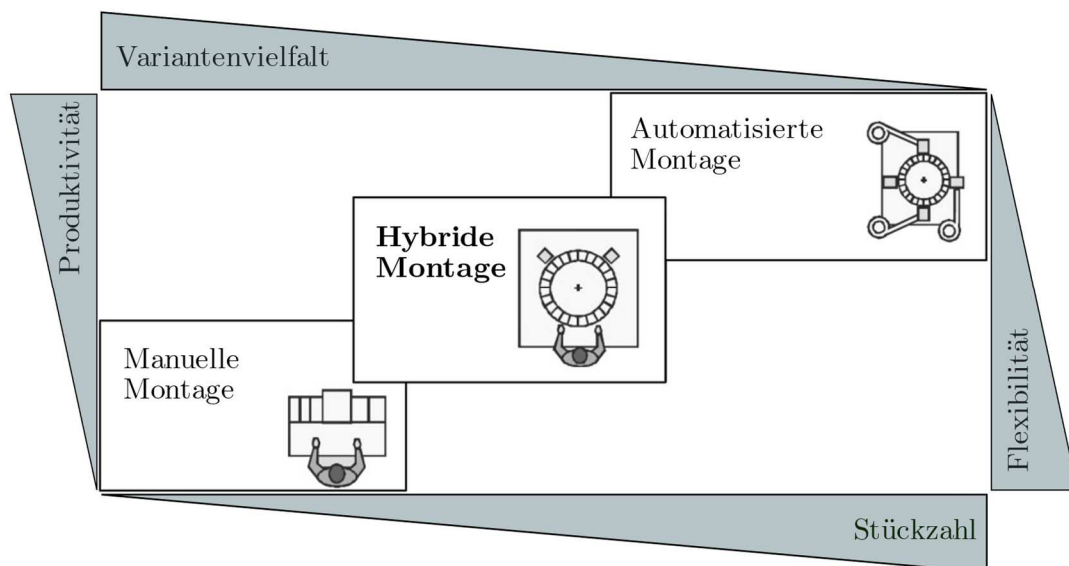


Abbildung 2.2: Einsatzbereiche manueller, hybrider und automatischer Montagekonzepte, Quelle: Lotter/Wiendahl 2006, S. 193 (leicht modifiziert)

Die Planung hybrider Montagesysteme startet mit der Ausarbeitung der manuellen Montage. Je nach Komplexität der Arbeitsaufgabe sollte der richtige Automatisierungs-

⁸ Vgl. Lotter/Wiendahl 2006, S. 3

⁹ Vgl. Lotter/Wiendahl 2006, S. 193

grad realisiert werden. Der Automatisierungsgrad, der durch eine kostengünstige Automatisierung bestimmter Prozesse oder einen Mehrzweck-Industrieroboter realisiert werden kann, wirkt sich direkt auf die Höhe der Investitionskosten aus. Die Arbeit wird für den Mitarbeiter durch hybride Montagesysteme erleichtert und stressige Situationen bezüglich Zeit oder monotone Arbeit werden vermieden.¹⁰

Hybride Montagesysteme haben einige Vorteile in Vergleich zu vollautomatisierten Montagesystemen. Sie sind flexibler und eignen sich besser für Produkte mit großer Variantenvielfalt sowie geringere Stückzahlen. Deswegen sind sie von großer Bedeutung bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), wo die Vollautomatisierung aufgrund von höherer Investitionskosten nicht die beste Option darstellt.¹¹

Statt speziell für die betrachtete Arbeit benutzte und an Flexibilität begrenzte Automaten kann bei einem hybriden Arbeitssystem der Roboter eingesetzt werden, was wegen seiner vielseitigen Einsatzbarkeit meistens der Fall ist. Abhängig davon, ob der Mensch und Roboter sich denselben Arbeitsraum teilen und gleichzeitig arbeiten, kommt es zu verschiedenen Formen der Interaktion, wobei die Mensch-Roboter-Kollaboration den höchsten Interaktionsgrad darstellt und im Prinzip nur eine spezielle Form der hybriden Montagesysteme bezeichnet.

2.2 Mensch-Roboter-Interaktion

Unter Mensch-Maschine-Interaktion (MRI) werden sämtliche Szenarien verstanden, bei denen Arbeitsräume von Mensch und Roboter nicht durch Schutzzäune getrennt sind und eine Interaktion möglich ist.¹²

Anmerkung: In der Literatur, wird oft der Übergriff MRI mit Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) als Synonym benutzt. Bei anderen Quellen wird MRK für drei Interaktionstypen benutzt, Koexistenz, Kooperation und Kollaboration. In vorliegender Arbeit wird die Abkürzung MRK ausschließlich für die Mensch-Roboter-Kollaboration, den höchsten Interaktionsgrad, verwendet.

2.2.1 Arten der Mensch-Roboter-Interaktion

Die Mensch-Roboter-Interaktion in einer Produktionsumgebung ohne trennbare Schutzeinrichtungen lässt sich in vier verschiedene Interaktionsszenarien einteilen. Diese Einteilung wurde vom Fraunhofer-Institut für Arbeitsorganisation (IAO) definiert. Die

¹⁰ Vgl. Lotter/Wiendahl 2006, S. 194

¹¹ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 1

¹² Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2016, S. 1

definierten Interaktionsszenarien hängen davon ab, ob der Mensch und der Roboter sich gemeinsam einen Arbeitsraum teilen und gleichzeitig an demselben Bauteil arbeiten. Damit ergibt sich auch die Möglichkeit des physischen Kontakts zwischen Mensch sowie Roboter. Um die Sicherheit zu gewährleisten, muss daher ein aufwendiger Zertifizierungsprozess stattfinden, der auf einer individuellen Risikobeurteilung basiert (siehe Abschnitt 2.5). Die vier Ebenen der Zusammenarbeit, von der Koexistenz (keine Zusammenarbeit) bis zur eigentlichen Kollaboration (direkte Zusammenarbeit) sind in Abbildung 2.3 dargestellt.¹³

Man unterscheidet zwischen folgenden Interaktionsarten:¹⁴

- **Zelle (keine Interaktion):**

Bei einer Roboterzelle sind Mensch und Roboter räumlich durch einen klassischen Schutzzaun getrennt. Es liegt kein Interaktionsszenario vor, da diese unabhängig voneinander arbeiten.

- **Koexistenz (MRI-1):**

Koexistenz bezeichnet ein Szenario, bei dem Mensch und Roboter parallel nebeneinander in unterschiedlichen Arbeitsräumen arbeiten, wobei die Arbeitsräume nicht durch einen Schutzzaun getrennt sind. Hier liegt kein richtiges Interaktionsszenario vor, da es keine Überschneidungen im Arbeitsraum gibt.

- **Synchronisiert (MRI-2):**

Synchronisierter Arbeitsablauf beschreibt ein Szenario, bei dem der Arbeitsraum von Mensch und Roboter lediglich geteilt wird. Hier entsteht keine direkte Zusammenarbeit, weil der Mensch und Roboter nicht gleichzeitig arbeiten.

- **Kooperation (MRI-3):**

Die Kooperation beschreibt eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, wenn beide gleichzeitig in einem gemeinsamen Arbeitsraum ihren Aufgaben nachgehen, jedoch nicht gleichzeitig an demselben Bauteil arbeiten. Mensch und Roboter arbeiten an unterschiedlichen Teilaufgaben, die nicht unmittelbar in einer Abhängigkeit voneinander stehen müssen.

- **Kollaboration (MRI-4):**

Unter Kollaboration wird eine direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter bezeichnet. Die Interaktionspartner führen zur gleichen Zeit gemeinsam eine Aufgabe an demselben Bauteil durch.

¹³ Vgl. Niewerth/Miro/Schäfer 2019, S. 10 f.

¹⁴ Vgl. Gillhuber 2017, Onlinequelle [26.05.2022]

	Konventionelle Lösung	Einsatz von Mensch-Roboter-Interaktion			
	<p>The diagram illustrates five levels of human-robot interaction (MRI) based on the robot's safety level (y-axis) and the degree of interaction (x-axis). The levels are: Zelle (robot in a separate cell), Koexistenz (robot and human in separate workspaces), Synchronisiert (robot and human working together in a shared workspace), Kooperation (robot and human working together in a shared workspace with physical contact), and Kollaboration (robot and human working together in a shared workspace with physical contact and force sensing). A legend indicates: blue for 'Arbeitsraum Roboter', green for 'Gemeinsamer Arbeitsraum', and orange for 'Arbeitsraum Mensch'.</p>				
Arbeitsschritte	sequentiell			gleichzeitig	
Arbeitsraum	Getrennte Arbeitsräume		Gemeinsamer Kollaborationsraum – zeitliche Trennung	Gemeinsamer Kollaborationsraum	
Arbeitsaufgabe	Keine Kopplung der Aufgabe		Gekoppelte Aufgaben	Gemeinsame Aufgabe	
Physischer Kontakt	Nicht möglich		Möglich, nicht notwendig und prinzipiell nicht erwünscht	Möglich, häufig erwünscht	
Mindestanforderungen gemäß DIN EN ISO 10218-1	Automatikbetrieb mit trennender Schutzeinrichtung	Sicherheitsüberwachter Halt	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung		
			Leistungs- und Kraftbegrenzung		
			Bahngeschwindigkeit	Handführung	
Geschwindigkeit	Maximale Geschwindigkeit	Begrenzte Geschwindigkeit			
Benutzer Robotertyp	Industrieroboter (LBR möglich)	Leichtbauroboter (LBR), Industrieroboter		LBR	
Automobilmontage ¹⁵	Vormontage, Endmontage			Endmontage	
Einsatz von MRI in der Industrie ¹⁶	62%		17%	13%	8%

Abbildung 2.3: Übersicht über Interaktionsformen und deren Merkmale, Quelle: In Anlehnung an Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 9 und Kopp/Schäfer/Kinkel 2020, S. 21

Anhand der in der Abbildung 2.3 enthaltenen Informationen lassen sich einige wichtige Schlussfolgerungen ziehen. Der Interaktionsgrad wird von Zelle (keine Interaktion) bis MRI-4 (höchste Interaktionsgrad) gegliedert. Daraus wird ersichtlich, dass MRK (MRI-4) die komplexeste Form der Interaktion ist, bei der Körperkontakt nicht nur möglich,

¹⁵ Vgl. Müller et al. 2019, S. 364

¹⁶ Vgl. Bauer, W. et al. 2016, S. 617

sondern wünschenswert sowie notwendig für die erfolgreiche Durchführung von Arbeitsaufgaben ist.

Nur bei einer klassischen Roboterzelle ist es möglich, dass sich der Roboter mit maximaler Geschwindigkeit bewegt. In allen anderen Fällen, je nach Art der Interaktion sowie der konkreten Arbeitsaufgabe, ist eine Bewegung nur mit reduzierter Geschwindigkeit möglich. Dies kann sich auf die Arbeitszeit auswirken und sollte bei der Planung eines MRI-Arbeitssystems berücksichtigt werden. Die Bewegungsgeschwindigkeit hängt auch von den gewählten Sicherheitsmaßnahmen ab (siehe Abschnitt 2.5).

Bei der Wahl des Robotertyps für ein MRI-Arbeitssystem wird zwischen einem klassischen Roboter sowie einem kollaborativen Roboter unterschieden. Die ersten drei Interaktionsgrade können auch mit einem klassischen Roboter erreicht werden, jedoch steigt mit der Interaktionsebene der Bedarf an zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen und damit verbundenen Investitionskosten. Für die MRK werden ausschließlich kollaborationsfähige Roboter verwendet (siehe Abschnitt 2.3.4).¹⁷

Eine weitere essenzielle Information erhält man über den Repräsentationsgrad bestimmter Interaktionstypen in der Industrie. Daraus lässt sich ablesen, dass die häufigste Form der Interaktion mit 62 % die Koexistenz ist und die MRK mit nur 8 % am wenigsten vertreten ist. Diese Zahl ist nicht so überraschend, wenn man die Komplexität sowohl der Technologie selbst als auch der Einführung in die Produktion berücksichtigt. Außerdem handelt es sich um eine neuere Technologie, die erst seit Kurzem ihre Anwendung in der Industrie findet.

Mit dieser Einführung in hybride Arbeitssysteme werden die Grundlagen für weitere Überlegungen gelegt. Der nächste Schritt umfasst das Kennenlernen des Robotersystems und jener Parameter, die es definieren. Ein besonderer Fokus liegt auf kollaborativen Robotern, mit denen der höchste Interaktionsgrad zwischen Mensch und Roboter erreicht werden kann.

¹⁷ Vgl. Müller et al. 2019, S. 48 f.

2.3 Grundlagen der Industrierobotik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Robotik mit dem Roboter als Hauptelement beschrieben. Es werden die Arten von Industrierobotern mit ihren Vor- und Nachteilen sowie den Parametern, durch die sie definiert sind, erörtert. Es zeigt sich zudem, dass die kollaborativen Roboter, mit ihren Vorteilen, bei jeder Interaktionsart zur Verwendung kommen, je ausgeprägter die Anforderung an die Flexibilität bei kurzen Produktionszyklen vorliegt. Am Ende werden die MRK-Arbeitssysteme mit besonderem Augenmerk auf Sicherheit genauer beschrieben.

2.3.1 Historische Hintergründe

Die Idee von Robotern ist sehr alt und geht schon auf Leonardo da Vinci zurück, der die heutigen Roboter in gewisser Weise voraussah, indem er sich ein Modell einer sich bewegenden Maschine in Form eines Löwen vorstellte.¹⁸ Der Begriff „Roboter“ wurde erstmals im Jahr 1920 durch das Theaterstück „R.U.R.“ (Rossum's Universal Robots) von dem tschechischen Schriftsteller Karel Capek verwendet. Der Begriff ist vom tschechischen Wort „rabota“ abgeleitet, was Fronarbeit bedeutet. In der russischen Sprache steht „rabota“ für Arbeit im allgemeinen Sinne. Mit dem Begriff bezeichnete Capek eine Gattung von „mechanischen Menschen“, die Menschen in Fabriken bei jeder Arbeit ersetzen sollten. Diese mechanischen Menschen werden als Diener der Menschen definiert und sind mit überlegener Intelligenz sowie außergewöhnlichen körperlichen Fähigkeiten ausgestattet.¹⁹

Die ersten konkreten Vorfahren der heutigen Roboter erschienen in den Dreißigerjahren des 20. Jahrhunderts in Form von Produktionsmaschinen. Sie wurden mit dem Ziel hergestellt, den Produktionsprozess zu modernisieren und kostengünstiger zu machen. Als Roboter galt damals jedes technische Gerät, das in der Lage war, bestimmte Operationen sowie Aufgaben eines Menschen auszuführen. Die wichtigsten Jahre für die Entwicklung von Robotern waren die Fünfzigerjahre des 20. Jahrhunderts. In dieser Zeit wurden numerisch gesteuerte Maschinen entwickelt, die einen Computer zur Steuerung und Verwaltung ihrer Arbeit verwenden haben.²⁰

Das Jahr 1956 gilt als Geburtsjahr für den praktischen Einsatz von Robotern bzw. die Erfindung des Industrieroboters, als George C. Devol ein Patent für die programmierte Übergabe von Artikeln beantragte. Die ersten serienmäßigen Industrieroboter stellte Anfang der 1960er-Jahre die Firma „Unimation“ her. Die Reaktion der Industrie kam erst

¹⁸ Vgl. Bruderer 2019, S. 1 f.

¹⁹ Vgl. Zeller 2005, S. 20

²⁰ Vgl. HiSoUR, Onlinequelle [28.10.2022]

später, als Japan 1968 begann, sich massenhaft am Robotergeschäft zu beteiligen. Seither sind die Entwicklung und der Einsatz von Industrierobotern rasant vorangekommen. Später, in den 1990er-Jahren, kam es zu einer rasanten Expansion der Computertechnik sowie des technologischen und konstruktiven Fortschritts von Maschinen, was wiederum zu rasanten Fortschritten beim Bau von Robotern mit immer besseren Eigenschaften führte.²¹ Einige Autoren schlugen eine chronologische Kategorisierung von Industrierobotern vor, wobei sie vier „Generationen“ definierten (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Robotergenerationen, Quelle: In Anlehnung an Zamalloa et al. 2017, S. 2

Generation	Zeitraum	Eigenschaften
Generation 0: Prä-Roboter	bis 1950	<ul style="list-style-type: none"> • Die ersten Industrieroboter waren pneumatisch oder hydraulisch
Generation 1: Erste Manipulatoren	1950–1967	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Regelalgorithmen (Punkt-zu-Punkt) • Automatische Wiederholung von Aufgaben
Generation 2: Sensorgeführte Roboter	1968–1977	<ul style="list-style-type: none"> • Mehr Bewusstsein für ihre Umgebung • Fortgeschrittene sensorische Systeme: z. B. Kraft, Drehmoment, Sicht • Lernen durch Demonstration • in der Automobilindustrie verwendet
Generation 3: Industrieroboter	1978–1999	<ul style="list-style-type: none"> • Roboter haben jetzt dedizierte Controller (Computer). • Neue Programmiersprachen für die Robotersteuerung. • Frei programmierbare Roboter • Teilweise Einbeziehung des künstlichen Sehens
Generation 4: Intelligente Roboter	2000–2022	<ul style="list-style-type: none"> • Einbeziehung erweiterter Computerfunktionen • Diese Computer arbeiten nicht nur mit Daten, sie können auch logische Schlussfolgerungen ausführen und lernen • Künstliche Intelligenz wird teilweise und experimentell eingeführt • Anspruchsvollere Sensoren, die Informationen an die Steuerung senden und diese durch komplexe Steuerungsstrategien analysieren • Der Roboter kann seine Aktionen auf solideren und verlässliche Informationen basieren • Einführung von kollaborative Robotern

²¹ Vgl. Zeller 2005, S. 28

2.3.2 Begriffe & Definitionen

Der Ursprung des Begriffes „Handhaben“ ist die Hand, die eine Vielzahl von Verwendungszwecken hat. Der Begriff „manuell“ bezieht sich auf die manuelle Bewegung von Objekten und kommt vom lateinischen „manus“, was Hand bedeutet. Laut VDI 2860 ist Handhaben definiert als das Schaffen, Verändern oder Aufrechterhalten einer räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern. Handhaben weist somit unterschiedliche Funktionen auf (Abbildung 2.4). Die Handhabungseinrichtungen sind im strengsten Sinne das technische Äquivalent zur Handarbeit. Die Handhabungseinrichtungen sind in der Praxis die technischen Einrichtungen wie Maschinen, Automaten, Vorrichtungen, die im weitesten Sinne der Handhabung dienen. Die Handhabungssysteme beziehen sich auf die Systeme mit Handhabungseinrichtungen und können manuell- oder programmgesteuert sein (Abbildung 2.5).²²

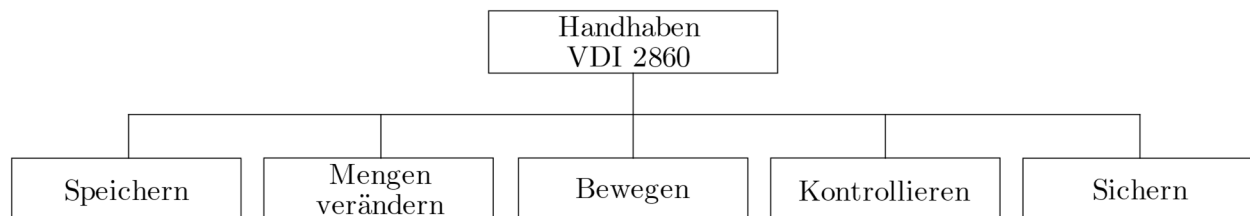


Abbildung 2.4: Funktionen des Handhabens, Quelle: In Anlehnung an Hesse 2020, S. 12

Bei der Verteilung auf manuelle und programmgesteuerte Handhabungssysteme unterscheidet man zwischen Manipulatoren, Einlegegeräten und Industrierobotern.

Manipulatoren

Manipulatoren sind Maschinen, die Objekte wie Werkstücke oder Werkzeuge unter manueller Anleitung handhaben. Der Bediener muss Sichtkontakt zum Arbeitsbereich haben, entweder direkt oder indirekt über einen Bildschirm, da diese nicht vorprogrammiert werden können. Menschen werden durch Manipulatoren von gefährlichen Bereichen ferngehalten. Durch sie kann auch menschliche Kraft verstärkt werden. Überdies gibt es Teleoperatoren, die ferngesteuerte Manipulatoren, die häufig auf mobilen Plattformen aufgebaut sind.²³

Einlegegeräte

Einlegegeräte sind mechanische Handhabungseinrichtungen, deren Bewegungsabläufe nach einem festen Programm ablaufen. Sie sind mit Greifern ausgestattet und werden als Pick-and-Place-Geräte bezeichnet (engl. to pick = nehmen; to place = weglegen). Mit

²² Vgl. Hesse/Seitz 1996, S. 9

²³ Vgl. Hesse/Seitz 1996, S. 13 f.

Einlegevorrichtungen lassen sich Werkstücke schnell und sicher bewegen und kommen meist in der Fertigung, aber auch an anderen Stellen zum Einsatz, die Schnelligkeit und Präzision erfordern, wie Verpackung, Behälterkommissionierung und Inspektion.²⁴

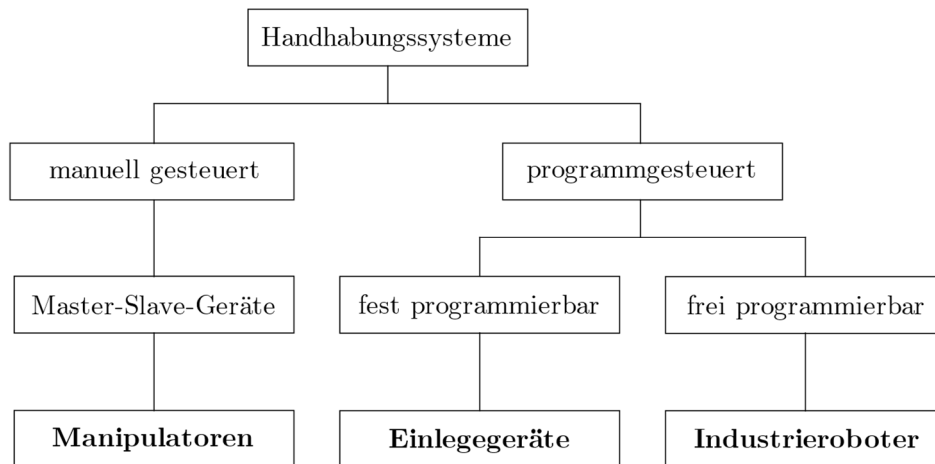


Abbildung 2.5: Einteilung der Handhabungssysteme nach dem Steuerungsniveau, Quelle: Weber 2017, S. 16 (leicht modifiziert)

Industrieroboter

Im Vergleich zu Manipulatoren und Einlegegeräten ist der Industrieroboter ein frei programmierbar Handhabungsgerät. Laut VDI-Richtlinie 2860 wird der Industrieroboter wie folgt definiert:

*Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen bzw. menschlichen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.*²⁵

Industrieroboter sind Maschinen, die mit hoher Geschwindigkeit und gleichbleibender Prozessqualität ohne Unterbrechung arbeiten können. Sie können mit verschiedenem Zubehör wie Greifern, Werkzeugen, Sensoren oder Umhüllungen ausgestattet werden, was eine flexible Anpassung an neue Aufgabe und Umgebung ermöglicht. Deswegen sind sie heute in nahezu allen Bereichen der industriellen Produktion zu finden. Viele Fertigungs- und Montageprozesse, insbesondere in der Automobil- und Konsumgüterindustrie, werden heute von Robotern ausgeführt.²⁶ Nach der VDI-Richtlinie 2861 Blatt 2 erfolgt eine Aufteilung von Industrieroboter-Kenngrößen in vier Gruppen (Tabelle 2.2).

²⁴ Vgl. Hesse/Seitz 1996, S. 15 f.

²⁵ Vgl. Weck/Brecher 2005, S. 54 ff.

²⁶ Vgl. Müller et al. 2019, S. 37

Tabelle 2.2: Industrieroboter-Kenngrößen, Quelle: Gerke 2014, S. 153 (leicht modifiziert)

geometrische Kenngröße	Belastungs-Kenngröße	kinematische Kenngröße	Genauigkeits-Kenngröße
<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Systemgrenze • Raumaufteilung • Arbeitsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Nennlast • Nutzlast • Nennmoment • Nenn-Massen-Trägheitsmoment 	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit • Beschleunigung • Überschwingweite • Ausschwingzeit • Verfahrzeit • Zykluszeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederholungsgenauigkeit (Position und Orientierung) • Wiederholungsgenauigkeit (Bahn) • Absolutgeschwindigkeit

Eigenschaften von Handhabungsgeräten

Handhabungsgeräte werden nach ihren wichtigsten Eigenschaften, dargelegt in Abbildung 2.6, bezeichnet.

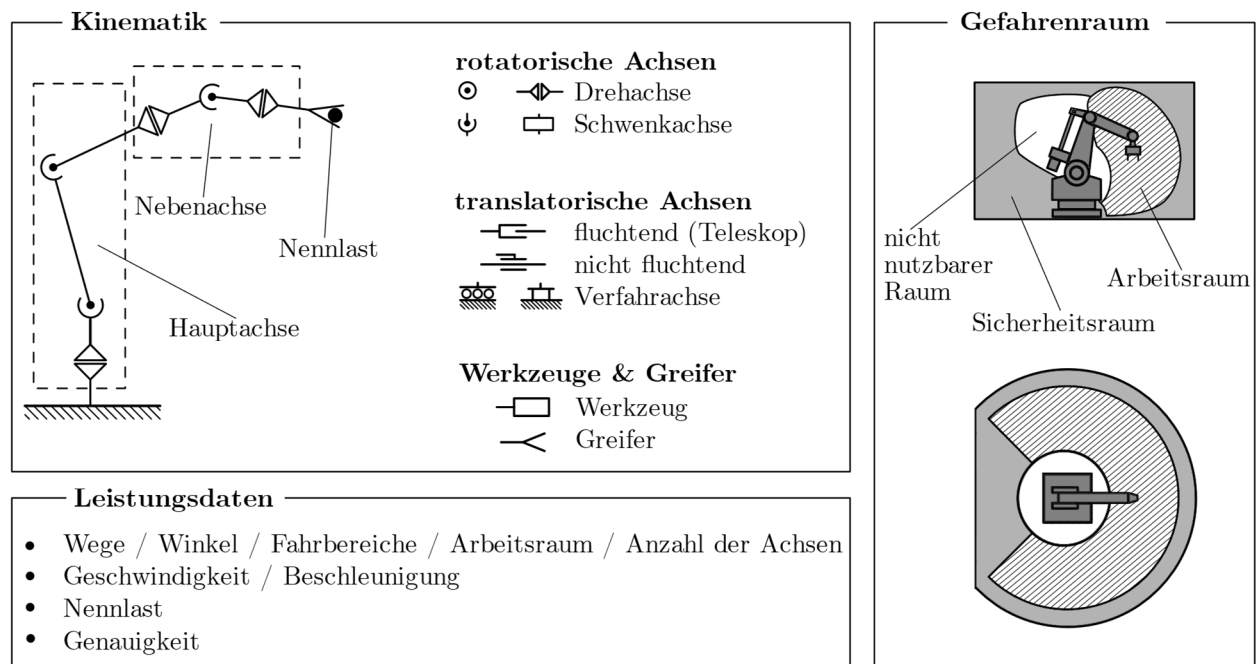


Abbildung 2.6: Spezifikation von Handhabungsgeräten, Quelle: Weck/Brecher 2005, S. 540 (leicht modifiziert)

Zwischen folgenden Kennzahlen ist zu unterscheiden:

- **Gefahrenraum**

Der Arbeitsraum beschreibt die nutzbare Bewegungsmöglichkeit eines Handhabungsgerätes. Der gesamte Bewegungsraum ist der maximale Raum, der von der Gesamtheit aller bewegten Elemente des Gerätes erreichbar ist. Die Differenz zwischen diesen zwei Räumen ist der nicht nutzbare Raum. Er sollte so klein wie möglich sein. Mit einem

angemessenen Sicherheitsraum um den Bewegungsraum bekommt man den Gefahrenraum, der während der Arbeit des Gerätes nicht betreten werden darf.²⁷

- **Kinematik**

Kinematik ist eine Abkürzung für die kinematische Kette, die sämtliche mechanischen Komponenten des Roboters außer dem Antrieb umfasst. Ihre Aufgabe ist es, den Effektor in die gewünschte räumliche Position zu bewegen.²⁸ Die Ausführung der Kinematik ist durch die beliebige Anzahl von translatorisch und rotatorisch gesteuerten Achsen gekennzeichnet. Dabei ist zwischen Haupt- und Nebenachsen zu unterscheiden. Die Hauptachsen werden am häufigsten verwendet, um den Greifer oder ein Werkzeug in eine beliebige räumliche Position zu verschieben. Die Orientierung des Greifers wird dann mit den Nebenachsen erreicht. Mit insgesamt sechs Maschinenachsen ist jede räumliche Orientierung eines Körpers realisierbar, was sechs Freiheitsgrade im kartesischen Arbeitsraum darstellt (Abbildung 2.7).²⁹

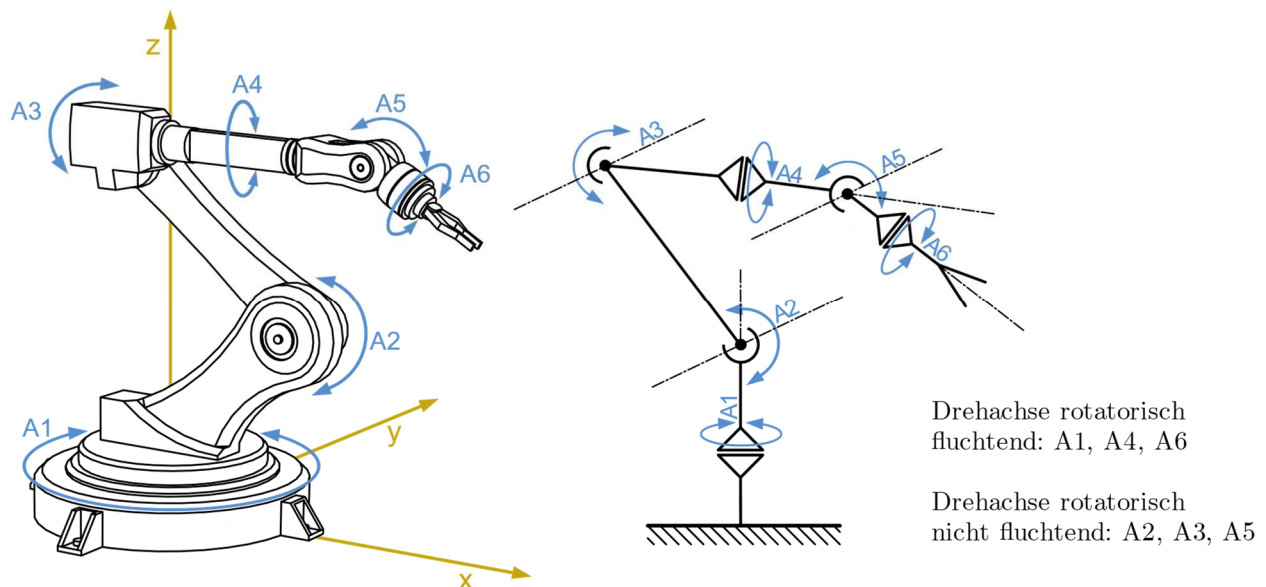


Abbildung 2.7: Knickarmroboter mit Achsen, Quelle: In Anlehnung an Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 38

Der in Abbildung 2.7 dargestellte sechsachsige Knickarmroboter mit kinematischem Ersatzschaltbild besteht lediglich aus rotatorischen Drehachsen die entweder vertikal bzw. fluchtend, oder horizontal bzw. nicht fluchtend sind. Der Knickarmroboter verfügt über eine serielle Kinematik. Im Unterschied dazu hat ein Parallelroboter eine parallele Kinematik (siehe Abbildung 2.11).

²⁷ Vgl. Weck/Brecher 2005, S. 541

²⁸ Vgl. Hesse/Schmidt/Schmidt 2001, S. 210

²⁹ Vgl. Weck/Brecher 2005, S. 540 f.

- **Leistungsdaten**

Eine essenzielle Größe der Handhabungsgeräte ist die Nennlast, die wie folgt definiert ist:

$$\text{Nennlast} = \text{Werkzeuglast (z. B. Greifer)} + \text{Nutzlast (z. B. Handhabungsobjekt)}.^{30}$$

Die Nennlast ist jene Last, die das Gerät ohne Veränderung der Geschwindigkeit und Beschleunigung im gesamten Arbeitsraum handhaben kann. Diese Last, die als Punktlast angenommen werden kann, erzeugt je nach Abstand zum Aufnahme­flansch die unterschiedliche Hebelkraft. Deswegen ist es wichtig, vom Hersteller die Belastungskennlinien zu entnehmen, um die sichere Handhabung planen zu können und damit eine Überlastung und einen Ausfall zu vermeiden (Abbildung 2.8).³¹

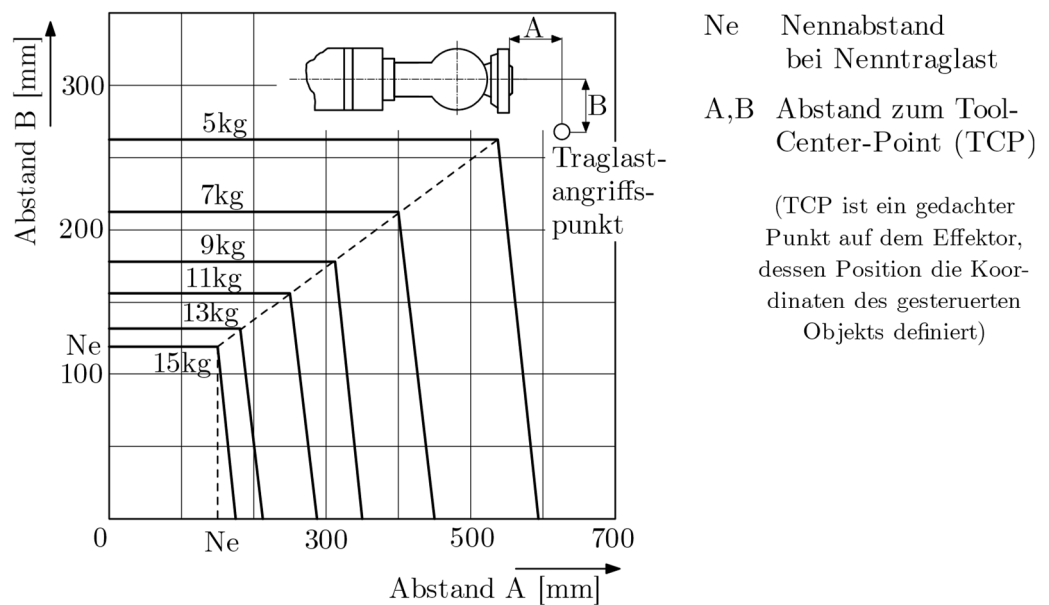


Abbildung 2.8: Traglastkennlinie für Industrieroboter mit 15 kg Nennlast, Quelle: Hesse 1998, S. 344 (leicht modifiziert)

Die weitere Kenngröße bei Auswahl von Handhabungsgeräten ist deren Genauigkeit, die sich durch Wiederholgenauigkeit, Absolutgenauigkeit sowie Bahngenauigkeit kennzeichnet.

Die Wiederholgenauigkeit, die oftmals als Arbeitsgenauigkeit bezeichnet wird, beschreibt die Fähigkeit des Gerätes, die von der Steuerung bestimmte Position während des Wiederholvorgangs zu erreichen. Aufgrund mechanischer Ungenauigkeiten wird der Roboter an einer der Positionen innerhalb der Streubreite ankommen, wobei er bei jedem neuen Wiederholvorgang eine andere Position einnimmt. Die Absolutgenauigkeit beschreibt die Fähigkeit des Gerätes, eine bestimmte Position im Arbeitsraum bezogen auf ein ortsfestes Koordinatensystem zu erreichen. Sie wird durch Randbedingungen wie

³⁰ Vgl. Hesse 1998, S. 343

³¹ Vgl. Hesse 1998, S. 343 f.

z. B. Nutzlast und gerätespezifische Faktoren wie z. B. Steifigkeit bestimmt. Die Absolutgenauigkeit kann durch Kalibrations- und Kompensationsverfahren verbessert werden. Sie liegt in der Regel weit unter der Wiederholgenauigkeit. Der Unterschied zwischen der Wiederhol- und Absolutgenauigkeit ist in Abbildung 2.9 ersichtlich. Eine weitere Kenngröße, die die Genauigkeit des Handhabungsgerätes bildet, wird als Bahngenauigkeit bezeichnet. Diese beschreibt die Fähigkeit des Gerätes, der von der Steuerung vorgegebenen Bahnkurve bei der Ausführung zu folgen.³²

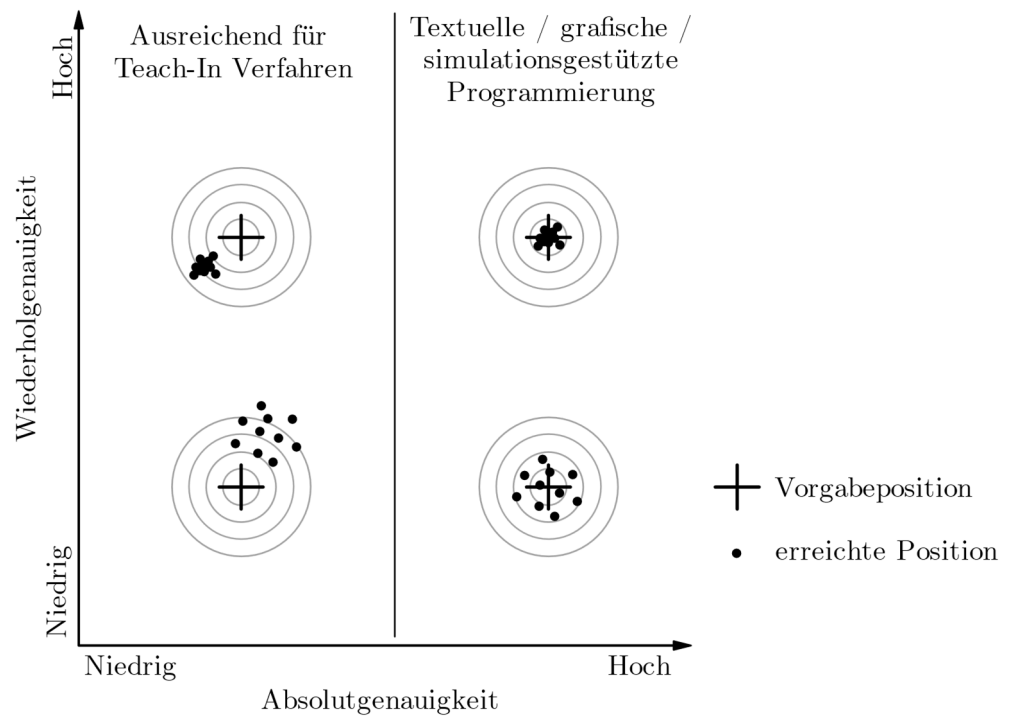


Abbildung 2.9: Messungen zur Wiederhol- und Absolutgenauigkeit eines Industrieroboters, Quelle: Müller et al. 2019, S. 299 (leicht modifiziert)

Bei der Auswahl eines Roboters muss neben den angegebenen Spezifikationen auch der Faktor der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden. Dies bezieht sich in erster Linie auf den Preis eines Systems, das die Anforderungen an die gewünschte Geschwindigkeit, Belastbarkeit usw. erfüllt. Bei hybriden Arbeitssystemen ist auch der Arbeitsraum essenziell, ebenso wie die Interaktionsgrad zwischen Gerät und Mensch, denn dies wirkt sich durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen auf den Preis aus.

³² Vgl. Weck/Brecher 2005, S. 541 f.

2.3.3 Robotersystem

Ein Industrieroboter kann ausschließlich in Kombination mit Peripheriegeräten, geeigneter Software, Sicherheitseinrichtungen usw. als voll funktionsfähige Maschine erachtet werden. Um seine Funktion optimal erfüllen und in hybriden Arbeitssystemen einsetzen zu können, ist es wichtig, sämtliche Komponenten des Robotersystems zu kennen.

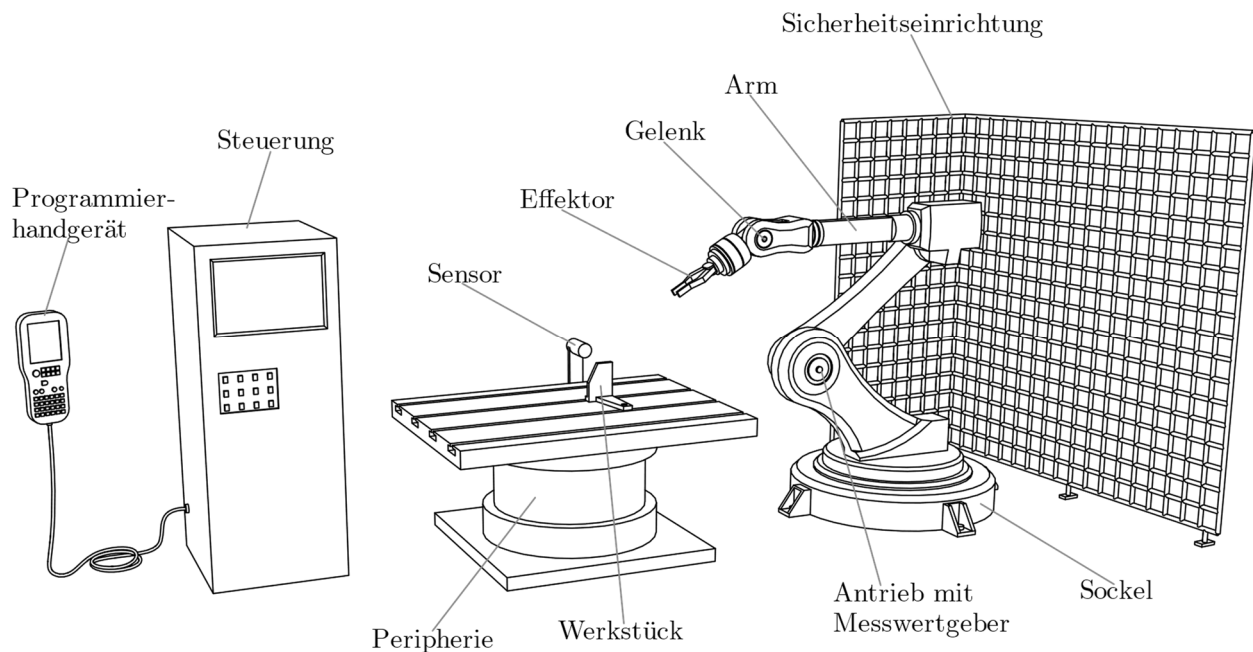


Abbildung 2.10: Komponenten eines Robotersystems, Quelle: In Anlehnung an Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 21

Unabhängig von der Aufgabenstellung, ist beim allgemeinen Aufbau eines Robotersystems zwischen den in Abbildung 2.10 bezeichneten Komponenten zu unterscheiden. So besteht ein Robotersystem aus folgenden Komponenten:³³

- **Kinematik/Bewegungseinheiten (Gelenke und Achsen):**

Kinematik umfasst alle mechanischen Komponenten des Roboters außer dem Antrieb und kann seriell oder parallel sein. Ihre Aufgabe ist es, den Effektor in die gewünschte räumliche Position zu bewegen (siehe Abschnitt 2.3.2).

- **Antriebe:**

Der Antrieb hat die Aufgabe, die Kinematik im Raum zu bewegen, und kann elektrisch, hydraulisch, pneumatisch oder eine Kombination aller drei Arten sein. In den meisten Fällen wird ein Motor benutzt, der in den Gelenken und/oder in

³³ Vgl. Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 19 f.

den Sockel integriert werden kann. Bei der seriellen Kinematik hat jedes Gelenk einen Antrieb. Man kann auch zusätzliche Antriebe benutzen, um die Arbeitsraum zu vergrößern.

- **Effektor:**

Der Effektor stellt das letzte Glied am Roboter dar und ist für die eigentliche Ausführung der Handhabungsaufgabe verantwortlich. Die Wahl des Effektors richtet sich nach der Aufgabenstellung und den Anforderungen, Energieform etc. und kann in der Industrie in verschiedenen Formen vorliegen, wie z. B. Greifer, Werkzeug, Prüfgerät.

- **Messsysteme:**

Das Maßsystem, das jede angetriebene Achse besitzt, wird für die Erfassung von aktuellen Geschwindigkeiten sowie Positionen benutzt. Dieses ist in einen Positionsregelkreis integriert, der aus Geber und Elektronik besteht. Der Geber dient zur Erfassung von Messgrößen und Elektronik zur Verstärkung und weiteren Verarbeitung.

- **Sensoren:**

Die Sensoren haben die Aufgabe, die Ereignisse oder Veränderungen in der Umgebung des Roboters zu erkennen, wie z. B. Positionskorrekturen, Werkstück vorhanden oder nicht, und Informationen an die Steuerung zu senden. Durch die Informationen wird dann der geplante Ablauf an die neuen Umstände angepasst.

- **Steuerung:**

Die Steuerung koordiniert das Zusammenwirken aller anderen Komponenten des Robotersystems. An die Steuerung werden sämtliche Informationen der angeschlossenen Komponenten gesendet. Sie werden dann bearbeitet und durch Befehle an verbundene Geräte gesendet mit dem Ziel, die Roboteraufgabe richtig und sicher ausführen zu können.

- **Programmierhandgerät:**

Das Programmierhandgerät ist ein Teil der Steuerung, das für die Handhabung bzw. Programmierung des Roboters benötigt wird.

- **Sicherheitseinrichtungen:**

Um die Sicherheit von Mensch und Maschine beim gemeinsamen Arbeiten zu gewährleisten, muss das Robotersystem mit Sicherheitseinrichtungen ausgestattet sein. Sie werden durch aufgabenspezifische Anforderungen bestimmt und können auf unterschiedliche Weise umgesetzt werden (siehe Abschnitt 2.5).

- **Peripheriegeräte:**

Allgemein kann man sämtliche Geräte in einem Robotersystem, die ein Signal an die Steuerung senden und/oder von der Steuerung empfangen, als Peripheriegeräte bezeichnen. Sie spielen eine große Rolle bei der Auswahl eines Roboters, da die Investitionskosten für Peripheriegeräte um ein Vielfaches höher sind als die Kosten für den Roboter selbst (siehe Abschnitt 3.3.1).

- **Software:**

Zur Durchführung der Aufgaben ist eine entsprechende Software erforderlich. Diese besteht aus einem vom Hersteller freigeschalteten Betriebssystem sowie Programmen, nach deren Befehlen Bewegungen und Aufgaben ausgeführt werden.

Bauformen der Industrieroboter

Bei der Auswahl eines geeigneten Roboters für eine bestimmte Aufgabe ist die Größe und Form des Arbeitsraums entscheidend. Die Grenzen des Arbeitsraums werden durch die maximale und minimale Reichweite der Hauptachsen des Roboters definiert. Dabei ergeben sich durch verschiedene Bauformen verschiedene Arbeitsräume (Abbildung 2.11).³⁴

Um ein Objekt beliebig im Raum anordnen zu können, benötigt man insgesamt sechs Freiheitsgrade. Das bedeutet, dass ein Roboter mit mindestens sechs Achsen das handzuhabende Objekt in jeder räumlichen Position in seinem nutzbaren Arbeitsraum platzieren kann. Die drei Hauptachsen dienen zum Bewegen des Objekts zu einem beliebigen Punkt im Raum, die drei Nebenachsen zu seiner Orientierung. Während Nebenachsen ausschließlich Rotationsachsen sein können, können Hauptachsen eine beliebige Kombination aus Translations- und Rotationsachsen haben.³⁵

Der in Abbildung 2.11 dargestellte Roboteraufbau mit ihrer Kinematik und die zugehörigen Arbeitsräume werden im Folgenden kurz beschrieben:

- **Flächenportalroboter**

Flächenportalroboter (auch kartesischer, Linear- oder Portalroboter genannt) sind Industrieroboter, die drei translatorische Achsen haben und damit über einen quaderförmigen Arbeitsraum verfügen. Sie können unterschiedlich groß sein und große Massen an Werkstücken handhaben, sodass sie in verschiedenen Industriebereichen eingesetzt werden. Sie werden bei industriellen Anwendungen häufig für CNC-Maschinen und den 3D-Druck verwendet.³⁶

³⁴ Vgl. Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 47

³⁵ Vgl. Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 47

³⁶ Vgl. Marquiss, Onlinequelle [06.09.2022]

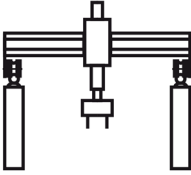
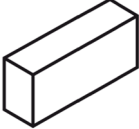
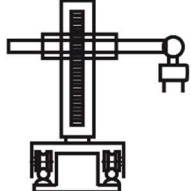

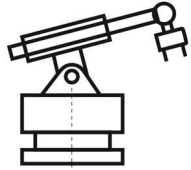

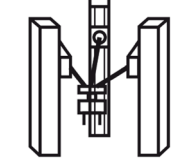
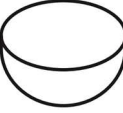
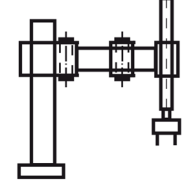

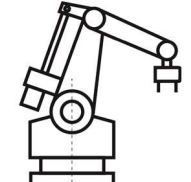

Roboterbauart	Achsen	
	Kinematik	Arbeitsraum
Flächenportalroboter		
Zylindrische Roboter		
Sphärische Roboter		
Parallelroboter		
SCARA-Robot		
Knickarmroboter		

Abbildung 2.11: Klassifizierung von Industrierobotern nach ihrem mechanischen Aufbau, Quelle: Hesse 2013, S. 408 (leicht modifiziert)

- **Zylindrische Roboter**

Zylindrische Roboter (auch Schwenkarmroboter genannt) haben eine fluchtende-rotatorische Achse an der Basis folgend mit zwei translatorischen Achsen. Der Arbeitsraum hat eine zylindrische Form, deren Höhe durch die erste translatorische Achse bestimmt ist, während mit der zweiten translatorischen Achse die Reichweite des Effektors bestimmt wird. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise werden zylindrische Roboter oft in engen Arbeitsräumen für einfache Aufgaben eingesetzt.³⁷

³⁷ Vgl. Learnchannel, Onlinequelle [06.09.2022]

- **Sphärische Roboter**

Sphärische Roboter (auch Polar-Roboter genannt) haben zwei rotatorische Achsen, eine fluchtend sowie eine nicht fluchtend, und eine translatorische Achse. Die Achsen, die das Polarkoordinatensystem verwenden, ermöglichen es dem Roboter, einen sphärischen Arbeitsraum zu haben. Er hat eine große Reichweite und wird oft z. B. für Punkt- und einfaches Bahnschweißen angewandt.³⁸

- **Parallelroboter**

Parallelroboter (auch Delta-Roboter genannt) haben eine parallele Kinematik mit drei translatorischen Achsen, die mit einer einzigen Basis verbunden sind. Sie sind über dem Arbeitsbereich montiert und haben einen kuppelförmigen Arbeitsraum. Bei hohen Geschwindigkeiten können sie sich feinfühlig als auch präzise bewegen, da jedes Gelenk des Effektors direkt von allen drei Achsen gesteuert wird. Häufig werden sie für schnelle Pick-and-Place-Anwendungen benutzt.³⁹

- **SCARA-Roboter**

SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm) (auch Horizontal-Knickarm- oder Schwenkarmroboter genannt) sind die Industrieroboter, die in der Regel vier Achsen besitzen, und können lediglich eine Handhabung in planparallelen Flächen ermöglichen. Sie haben einen Arbeitsraum, der oft nierenförmig ist, dieser kann aber auch kreisförmig um den Roboterfuß sein. Sie sind zur schnellen Pick-and-Place-Handhabung geeignet.⁴⁰

- **Knickarmroboter**

Im Vergleich zu den bislang genannten Robotertypen verfügt der sechsachsige Knickarmroboter über die meisten Freiheitsgrade, die es ihm ermöglichen, das Werkstück in jeder gewünschten Position in seinem Arbeitsraum zu positionieren und auszurichten. Er verfügt über einen kugelförmigen Arbeitsraum und ist mit seiner großen Arbeitshöhe und Reichweite für den Einsatz für flexible Arbeitsaufgaben geeignet. Mit hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit ist der Roboter mit Gelenkarm in verschiedenen Industriebereichen zu finden.⁴¹

Die bauartspezifischen Leistungsgrenzen von Industrierobotern sind entscheidend für ihren Einsatz. Sie ergeben sich aus den statischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften der mechanischen Struktur. Im Allgemeinen sind sie aufgrund physikalischer Gesetze teilweise widersprüchlich. Werden beispielsweise hohe Anforderungen an die absolute Positioniergenauigkeit bei hoher Aktionsdynamik gestellt,

³⁸ Vgl. Learnchannel, Onlinequelle [06.09.2022]

³⁹ Vgl. Marquiss, Onlinequelle [06.09.2022]

⁴⁰ Vgl. Xpertgate, Onlinequelle [06.09.2022]

⁴¹ Vgl. Weck/Brecher 2005, S. 547 ff.

ist dies ausschließlich mit kleineren Nutzlasten sowie bewegten Massen zu erreichen. Ebenso können in großen Arbeitsräumen aufgrund größerer statischer, dynamischer und thermischer Verformungen nur geringe Positioniergenauigkeiten erreicht werden. Die Auswahl der Roboterbauform wird durch den erforderlichen Arbeitsraum bestimmt (Abbildung 2.12).⁴²

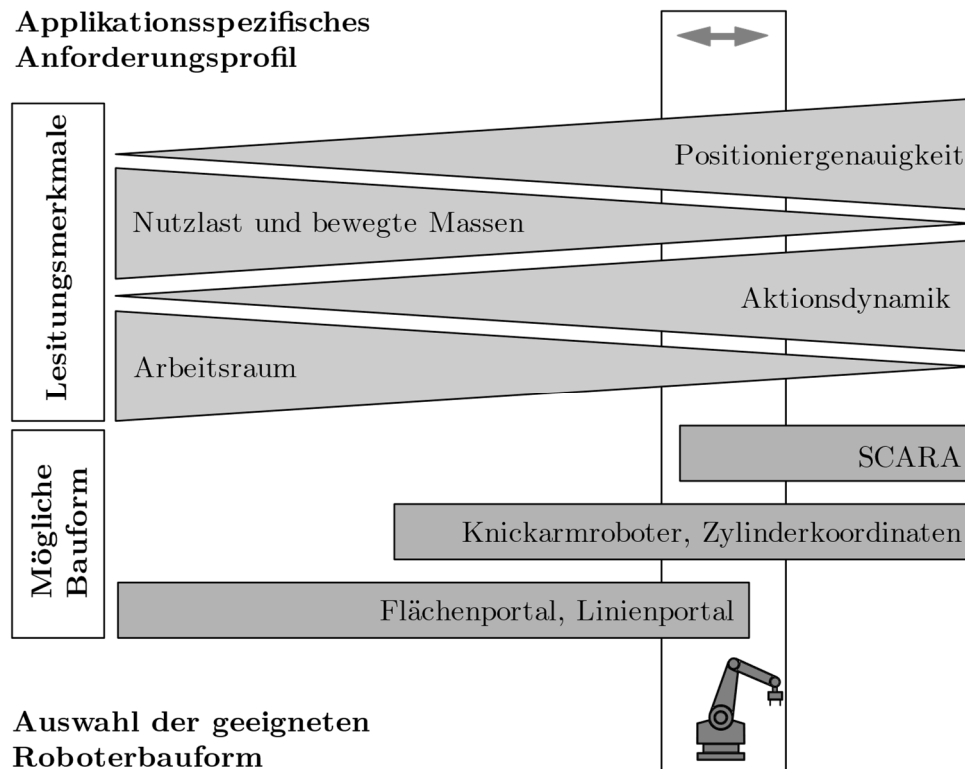


Abbildung 2.12: Leistungsgrenzen von Roboterbauarten, Quelle: In Anlehnung an Weck/Brecher 2005, S. 547

Abhängig von der Interaktionsart, Applikation, Traglast etc., können in Prinzip alle genannte Roboterbauarten in der Arbeit mit dem Mensch verwendet werden. Jedoch, wegen ihres hohen Freiheitsgrades und damit vielseitiger Einsetzbarkeit und Flexibilität, werden bei einer direkten Kollaboration ausschließlich Knickarmroboter verwendet. Unter Einhalten der Sicherheitsmaßnahmen und damit verbundenen Beschränkungen können die klassischen Industrie-Knickarmroboter auch bei Kollaboration eingesetzt werden. Heutzutage gibt es speziell für die Kollaboration entwickelte Roboter, dessen Industrie-einsatz immer mehr an Bedeutung gewinnt.

⁴² Vgl. Weck/Brecher 2005, S. 547

2.3.4 Kollaborationsfähige Roboter

Ausgehend von einem manuellen Arbeitsplatz mit dem Ziel, den Arbeitsprozess durch Automatisierung zu verbessern, stellt sich die Frage, ob es besser ist, den gesamten Arbeitsprozess oder lediglich einige Teilprozesse zu automatisieren. Dieser Unterschied zwischen automatisierten und hybriden Arbeitssystemen führt zur Auswahl des passenden Robotertyps. Dabei ist zwischen konventionellen Industrierobotern und kollaborationsfähigen Robotern (Cobots) (aus dem Englischen: collaborative robot, cobot) zu unterscheiden. Neben dieser Bezeichnung sind in der Industrie und Literatur auch andere alternative Bezeichnungen für kollaborationsfähige Roboter zu finden. Zu verbreiteten Bezeichnungen zählen „kollaborative Roboter“, „sensitiver Roboter“, „MRK-Roboter“ und „Leichtbauroboter“. In der Industrie sind kollaborative Roboter in unterschiedlichen Ausführungen, Größen sowie Fähigkeiten zu finden (Abbildung 2.13).



Abbildung 2.13: Kollaborationsfähige Roboter: 1. Staubli: TX2, 2. KUKA: LBR IIWA, 3. Universal Robots: UR3, UR5, UR10, 4. Fanuc: CR-35iA, 5. AUBO: OUR, 6. Techman: TM5, 7. ABB: Yumi, 8. Rethink Robotics: Sawyer, 9. Kawada: Nextage, Quelle: SAI Industrial LLC, Onlinequelle [25.07.2022] (leicht modifiziert)

Leichtbauroboter (LBR) wurden 1996 von J. Edward Colgate sowie Michael Peshkin, Professoren der Northwestern University, auf Initiative von General Motors erfunden. Eine US-Patentanmeldung aus dem Jahr 1997 beschreibt LBR als „ein Gerät und ein Verfahren zur direkten physischen Interaktion zwischen einer Person und einem Allzweckmanipulator (engl. general purpose manipulator), der von einem Computer gesteuert wird“. Die Forschung zielte darauf ab, Wege zu finden, Roboter oder

roboterähnliche Automaten sicher genug zu machen, um mit Menschen arbeiten oder kooperieren zu können.⁴³

Die Nutzung von LBR soll das Unfall- und Verletzungsrisiko am Arbeitsplatz minimieren. Sie sind mit einer sicheren Konstruktion, wie z. B. durch Sensoren, einer geringen Antriebsleistung sowie geeigneten Bauform für die Zusammenarbeit mit Menschen geeignet. Diese besitzen eine Kraft- und Leistungsbegrenzung die durch das Kraft-Momenten-Sensorsystem in den Gelenken ermöglicht wird. Der Aufbau des LBR-Gelenks mit einem Drehmomentsensor und andere Komponenten ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Nutzung von Sensoren ermöglicht eine manuelle Führung sowie Kollisionserkennung des Endeffektors. Außerdem sind sie ohne scharfe Kanten und mit geringem Gewicht (daher die Bezeichnung „Leichtbauroboter“) konstruiert, sodass die Gefahr bei einem Körperkontakt mit dem Menschen so gering wie möglich ist.⁴⁴

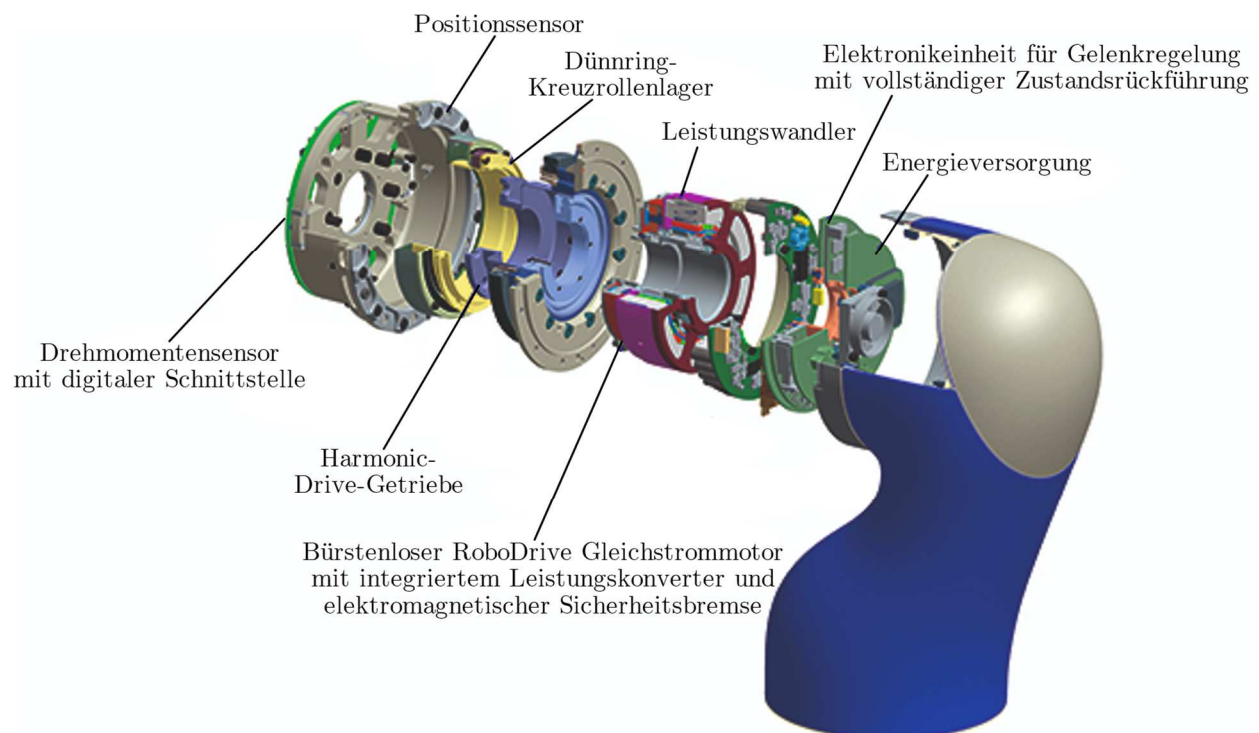


Abbildung 2.14: Gelenkkomponenten eines Leichtbauroboters, Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Onlinequelle [25.07.2022]

Die Risikoreduzierung sowie höhere Geschwindigkeiten können durch die Nutzung von elastischen Elementen am oder im Roboter ermöglicht werden. In dem Fall wird von Nachgiebigkeit gesprochen. Dabei ist zwischen einer mechanischen (nachgiebige Gelenke oder Glieder) sowie einer Nachgiebigkeit der Umhüllung zu unterscheiden. Die

⁴³ Vgl. Miljaković Jevtić 2022, Onlinequelle [25.07.2022]

⁴⁴ Vgl. Müller et al. 2019, S. 71 ff.

Nachgiebigkeit ermöglicht, dass die Kollisionsenergie bei einer Kollision durch elastische Elemente absorbiert und somit abgeschwächt wird. Eine Abschwächung der Kollisionsenergie lässt sich auch durch die Polsterung der Außenwand des Roboters erreichen.⁴⁵

Die herkömmlichen Industrieroboter sind in der Regel große, fest installierte Geräte, die mit hoher Genauigkeit und Geschwindigkeit ausgelegt sind. Wegen der Sicherheitsrisiken, die sie für die menschlichen Arbeiter darstellen, benötigen sie normalerweise Sicherheitsmaßnahmen wie einen Käfig, um Menschen aus dem Arbeitsbereich des Roboters fernzuhalten. Die Integration des Roboters mit Sicherheitskäfig sowie zusätzliche Investitionen für Zuführungen, Bereitstellungen und Greifwerkzeuge können die Kosten maßgeblich erhöhen. Zu den Kosten zählt auch der Bedarf an professionellen Dienstleistungen, um die Roboter zu programmieren und sie mit anderen Produktionsanlagen und -maschinen zu verknüpfen. Aus diesen Gründen sind die traditionellen Industrieroboter am besten für die Serienfertigung geeignet, bei der die Produktionsprozesse jahrelang unverändert weiterlaufen.⁴⁶

Aufgrund wirtschaftlicher und technischer Einschränkungen der Industrieroboter wird die Produktion bei Kleinserien oder Einzelprodukten vielerorts noch manuell ausgeführt. Eine hohe Varianz von Produkten und kürzere Produktlebenszyklen erfordern flexible sowie an die Änderungen schnell anpassbare Arbeitssysteme, die durch eine Automatisierung nicht realisiert werden können. Insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) kann die Wirtschaftlichkeit aufgrund der zusätzlichen Peripherie- und Integrationskosten sowie langen Amortisationszeiträume oft nicht erreicht werden. Das führt dazu, dass auch technisch einfach automatisierbare Prozesse noch manuell ausgeführt werden.⁴⁷

Die Nutzung von LBR, die eine schutzzaunlose Zusammenarbeit mit Menschen ermöglichen, eröffnet neue Automatisierungslösungen für die manuelle Montage, ohne größere Änderungen im Arbeitssystemlayout zu erfordern. Mit niedrigeren Einstandskosten, schneller Integration und einfacher Programmierung ohne Vorkenntnisse steigen durch LBR die Automatisierungspotenziale bei KMUs. Somit lassen sich einfache Applikationen, die keine großen Investitionen in zusätzliche Sicherheitseinrichtungen, Materialbereitstellung oder teure Peripherie erfordern, wirtschaftlich umsetzen. Mit ihrem geringen Eigengewicht sind die LBR leicht genug, um sich leicht bewegen zu lassen und damit ortsflexibel für die neuen Prozesse in der Produktionskette einzusetzen. Durch das geringe Robotergewicht entsteht aber auch der Schwachpunkt der LBR, die sie sich durch geringere Traglast gekennzeichnet. Eine Liste von Vor- und Nachteilen der

⁴⁵ Vgl. Müller et al. 2019, S. 53

⁴⁶ Vgl. Collaborative Robotics Trends 2020, Onlinequelle [25.07.2022]

⁴⁷ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 12

Leichtbauroboter im Vergleich zu den klassischen Industrierobotern stellt Tabelle 2.2 dar.⁴⁸

Tabelle 2.2: Vorteile und Nachteile der Leichtbauroboter in Vergleich zu den klassischen Industrierobotern, Quelle: Eigene Darstellung

Vorteile	
• Flexibler Einsatz	Der LBR lässt sich bei verschiedenen Aufgaben einsetzen und ist schnell an die Produktionsänderungen anpassbar.
• Niedrige Investitionskosten	Kosten von LBR und erforderlicher Peripherie hängen von Komplexität der Aufgabe sowie erforderlichen Anforderungen an das Robotersystem ab. Im Allgemeinen sind die Investitionskosten geringer als bei klassischen Industrierobotern. Dies spiegelt sich auch durch einfachere Umsetzung und Programmierung.
• Kürzere Amortisationszeit	Durch die geringeren Investition- sowie den Entfall von zusätzlichen Kosten, die mit klassischen Robotern verbunden sind, ergeben sich kürzere Amortisationszeiten.
• Schnelles Einrichten	Wegen geringen Eigengewichts und der intuitiven und einfachen Benutzung erfolgt das Einrichten viel schneller als bei klassischen Robotern.
• Einfache Programmierung	Programmieren durch Handführung und intuitive 3D-Visualisierung ermöglichen die Programmierung auch für Bediener ohne Vorkenntnisse.
• Kollaborationsfähigkeit und Sicherheit	Nach DIN EN ISO 10218-1:2011 ist für die Leistungs- und Kraftbegrenzung (siehe Abschnitt 2.5) bei einer direkten MRK ein spezieller Roboter zu entwickeln, der inhärente Sicherheitsfunktionen oder eine sicherheitsrelevante Steuerung enthält. ⁴⁹ Der LBR erfüllt diese Anforderungen und ermöglicht damit einen sicheren Einsatz.
• Geringe Änderungen im Arbeitssystemlayout nötig	Wegen kleinen Baugrößen, Wegfall von Schutzzäunen beim Einsatz und sicheren Einsatz können LBR ohne größere Änderungen im Arbeitssystemlayout umgesetzt werden.

⁴⁸ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 12 f.

⁴⁹ Vgl. Müller et al. 2019, S. 48

• Einsatz ortsflexibel	Die geringe Eigengewicht, Wegfall von stationärer Sicherheitstechnik sowie ein schnelles Einrichten ermöglichen einen ortsflexiblen Einsatz. Die LBR können auch auf mobile Plattformen installiert werden und dadurch einen zusätzlichen Flexibilitätsgrad erreichen.
• Geringes Eigengewicht	Aufgrund des geringen Eigengewichts können die LBR leicht verschoben und für die neue Aufgabe eingesetzt werden.
Nachteile	
• Geringe Traglast	LBR sind für die Handhabung von kleinen Traglasten von 3 bis 10 kg am besten geeignet, obwohl einige Modelle bis zu 35 kg handhaben können. ⁵⁰ Mit größer Traglast ist mit höheren Kosten von Robotern und erhöhtem Verletzungsrisiko wegen bewegter Massen bei MRI zu rechnen.
• Nicht ganz unabhängig	Im Gegensatz zu Industrierobotern, die ohne menschliche Arbeitskräfte mit voller Kapazität arbeiten können, benötigt ein LBR ein gewisses Maß an menschlicher Unterstützung oder Überwachung. ⁵¹
• Geringe Wiederholgenauigkeit	Die Genauigkeit von LBR variiert je nach LBR-Modell. Im Allgemeinen ist sie geringer als bei Industrierobotern. ⁵² Die hohe mechanische Nachgiebigkeit verursacht eine schlechte Wiederholgenauigkeit. ⁵³
• Geringe Geschwindigkeit	Laut ISO 10218 ist eine Geschwindigkeitsbegrenzung des TCP von 250 mm/s während MRK vorgeschrieben. ⁵⁴ Bei anderen Interaktionsformen kann sich LBR mit höherer Geschwindigkeit bewegen. Im Allgemeinen ist die Geschwindigkeit aus technischen und Sicherheitsgründen geringer als beim klassischen Industrieroboter.

Neben dem Vergleich kollaborativer Roboter mit klassischen Industrierobotern ist es essenziell, deren Vor- und Nachteile in Bezug auf den Menschen sowie in Abhängigkeit von verschiedenen Interaktionsszenarien miteinander zu vergleichen (Tabelle 2.3). Diese Informationen sind auch für die Implementierungsmethodik von MRI-Arbeitssystemen nützlich, deren Konzept im dritten Kapitel vorgestellt wird.

⁵⁰ Vgl. HowToRobot, Onlinequelle [25.07.2022]

⁵¹ Vgl. HowToRobot, Onlinequelle [25.07.2022]

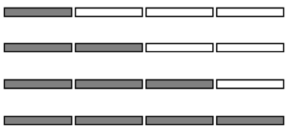
⁵² Vgl. Southwest Research Institute, Onlinequelle [25.07.2022]

⁵³ Vgl. Müller et al. 2019, S. 53

⁵⁴ Vgl. Peterson 2020, Onlinequelle [25.07.2022]

Tabelle 2.3: Überblick über Stärken und Schwächen von Mensch und Leichtbaurobotern in unterschiedlichen Interaktionsszenarien, Quelle: Berg et al. 2019, S. 20 (leicht modifiziert)

Mensch	LBR in MRK	LBR im Einsatz ohne Schutzzaun	LBR in Stationärer Zelle
Flexibilität			
<ul style="list-style-type: none"> • Flexible Aufgaben- und Einsatzbereiche • Sensomotorische Fähigkeiten • Komplexe Problemlösefähigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere bis hohe Anpassungsfähigkeit durch Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter 	<ul style="list-style-type: none"> • Ortsflexibilität durch Wegfall von stationärer Sicherheitstechnik (z. B. Schutzzaun) • Hohe Anpassungsfähigkeit der Applikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Ortsgebunden wegen stationärer Sicherheitstechnik (z. B. Zelle) • Anpassungsfähigkeit der Applikation nur im Rahmen der Zelle
Belastbarkeit			
<ul style="list-style-type: none"> • Körperliche und geistige Belastungs- und Leistungsgrenzen • Übernahme monotoner Aufgaben durch den Roboter • Heben schwerer Teile (bis ca. 14 kg) • Verbesserung ergonomischer Aspekte • Kontinuierliche Arbeitsleistung des Roboters 		<ul style="list-style-type: none"> • Übernahme monotoner Aufgaben durch den Roboter • Heben schwerer Teile (bis ca. 14 kg) • Verbesserung ergonomischer Aspekte • Kontinuierliche Arbeitsleistung des Roboters 	
Geschwindigkeit			
<ul style="list-style-type: none"> • Schwankende Arbeitsgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere bis hohe Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters je nach Sicherheitstechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters
Qualität			
<ul style="list-style-type: none"> • Schwankendes Qualitätsniveau je nach Person und Befinden 		<ul style="list-style-type: none"> • Gleichbleibendes Qualitätsniveau des Roboters • Integrierte Qualitäts- und Prozesskontrolle möglich 	
Investitionskosten			
<ul style="list-style-type: none"> • Ausbildungs- und Einarbeitungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für MRK-fähige Komponenten (Roboter, Endeffektor, Vorrichtungen) • Kosten für Qualifizierung der Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für (MRK-fähige) Komponenten (Roboter, Endeffektor, Vorrichtungen) • Kosten für anpassungsfähige Sicherheitstechnik (z. B. Laserscanner) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für Komponenten (Roboter, Endeffektor, Vorrichtungen) • Kosten für stationäre Sicherheitstechnik (z. B. Schutzzaun, Lichtgitter)
Laufende Kosten			
<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Kosten durch hohe Stundensätze für Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Kosten durch hohe Stundensätze für Mitarbeiter und Maschinenstundensatz für den Roboter 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufende Kosten durch Maschinenstundensatz • Hohe Rüstkosten bei häufiger Applikationsanpassung 	

Aufwand der Absicherung			
<ul style="list-style-type: none"> • Richtlinien für manuelle Arbeitsplätze • Persönliche Schutzausrüstung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Absicherungsaufwand aufgrund der Zusammenarbeit mit dem Menschen 	<ul style="list-style-type: none"> • Absicherung des Roboters durch Sicherheitstechnik (z. B. Lichtschranke) • Anpassung der Sicherheitstechnik bei Veränderung der Applikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Einmalige Auslegung der stationären Zelle und der Sicherheitstechnik (z. B. Zellengröße, Anzahl Türschalter)
Programmieraufwand (beim Menschen: Aufwand zum Einlernen)			
<ul style="list-style-type: none"> • Geringer bis hoher Anlernaufwand je nach Aufgabentyp und Person 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlerer bis hoher Programmieraufwand je nach Grad der Zusammenarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlerer bis hoher Programmieraufwand bei Implementierung oder Anpassung der Applikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer bis mittlerer Programmieraufwand je nach Aufgabentyp
 <p style="text-align: right;">Geringe Ausprägung</p> <p style="text-align: right;">Höchste Ausprägung</p>			

2.4 Mensch-Roboter-Kollaboration

Die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRI-4) stellt ein spezielles hybrides Arbeitssystem, die höchste Stufe der Mensch-Roboter-Interaktion, dar und umfasst die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum. Die Zusammenarbeit erfolgt ohne trennende (z. B. Zäune und Gitter) und nicht trennende (z. B. Lichtgitter, Laserscanner) Schutzvorrichtungen.⁵⁵ Der Mensch und Roboter arbeiten dabei gleichzeitig an denselben Aufgaben bzw. am selben Objekt (Abbildung 2.15).

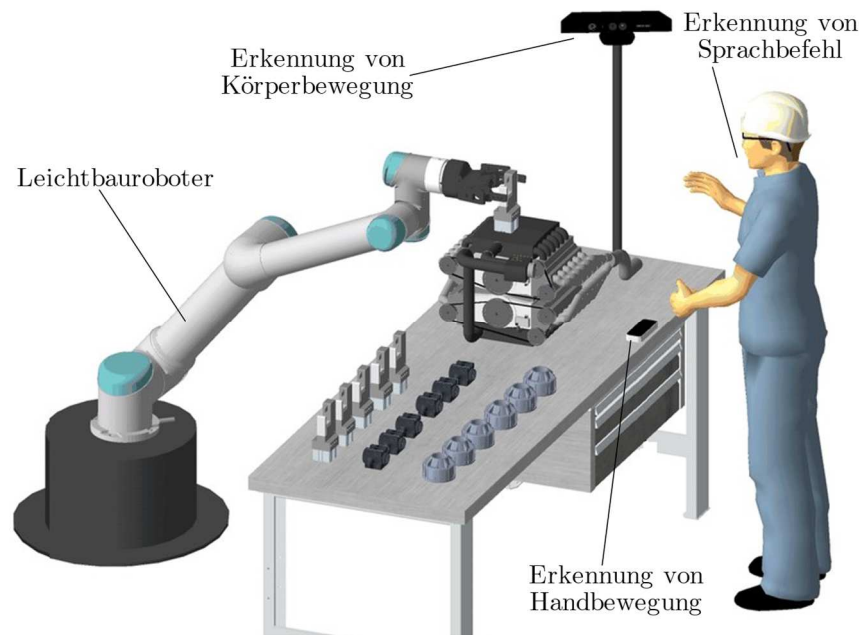


Abbildung 2.15: Mensch-Roboter-Kollaboration, Quelle: Liu et al. 2018, S. 74763 (leicht modifiziert)

Die ersten Schritte zur MRK fanden 1990 statt, als die Elan Schaltelemente GmbH & Co. KG zusammen mit Reis Robotics die ESALAN Safety Controllers präsentiert hat. Diese ermöglichten erstmals eine sichere Überwachung der Geschwindigkeit und Position des Roboters. Mithilfe einer Software war es möglich, die Arbeit des Roboters innerhalb seines Arbeitsraums einzuschränken und damit die Gefährdung durch Kinematik einzugrenzen.⁵⁶

Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter im Rahmen von MRK ist ausschließlich durch den Einsatz von Leichtbauroboter realisierbar. Somit ist laut DIN EN ISO 10218-1:2011 ein kollaborierender Betrieb wie folgt definiert:⁵⁷

Zustand, in dem hierfür konstruierte Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten.

⁵⁵ Vgl. Markis et al. 2016, S. 9

⁵⁶ Vgl. Müller et al. 2019, S. 2

⁵⁷ Vgl. Müller et al. 2019, S. 19

In einem MRK-Arbeitssystem (MRK-AS) lassen sich die Fähigkeiten von Mensch und Roboter kombinieren, sodass der gesamte Prozess optimiert werden kann. Ein Mensch kann Aufgaben übernehmen, die seinen Fähigkeiten entsprechen, wie z. B. das Überwachen und Steuern des Prozesses, das Treffen von Entscheidungen sowie das Ausführen komplizierter Aktionen, die mit einem Roboter nur mithilfe zusätzlicher Sensoren und Werkzeuge realisierbar wären. Gleichzeitig kann der Roboter für den Menschen ungünstige Aufgaben, wie monotone, präzise und zeitlich begrenzte, übernehmen.

Flexibilität und Änderungen von Montageprozessen erfordern eine enge Verknüpfung zwischen Werker und automatisierter Montageanlage. Die MRK verbessert komplexe Montageprozesse, insbesondere wenn ein Roboter von einem Werker geführt werden kann und der Roboter den Werker motorisch unterstützt. Je nach Grad der Unterstützung durch Sensorik, Aktorik oder Datenverarbeitung kann der Mensch in Fertigungsprozessen unterschiedlich unterstützt werden.⁵⁸

Durch MRK lässt sich eine höhere Wirtschaftlichkeit gegenüber manuellen und vollautomatischen Systemen erreichen. Im Vergleich zur manuellen Fertigung wird dies durch eine Steigerung der Produktivität, des Arbeitsprozesses und der Produktqualität erzielt. Im Vergleich zur Vollautomatisierung ist es möglich, Produkte in kleinen Serien sowie mit hoher Variantenvielfalt herzustellen. Durch MRK lassen sich durch menschliche Fähigkeiten die hohen Kosten für Sensoren und Greifer einsparen.⁵⁹

Durch optimale Planung können die an das MRK-System gestellten Anforderungen erfüllt werden:⁶⁰

- LBR mit Kraft- und Leistungsbegrenzung
- Skalierbarer Anlagenbau im Hinblick auf eine vielfältige Produktion
- Hohe Flexibilität bei Prozessänderungen
- Verbesserung der Ergonomie des Menschen
- Sichere Zusammenarbeit ist durch Einhaltung der Normen und Richtlinien realisierbar
- Einfache Bedienung und Programmierung von LBR
- Qualitätssicherung durch Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter

⁵⁸ Vgl. Krüger/Lien/Verl 2009, S. 628

⁵⁹ Vgl. Krüger/Lien/Verl 2009, S. 628 ff.

⁶⁰ Vgl. Buxbaum/Bendel 2020, S. 2

2.4.1 Realisierung der MRK-Arbeitssysteme

In bestimmten Situationen kann für MRK auch ein herkömmlicher Industrieroboter eingesetzt werden, der dann mit einer speziellen externen Sicherheitstechnik ausgestattet werden muss, was die Investitionskosten deutlich erhöht. Durch den Einsatz von Sicherheitstechnik ist es möglich, den Roboter bei Gefahr für Menschen zu stoppen. Die Wahl der Sicherheitstechnik richtet sich nach der Aufgabenstellung und damit den Sicherheitsanforderungen. Sicherheitslösungen wie Sicherheitsmatten oder Sicherheitskamerasysteme unterscheiden sich bezüglich Sicherheitsstufe, Komplexität sowie Höhe der Investitionskosten. Dabei kommen unterschiedliche Arten von Sensoren zum Einsatz, die für die ständige Messung und Gewinnung von Informationen über die Umgebung zuständig sind (Tabelle 2.4).⁶¹

Tabelle 2.4: Relevante interne und externe Sensoren im Kontext der MRK, Quelle: Müller et al. 2019, S. 74 (leicht modifiziert)

Aufteilung von Sensoren im Kontext der MRK	
Externe / exterozeptive Sensoren	Interne / propriozeptive Sensoren
Messung der Zustandsgrößen der Umgebung	Messung der inneren Zustandsgrößen
<ul style="list-style-type: none"> • Resistive Sensoren (resistiver Effekt) • Kapazitive Sensoren (kapazitive Effekte) • Induktive Sensoren (induktive Effekte) • Akustische Sensoren (akustische Effekte) • Optische Sensoren (optische Effekte/ photoelektrischer Effekt) • Pneumatische Sensoren (thermo- dynamische Effekte) • Radarsensoren (Doppler-Effekt) • Weitere Sensoren (z. B. Gauß-Effekt, Hall- Effekt, thermoelektrischer Effekt/ Seebeck- Effekt, Thermowiderstands-Effekt) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren zur Kraft-/Momentenmessung (piezoelektrischer Effekt, resistiver Effekt, magnetostriktiver Effekt, optische Effekte) • Sensoren zur Positions-, Weg- und Winkel- messung (induktive Effekte, kapazitive Effekte, magnetostriktiver Effekt, Hall- Effekt, optische Effekte, akustische Effekte) • Sensoren zur Beschleunigungs- und Dreh- ratenmessung (Hall-Effekt, kapazitiver Effekt, piezoelektrischer Effekt, magneto- resistiver Effekt, thermodynamische Effekte, Coriolis-Kraft, Sagnac-Effekt)

Durch den Einsatz von Sicherheitseinrichtungen ist es möglich, das Vorhandensein von Gefahren für Menschen festzustellen. Diese wird in der Regel durch den Mindestabstand zwischen Mensch und Roboter bestimmt. Sie wird laut DIN EN ISO 13855 in Millimetern berechnet und ist abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit von Mensch und Roboter sowie der Reaktionszeit von Sensoren und Robotersteuerung. Durch Sicherheitstechnik wird sichergestellt, dass der Roboter nur so lange arbeitet, wie der Personenabstand den Mindestabstand nicht unterschreitet (siehe Abschnitt 2.5).⁶²

⁶¹ Vgl. Müller et al. 2019, S. 46 f.

⁶² Vgl. Müller et al. 2019, S. 46 f.

In der Automobilindustrie, einem der größten Anwendungsgebiete von Industrierobotern, wird eine Vielzahl von Schweißwerkzeugen oder Klebstoffauftragssystemen zum Fügen von Materialien und Stoffen eingesetzt. Während Schweißprozesse aufgrund ihrer Anforderungen häufig eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ausschließen, werden MRK-Anwendungen hauptsächlich im Bereich der Handhabungs- und Montagetechnik realisiert.⁶³ In der Produktion von Hochvoltspeichern (HVS) erfolgen die Arbeiten an der Schweiß- und Klebearbeitsstation daher in einer klassischen Roboterzelle (siehe Abschnitt 4.2).

Bei der Entscheidung über die Implementierung von MRK-AS ist ein Vergleich sowohl mit manuellen als auch mit vollautomatisierten Arbeitssystemen erforderlich. MRK kann und soll die Automatisierung nicht ersetzen, sondern bildet eine neue Möglichkeit, manuelle Arbeitssysteme zu erweitern, und steht mit ihren Vorteilen und Einschränkungen zwischen diesen beiden Arbeitssystemen.

Bei der Planung und Umsetzung von MRK-Arbeitssystemen treten fünf Dimensionen in den Vordergrund, die die Kernpunkte eines MRK-Arbeitssystems bilden:⁶⁴

- **Flächennutzung**

Hier geht es um die Ermittlung des Platzbedarfs einer MRK-Applikation. Durch den Wegfall trennender Schutzeinrichtungen und durch das Teilen desselben Arbeitsraums ist eine MRK platzsparender und eine effizientere Nutzung von produktiven Flächen realisierbar.

- **Ergonomie**

Die Ergonomie lässt sich durch eine geeignete Zusammenführung der Stärken von Mensch und Roboter erreichen. Dabei werden die menschliche Fertigkeiten und Fähigkeiten mit der Kraft, Präzision und Wiederholgenauigkeit eines Roboters kombiniert.

- **Flexibilität**

Durch die Erhöhung der Flexibilität kann eine automatisierte Produktion auch bei kleinen Losgrößen oder sogar Einzelprodukten wirtschaftlich realisiert werden. Flexibilität kann sich entweder auf das Produkt (Variantenflexibilität, Änderungsflexibilität) oder auf die Produktion (Funktionsflexibilität, Volumenflexibilität, Erweiterungsflexibilität, Redundanz, Ortsflexibilität) beziehen.

⁶³ Vgl. Müller et al. 2019, S. 62

⁶⁴ Vgl. Buxbaum/Bendel 2020, S. 23 ff.

- **Intuitivität**

Durch die Intuitivität soll die Anpassung der Bedienung durch eine effiziente, einfache und verlässliche Programmierung ermöglicht werden.

- **Peripherie**

Durch die Peripherie, die die applikationsspezifische Komponente eines Robotersystems darstellt (z. B. Zuführeinrichtungen, Vorrichtungen, Effektoren usw.) wird die MRK-Applikation bestimmt. Um die Komplexität einer MRK-Applikation zu senken sowie schlankere Arbeitssysteme zu realisieren, sollte eine Reduktion der Peripherie durch integrierte Systemlösungen stattfinden.

Der Endeffektor stellt bei MRK einen essenziellen Teil der Peripherie dar und beschreibt allgemein das letzte Glied in der kinematischen Kette des Roboters. Die derzeit in der Industrie eingesetzten Endeffektoren bestehen aus einer Vielzahl von Werkzeugen und Greifern. Die Gestaltungs- und Steuerungsfreiheit, die bei klassischen Robotern erlaubt ist, hat bei MRK-Arbeitssystemen wesentliche Einschränkungen. Hierzu zählen die Anforderungen an Leistungs- und Kraftgrenzen, die geltenden Normen und Spezifikationen zu entnehmen sind (DIN ISO/TS 15066:2016). Zudem ist für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz auch eine ausreichend hohe Flexibilität der Greiftechnik erforderlich. Um eine möglichst schnelle und einfache Integration in Produktionsprozesse zu ermöglichen, ist es notwendig, die Vorteile von LBRs, wie einfache Programmierung, Verwendung universeller Schnittstellen sowie integrierter Sensorik, zu nutzen. Diese Vorteile bieten das Potenzial, die MRK durch zusätzliche Funktionen des Greifsystems zu optimieren. Dies kann beispielsweise über zusätzliche Funktionen direkt im Greifsystem integriert werden. Somit kann der Mensch einen direkten Einfluss auf den Prozess nehmen.⁶⁵

Einer der wichtigsten Faktoren bei der Planung von MRI-Arbeitssystemen und insbesondere MRK ist das Erreichen einer sicheren Arbeit für Mensch und Roboter. Deshalb ist es wichtig, den Prozess zur Risikoerkennung und -minderung zu erörtern, der durch Richtlinien und Normen beschrieben wird.

⁶⁵ Vgl. Müller et al. 2019, S. 62

2.5 Sicherheit bei MRK-Systemen

Bei der Arbeit mit Maschinen ist die Sicherheit der Arbeiter von größter Bedeutung. Im Rahmen der Interaktion von Menschen mit Robotern bei MRI-Arbeitssystemen ist die Sicherheit von besonderer Bedeutung, da keine physische Barriere existiert, die den Arbeitsbereich des Roboters einschränkt. Deshalb wird bei der Planung und Umsetzung von MRI-Arbeitssystemen ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, die Gefährdung von Personen auszuschließen.

Die Sicherheit von Menschen wird durch eine Reihe von Normen und Richtlinien unterstützt. Die Erstellung einer Risikobeurteilung des Gesamtsystems bildet eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Umsetzung einer Anwendung in MRK. Dabei muss die Kinematik des Roboters ebenso berücksichtigt werden wie das Bauteil sowie sämtliche Peripheriegeräte.⁶⁶

Roboter, die in kollaborativen Umgebungen eingesetzt werden, müssen mit Sicherheitsfunktionen ausgestattet sein, die entweder eine sich nähernde Person vor dem eigentlichen Kontakt erkennen und angemessen reagieren können oder mit so geringen Kräften arbeiten, dass selbst im Falle einer Kollision keine inakzeptable Verletzungsgefahr für Menschen entsteht. Für den kollaborativen Betrieb werden speziell die kraft- und leistungsreduzierte Leichtbauroboter entwickelt. Diese sind mit eingebauten Sicherheitsfunktionen für die direkte Verbindung mit Personen innerhalb des vorgesehenen Interaktionsraums ausgestattet, wie z. B. kapazitiven oder taktilen Sensoren zur Kollisionserkennung. Durch Hinzufügen der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen können für die anderen Kontaktarten auch herkömmliche Industrieroboter eingesetzt werden.⁶⁷

Gesetzliche Rahmenbedingungen

Aus der Sicht des Betreibers hat ein kollaborativer Roboter für sich allein keinen konkreten Nutzen und wird als „Unvollständige Maschine“ oder als „Maschine“ bezeichnet. Erst durch Integration der richtigen Peripherie und geeignete Umsetzung des Roboters am MRK-Arbeitsplatz sowie seine Einbindung in das industrielle Kommunikationsnetz des Unternehmens wird der Roboter zu einer einsatzbereiten MRK-Applikation. In dieser Kombination sowie in Zusammenarbeit mit dem Menschen ergeben sie eine MRK-Anwendung nach EN ISO 10218-2 und aus Sicht der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG eine Maschine, die vor dem Inverkehrbringen am europäischen Markt mit einer EG-Konformitätserklärung und einem CE-Zeichen ausgestattet werden muss. Zum Erhalt

⁶⁶ Vgl. Markis et al. 2016, S. 7

⁶⁷ Vgl. Markis et al. 2016, S. 9

dieser muss das Robotersystem einen Zertifizierungsprozess durchlaufen (Abbildung 2.16). Über die CE-Kennzeichnung gibt der Integrator/Maschinenhersteller an, dass das Robotersystem allen entsprechenden Richtlinien entspricht. CE steht für „Conformité Européenne“, also „Übereinstimmung mit EU-Richtlinien“.⁶⁸ In dem Fall muss nach den nationalen Arbeitnehmer-Innenschutzbestimmungen (in Österreich AM-VO und ASchG) die sichere Funktion durch den Betreiber nachgewiesen werden.⁶⁹

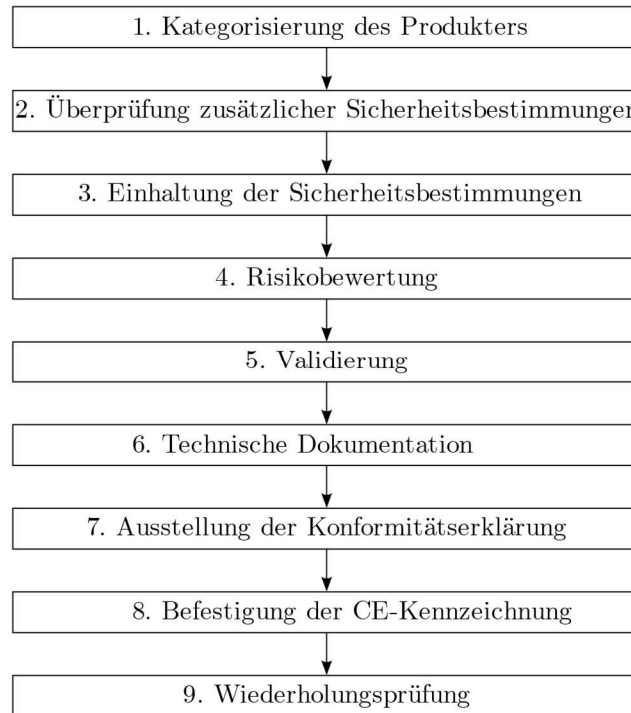


Abbildung 2.16: Ablauf der CE-Kennzeichnung, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 313

2.5.1 Risikobeurteilung

Die Risikobeurteilung bildet das Kernstück einer Konformitätsuntersuchung. Sie umfasst einen strukturierten Prozess, mit dem festgelegt wird, welche Sicherheitsanforderungen eine MRI-Applikation erfüllen muss, um die Risiken für den Menschen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.⁷⁰

Das Vorgehen zur Risikobeurteilung und -minderung ist in der EN ISO 12100 definiert (siehe Abschnitt 2.5.3) und beschreibt einen iterativen Prozess, der als Resultat eine Risikoverhinderung bewirkt (Abbildung 2.17).

⁶⁸ Vgl. Müller et al. 2019, S. 311

⁶⁹ Vgl. Markis et al. 2016, S. 10 f.

⁷⁰ Vgl. Markis et al. 2016, S. 10

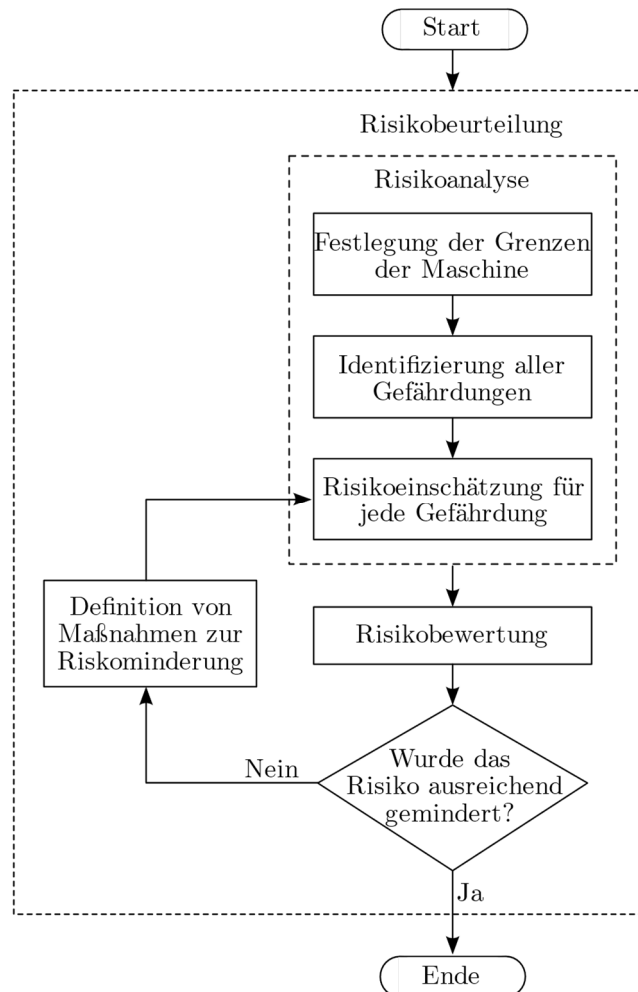


Abbildung 2.17: Vorgehensweise zur Risikobeurteilung nach EN ISO 12100, Quelle: In Anlehnung an WEKA MEDIA GmbH & Co. KG 2020, Onlinequelle [13.08.2022]

Laut der EN ISO 12100 erfolgt eine Risikobeurteilung in fünf Schritten (Abbildung 2.17). Die Schritte 1 bis 3 sind als Risikoanalyse bezeichnet. Mit dem 5. Schritt wird geprüft, ob Risiko genug gemindert ist. Der Prozess muss so lange wiederholt werden, bis das Risiko in einem hinreichenden Maße vermindert wurde.⁷¹

Festlegung der Grenzen der Maschine

Die Festlegung der Maschinengrenzen beschreibt Merkmale und Leistung der Maschine sowie räumliche und zeitliche Grenzen. Dazu zählen auch Grenzen wie Einsatzbedingungen und Personalqualifikation. Räumliche Grenzen betreffen Bewegungsräume der Maschine sowie Platzbedarf für den Bediener. Zeitliche Grenzen beschreiben z. B. Wartungsintervalle und Lebensdauer einer Maschine.⁷²

⁷¹ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 9 ff.

⁷² Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 13

Identifizierung der Gefährdungen

Um mögliche Gefahren zu identifizieren, haben sich Workshop-Formate bewährt, in denen verschiedene Experten mögliche Gefährdungen, entlang der Lebensdauerphasen der MRK-Applikation identifizieren (Abbildung 2.18). Dabei kommen als gefährdete Personen neben Maschinenbediener auch Reinigungspersonal, Techniker sowie andere zutreffende Personen in Betracht.⁷³

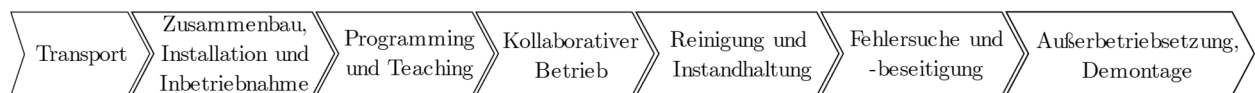


Abbildung 2.18: Lebensdauerphasen einer MRK-Applikation, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 14

Eine wesentliche Gefährdung bei MRK-Anwendungen betrifft die Möglichkeit einer Kollision zwischen Mensch und Roboter. Mögliche Kollisionsstellen müssen für diesen besonderen Fall durch eine Gefährdungsanalyse identifiziert werden. Abbildung 2.19 zeigt beispielhaft solche Kollisionsstellen. Neben direkten mechanischen, sind auch weitere wesentliche Gefährdungen (z. B. elektrische und ergonomische) zu berücksichtigen.⁷⁴

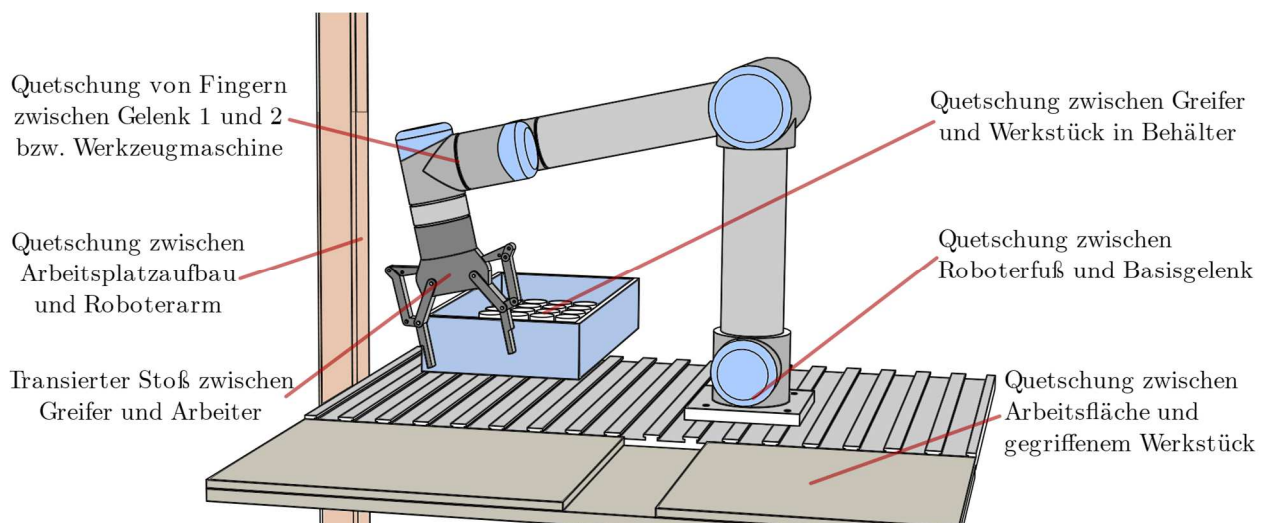


Abbildung 2.19: Identifizierte Kollisionsgefährdungen, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 14

Risikoeinschätzung und Risikobewertung

Nach einer vollständigen Identifizierung von Risiken ist eine Risikobewertung durchzuführen. Im Vergleich zur Identifizierungsphase, die sich auf die subjektive Einschätzung der beurteilenden Personen bezieht, wird durch die Quantifizierung der Gefährdungen ein erforderliches Maß an Objektivität des Prozesses erreicht. Jede

⁷³ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 104

⁷⁴ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 10 f.

identifizierte Gefährdung wird nach vier Kriterien bewertet, wobei für jedes Kriterium eine Bewertung angenommen wird. Hier ist zwischen folgenden Kriterien zu unterscheiden:⁷⁵

- S: Schadensausmaß bei Eintritt der Gefährdung.
- F: Die Häufigkeit und Dauer, mit welcher ein Mensch der Gefährdung ausgesetzt ist.
- W: Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Gefährdung eintritt.
- P: Vermeidbarkeit des Schadens durch Erkennung des Gefährdungseintritts.

Tabelle 2.5: Kriterien zur Bewertung von Gefährdung, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 15

Kriterium	Bewertung	Beschreibung
Schadensausmaß	$S \in \{0;4\}$	0 = kein Schaden
		4 = irreversibler Schaden, Verlust von Körperteilen, Tod
Häufigkeit	$F \in \{1;5\}$	1 = Aussetzung der Gefahr seltener als einmal im Jahr für
		5 = Aussetzung der Gefahr häufiger als einmal pro Stunde
Eintrittswahrscheinlichkeit	$W \in \{1;5\}$	1 = vernachlässigbar
		5 = sehr hoch
Vermeidbarkeit	$P \in \{1;5\}$	1 = Erkennen des Gefährdungseintritts und Ausweichen ist
		5 = Erkennen und Ausweichen ist unmöglich

Aus diesen einzelnen Bewertungen werden aggregierte Werte, namentlich die Risikoklasse (Gleichung 2.1) sowie die Risikoprioritätszahl (RZP)(Gleichung 2.2), ermittelt.⁷⁶

$$\text{Risikoklasse} = F + W + P \quad (2.1)$$

$$\text{RZP} = \text{Risikoklasse} \cdot S \quad (2.2)$$

Die Risikoprioritätszahl hat eine Aussagekraft erst im Vergleich mit einem zuvor festgelegten und akzeptierten Restrisiko. Das akzeptierte Restrisiko gilt als nicht zu überschreitender Höchstwert für die RPZ und wird durch das Team, das die Risikobeurteilung erstellt hat, bestimmt. Das Restrisiko sollte so weit wie möglich oder mindestens auf ein Maß unterhalb des festgelegten akzeptierten Restrisikos reduziert werden. (Abbildung 2.20).⁷⁷

⁷⁵ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 15

⁷⁶ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 15

⁷⁷ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 15 f.

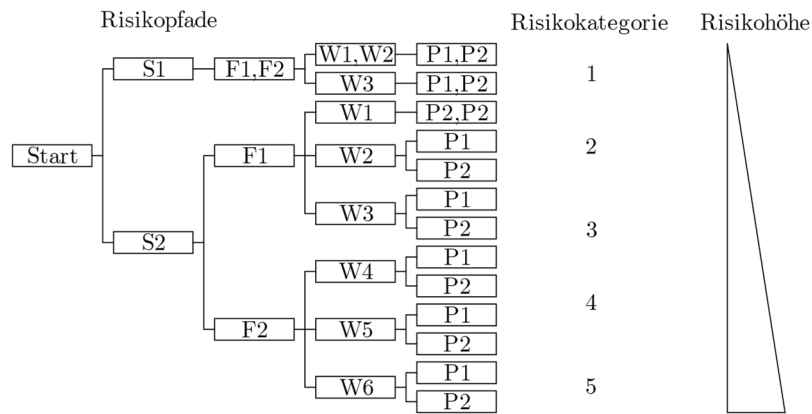


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung eines Risikographen zur Ermittlung einer Risikokategorie, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 15

Risikominderung

Sämtliche identifizierten Gefährdungen, die mit einer RPZ größer als dem vereinbarten Zielwert bewertet werden, sind durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. Die Maßnahmen lassen sich in konstruktive, technische und organisatorische Maßnahmen unterteilen. Konstruktive Maßnahmen beschreiben bauliche Veränderungen an der Maschine. Technische Maßnahmen werden durch technische Hilfsmittel wie zusätzliche Schutzeinrichtungen oder Sensoren bestimmt. Organisatorische Maßnahmen beziehen sich auf die Gestaltung des Arbeitsplatzes.⁷⁸

2.5.2 Maßnahmen zur Risikominderung

Nachdem im Rahmen der MRK die möglichen Kollisionsszenarien identifiziert wurden, gilt die technische Maßnahme der Reduktion von Kräften und Geschwindigkeiten als wichtigste Maßnahme zur Risikominderung. Diese dient zur Einhaltung von Kraft- und Druckgrenzwerten, die bei einer Kollision entstehen.⁷⁹

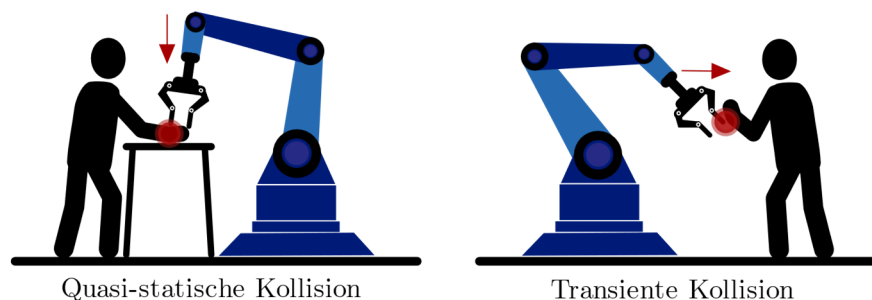


Abbildung 2.21: Klassifizierung von Kollisionssituationen, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 17

⁷⁸ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 16

⁷⁹ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 17

Die potenziellen Kontaktsituationen werden laut ISO/TS 15066 in den transienten und den quasi-statischen Kontakt unterteilt (Abbildung 2.21). Sie unterscheiden sich in der Dauer des Kontakts sowie der Möglichkeit des betroffenen Menschen, sich nach dem Zusammenstoß zu befreien. Der quasi-statische Kontakt dauert länger als 0,5 Sekunden an und der Mensch wird zwischen Roboter und der Umgebung eingeklemmt. Der transiente Kontakt dauert höchstens 0,5 Sekunden und die getroffene Person kann sich nach dem Kontakt zurückziehen. Die Grenzwerte für eine Kollision werden nach der ISO/TS 15066:2016, die den Standard EN ISO 10218-1/2:2012 ergänzt, für 29 spezifische Körperregionen festgelegt.⁸⁰

Risikominderung durch Programmierung

Die Gestaltung des Programms selbst sollte zur Risikovermeidung beitragen, ohne die Leistung erheblich zu beeinträchtigen. Einige der möglichen Maßnahmen sind im Folgenden definiert:⁸¹

- Auf mögliche Quetschstellen soll langsamer zugefahren werden.
- Die Pfadverläufe sollen mit dem gewissen Abstand zur Umgebungsobjekte geplant werden.
- Der Geschwindigkeitsverlauf innerhalb des gemeinsamen Arbeitsraums soll in Abhängigkeit der Position von Personen angepasst werden.
- Zur Vermeidung scherender Kollision soll die Annäherung an ebene Oberfläche möglichst im rechten Winkel zugefahren werden.

Konstruktive und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen

Diese Sicherheitsmaßnahmen stellen häufig auch die kostengünstigeren, einfacher zu implementierenden Maßnahmen zur Risikominderung dar und lassen sich entweder in Bezug auf den Roboter oder den Einsatzbereich definieren:⁸²

- In Bezug auf den Roboter:

Einfache konstruktive Elemente können die Zugänglichkeit von potenziellen Scher- und Quetschstellen erschweren bzw. unmöglich machen.

Die Flächenvergrößerung an kleinen Kontaktflächen ermöglicht die Verteilung von Kollisionskräften auf einen größeren Bereich.

⁸⁰ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 17 f.

⁸¹ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 21

⁸² Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 22 f.

Medienleitungen sollten in einem Kanal entlang des Hauses verlegt werden, was die Gefahr von Schäden an der Anlage oder Verletzungen durch Verfangen des Kabels verringert.

- In Bezug auf den Einsatzbereich

Das Bewegungsbereich des Roboters sollte durch Hinweisschilder sowie die optische Kennzeichnung angegeben werden.

Eine sinnvolle Anordnung des Bedienpanels im MRK-Arbeitsraum ermöglicht eine Übersicht der Stör- und Fehlermeldungen sowie einen sofortigen Zugriff auf die Nothalteinrichtung.

Im MRK-Arbeitsraum sind große vor kleinen Flächen sowie runde vor eckigen Formen zu bevorzugen.

2.5.3 Normen

Der Prozess der Risikobeurteilung und -minderung mit dem Ziel der menschlichen Sicherheit bei der Arbeit mit Robotern wird durch eine Reihe von Normen und Richtlinien unterstützt. Die in Europa verwendeten Normen lassen sich hierarchisch in drei Gruppen klassifizieren (Abbildung 2.22).

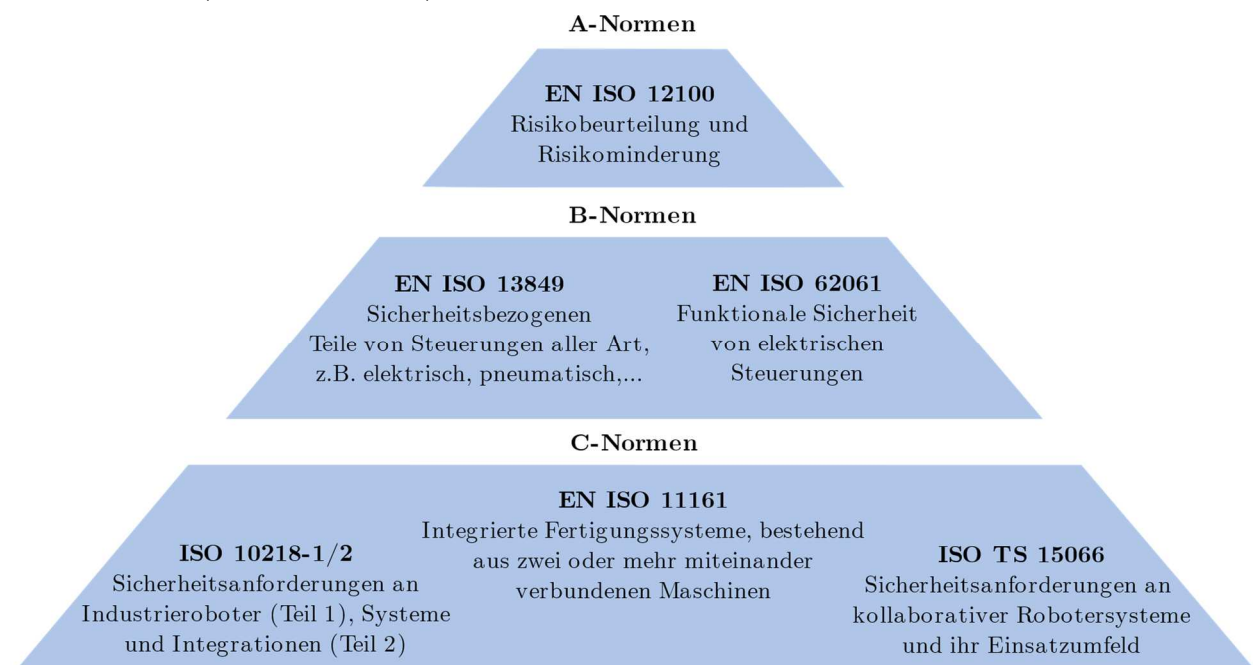


Abbildung 2.22: Relevante Normen aus der Sicht einer MRK-Applikation (Auszug), Quelle: Markis et al. 2016, S. 10

Die einzige existierende und für sämtliche Maschinen verbindliche A-Norm ISO 12100 beschreibt sowohl den Risikobeurteilungsprozess gemäß Maschinenrichtlinie als auch die

bisher gültigen Gestaltungsgrundsätze zur sicheren Konstruktion. B-Normen beschreiben allgemeine Gestaltungsaspekte, die für eine Vielzahl von Maschinen relevant sind. C-Normen sind maschinenspezifisch und behandeln Maßnahmen zur Risikominderung für die Maschine sowie die Anlagen, für die sie gelten.⁸³

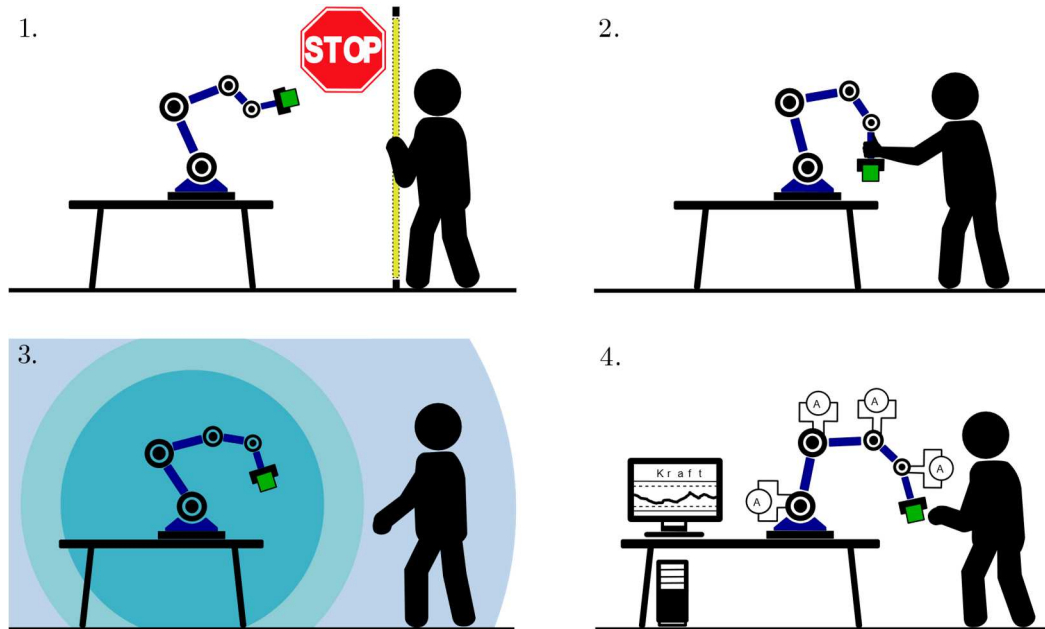


Abbildung 2.23: Schutzprinzipien nach TS 15066: 1. Sicherheitsüberwachter Halt, 2. Handführung, 3. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, 4. Leistungs- und Kraftbegrenzung, Quelle: Ronzhin/Rigoll/Meshcheryakov 2018, S. 98

Von hoher Bedeutung für eine MRK-Applikation ist – neben den roboterspezifischen Normen wie ISO 11161 oder ISO 10218 – die für MRK spezielle Norm ISO/TS 15066. Diese Norm beschreibt vier mögliche Formen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter und adressiert allgemein die Anforderungen an das MRK-Arbeitssystem in Bezug auf die physikalische Umsetzung von Steuerungen und Aktoren, deren Programmierung sowie Betriebsumgebung (Abbildung 2.23) Die vier Kollaborationsformen sind folgendermaßen definiert:⁸⁴

1. **Sicherheitsüberwachter Halt:** Der Roboter stoppt, bevor ein Mensch den gemeinsamen Arbeitsbereich betritt, und startet erst wieder, wenn dieser den Arbeitsbereich verlässt.
2. **Handführung:** Der Roboter wird nur durch den Bediener bewegt und stellt ihm passiv seine Kraft zur Verfügung. Dies kann beim Teaching durch direkte Bewegung des Roboterarms oder bei handgeführten Hebehilfen der Fall sein.

⁸³ Vgl. Markis et al. 2016, S. 11

⁸⁴ Vgl. Markis et al. 2016, S. 11 f.

3. **Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung:** Die Geschwindigkeit des Roboters wird stufenweise reduziert, wenn der Abstand zwischen dem Menschen und dem Roboter abnimmt. Im Zweifelsfall kommt der Roboter zum Stillstand.
4. **Leistungs- und Kraftbegrenzung:** Die bei der Bewegung des Roboters entstehende Kräfte werden so weit begrenzt, dass auch bei einer Kollision keine bleibenden Verletzungen entstehen können. Dies erfolgt durch die Haltung von vordefinierten Leistungen und Fahrgeschwindigkeiten auf akzeptablem Niveau.

Die wichtigsten harmonisierten Normen sind in Anhang A zu finden.

Ähnlich zur ISO 27001, die Anforderungen an allgemeine IT-Systeme festlegt, befasst sich die Normenfamilie IEC 62443 speziell an Industrielle Automatisierungs- und Steuerungssysteme und ist für Anwendung von MRK-Applikationen von besonderer Bedeutung. Sie beschreibt ein Vorgehen zur Risikobeurteilung und -minderung, ähnlich wie ISO 12100, wobei der Fokus auf Informationssicherheit der Maschine steht.⁸⁵

⁸⁵ Vgl. Steger et al. 2018, S. 11 ff.

3 Konzeptentwicklung zum Einsatz von MRI-Arbeitssystemen

Bei jeder neuen Technologie, die in der Produktion eingesetzt werden soll, um sich einen wettbewerbsfähigen Platz am Markt zu sichern, sowohl was das Produkt als auch den Produktionsprozess selbst betrifft, stellt sich die Frage, wie dies am einfachsten ohne großen Planungs-, Zeit- und Investitionsaufwand zu realisieren ist. Das Planen und Einsetzen komplexer Arbeitssysteme, wie die direkte Zusammenarbeit von Mensch und Roboter, stellen dabei eine echte Herausforderung dar. Zum einen gibt es keine ausreichenden empirischen Daten, da diese Form von Arbeitssystemen in der Branche noch nicht weitverbreitet ist. Zum anderen ist der Umsetzungsprozess komplizierter als bei einer Vollautomatisierung, da er von verschiedenen Richtlinien und Normen begleitet wird, die ein sicheres gemeinsames Arbeiten von Mensch und Roboter ermöglichen müssen. Um die Einführung des MRI-Arbeitssystems zu erleichtern, wird in diesem Kapitel ein Konzept vorgestellt, das den Anwender sowohl bei der Auswahl der zu implementierenden Arbeitsplätze als auch bei deren Planung unterstützen soll.

Anmerkung: In folgenden Kapiteln sind die Begriffe „Arbeitsplatz“ und „Arbeitssystem“ als Synonyme zu verstehen. Im Allgemeinen kann ein Arbeitssystem entweder einen einzelnen oder auch mehrere Arbeitsplätze umfassen.⁸⁶ Unter Arbeitssystem wird im Folgenden ein Arbeitsplatz in der Montage verstanden.

3.1 Darstellung des Konzepts

Der gesamte Prozess – von der Auswahl der Arbeitsplätze für die MRI bis hin zu deren Umsetzung – lässt sich im Allgemeinen durch vier Hauptschritte darstellen (Abbildung 3.1).

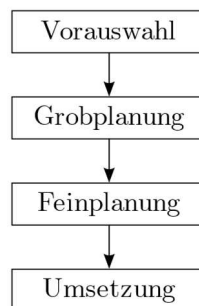


Abbildung 3.1: Allgemeiner Prozess für die Umsetzung des MRI-Arbeitssystems, Quelle: Eigene Darstellung

⁸⁶ Vgl. Dogan 2022, Onlinequelle [29.11.2022]

Jeder dieser Hauptschritte besteht weiter aus verschiedenen Schritten, die während des Implementierungsprozesses verfolgt werden müssen (Abbildung 3.2). Die letzten zwei Hauptschritte sind unternehmensspezifisch und können um zusätzliche Schritte erweitert werden. Daraus folgt, dass der Fokus des Konzepts ausschließlich auf der frühen Planungsphase liegt, welche die Vorauswahl sowie Grobplanung umfasst.

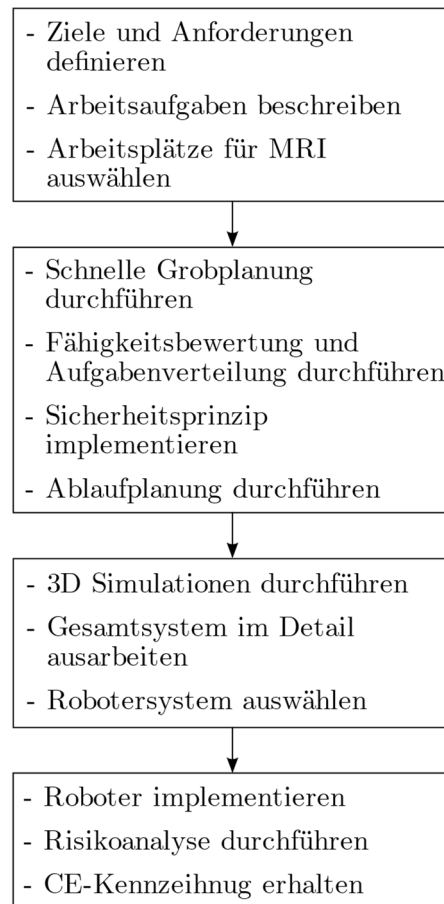


Abbildung 3.2: Allgemeiner Prozess für die Umsetzung des MRI-Arbeitssystems mit wichtigsten Aufgaben, Quelle: Eigene Darstellung

Um eine sinnvolle Auswahl von Arbeitsplätzen für die Planung von MRI, sowie deren Umsetzung zu ermöglichen, ist es notwendig, die Hauptschritte mit weiteren Aufgaben und Entscheidungsprozessen zu verbinden (siehe Abbildung 3.4). So entsteht ein einheitliches Konzept mit Leitlinien und Entscheidungshilfen, das dem Anwender auf einfache Weise bei der Planung helfen kann.

3.1.1 Anforderungen an das Konzept

Die Anforderungen an das Konzept bestehen aus einfachen sowie informativen Leitfäden, die dem Anwender einen umfassenden Zugang zur Auswahl und Planung von Arbeitssystemen im Rahmen der Mensch-Roboter-Interaktion bieten. Auf Basis des Konzeptes sind eine Aussage über mögliche Einsatzstellen in der Montage und die Wahl der geeigneten Interaktionsform möglich. Durch eine grobe Planung ist es möglich, eine optimale Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter vorzunehmen und gleichzeitig eine Vielzahl der Ziele zu erfüllen, die an ein MRI-Arbeitssystem gestellt werden.

Mit der Anwendung des Konzepts wird die Anzahl der Stellen durch den Auswahl- und Planungsprozess reduziert. Ziel ist es, für die Detailplanungsphase jene Arbeitsplätze auszuwählen, die das beste Potenzial für die MRI-Umsetzung aufweisen und den größten positiven Effekt auf die Erfüllung der gesetzten Anforderungen und Ziele haben (Abbildung 3.3).

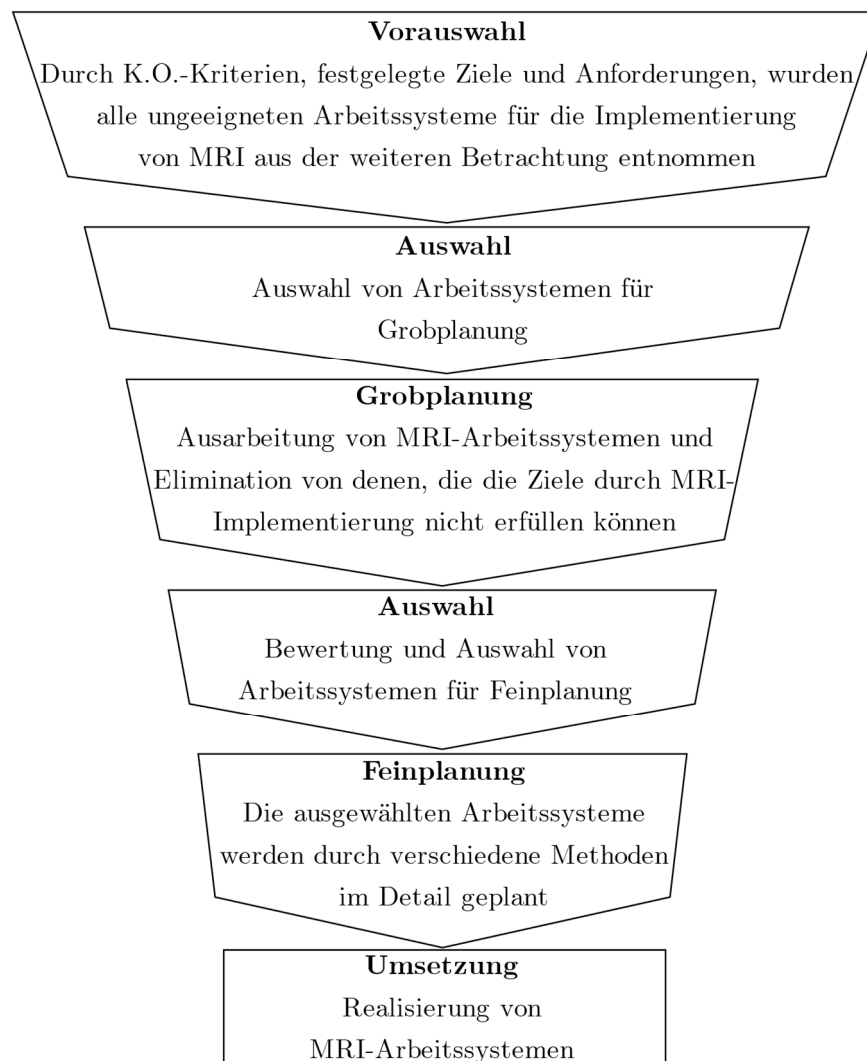


Abbildung 3.3: Anzahl zu analysierender Arbeitsplätze, Quelle: Eigene Darstellung

3.1.2 Ablaufübersicht

Das in Abbildung 3.4 gezeigte Flussdiagramm wird verwendet, um den Prozess der Implementierung von MRI-Arbeitssystemen in der Produktion grafisch darzustellen. Am Diagramm sind die vier großen Schritte ersichtlich, die bereits in Abbildung 3.1 dargestellt sind.

Der erste Schritt, der darauf abzielt, mögliche Arbeitsplätze für die Implementierung des MRI auszuwählen, umfasst die Definition von Zielen und Anforderungen, die Beschreibung der Aufgaben für jeden Arbeitsplatz sowie die Anwendung von Kriterien, anhand derer über die Möglichkeit der Implementierung für den betreffenden Arbeitsplatz entschieden wird. Aus der Gesamtzahl der „n“ analysierten Arbeitsplätze wird die Anzahl „i“ derjenigen eliminiert, bei denen eine MRI-Implementierung entweder nicht oder nur mit großem Aufwand möglich ist. Sie werden nicht weiter berücksichtigt.

Für die restlichen Arbeitsplätze gilt es schließlich, den passenden Interaktionsgrad zu wählen. Dies hängt davon ab, ob sich Mensch und Roboter denselben Arbeitsplatz teilen, gleichzeitig arbeiten und ob sie an derselben Aufgabe oder demselben Produkt arbeiten müssen. Da jede Interaktionsform ihre Vor- und Nachteile aufweist, ist für den ausgewählten Arbeitsplatz mit entsprechendem Interaktionsgrad zu entscheiden, ob dieser durch die Grobphase weiter geplant wird. Dabei werden „j“-Arbeitsplätze von der weiteren Berücksichtigung ausgeschlossen. Für die verbleibenden „n-i-j“-Arbeitsplätze erfolgt eine Grobplanung. Sie findet für jeden Arbeitsplatz separat statt.

Die Grobplanung beginnt mit der Aufteilung der Aufgabe in Montagevorgänge. Für jeden Montagevorgang wird basierend auf der Berechnung entschieden, ob er besser von einem Menschen oder von einem Roboter durchgeführt werden soll. Somit können menschliche und robotische Fähigkeiten entsprechend den Anforderungen der Operationsdurchführung optimal genutzt werden.

Weiterhin ist es notwendig, für den betrachteten Arbeitsplatz ein Sicherheitsprinzip zu wählen, das eine sichere Zusammenarbeit zwischen Mensch sowie Roboter ermöglichen muss. Je nach gewähltem Prinzip werden im Betrieb Grenzen gesetzt, wie etwa die maximal zulässigen Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters oder der minimal zulässige Abstand bei der Zusammenarbeit.

An dieser Stelle ist bereits die Auswahl eines Roboters möglich – ein Schritt, der ansonsten nach der Planung stattfindet. Wird der Roboter an dieser Stelle ausgewählt, lässt sich anhand der Herstellerangaben berechnen, wie viel Zeit der Roboter für bestimmte Aufgaben benötigt. Wird der Roboter nicht an dieser Stelle ausgewählt, werden die Standardwerte für die Berechnung herangezogen. Bei der Planung des Arbeitsablaufs wird die endgültige Entscheidung über die Aufgabenverteilung sowie über die Reihenfolge ihrer

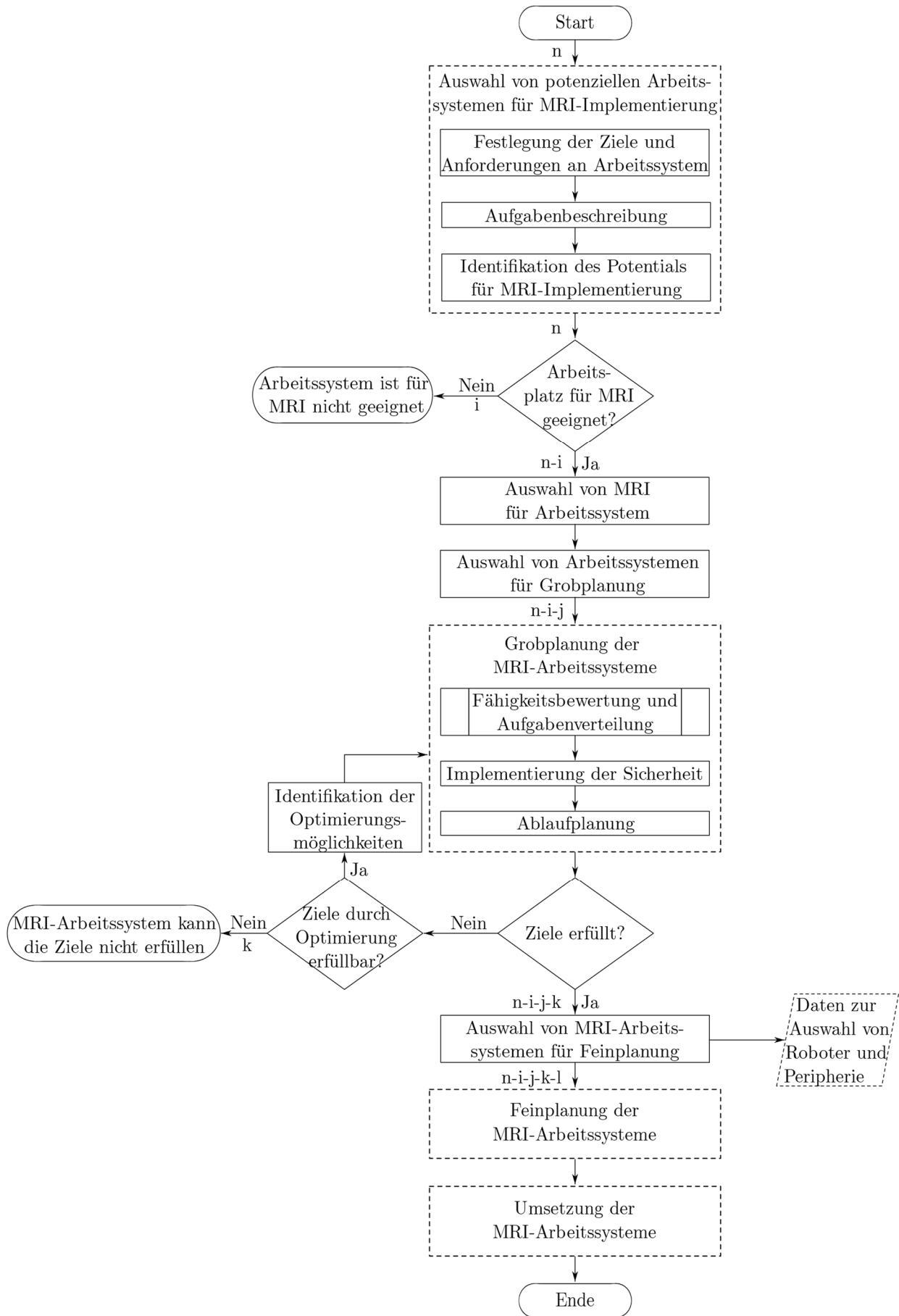


Abbildung 3.4: Ablaufdiagramm zur Implementierung von MRI, Quelle: Eigene Darstellung

Ausführung getroffen. Dadurch ist es möglich, dass dem Roboter Aufgaben zugeordnet werden, die ein Mensch besser erledigen kann. Daraus folgt, dass der Roboter mit Bauteilen arbeiten muss, deren Eigenschaften sich von den geplanten Bauteilen unterscheiden. Da die Masse des Arbeitsteils ein essenzieller Faktor bei der Auswahl eines Roboters ist, ist es notwendig, zu wissen, mit welchen Arbeitsteilen der Roboter arbeiten muss. Am Beispiel der Hochvoltspeicher-Produktion (Kapitel 4) wird gezeigt, dass der Roboter am besten zum Verbinden von Zellen zu einem Stack eingesetzt wird. Es ist ein Roboter auszuwählen, der die Batteriezellen handhaben kann. Wenn aber später im Zuge der Ablaufplanung dem Roboter ein Schritt zugewiesen wurde, bei dem der Roboter mit dem Stack arbeiten muss, wäre eine erneute Auswahl des Roboters erforderlich.

Das MRI-Arbeitssystem wird bei der Ablaufplanung mit der MTM-Zeitmethode beschrieben und simuliert. Gleichzeitig wird für den Roboter die speziell entwickelte MTM-MRK-Sprache auf Basis von MTM-1 verwendet. Anhand der Ergebnisse der Ablaufplanung, wie Durchführungszeiten oder Reihenfolge von Montageoperationen, werden dann die zuvor festgelegten Ziele verifiziert, wonach das MRI-Arbeitssystem entweder zur Feinplanung weitergeführt oder – bei Nichterreichung der Ziele durch Optimierung – erneut ein Grobplanungsprozess durchlaufen wird.

Generell sind nur einige Arbeitsplätze übrig, die für MRI geeignet sind und durch eine detaillierte Planung weitergeplant werden sollten. Je nach Anzahl und Umsetzungsmöglichkeit können eine Bewertung und Auswahl von Arbeitsplätzen für die Feinplanungsphase erfolgen, z. B. nach Arbeitszeiten. Die Anzahl der Plätze für den weiteren Prozess wird um „k“ eliminierte Arbeitsplätze kleiner.

Die Feinplanung des Arbeitssystems ist sowohl Aufgabe als auch Unternehmensspezifität und kann je nach Komplexität und Ressourcen des Unternehmens unterschiedlich umgesetzt werden. In der Regel wird eine solche Planung durch 3D-Simulationen unterstützt und lässt sich nur mithilfe von Experten erfolgreich umsetzen. Je nach ausgewähltem Roboter ist es möglich, vom Hersteller bereitgestellte Software zu verwenden.

3.2 MRK-Implementierungsziele

Hier werden die wichtigen Ziele beschrieben, die zu Beginn der Nutzung des Implementierungskonzepts definiert werden müssen. Sie sind mit Kriterien verknüpft und werden bei der Auswahl potenzieller MRI-Stellen für die weitere Planung verwendet. Sie dienen hier als Ausgangspunkt des Konzepts. Ihre Überprüfung erfolgt nach der Grobplanungsphase. Im Idealfall sind die Ziele bereits nach der ersten, groben Planung des MRI-Arbeitssystems erreicht. In der Praxis können je nach Komplexität des Systems mehrere Iterationen durchgeführt werden, bis die Ziele erreicht sind. Es kann auch vorkommen, dass bei manchen Schnittstellen die gewünschten Ziele durch die Implementierung von MRI nicht erreicht werden können. Diese Arbeitssysteme sind vor Feinplanung auszuschließen.

Dazu kommen Teilziele, die den Arbeitsplatz zukunftssicher und attraktiver machen können, wie z. B. die Möglichkeit mit neuester Technologie zu arbeiten und die Möglichkeit Alleinstellungsmerkmale zu erzielen.⁸⁷

3.2.1 Einführungsgründe für MRK-Systeme

MRI-Arbeitssysteme sind für die Industrie von großer Bedeutung, insbesondere für KMU, weshalb diese Form des Arbeitsprozesses zunehmend an Bedeutung gewinnt. Dies zeigen auch die durchgeführten Studien. Laut einer Studie aus dem Jahr 2016 bewerteten 97 % der Teilnehmer unter 15 Roboterherstellern, 14 Integratoren und fünf Anwenderfirmen aus Österreich und Deutschland das Zukunftspotenzial für MRK als „hoch“ oder „sehr hoch“ und sahen darin die höchsten Einsatzmöglichkeiten in der Montage.⁸⁸

Eine weitere Studie des Fraunhofer-Instituts untersuchte anhand realer Beispiele den Stand der zaunlosen Robotersystemen in der Industrie in Deutschland. Ziel der Studie bestand darin, die Erfahrungen hinsichtlich des Einführungsprozesses, der Mitarbeiterakzeptanz und der Wirtschaftlichkeit in Unternehmen zu ermitteln, die bereits LBR in der Produktion eingesetzt haben.⁸⁹

Für die Studie wurden 25 verschiedene Applikationen ausgewählt und analysiert. Auswahlkriterien waren, dass die Anwendung im Serieneinsatz ist oder in Kürze sein wird und sich der LBR bereits in mehreren Unternehmen im Einsatz befindet. Aus dieser Studie gehen die Gründe für die Implementierung des MRK hervor, die in Abbildung 3.5 dargestellt sind. Obwohl die Studie nur Leichtbauroboter betrachtete, lassen sich die

⁸⁷ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 17

⁸⁸ Vgl. Markis et al. 2016, S. 13

⁸⁹ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 6

Ergebnisse für eine allgemeine MRI-Analyse verwenden.⁹⁰ Die Forschung wurde für MRK durchgeführt, aber ähnliche Gründe, unter Berücksichtigung ihrer Ähnlichkeiten sowie Unterschiede würden auch für andere Interaktionsformen gelten.

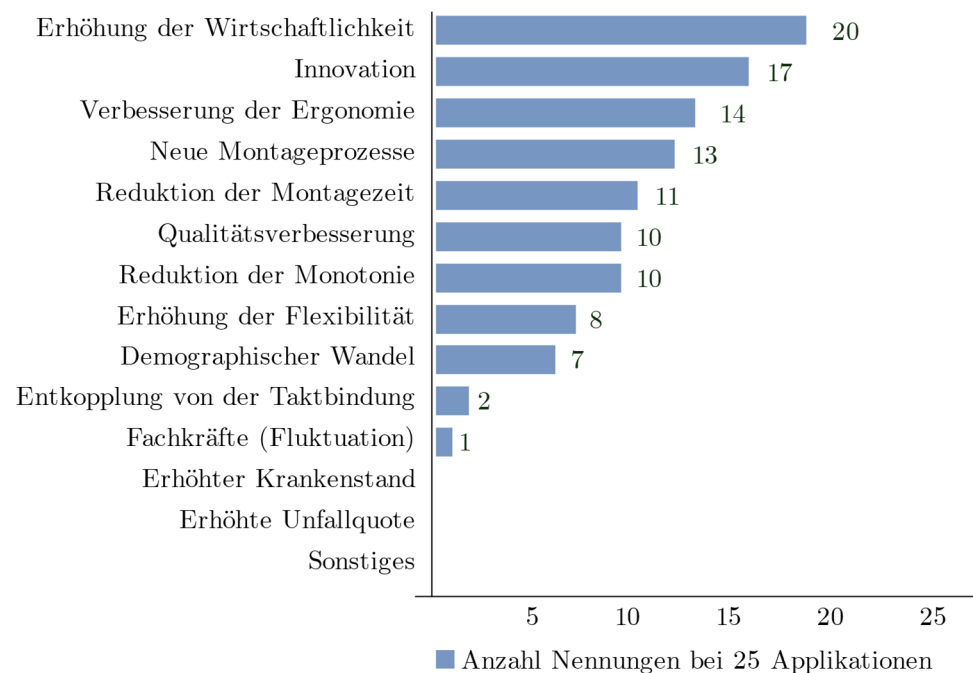


Abbildung 3.5: Applikationsgrund (Mehrfachnennungen möglich), Quelle: Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 17 (leicht modifiziert)

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Steigerung der Wirtschaftlichkeit als häufigster Grund für die Wahl der Applikationsauswahl genannt wurde.⁹¹ Mit MRI-Arbeitssystemen als Bindeglied zwischen manuellen Arbeitssystemen sowie der Vollautomatisierung ist es möglich, eine relativ hohe Flexibilität des manuellen Arbeitssystems beizubehalten und gleichzeitig die hohen Investitionen zu vermeiden, die eine Vollautomatisierung erfordert (Abbildung 3.6).

Obwohl die ergonomische Verbesserung zu einer der wichtigsten Gründe bei der Implementierung von MRI gehört, lässt sich die Zufriedenheit mit der ergonomischen Optimierung nicht durch wirtschaftliche Kennzahlen ausdrücken.⁹² Vor allem in der Automobilindustrie kann die ergonomische Optimierung in den Montageprozessen durch wirtschaftliche Kennzahlen nicht ausgedrückt werden.⁹³ Andererseits bietet die Verbesserung der Ergonomie durch MRI die Möglichkeit der Gestaltung altersgerechter Arbeitsplätze und eine effiziente Beschäftigung bis zum Erreichen der Altersgrenze.⁹⁴

⁹⁰ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 6

⁹¹ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 16

⁹² Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 22

⁹³ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 22

⁹⁴ Vgl. Schröter 2018, S. 1 f.

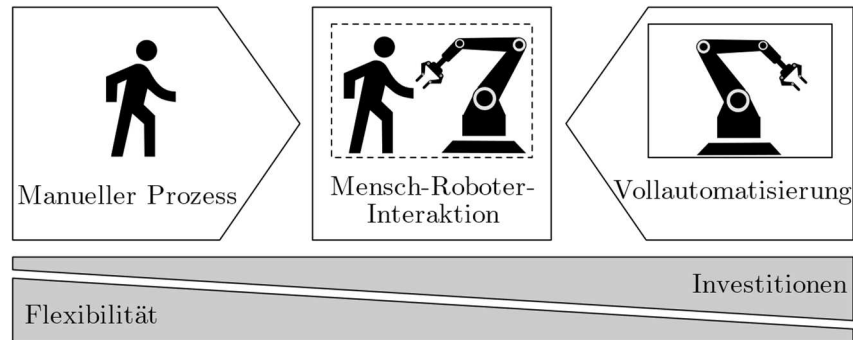


Abbildung 3.6: Mensch-Roboter-Interaktion als Zwischenstufe von manueller Arbeit und Vollautomatisierung, Quelle: In Anlehnung an Neubauer/Heyn 2015

Im allgemeinen Fall sind die Einführungsgründe so verknüpft, dass sie sich gegenseitig implizieren. Dies ergibt sich aus den vielfältigen Vorteilen, die MRI-Arbeitssysteme mit sich bringen. Die wichtigsten Gründe sind in Tabelle 3.1 präsentiert und beschrieben. Es ist wichtig, zu beachten, dass die Gültigkeit der präsentierten Gründe vom Grad der Interaktion sowie davon abhängt, ob ein Industrie- oder ein Leichtbauroboter verwendet wird. Der Einsatz eines Industrieroboters in Interaktionsszenarien, die dies gestatten, ist möglich und die Berechtigung der Verwendung hängt von der auszuführenden Aufgabe ab. Dabei sollte man stets die Vorteile von LBR gegenüber Industrierobotern im Auge behalten (Tabelle 2.2). Zudem bedingen unterschiedliche Interaktionen einen unterschiedlichen Nutzungsgrad der Fähigkeiten des Roboters (Tabelle 2.3).

Tabelle 3.1: Gründe für Umsetzung von MRI in Produktionsprozess in Bezug auf manuelle (M) oder automatisierte (A) Arbeitssysteme, Quelle: Eigene Darstellung

Einführungsgründe	In Bezug auf M/A	Beschreibung
Erhöhung der Wirtschaftlichkeit	M, A (bei geringem Stückzahl)	Abhängig von der zu produzierenden Stückzahl, können mit der optimalen Nutzung von MRI Stückkosten gesenkt werden. ⁹⁵
Innovation	M, A	MRI ermöglicht innovative Ausnutzung der Fähigkeiten von Mensch und Roboter, Erstellung neuer Produktionsprozesse sowie Entstehung neuer Produkte.
Erhöhung der Flexibilität	A	Erhöhung der Stückzahlflexibilität im Vergleich zur Vollautomatisierung (siehe Abschnitt 2.3.4).
Verbesserung der Ergonomie	M	Entlastung der Mitarbeiter, sowohl bei physischen als auch bei psychischen Belastungen (Monotonie). ⁹⁶

⁹⁵ Vgl. Helms/Schraft/Hagele 2002, S. 399

⁹⁶ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 16

Reduktion der Montagezeit	M	Durch optimale Verteilung von Aufgaben können eine Prozessbeschleunigung und damit die Reduktion der Montagezeit erreicht werden. ⁹⁷
Verbesserung der Prozessqualität	M	Prozessqualität kann durch integrierte Prozesskontrolle und Genauigkeit optimiert werden. ⁹⁸
Erhöhung der Prozessstabilität	M	Ohne ganz auf die Unterstützung von Robotern zu verzichten, kann der Mensch den Prozess überwachen und Anpassungen vornehmen. Das kann zu geringeren Stillständen und Materialeinsparungen führen. ⁹⁹
Erhöhung der Produktivität	M	Durch die Reduktion der Montagezeit, Erhöhung der Prozessstabilität und Einsparung von Material kann eine höhere Produktivität erreicht werden.
Erhöhung der Produktqualität	M	Durch Stärken von Interaktionspartnern können die Aufgaben besser und präzise ausgeführt werden.
Raumersparnis	A	Durch den Wegfall der Schutzzäune und Teilung von gemeinsamen Arbeitsraum erfolgt eine Raumersparnis.
Vergrößerung von Bewegungsfreiheit der Werker	A	Durch den Wegfall der Schutzzäune erfolgt eine größere Bewegungsfreiheit der Werker. Das hat zur Folge eine bessere Arbeit mit großen Werkteilen. ¹⁰⁰

3.2.2 Einführungshindernisse für MRK-Systeme

Die Ergebnisse der bereits erwähnten Studie zeigen auch, dass die Umsetzung von MRK-Arbeitssystemen gewisse Hindernisse aufweisen. Als Fazit lässt sich festhalten, dass der normativ angeblich bereits ausgearbeitete Aspekt der Sicherheit das größte Hindernis für die Umsetzung der MRI darstellt (Abbildung 3.7).¹⁰¹ Aus Sicht des Roboterherstellers erwiesen sich von insgesamt 16 analysierten Hindernissen drei als die größten Hindernisse auf dem Weg zu einer größeren Verbreitung von MRI-Arbeitssystemen. Dazu zählen die Komplexität der anwendungsspezifischen Risikobeurteilung, Unklarheiten bei der

⁹⁷ vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 33

⁹⁸ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 33

⁹⁹ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 4

¹⁰⁰ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 5

¹⁰¹ Vgl. Markis et al. 2016, S. 13

Interpretation und Umsetzung von Vorgaben aus relevanten Normen sowie die Notwendigkeit einer Neubeurteilung und -zertifizierung nach jeder Änderung sowie Anpassung der Anwendung.¹⁰²

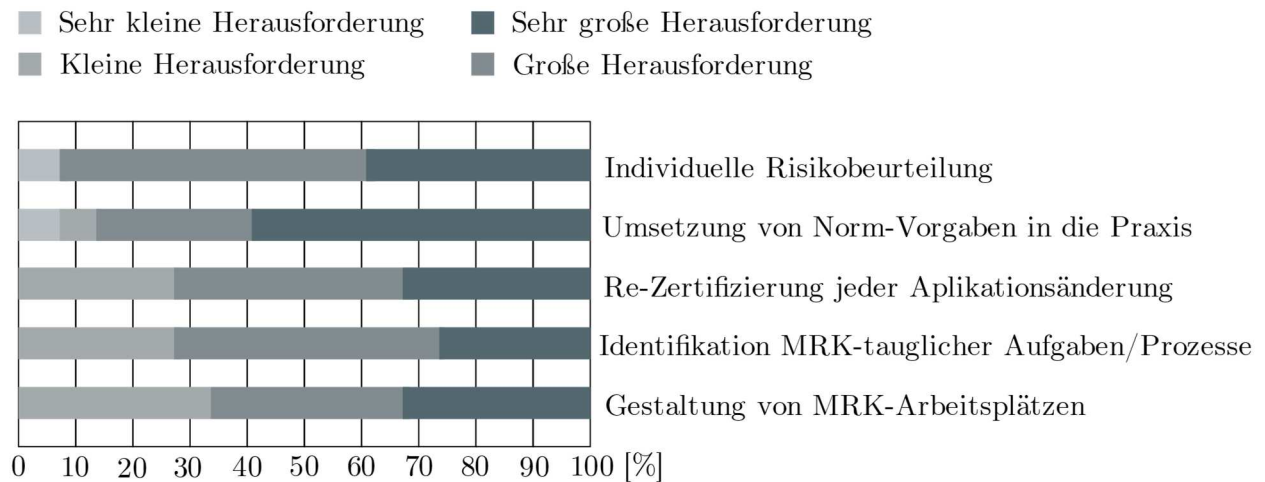


Abbildung 3.7: Mensch-Roboter-Kollaboration als Zwischenstufe von manueller Arbeit und Vollautomatisierung, Quelle: Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 13 (leicht modifiziert)

Mögliche MRK-Hemmnisse können auch durch Maschine, Material, Milieu, Prozess und Wirtschaftlichkeit vorliegen.¹⁰³ Dazu gehören unter anderem Beschränkungen der maximal erlaubten Geschwindigkeit des Roboters sowie sehr anspruchsvolle und meist unrentable Arbeiten mit elastischen und sehr langen Teilen. Auch die Notwendigkeit, den Arbeitsplatz zu verlegen, kann problematisch sein, wenn dieser sich an Orten befindet, an denen Sicherheitsmaßnahmen die Sicherheit der Arbeitnehmer nicht gewährleisten können.¹⁰⁴

3.2.3 Erhöhung der Wirtschaftlichkeit

Das Hauptziel bei der Automatisierung von Arbeitssystemen in der industriellen Produktion bildet fast immer die Erzielung wirtschaftlicher Vorteile durch eine Reduzierung der Produktionskosten.¹⁰⁵ Der Einsatz von MRI-Arbeitssystemen in der Produktion bietet das Potenzial zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und wird in der Regel nicht nur von Investitionskosten, sondern auch von erreichbaren Taktzeiten sowie erzielbaren Stückzahlen bestimmt. Allerdings stoßen klassische Abschreibungsrechnungen, die Grundlage für Investitionsentscheidungen, bei MRI-Arbeitssystemen an ihre Grenzen und es stehen meist keine Bewertungsmethoden zur Verfügung. Auch die positiven

¹⁰² Vgl. Markis et al. 2016, S. 13

¹⁰³ Vgl. Müller et al. 2019, S. 326

¹⁰⁴ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 35 f.

¹⁰⁵ Vgl. Müller et al. 2019, S. 334

Auswirkungen einer optimierten Arbeitsergonomie, einer verbesserten Produktqualität sowie einer erhöhten Stückzahlflexibilität sind im Vorfeld schwer zu quantifizieren.¹⁰⁶

Anhand der unterschiedlichen Werte von Kosten der Arbeitssysteme lassen sich gewisse Rückschlüsse ziehen. Somit sind manueller und automatisierter Produktion in Bezug auf Fix- und Dauerkosten gegensätzliche Eigenschaften zuzuschreiben (Abbildung 3.8). Fixkosten stellen Kosten dar, die unabhängig von der Produktionsmenge sind (z. B. Strom, Miete etc.). Variable Kosten sind variable Kosten, die von der Produktionsmenge abhängen (z. B. Materialkosten, Transportkosten usw.).¹⁰⁷

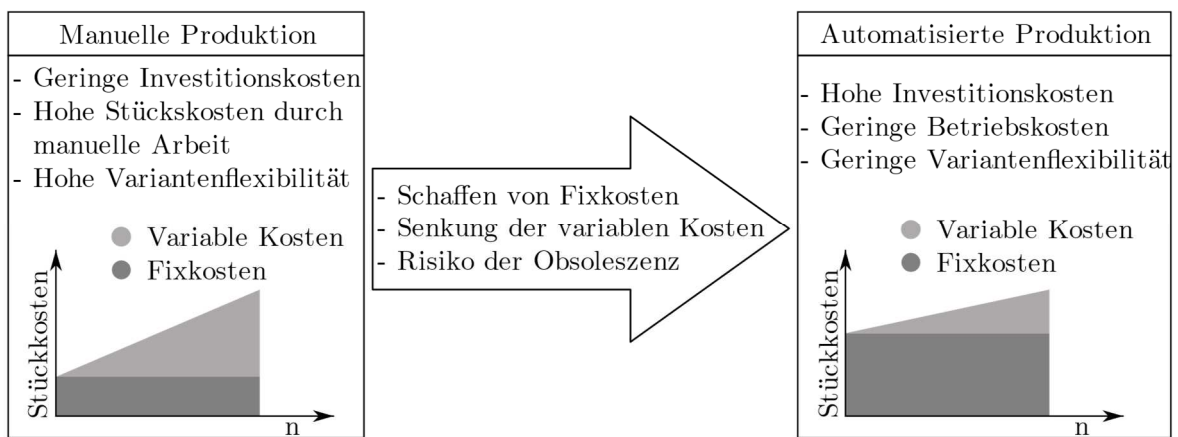


Abbildung 3.8: Variable und fixe Stückkosten manueller und automatisierter Produktionen, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 335

Manuelle Arbeitssysteme zeichnen sich in der Regel durch einen sehr geringen Investitionsbedarf aus, was zu sehr geringen Fixkosten führt. Die manuelle Fertigung ist sehr flexibel und vielseitig, aber es gibt erhebliche variable Stückkosten, da sämtliche Arbeiten von Hand ausgeführt werden. Die Vollautomatisierung führt in der Regel zu einer deutlichen Erhöhung der Fixkosten. Überdies verursacht die Automatisierung einen erheblichen Engineering-, Integrations- und Inbetriebnahmeaufwand. Sie ist meistens unflexibel und weist ein hohes Obsoleszenzrisiko auf. Allerdings kommt es im Vergleich zu manuellen Arbeitssystemen zu einer deutlichen Reduzierung der variablen Stückkosten.¹⁰⁸

¹⁰⁶ Vgl. Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 24

¹⁰⁷ Vgl. Müller et al. 2019, S. 335

¹⁰⁸ Vgl. Müller et al. 2019, S. 335

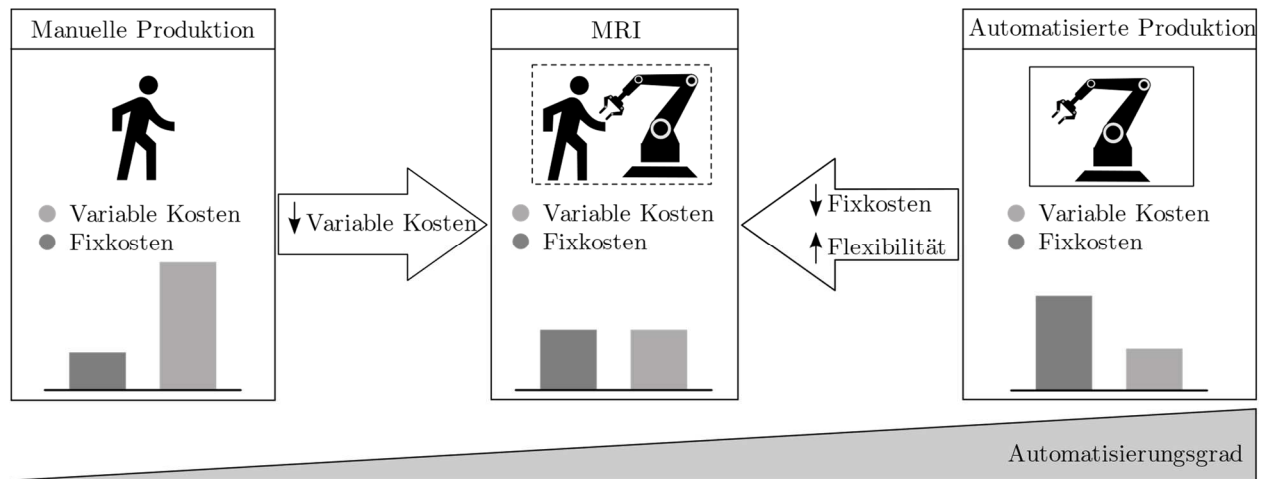


Abbildung 3.9: MRK als Mittelweg zwischen manueller Produktion und Vollautomatisierung, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 336

Bei den fixen und variablen Stückkosten liegt MRI in der Mitte zwischen rein manueller und vollautomatisierter Fertigung (Abbildung 3.9). Im Vergleich zur manuellen Fertigung, bei der die Stückkosten konstant und unabhängig vom Produktionsvolumen sind, bieten teil- und vollautomatisierte Lösungen das Potenzial zur Kostenreduzierung bei größeren Produktionsvolumen (Abbildung 3.10). Dieses Potenzial ist besonders dort groß, wo eine vollständige Automatisierung wirtschaftlich nicht realisierbar ist.¹⁰⁹

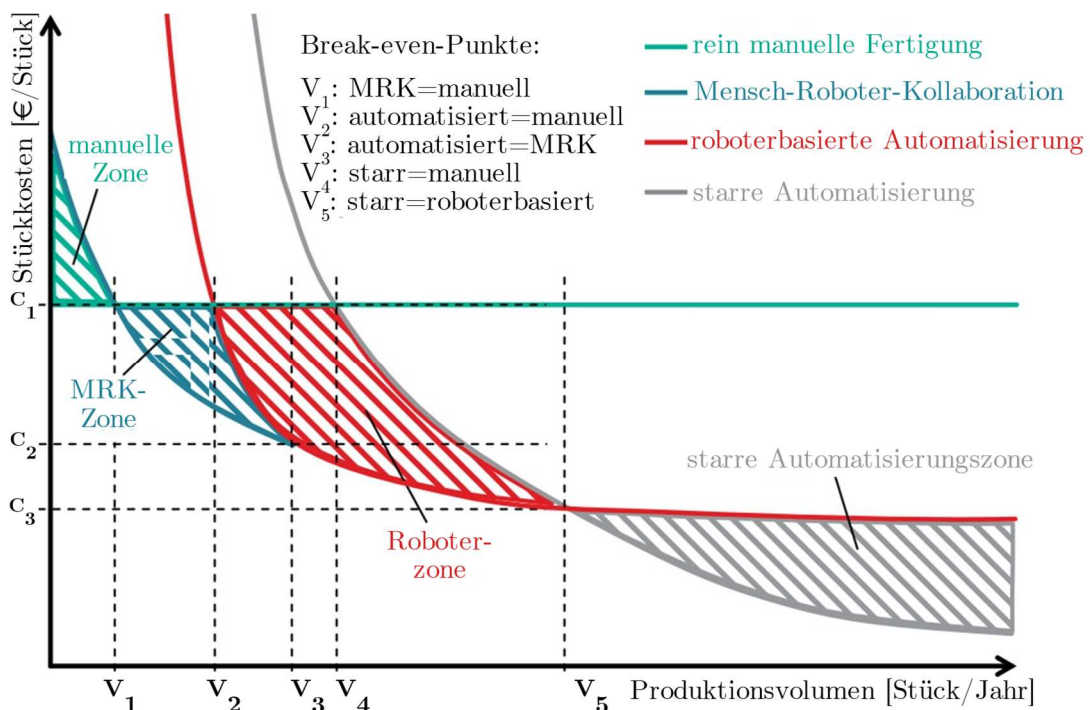


Abbildung 3.10: Wirtschaftliche Anwendbarkeit von verschiedenen Produktionsparadigmen, Quelle: Markis et al. 2016, S. 9 (leicht modifiziert)

¹⁰⁹ Vgl. Müller et al. 2019, S. 336

Die Anschaffung eines Robotersystems bildet eine langfristige Investition, und daher ist es wichtig, zu beachten, dass ein großer Teil der Kosten nicht mit der Anschaffung des Roboters selbst zusammenhängt. Bei der Beurteilung der Rentabilität ist es deshalb essenziell, den gesamten Lebenszyklus der Anlage zu berücksichtigen. Dazu zählt der Aufwand für die Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme des Systems. Folglich ist es notwendig, die Methode der Betrachtung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus anzuwenden, wie z. B. die Ermittlung der Lebenszykluskosten bzw. Life Cycle Costing (LCC) (Abbildung 3.11).¹¹⁰

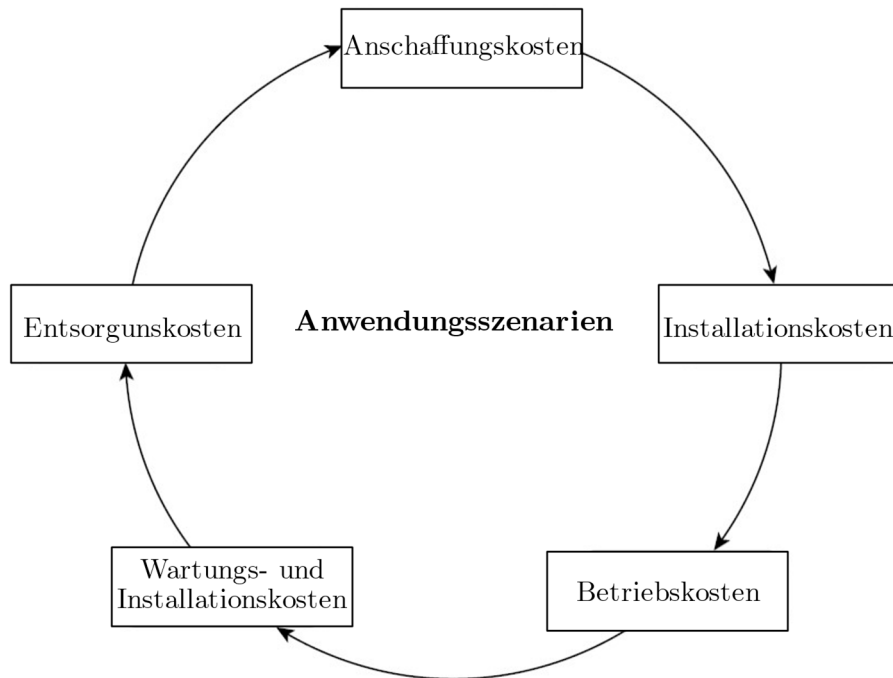


Abbildung 3.11: Elemente einer Lebenszykluskostenrechnung, Quelle: Fraunhofer IMW 2019, S. 39 (leicht modifiziert)

Diese Methode lässt sich je nach Bedarf für eine genauere Überprüfung der Wirtschaftlichkeit von MRI-Arbeitssystemen einsetzen. Allerdings kann im Rahmen der frühen Planungsphase eine grobe Kostenschätzung stattfinden, während die Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit des Zeitgewinns durch die Implementierung des Roboters und damit der Produktionssteigerung kalkuliert werden kann.

In vollautomatisierten Arbeitssystemen machen die Roboterkosten lediglich ein Drittel bis ein Fünftel der Gesamtinvestition aus. Gleichzeitig ergeben sonstige Kosten zwischen zwei Drittel und vier Fünftel der Gesamtkosten. Diese grobe Abschätzung mit einer drei- bis fünffachen Erhöhung der Kosten der Gesamtinvestition lässt sich bei kollaborierenden Robotern und damit bei der Entscheidung über die Implementierung von MRI-Arbeitssystemen heranziehen.¹¹¹

¹¹⁰ Vgl. Müller et al. 2019, S. 338

¹¹¹ Vgl. Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 17

3.2.4 Verbesserung der Ergonomie

Der Begriff „Ergonomie“ geht auf das Jahr 1857 zurück und wurde von Wojciech Jastrzębowski geprägt. Die International Ergonomics Association (IEA) definiert Ergonomie als ein Gebiet, das wissenschaftlich erforscht, wie Menschen mit anderen Systemen interagieren, und sowohl die Humanisierung als auch die Rationalisierung der Arbeit vorantreibt.¹¹²

Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems nehmen laut Gesundheitsbericht der DAK (Deutsche Angestellten Krankenkasse) den ersten Platz unter den verbreitetsten Krankheitsarten ein und machten 2021 mit 22,1 % den größten Anteil am Krankheitsstatus aus. Die daraus resultierenden Kosten für Unternehmen sind nicht unerheblich. Daher ist es sinnvoll, wenn die MRI-Lösung Werker von schwieriger oder ergonomisch ungünstiger Arbeit befreit. Neben der körperlichen Anstrengung bedeutet eine sehr monotone Arbeit auch eine große psychische Belastung für den Menschen. Der Einsatz von MRI-Lösungen, insbesondere MRI-3 und MRI-4, kann maßgeblich zur Verbesserung der Ergonomie beitragen und somit den Krankenstand reduzieren und die Mitarbeiterzufriedenheit erhöhen.¹¹³

Bei der Planung eines Arbeitssystems, in dem Mensch und Roboter zusammenarbeiten müssen, sollte der Mensch im Mittelpunkt stehen, insbesondere wenn es um die MRK geht. Mit einem solchen Arbeitssystem kann der Roboter Aufgaben übernehmen, die für den Menschen ergonomisch ungünstig sind. Bei bestehenden manuellen Arbeitssystemen kann die Notwendigkeit einer MRI-Planung auf Ermittlung der ergonomischen Arbeitsbedingungen basiert werden. Eine subjektive Einschätzung der körperlichen Beanspruchungen und Belastungen kann mithilfe einer Mitarbeiterbefragung stattfinden.¹¹⁴ Ergonomie lässt sich aber auch objektiv bestimmen, was gerade für ein in Planung befindliches Arbeitssystem wichtig ist, für das noch keine empirischen Daten vorliegen.

Für die Analyse und Bewertung der Ergonomie am Arbeitsplatz bestehen verschiedene objektive Verfahren, die entweder manuell oder durch Software durchgeführt werden können. Eine mögliche Liste dieser Verfahren ist in Anhang B zu finden.

¹¹² Vgl. Müller et al. 2019, S. 332

¹¹³ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 31

¹¹⁴ Vgl. Staut, Onlinequelle [06.09.2022]

3.2.5 Verkürzung der Montagezeit

Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter kann die Montagezeit erheblich verkürzen, wenn Montagetätigkeiten entsprechend den Fähigkeiten der Interaktionspartner zugewiesen werden und somit die Aufgaben mit minimalem Zeitaufwand ausgeführt werden können. Zudem kann auch eine Minimierung der Leerzeiten erreicht werden. Bei bestimmten Interaktionsszenarien, bei denen Aufgaben gleichzeitig stattfinden können, wirkt sich die parallele Ausführung der Aufgaben direkt auf die Verkürzung der Montagezeit aus. Die Verkürzung von Montagezeit ist weiterhin mit erhöhter Produktivität sowie Wirtschaftlichkeit verbunden, was die Erfüllung dieses Ziels äußerst wichtig macht.

Ausführungszeiten im Planungsprozess lassen sich auf unterschiedliche Weise ermitteln. Für bestehende Arbeitssysteme können sie direkt gemessen werden. Dies kann entweder durch direkte Messungen aus dem Produktionsprozess oder durch den Aufbau eines Testarbeitssystems erfolgen. In der Planungsphase von hybriden Arbeitssystemen fehlt aber oft die Möglichkeit, die Zeit des Roboters oder gar beider Interaktionspartner zu messen. Deshalb ist es notwendig, diese Zeiten mit einer der Methoden zu ermitteln, mit denen sich der Arbeitsprozess simulieren lässt. In frühen Planungsphasen ist der Einsatz komplizierter Softwarelösungen meist eine zeitlich und wirtschaftlich anspruchsvolle Lösung. Außerdem genügt es, in diesem Planungsstadium die Zeit grob abzuschätzen und darauf aufbauend eine Entscheidung über den weiteren Planungsprozess zu treffen. Eine der Methoden, die es auf praktische und einfache Weise ermöglicht, die Zeit abzuschätzen sowie die Reihenfolge der Ausführung von Aufgaben zu planen, ist das System der vorgegebenen Zeiten (SvZ), das in Abschnitt 3.7.3 beschrieben wird.

3.2.6 Verbesserung der Qualität

Unter Qualität werden hier sowohl die Qualität des Produktes als auch die Qualität des Arbeitsprozesses zu verstehen. Hängt die Qualität des Prozesses oder Produkts von der Genauigkeit der Bewegung ab, so lässt sich durch die Übernahme dieser Aufgaben durch den Roboter eine Qualitätssteigerung erreichen. Gleiches gilt für Aufgaben mit vielen Wiederholungen. Der Mensch ist bei der Arbeit Fehlern und Ermüdung ausgesetzt, was zu Inkonsistenz führen kann. Der Einsatz von Robotern für diese Arbeitsgänge führt zu einer Stabilisierung des Prozesses, was den Nacharbeitsbedarf weiter reduziert und folglich Zeit, Ressourcen und Material spart.

3.3 Aufgabenbeschreibung

Für die Auswahl von Arbeitsplätzen für den möglichen Einsatz von MRI sind sowohl Informationen über die am Arbeitsplatz ausgeführten Aufgaben als auch über die verwendeten Arbeitsteile notwendig. Bei Aufgaben genügen eine grobe Beschreibung der Abarbeitungsreihenfolge sowie eine Beschreibung der Aufgaben selbst. Die notwendigen Informationen zu den Aufgaben an den Arbeitsplätzen finden sich in Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Informationen über Arbeitssystemen, Quelle: Eigene Darstellung

Bauteil	Ergonomie	Teilebereitstellung	Montageprozess
<ul style="list-style-type: none"> • Masse • Größe • Form • Steifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • physische Belastung (z. B. schwere Teile; hohe Kräfte) • psychische Belastung (z. B. monotone Aufgaben, präzise Arbeit, zeitaufwendig) • gesundheitsschädlich (z. B. Substanzen, Gase) 	<ul style="list-style-type: none"> • positioniert und orientiert bereitgestellt (leicht automatisierbar) • unregelmäßig (nicht prozesssicher automatisierbar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Öfter Prozessänderungen (Anforderung nach Flexibilität) • Taktzeit • Einschränkungen des Arbeitsraum • Stückzahl

3.4 Identifikation des Potenzials für die Implementierung von MRI-Systemen

Die Automatisierung eines manuellen Arbeitsplatzes kann entweder in Richtung Vollautomatisierung oder in Richtung hybrider Arbeitssysteme gehen. Gleichzeitig ist es wichtig, zu wissen, dass MRK-Systeme eine vollständige Automatisierung in der Produktion nicht ersetzen sollen und können, sondern den Lösungsumfang technischer Systeme zur Umsetzung des Produktionsprozesses erweitern. Für die endgültige Entscheidung müssen beide Möglichkeiten analysiert werden. Diesbezüglich erweist es sich als notwendig, die Vor- und Nachteile der einen und anderen Automatisierungsform gegenüberzustellen. (Abbildung 3.12).¹¹⁵

Daten und Erfahrungen aus dem bestehenden Prozess lassen sich vorteilhaft nutzen. Dazu gehören Randbedingungen bzgl. Variantenvielfalt, Materialbereitstellung, aber auch Einschränkungen, z. B. räumliche Gegebenheiten. Mögliche MRK-Barrieren können Maschine, Material, Umgebung, Prozess und Kosteneffizienz darstellen.¹¹⁶

¹¹⁵ Vgl. Müller et al. 2019, S. 8

¹¹⁶ Vgl. Müller et al. 2019, S. 324

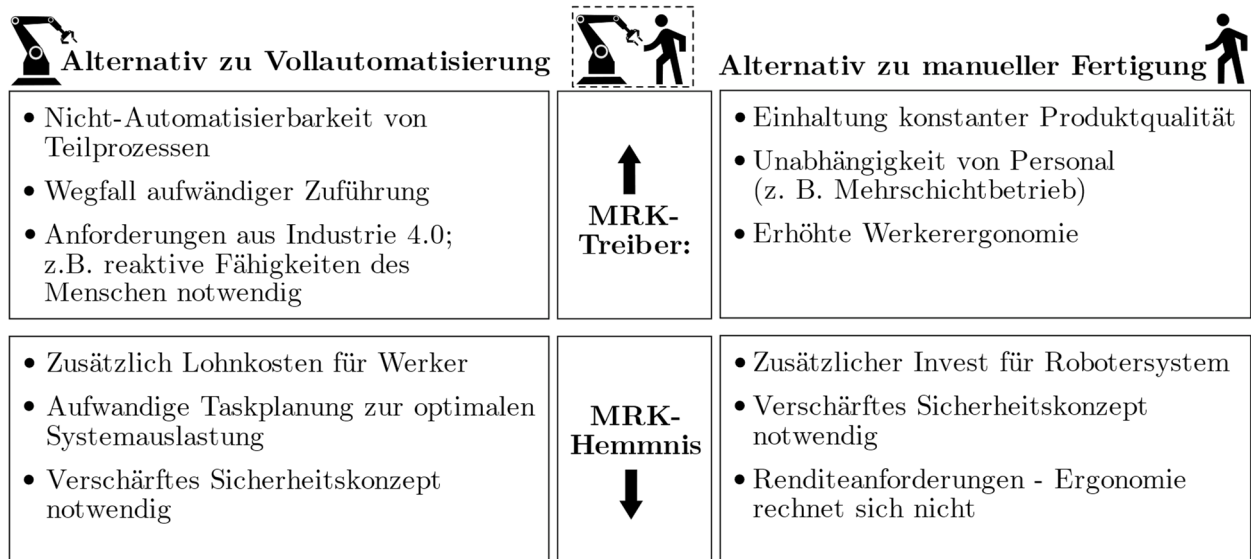


Abbildung 3.12: MRK-Treiber und -Hemmnisse als Alternative gegenüber einer manuellen Fertigung oder einer Vollautomatisierung, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 9

Einige der wichtigsten Faktoren, welche die Möglichkeit der Implementierung von MRK-Arbeitssystemen beeinflussen, sind:¹¹⁷

- **Geschwindigkeit**

Bei MRI-Arbeitssystemen kann sich der Roboter nicht mit hoher Geschwindigkeit bewegen. Insbesondere die Sicherheitsbegrenzung der Arbeitsgeschwindigkeit auf 250 m/s bei MRK gilt als technisch limitierender Faktor für ein Arbeitssystem.

- **Taktzeit**

In der Automobilindustrie haben die Anlagen sehr kurze Taktzeiten und wenn ein Industrieroboter durch LBR ersetzt wird, geht das meist zulasten der Taktzeit. Überdies ist es wichtig, zu beachten, dass einige manuelle Prozesse auch schneller ablaufen können und LBR den Arbeitsablauf der Mitarbeiter stören kann. Durch eine optimale Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter sowie paralleles Arbeiten lassen sich jedoch deutlich kürzere Durchlaufzeiten im Vergleich zur manuellen Fertigung erzielen.

- **Sicherheit**

Bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter rangiert die Sicherheit an erster Stelle. Sicherheit bildet daher eine Mindestanforderung bzw. ein Ausschlusskriterium für eine Konzeptlösung. Im allgemeinen Fall bezieht sich Sicherheit auf jeden Aspekt des Arbeitssystems von MRI.

¹¹⁷ Vgl. Müller et al. 2019, S. 324 ff.

- **Arbeitsraum**

In der Praxis stellt der Arbeitsraum eine große Restriktion dar. Viele Fabriken sind im Laufe der Jahre durch immer neuere Produkte, kürzere Produktlebenszyklen und Variantenvielfalt stark an ihre räumlichen Grenzen gestoßen. Manchen Prozessen steht dadurch lediglich ein Minimum an Arbeitsraum zur Verfügung, sodass dies bei der Auslegung eines MRI-Arbeitsplatzes beachtet werden muss, insbesondere bei MRI-1.

- **Flexibilität**

Eine andere Sache, die auch beachtet werden sollte, ist die Notwendigkeit der Flexibilität und Produktionszyklen. Wenn gleichbleibende Produktionszyklen von mehr als vier Jahren vorliegen, ist eine automatisierte Produktion zu überlegen.¹¹⁸

- **Akzeptanz**

Beim Einfügen eines Roboters in den Produktionsprozess spielt Akzeptanz des Werkers auch eine essenzielle Rolle. Nur durch Offenheit kann eine erfolgreiche Mensch-Roboter-Kollaboration eingeführt werden. Eine grundlegende Abneigung gegen Veränderungen oder die Zusammenarbeit mit einem Roboter ist ein K.o.-Kriterium.

Allgemein soll die Zusammenarbeit menschengerecht gestaltet werden. Der Mensch kann Montageoperationen übernehmen, die eine hohe Flexibilität, Lernfähigkeit, Mobilität und Anpassungsfähigkeit verlangen, und dem Roboter Aufgaben mit hoher Genauigkeit, hoher Qualität und hohen Lasten übergeben werden. MRK-Arbeitsplatz lässt sich so planen, dass entweder der Roboter immer auf den Mensch wartet oder der Mensch wartet auf den Roboter. Der zweite Fall kann angenehmer für den Mensch sein, aber dafür ggf. zu Taktzeitverlusten führen.¹¹⁹

3.4.1 Kriterien zur Auswahl von MRI-geeigneten Arbeitssystemen

Abschließend lassen sich alle diese Anforderungen als Kriterien darstellen (Tabelle 3.3). Sie liefern allerdings keine eindeutigen Entscheidungen, sondern Leitlinien, die zunächst dabei helfen sollen, geeignete Arbeitsplätze für die MRI-Weiterplanung auszuwählen, und solche, die es nicht sind, zu eliminieren. In der Praxis bedeutet dies, dass für jeden Arbeitsplatz Kriterien angelegt und anhand des Umsetzungsaufwandes entschieden werden muss, ob die MRI an dem betreffenden Arbeitsplatz eingesetzt werden kann (siehe Abschnitt 5.1.5). Die Kombination verschiedener Kriterien für den betrachteten

¹¹⁸ Vgl. Fraunhofer IMW 2019, S. 32

¹¹⁹ Vgl. Müller et al. 2019, S. 327 ff.

Arbeitsplatz kann oft zu einem notwendigen Kompromiss führen. Diese Kriterienliste kann je nach Besonderheiten des Arbeitsplatzes erweitert werden kann. In diesem Fall obliegt es dem Anwender, anhand sämtlicher Informationen über die MRI-Arbeitssysteme in Abhängigkeit von den neu geschaffenen Kriterien über die Komplexität der Implementierung zu entscheiden.

Tabelle 3.3: Kriterien für die Entscheidung über die Eignung eines Arbeitssystems für die MRI-Umsetzung, Quelle: Eigene Darstellung

Eignung des Arbeitssystems für MRI-Umsetzung	Kriterium
K.O.-Kriterien: MRI-Arbeitssysteme sind nur mit einem sehr großem Aufwand realisierbar	1. Hohe Bewegungsgeschwindigkeiten sind notwendig 2. Sehr kurze Taktzeiten sind notwendig 3. Gefährdung der Werker im Arbeitsprozess z. B. durch große Hitze, schädliche Gase oder Werkstücke mit scharfen Kanten 4. Lange oder schwere Bauteile müssen gehandhabt werden 5. Ungeordnete Bereitstellung der Bauteile 6. Schlechte Akzeptanz am Arbeitsplatz 7. Unterschiedliche Montageschritte und/oder Bauteile, die unterschiedliche Effektoren und/oder Werkzeugen benötigen
MRI-Arbeitssysteme sind realisierbar, aber vielleicht nicht die beste Lösung	8. Arbeitsplatzverlegung aufgrund von Sicherheitsstandards nötig 9. An den Werkstücken sind biegeschlaife Komponenten angebracht 10. Es liegen gleichbleibende Produktionszyklen von mehr als vier Jahren vor 11. Platzbedarf muss wesentlich erhöht werden
MRI-Arbeitssysteme sind bei diesen Kriterien bevorzugt	12. Schlechte Ergonomie – monotone oder hochpräzise Arbeit erforderlich, Handhabung von schweren oder gefährlichen Bauteilen 13. Produktionsflexibilität ist notwendig, es liegen kurze Produktionszyklen vor 14. Prozess- und/oder Produktqualität kann durch Genauigkeit gesteigert werden 15. Produktionsprozess kann durch Automatisierung beschleunigt werden 16. Eine Parallelisierung der Arbeit von Mensch und Roboter ist möglich 17. Bauteile liegen geordnet vor 18. Dritte Hand ist erforderlich

3.5 Auswahl der Mensch-Roboter-Interaktionsart

An dieser Stelle, in der frühen Planungsphase, gilt es zu entscheiden, welches Interaktionsszenario den gesetzten Zielen und Anforderungen entspricht sowie den gewählten Kriterien nicht widerspricht. Dies hängt von der geforderten Arbeitsausführung am beobachteten motorischen Arbeitsplatz ab, d. h. davon, ob Mensch und Roboter sich denselben Arbeitsplatz teilen, gleichzeitig arbeiten sollen sowie von der Möglichkeit oder Notwendigkeit von Körperkontakt bei der Ausführung von Arbeitsaufgaben. Der Fokus liegt weiterhin auf der Mensch-Roboter-Kollaboration, aber wenn dies nicht realisierbar ist, muss ein niedrigeres Interaktionsgrad ausgewählt werden. Ein einfacher Ablauf zur Auswahl des richtigen Interaktionstyps ist in Abbildung 3.13 ersichtlich.

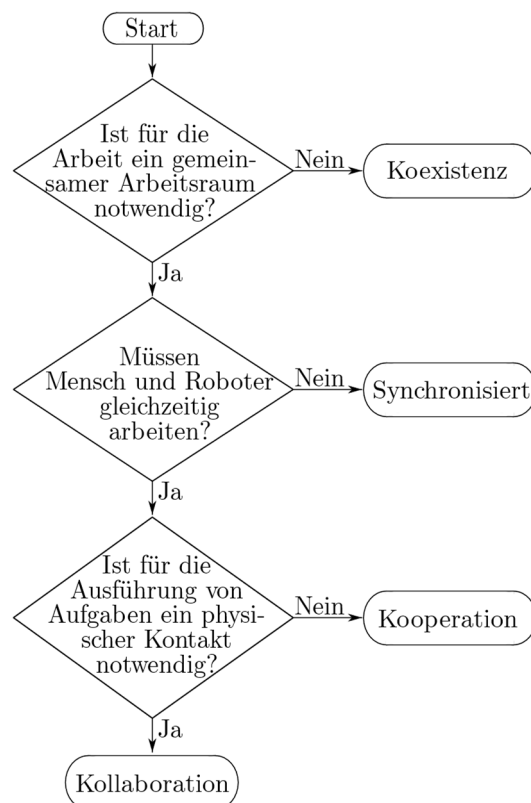


Abbildung 3.13: Auswahl des Mensch-Roboter-Interaktionstyps für ein Arbeitssystem, Quelle: In Anlehnung an Behrens et al. 2015

3.6 Auswahl von Arbeitssystemen für die Grobplanung

Jedes Interaktionsszenario verfügt über Vor- und Nachteile. An dieser Stelle in der frühen Planungsphase ist es möglich, basierend auf den bislang erwähnten Merkmalen der MRI-Arbeitssysteme die Arbeitsplätze für die nächste Planungsphase auszuwählen. Als Auswahlgrundlage können hier Abbildung 2.3, Tabelle 2.3, die Unterschiede bei der Benutzung von Leichtbaurobotern in verschiedenen Interaktionsszenarien darstellt, sowie die einfache Darstellung in Abbildung 3.14 dienen.

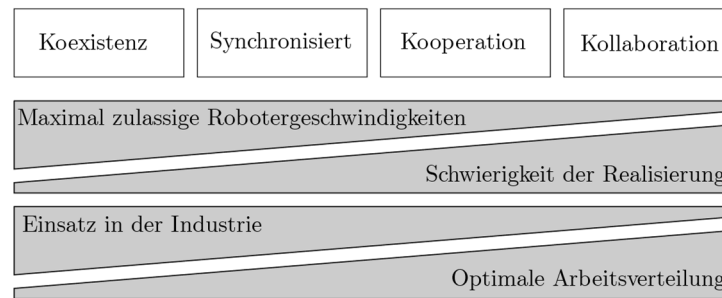


Abbildung 3.14: Merkmale verschiedener Interaktionsszenarien, Quelle: Eigene Darstellung

Im nächsten Schritt erfolgt für die ausgewählten Arbeitsplätze die Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme. Diese Planungsphase stellt einen umfangreichen Ansatz dar, der aus mehreren Schritten besteht. Dazu zählen die Bewertung der Fähigkeiten von Mensch und Roboter für den betrachteten Arbeitsschritt, die Arbeitsverteilung, die Umsetzung von Sicherheit auf deren Grundlage Einschränkungen für das Arbeitssystem gesetzt werden, sowie die Anwendung der Methode der vorgegebenen Zeiten zur Ablaufplanung sowie Berechnung von Bearbeitungszeiten.

3.7 Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme

Die grobe Planung von MRK-Arbeitssystemen, die auf Beumelburg 2005 und Schröter 2018 basiert, wird in diesem Kapitel vorgestellt. Dabei ist es zu Beginn wichtig zu erwähnen, dass dies ein Teil der Frühplanungsphase ist, was zum Ziel hat, die ersten nützlichen Informationen über mögliche MRK-Arbeitssysteme für den betrachteten Fall zu erhalten, die eine Grundlage für die Überprüfung von zuvor festgelegten Zielen darstellen.

Die Grobplanung von MRK-Arbeitssystemen besteht aus vier Schritten (Abbildung 3.15). Der Prozess der Planung von Arbeitssystemen beginnt mit der Arbeitsteilung in Montageaufgaben bzw. Montageoperationen. Danach werden für jede Montageoperation die Fähigkeiten von Mensch und Roboter anhand eines Kriterienkatalogs durch die Berechnung von Fähigkeitskennzahlen bewertet. Basierend auf dieser Berechnung kann eine Entscheidung über die Verteilung der Montageaufgaben stattfinden, was zur Definition des ersten Montageprozesses führt.

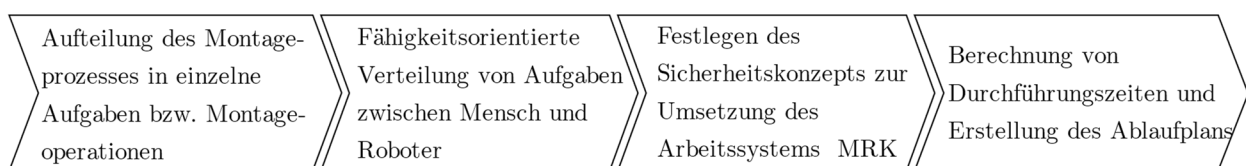


Abbildung 3.15: Schritte der Grobplanung von MRK-Arbeitssystemen, Quelle: Eigene Darstellung

Im nächsten Schritt wird die Sicherheit bei der MRI berücksichtigt. Wichtig zu beachten ist, dass hier keine detaillierte Risikobeurteilung stattfindet, sondern nur das Schutzprinzip definiert wird, das dem MRI-Arbeitssystem gewisse Grenzen setzt (siehe Abschnitt 3.7.2). Im letzten Schritt wird die MRI-Ablaufplanung vorgenommen und die Durchführungszeiten werden aufgabenbezogen kalkuliert. Arbeitsschritte von Mensch und Roboter werden durch ein System von Prozessbausteinen modelliert (siehe Abschnitt 3.7.3).

3.7.1 Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben

Die Zusammenarbeit in einem MRI-Arbeitssystem kann durch die Kombination von individuellen Eigenschaften von Mensch und Roboter die Arbeitsqualität sowie die Effizienz in industriellen Prozessen steigern. Dabei verfügen Mensch und Roboter über unterschiedliche Fähigkeiten (Tabelle 3.4).¹²⁰ Der Mensch verfügt über ein hohes Maß an kognitiven und sensomotorischen Fähigkeiten, was ihn äußerst flexibel macht und es ihm ermöglicht, sich schnell und einfach an Veränderungen anzupassen, die sich im Montageprozess ergeben könnten. Der Roboter hingegen zeichnet sich durch eine weitaus geringere Flexibilität aus und muss bei einer Änderung im Prozess eine Umprogrammierung sowie mechanische Änderungen am Greifer durchlaufen, um ihn unter neuen Gegebenheiten einsetzen zu können.¹²¹

Tabelle 3.4: Vor- und Nachteile von Mensch und Roboter in der Montage, Quelle: (Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 24)

Mensch	Roboter
Nachteile	Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Unzuverlässige Prozesskontrolle • Ergonomische Einschränkungen • Genaues Positionieren nur über Vorrichtungen oder Anschläge • Verlangt nach anspruchsvollen Aufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> • Integrierte Prozesskontrolle • Handhabung schwerer Bauteile • Exaktes Abfahren definierter Bahnpunkte • Zuverlässige Durchführung monotoner Tätigkeiten
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Verfügbarkeit • Handhabung komplexer Bauteile möglich • Zuverlässige Durchführung komplexer Fügevorgänge • Unkomplizierte Teilebereitstellung möglich • Aufgabenflexibel 	<ul style="list-style-type: none"> • Störungen möglich • Handhabung durch Bauteileigenschaften eingeschränkt • Toleranzbehaftetes Fügen nur mit zusätzlicher Sensorik möglich • Definierte Teilebereitstellung notwendig • Starre Abarbeitung von Aufgabe

¹²⁰ Vgl. Schröter 2018, S. 42

¹²¹ Vgl. Schröter 2018, S. 13

Die Zuordnung von Montageaufgaben erfolgt durch die Bewertung von Ressourcen von Mensch und Roboter (Abbildung 3.16).

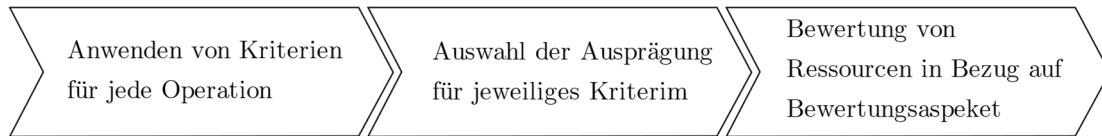


Abbildung 3.16: Bewertung der Ressourcen von Mensch und Roboter für jede Ausprägung und alle Kriterien, Quelle: Eigene Darstellung

Der Bewertungsprozess startet mit dem Anwenden von Kriterien auf die Montageoperation. Bei der Auswahl sind lediglich relevante Kriterien zu verwenden. Die Kriterien, die keine Relevanz für die betrachtete Montageoperation besitzen, werden für den weiteren Entscheidungsprozess nicht berücksichtigt. Die Kriterien sind in einem Kriterienkatalog zusammengefasst, der eine Grundlage zur Beurteilung der Fähigkeit von Mensch und Roboter zur Durchführung einer Montageaufgabe darstellt (Tabelle 3.6). Das Einteilen von Kriterien erfolgt in Bezug auf Ergonomie, Montageprozess sowie Bauteil. Im ersten Fall lässt sich die ergonomische Belastung differenziert betrachten. Die weiteren Kriterien bezüglich des Montageprozesses und des Bauteils beziehen sich auf die technische Umsetzbarkeit der Montageoperationen sowie die zu erwartende Prozessqualität. Jedem Kriterium sind seine möglichen Ausprägungen zugeordnet. Diese zeigen auf, in welchen Formen die Kriterien auftreten können.¹²²

Tabelle 3.5: Bewertungsaspekte und zugehöriges Formelzeichen, Quelle: Schröter 2018, S. 54

Bewertungsaspekt	Formelzeichen	Wertebereich
Taktzeit	F _Z	∈ {0; 0,5; 1}
Zusatzinvest	F _K	∈ {0; 0,5; 1}
Prozessqualität	F _{PQ}	∈ {0; 0,5; 1}
Arbeitsqualität	F _{AQ}	∈ {0; 0,5; 1}

Für jedes relevante Kriterium und jede zutreffende Ausprägung wird eine Bewertung der Ressourcen Mensch und Roboter vorgenommen und damit quantifiziert, welche Fähigkeit der Mensch und welche der Roboter für die betrachtete Montageoperation aufweist. Diese Fähigkeit wird durch eine Fähigkeitskennzahl beschrieben. Um die Objektivität zu erhöhen, wird die betrachtete Ressource dabei stets im Vergleich zur jeweils anderen Ressource bewertet. Die Bewertung erfolgt in Bezug auf die Bewertungsaspekte gemäß Tabelle 3.5. Dabei wird beurteilt, ob der Mensch besser (Bewertung 1), gleichwertig (Bewertung 0,5) oder schlechter (Bewertung 0) als der Roboter in Bezug auf die Bewertungsaspekte aus Tabelle 3.5 ist.¹²³

¹²² Vgl. Schröter 2018, S. 49 ff.

¹²³ Vgl. Schröter 2018, S. 53

Tabelle 3.6: Kriterienkatalog zur Ablaufplanung von Arbeitssystemen, Quelle: Schröter 2018, S. 51

Kriterium		Ausprägung	
Ergonomie			
K ₁	Wird die Arbeitsposition oder Haltung durch die Position der Fügestelle negativ beeinflusst?	A _{1,1} A _{1,2} A _{1,3}	Ja Teilweise Nein
K ₂	Wie hoch ist die Masse des zu handhabenden Werkzeugs oder Bauteils?	A _{2,1} A _{2,2} A _{2,3}	< 1 kg 1 kg – 8 kg > 8 kg
K ₃	Wie viele Wiederholungen des Montagevorgangs treten innerhalb einer Schicht auf?	A _{3,1} A _{3,2} A _{3,3}	< 40 40 – 500 > 500
K ₄	Sind Hilfs-, Betriebs-, Werkstoffe oder Umgebungseinflüsse potenziell gesundheitsschädlich für den Mitarbeiter?	A _{4,1} A _{4,2}	Ja Nein
K ₅	Auf welcher Höhe befindet sich die Fügestelle oder das zu handhabende Bauteil?	A _{5,1} A _{5,2} A _{5,3}	< 1 m 1 m – 1,5 m > 1,5 m
K ₆	Weist das zu handhabende Bauteil scharfe Kanten auf?	A _{6,1} A _{6,2}	Ja Nein
Montageprozess			
K ₇	Welche Art der Fügepassung liegt vor?	A _{7,1} A _{7,2} A _{7,3}	Spielpassung Grenzpassung Übermaßpassung
K ₈	Besteht während des Montageprozesses die Möglichkeit des Vertauschens von Fügeteilen oder Fügstellen?	A _{8,1} A _{8,2}	Ja Nein
K ₉	Wie wird die Basis oder das Fügeteil bereitgestellt?	A _{9,1} A _{9,2}	Positioniert und orientiert Vermischt liegend
Bauteil			
K ₁₀	Ist das Bauteil kratz-, bruch- und/oder formempfindlich?	A _{10,1} A _{10,2}	Ja Nein
K ₁₁	Wie ist die Steifigkeit des Bauteils einzustufen?	A _{11,1} A _{11,2} A _{11,3}	Starr Elastisch Biegeschlaff
K ₁₂	Sind Greif- und Zentriermöglichkeit des zu greifenden Bauteils gegeben?	A _{12,1} A _{12,2}	Ja Nein

Durch die Auswahl von Gewichtungen g_f , die angepasst werden können, um z. B. unterschiedlichen Unternehmenszielen gerecht zu werden, werden die Fähigkeitszahlen gewichtet.¹²⁴ Dabei wird bei allen Kriterien die gleiche Gewichtung für die jeweilige

¹²⁴ Vgl. Schröter 2018, S. 54

Montageoperation angenommen. Eine unterschiedliche Gewichtung für jedes Kriterium sowie Bewertung in Bezug auf zusätzliche Bewertungsaspekte können im Laufe der Feinplanung erfolgen.

Schließlich erfolgt für Fähigkeitskennzahlen eine Aggregation, um die normierte Fähigkeitskennzahl $F_{Mges,i,j}$ (Mensch) für das Kriterium i mit der Ausprägung j zu berechnen. Die Berechnung der normierten Fähigkeitskennzahlen findet auf Grundlage der erwarteten Fähigkeit der Ressource in Bezug auf die Bewertungsaspekte Taktzeit, Zusatzinvestment, Arbeits- und Prozessqualität statt. Die normierte Fähigkeitskennzahl für Mensch ($F_{Mges,i,j}$) und Roboter ($F_{Rges,i,j}$) wird nach den Gleichungen 3.1 und 3.2 berechnet.¹²⁵

$$F_{Mges,i,j} = g_1 F_Z + g_2 F_K + g_3 F_{PQ} + g_4 F_{AQ} \quad (3.1)$$

$$F_{Rges,i,j} = 1 - F_{Mges,i,j} \quad (3.2)$$

Sobald die normierte Fähigkeitskennzahlen für jedes Kriterium berechnet sind, wird der normierte Gesamteignungsgrad des Menschen e_M und des Roboters e_R gemäß Gleichungen 3.3 und 3.4 für die jeweilige Montageoperation berechnet. Die Berechnung von Gesamteignungsgraden ist in Abbildung 3.17 schrittweise dargestellt.¹²⁶

$$e_M = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot F_{Mges,i,j}}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad e_M \in \{0, \dots, 1\} \quad (3.3)$$

$$e_R = 1 - e_M, \quad e_R \in \{0, \dots, 1\} \quad (3.4)$$

Die Gewichte g_i werden durch den Anwender abhängig von der betrachteten Montageoperation ausgewählt. Somit lässt sich die Berechnung des Eignungsgrades genau auf die Umstände der betrachteten Montageoperation anpassen. Liegen beispielsweise ergonomische Probleme vor, können die relevanten Kriterien mehr gewichtet und die Bewertung entsprechend angepasst werden. Anhand der Eignungsgrade ist die Fähigkeit einer Ressource für eine Montageoperation direkt ersichtlich.¹²⁷

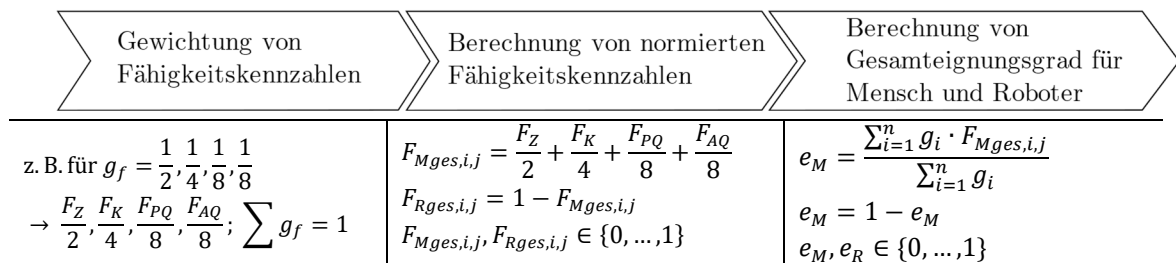


Abbildung 3.17: Berechnung von Gesamteignungsgrad anhand von gewichteten Fähigkeitskennzahlen, Quelle: Eigene Darstellung

¹²⁵ Vgl. Schröter 2018, S. 54

¹²⁶ Vgl. Schröter 2018, S. 55

¹²⁷ Vgl. Schröter 2018, S. 55 ff.

Dabei kann die Gewichtung auf verschiedene Weisen vorgenommen werden. Ähnlich wie bei der Gewichtung von Fähigkeitskennzahlen kann die Wichtigkeit eines Kriteriums durch das prozentuelle Verhältnis zu den anderen bestimmt werden. Es ist zu beachten, dass für jede Operation eine bestimmte Anzahl von Kriterien relevant ist und für jede von ihnen entschieden werden muss, wie sie bezüglich Wichtigkeit im Vergleich zu den anderen Kriterien stehen. Im allgemeinen Fall, ohne Präferenz von Kriterien, errechnet sich das Gewicht g_f als $1/n$ (n steht für Anzahl von relevanten Kriterien), wobei die Summe der Gewichte in der Gleichung 3.3 dann 1 ergibt.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, den ordinalen Werten die skalierten kardinalen Werte zuzuordnen.¹²⁸ Die Gewichtung kann basierend auf der Wichtigkeit des beobachteten Kriteriums gewählt werden (Tabelle 3.7). So kann der Anwender die Wichtigkeit für jedes Kriterium separat bestimmen, ohne über den prozentualen Wichtigkeitsanteil eines Kriteriums im Verhältnis zu den anderen nachzudenken.

Tabelle 3.7: Bestimmung des Gewichts g_i je nach Wichtigkeit des Kriteriums, Quelle: In Anlehnung an Beumelburg 2005, S. 57

Ordinale Wert	Kardinale Wert
(sehr) Wichtig	3
teilweise wichtig	2
fast/ganz unwichtig	1

Eine Möglichkeit, die sich aus dieser Art der Gewichtung ergibt, liegt darin, die Bewertung der Wichtigkeit der Kriterien durch mehrere Anwender zu berücksichtigen. Dadurch lässt sich für jedes Kriterium ein Gewichtsmittelwert bilden und damit eine zusätzliche Objektivität der Bewertung erreichen.

$$g_{m,i} = \frac{\text{Anteil} \text{ "Wichtig" }}{\text{Anzahl Anwender}} \cdot 3 + \frac{\text{Anteil} \text{ "Teilweise Wichtig" }}{\text{Anzahl Anwender}} \cdot 2 + \frac{\text{Anteil} \text{ fast/ganz unwichtig}}{\text{Anzahl Anwender}} \cdot 1 \quad (3.5)^{129}$$

Zum Beispiel für 10 Anwender, wobei 6 den Wert 3 ausgewählt haben, 3 Anwender den Wert 2 und 1 Anwender den Wert 1 ausgewählt hat, errechnet sich ein Gewichtsmittelwert wie folgt:

$$g_{m,i} = \frac{6}{10} \cdot 3 + \frac{3}{10} \cdot 2 + \frac{1}{10} \cdot 1 = 1,8 + 0,6 + 0,1 = 2,5.$$

Nachdem die Gewichte für jedes Kriterium gewählt werden, also jedes Kriterium nach Wichtigkeit bewertet wird, folgt die Berechnung von Eignungsgrade für Mensch und Roboter. Durch die Berechnung von Eignungsgraden kann eine Sequenz von Montageoperationen analysiert werden. Durch die Differenzen der Eignungsgrade einer Montageoperation ist es möglich, von aufeinanderfolgenden Montageoperationen diejenigen zu

¹²⁸ Vgl. Beumelburg 2005, S. 57

¹²⁹ In Anlehnung an Beumelburg 2005, S. 58

identifizieren, die das höchste Potenzial für MRK bieten (Gleichung 3.1). Mit dem Wert von $\Delta e_{MR,i} = 1$ wird die maximal mögliche Eignung des Menschen für die betrachtete Montageoperation repräsentiert, wobei $\Delta e_{MR,i} = -1$ die maximal mögliche Eignung des Roboters repräsentiert.¹³⁰

$$\Delta e_{MR,i} = e_{M,i} - e_{R,i} \quad \Delta e_{MR,i} \in \{-1; \dots; 1\} \quad (3.1)$$

So ist es möglich, die betrachtete Montageoperation je nach Fähigkeiten entweder einem Menschen oder einem Roboter zuzuordnen. Eine Liste sämtlicher Formelzeichnungen mit deren Bedeutung zeigt Tabelle 3.8.

Tabelle 3.8: Zusammenfassung der Formelzeichnung, Quelle: Eigene Darstellung

Formelzeichnung	Bedeutung	Wertebereich
g_f	Fähigkeitszahlen-Gewichtung	$g_f \in \{0, \dots, 1\}, \sum g_f = 1$
$F_{Mges,i,j}$	Normierte Fähigkeitskennzahl Mensch	$F_{Mges,i,j} \in \{0, \dots, 1\}$
$F_{Rges,i,j}$	Normierte Fähigkeitskennzahl Roboter	$F_{Rges,i,j} \in \{0, \dots, 1\}$
g_i	Kriterium-Gewichtung	$g_i \in \{1,2,3\}$
e_M	Eignungsgrad Mensch	$e_M \in \{0, \dots, 1\}$
e_R	Eignungsgrad Roboter	$e_M \in \{0, \dots, 1\}$
$\Delta e_{MR,i}$	Differenzen der Eignungsgrade	$\Delta e_{MR,i} \in \{-1; \dots; 1\}$

Beispiel

Tabelle 3.9 umfasst ein einfaches Beispiel für die Berechnung von Fähigkeitskennzahlen für eine Montageoperation. Die Aufgabe der Montageoperation besteht darin, ein Bauteil von Masse 0,5 kg zwischen zwei Positionen 800 Mal in einer Arbeitsschicht zu verschieben. Um das Beispiel einfach zu machen, werden nur drei Kriterien als relevant angenommen. Für die relevanten Kriterien K_i werden nach der Aufgabebeschreibung die zutreffenden Ausprägungen $A_{i,j}$ ausgewählt.

Tabelle 3.9: Beispiel zur Berechnung von normierten Fähigkeitskennzahlen, Quelle: Eigene Darstellung

Kriterium K_i	Ausprägung $A_{i,j}$	Fähigkeitskennzahlen				Gewichtung g_f	Normierte Fähigkeitskennzahlen	
		FZ	FK	FAQ	FPQ		$F_{Mges,i,j}$	$F_{Rges,i,j}$
K_2	$A_{2,1}$	0,5	0,5	0,5	0,5	$\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}$	0,5	0,5
K_3	$A_{3,3}$	0	0,5	0	0,5		0,25	0,75
K_9	$A_{9,2}$	1	1	0,5	1		0,8125	0,1875

Eine Masse von 0,5 kg stellt für den Menschen kein Problem dar, deshalb kann für K_1 bei der Bewertung in Bezug auf Bewertungsaspekte für jede Fähigkeitszahl ein Wert von 0,5 angenommen werden. Bei einer großen Anzahl von Wiederholungen ist ein Mensch

¹³⁰ Vgl. Schröter 2018, S. 57

schlechter als ein Roboter, wenn die menschliche Ermüdung im Laufe der Zeit und den ergonomischen Faktor der Monotonie berücksichtigen werden. Deshalb wird bei K_3 für F_Z der Wert 0 angenommen. Wenn das Objekt nicht genau an der gewünschten Position platziert werden muss bzw. kein Zusatzinvest bezüglich Vorrichtungen für Mensch notwendig ist (Roboter hat eine hohe Genauigkeit und ist viel präziser als Mensch), lässt sich für F_K der Wert 0,5 annehmen. Bei der Qualität der Arbeit vom Menschen wird der Wert 0 angenommen, während die Prozessqualität mit 0,5 bewertet wird. Eine ähnliche Logik wird im Weiteren herangezogen, bis allen Fähigkeitskennzahlen ein Wert zugeordnet ist bzw. bis die Ressource des Menschen für die jeweilige Montageoperation und alle Kriterien in Bezug auf Bewertungsaspekte bewertet sind.

Die Gewichtung der Kennzahlen erfolgt mit den Werten aus Tabelle 3.9. So wird angenommen, dass der Fokus bei dem Beispiel auf Zeit und Zusatzinvest liegt. Mit den so gewählten Werten für Fähigkeitskennzahlen und angenommenen Gewichten werden die normierte Fähigkeitskennzahlen $F_{Mges,i,j}$ und $F_{Rges,i,j}$ nach den Gleichungen 3.1 und 3.2 berechnet.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass für die Durchführung der Montageoperation, wenn nur das erste Kriterium betrachtet wird, sowohl Mensch als auch Roboter gleich gut geeignet sind. Bei Betrachtung des zweiten Kriteriums ist durch die höhere Wiederholungszahl die Ressource des Roboters besser geeignet. Beim dritten Kriterium ist ein Mensch weitaus besser, weil die Fähigkeiten eines Menschen bei vermischten liegenden Bauteilen viel besser sind als jene eines Roboters.

Die Gewichtung g_i von Kriterien K_i erfolgt nach Tabelle 3.10, wobei zwei unterschiedliche Gewichtungsfälle betrachtet werden. In beiden Fällen wird angenommen, dass das Kriterium K_2 fast/ganz unwichtig ist (Wert 1). Für K_3 wird in Fall 1 der Wert 2 angenommen (Kriterium ist teilweise wichtig), und in Fall 2 der Wert 3 (Kriterium ist (sehr) wichtig). Für K_9 sind die Gewichte umgekehrt ausgewählt bzw. in Fall 1 der Wert 3 und in Fall 2 der Wert 2.

Tabelle 3.10: Gewichtung von Kriterien bei zwei verschiedenen Fällen, Quelle: Eigene Darstellung

Kriterium K_i	Gewicht g_i	
	Fall 1	Fall 2
K_2	1	1
K_3	2	3
K_9	3	2

In Fall 1, bei dem das Kriterium 9 gewichtet wird, lässt sich anhand der Ergebnisse aus Tabelle 3.11 schlussfolgern, dass der Montagevorgang einem Menschen zuzuordnen ist (Eignungsgrad Mensch $e_M = 0,563$). Dies rührt daher, dass der Fokus auf einem Kriterium

liegt, das die vermischt liegenden Bauteile berücksichtigt und daher ein hohes Maß an menschlicher kognitiver sowie sensomotorischer Kompetenz voraussetzt.

Tabelle 3.11: Berechnung von Eignungsgraden für Fall 1, Quelle: Eigene Darstellung

Fall 1						
Kriterium	Ausprägung	Normierte Fähigkeitskennzahl	Gewicht	Multiplikation		
K_i	$A_{i,j}$	$F_{Mges,i,j}$	$F_{Rges,i,j}$	g_i	$g_i \cdot F_{Mges,i,j}$	$g_i \cdot F_{Rges,i,j}$
K ₂	A _{2,1}	0,5	0,5	1	0,5	0,5
K ₃	A _{3,3}	0,25	0,75	2	0,5	1,5
K ₉	A _{9,2}	0,8125	0,1875	3	2,4375	0,5625
					$e_M = 0,563$	$e_R = 0,427$

In Fall 2, basierend auf Ergebnissen aus Tabelle 3.12, wo das Gewicht in Bezug auf eine große Anzahl an Wiederholungen festgelegt wird, folgt, dass der Montagevorgang dem Roboter zugewiesen werden sollte (Eignungsgrad Roboter $e_R = 0,521$).

Tabelle 3.12: Berechnung von Eignungsgraden für Fall 2, Quelle: Eigene Darstellung

Fall 2						
Kriterium	Ausprägung	Normierte Fähigkeitskennzahl	Gewicht	Multiplikation		
K_i	$A_{i,j}$	$F_{Mges,i,j}$	$F_{Rges,i,j}$	g_i	$g_i \cdot F_{Mges,i,j}$	$g_i \cdot F_{Rges,i,j}$
K ₂	A _{2,1}	0,5	0,5	1	0,5	0,5
K ₃	A _{3,3}	0,25	0,75	3	0,75	0,25
K ₉	A _{9,2}	0,8125	0,1875	2	2,625	0,375
					$e_M = 0,479$	$e_R = 0,521$

Anhand dieses einfachen Beispiels wurde gezeigt, wie durch die Berechnung und Bevorzugung bestimmter Kriterien unterschiedliche Werte gewonnen werden können, mit deren Hilfe sich der beobachtete Montagevorgang einem Menschen oder einem Roboter zuordnen lässt.

3.7.2 Implementierung der Sicherheit bei MRK-Arbeitssystemen

Die in Abschnitt 2.5.3 nach DIN ISO 10218-1 vier beschriebenen Schutzprinzipien werden hier als Teil der Grobplanung berücksichtigt. Basierend auf dem gewählten Sicherheitsprinzip, das in direktem Zusammenhang mit der Art der Interaktion steht, lässt sich anhand von aktuell gültigen Normen die maximal zulässige Geschwindigkeit bzw. der minimal einzuhaltende Sicherheitsabstand des Roboters berechnen.

Im Rahmen der Grobplanungsphase ersetzt diese Berechnung keine detaillierte Risikobeurteilung, sondern liefert eine erste Abschätzung der einzuhaltenden Grenzwerte, die als Eingangswerte für den weiteren Planungsprozess dienen.¹³¹ Das gewählte Schutzkonzept wirkt sich auf Investitionskosten, Platzbedarf sowie Produktivität des Arbeitssystems aus, daher ist dessen Berücksichtigung in der frühen Planungsphase von großer Bedeutung.¹³² Je nach Schutzprinzip ist neben der Interaktionsart auch die Wahl des Robotertyps sowie von geeigneten Sensoren davon abhängig (Tabelle 3.14). Tabelle 3.13 gibt einen Überblick über den Zusammenhang zwischen Sicherheitsprinzip und Interaktionsart, aktuelle Normen sowie die Auswirkungen auf die Planung der MRI.

Tabelle 3.13: Schutzprinzipien nach DIN EN ISO 10218-1 und ihre Auswirkung auf Planung von MRI, Quelle: Eigene Darstellung

Schutzprinzip	Interaktionsart	Gültige Norm	Beschreibung
Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	Koexistenz Synchronisiert	DIN EN ISO 13855	<ul style="list-style-type: none"> Keine Zusammenarbeit möglich (unterschiedliche Arbeitsräume; Roboter ist gestoppt, wenn sich der Mensch im Arbeitsraum von Roboter befindet) maximal zulässige Robotergeschwindigkeit bei Betrieb Mindestabstand vom Schutzfeld zum Gefährdungsbereich (mindestens 100 mm)¹³³ (siehe Anhang D)
Handführung	Kollaboration	DIN EN ISO 10218-2	<ul style="list-style-type: none"> Endeffektor des Roboters durch den Mensch geführt Sicherheitsbewertete Geschwindigkeit
Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	Koexistenz Synchronisiert Kooperation	ISO TS 13855	<ul style="list-style-type: none"> Zusammenarbeit möglich (MRI-3) Minimaler Schutzabstand zwischen Mensch und Roboter abhängig von Robotergeschwindigkeit (siehe Anhang D)
Leistungs- und Kraftbegrenzung	Koexistenz Synchronisiert Kooperation Kollaboration	ISO TS 15066	<ul style="list-style-type: none"> Zusammenarbeit möglich (MRI-3, MRI-4) Maximal zulässige Kräfte (siehe Anhang D) Maximal zulässige LBR-Geschwindigkeit (250 mm/s)

¹³¹ Vgl. Schröter 2018, S. 46

¹³² Vgl. Schröter 2018, S. 59

¹³³ Vgl. Schröter 2018, S. 61

Tabelle 3.14: Kollaborationskonzepte und benötigte Technologien, Quelle: In Anlehnung an Khalid et al. 2016, S. 8

Schutzprinzip	Robotertyp	Eingesetzte Sensoren
Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	Industrieroboter	• Laserscanner
	Leichtbauroboter	• Näherungssensor • Lichtvorhang
Handführung	Leichtbauroboter	• Kraftsensoren • Drehmoment Sensoren
		• Externe Anweisungen an die Robotersteuerung
Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	Industrieroboter	• Kameras
	Leichtbauroboter	• Trägheitsmesseinheit • Algorithmus zur Vermeidung von Menschen
Leistungs- und Kraftbegrenzung	Leichtbauroboter	• Kraftsensoren
		• Drehmoment Sensoren
		• Wägezellen

3.7.3 Ablaufplanung

Als Planung oder Reihenfolgeplanung wird jenes Vorgehen bezeichnet, bei dem ein aus mehreren Teilprojekten bestehendes Projekt strukturiert sowie hinsichtlich seines zeitlichen Ablaufs analysiert wird, um eine zeitlich optimale Abfolge und Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine zu erreichen.¹³⁴

Für die Montageplanung können verschiedene Softwarelösungen eingesetzt werden, mit deren Hilfe sich Zeiten und Reihenfolge der Aufgaben durch Simulation berechnen lassen. Zudem können die Zeiten, die zum Ausführen bestimmter Aufgaben erforderlich sind, durch Messen bestehender Prozesse erhalten werden. In der frühen Phase der Planung von Arbeitssystemen, in der eine grobe zeitliche Abschätzung genügt, stellen diese Methoden jedoch eine zeit- und ressourceninadäquate Lösung dar. MTM (Methods Time Measurement), eine Methode von Systemen vorbestimmter Zeiten (SvZ), stellt eine Prozesssprache dar, mit deren Hilfe Arbeitssysteme mit der Abfolge von Aufgaben und dem dafür benötigten Zeitaufwand bereits in der Frühphase einfach und schnell geplant werden können.

Prozesszeiten

Zeitdaten sind ein essenzielles Kriterium für die Gestaltung, Organisation und Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Arbeitssystems. Die Ausführungszeit bzw. der Zeitbedarf zur

¹³⁴ Vgl. Bloech et al. 1993, S. 267

Durchführung einer Montageaufgabe bildet eine wichtige Planungs- und Bewertungsgröße in der Montageplanung. Überdies werden die Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Montageanlage maßgeblich von der Ausführungszeit bestimmt.¹³⁵

Bei der Ermittlung der Zeitdaten unterscheidet man zwischen Ist- und Sollzeit. Ist-Zeiten stellen die Zeiten dar, die tatsächlich benötigt werden, um bestimmte Teile des Prozesses auszuführen. Soll-Zeiten hingegen sind jene Zeiten, die planmäßig zur Ausführung bestimmter Ablaufabschnitte benötigt werden. Je nach Datenermittlungsverfahren basieren Soll-Zeiten direkt oder indirekt auf Ist-Zeiten. Die Bestimmung von Zeitdaten kann auf drei Arten erfolgen: durch kontinuierliche Beobachtungen, durch Stichprobenbeobachtungen (Multimomentverfahren) sowie durch rechnerisch-analytische Methoden, wie z. B. Systeme vorbestimmter Zeiten. Die ersten beiden Methoden ermitteln die tatsächlichen Zeitdaten. Im Gegensatz dazu liefern rechnerisch-analytische Methoden direkt Soll-Zeiten, ohne dass zuvor Echtzeitdaten in der Anwendung erhoben werden. So sind sie sehr kostengünstig zu erstellen, da Änderungen an einzelnen zeit-beeinflussenden Größen sehr einfach stattfinden können.¹³⁶

Methods Time Measurement (MTM)

Eine verständliche sowie reproduzierbare Beschreibung der Wechselwirkungen von Systemelementen erfordert ein definiertes Vorgehen, mit dessen Hilfe Arbeitsabläufe erfasst, dokumentiert und ausgewertet werden können. Daher werden für diese Beschreibung Prozesssprachen wie MTM verwendet. Die Elemente dieser Sprache werden als MTM-Prozessbausteine bezeichnet. Sie bestehen aus einem definierten „Stück“-Prozess, einem zugehörigen Zeitwert (Normzeit) sowie einer eindeutigen Kodierung. Ein so definiertes MTM-Prozessbausteinsystem ist simulationsfähig und lässt sich auf virtuelle Arbeitssysteme anwenden. Somit können Arbeitssysteme in der Prozessplanung oder im quantitativen Vergleich von Alternativen beschrieben werden, weil das MTM-Verfahren keine eigentlichen Betriebssysteme benötigt, um die Analyse durchzuführen sowie die Zielzeiten zu bestimmen. Der MTM-Prozessbaustein zeichnet sich durch zwölf Sprachelemente aus, die einem anwendungsneutralen und einem anwendungsspezifischen Teil zugeordnet sind (Abbildung 3.18).¹³⁷

Der anwendungsneutrale Teil des MTM-Prozessmoduls wird einmalig während seiner Entwicklung definiert. Der anwendungsneutrale Teil des MTM-Prozessbausteins ist jedoch nur bei Verwendung des MTM-Prozessmoduls spezifiziert. Die Verbindung des anwendungsneutralen mit dem anwendungsspezifischen Teil spezifiziert die Inhalte der Verwendung des Prozessbausteins und stellt bei der MTM-Ablaufbeschreibung (der

¹³⁵ Vgl. Schröter 2018, S. 26

¹³⁶ Vgl. Schröter 2018, S. 27 f.

¹³⁷ Vgl. Neumann 2018, S. 5 ff.

MTM-Analyse) eine Zeile in den MTM-Formularen dar. Unter Berücksichtigung der geltenden Regeln der Anwendung wird diese Verbindung wiederholt und die Beschreibung und Modellierung der definierten Arbeitsinhalte oder des gesamten Arbeitsablaufs erstellt. So entsteht ein Modell, das man als Arbeitsablaufmodell bezeichnet.¹³⁸

MTM-Prozessbaustein		
anwendungsneutral		anwendungsspezifisch
Beginn	Ende	Faktor
Bezeichnung	Inhalt	Beschreibung
Kodierung	Normzeit	Sollzeit
Ablauf	Einflussgrößen	Weit.Attribute
Anwendungsregeln		

Abbildung 3.18: Sprachelemente des MTM-Prozessbausteinsystems, Quelle: Bokranz/Landau 2012, S. 386 (leicht modifiziert)

Werden MTM-Prozessbausteine gemeinsam auf unterschiedlichen Ebenen zur Beschreibung und Bewertung von Arbeitsabläufen eingesetzt und klare Gestaltungsregeln befolgt, bildet dieses Vorgehen die Basis für die Entwicklung von branchenneutralen und unternehmensspezifischen MTM-Prozessbausteinsystem. Im Laufe der Jahre ist eine Vielzahl von MTM-Systemen von Prozessbausteinen entstanden (z. B. MTM-1, MTM-UAS, MTM-MEK usw.), deren Einsatz sich auf verschiedene Einsatzbereiche bei unterschiedlichen Aufgaben erstreckt.¹³⁹

MTM-1

MTM-1 bildet das MTM-Grundsystem und umfasst ein Verfahren zur Modellierung eines beliebigen manuellen Arbeitsablaufs unter Verwendung der erforderlichen Grundbewegungen. Abhängig von den Einflussgrößen wird jeder Grundbewegung ein Normzeitwert zugeordnet.¹⁴⁰

Untersuchungen haben gezeigt, dass etwa 80 % bis 85 % der vollständig beeinflussbaren Prozesse aus fünf Grundbewegungen bestehen, für die auch ein Bewegungszyklus typisch ist (Abbildung 3.19). Dieser Bewegungszyklus wird als Grundzyklus bezeichnet und beschreibt einen charakteristischen Bewegungsablauf, der besonders häufig vorkommt. Je nach Bewegungsfolge wird zwischen Aufnehmen und Platzieren unterschieden. Mithilfe der fünf wichtigsten Grundbewegungen lassen sich Abläufe beschreiben (Tabelle 3.8).¹⁴¹

¹³⁸ Vgl. Neumann 2018, S. 5 f.

¹³⁹ Vgl. Neumann 2018, S. 7 f.

¹⁴⁰ Vgl. Neumann 2018, S. 11

¹⁴¹ Vgl. Neumann 2018, S. 13 f.

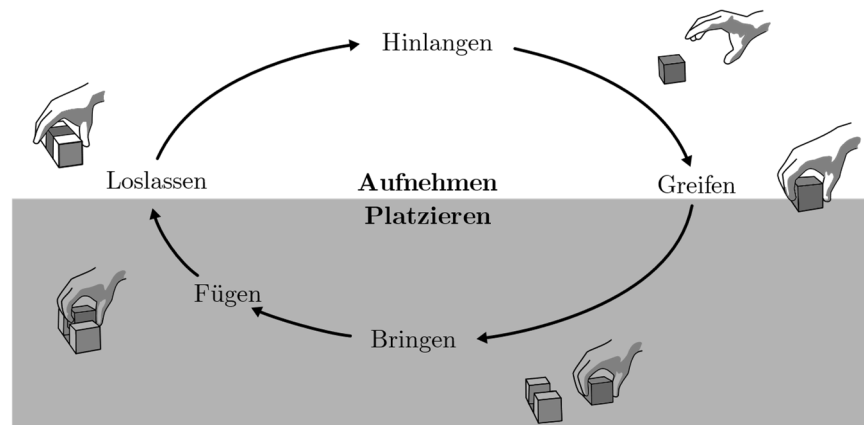


Abbildung 3.19: Der Grundzyklus, Quelle: Deutsche MTM-Vereinigung e. V. 2016, S. 33

Neben diesen fünf Grundbewegungen kommen noch drei weitere zum Einsatz, die hauptsächlich der Beschreibung von Handbewegungen dienen. Dies sind Rotation, Kompression und Trennung. Weiterhin unterscheidet man zwei Blickfunktionen (mentale Funktionen): Blickverschieben und Prüfen. Außerdem werden anhand von fünfzehn Körperbewegungen die Bewegungen der Füße und Beine sowie die Bewegungen des Oberkörpers beschrieben.¹⁴²

Tabelle 3.15: Wichtigste Grundbewegungen, Quelle: In Anlehnung an Neumann 2018, S. 14

Grundbewegung	Beschreibung
Hinlangen	Bewegung der Hand zu einem Gegenstand
Greifen	Einen Gegenstand unter Kontrolle bringen
Bringen	Bewegen eines Gegenstandes mit der Hand
Fügen	In- oder Aneinanderfügen von Gegenständen
Loslassen	Aufheben der Kontrolle über einen Gegenstand

Die Zeitwerte für die verschiedenen Bewegungen lassen sich der Datenkarte (Standard-Zeitwertkarte) entnehmen. Die Datenkarte enthält Tabellen für Hand- und Fingerbewegungen, Blickfunktionen und Körperbewegungen sowie eine Zeitumrechnungstabelle und eine Tabelle, die zeigt, welche Bewegungen mit beiden Händen gleichzeitig ausgeführt werden können. Die Zeitwerte der Grundbewegungen sind im Zeitinhalt $1 \text{ TMU} = 1/100000$ Stunden angegeben, wobei TMU (Time Measurement Unit) für „Zeitmess-Einheit“ steht.¹⁴³

MTM-MRK

Die Prozesssprache MTM-MRK stellt eine Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in der MRK dar, in der Prozessbausteine zur roboterbasierten Beschreibung von Bewegungen definiert werden. Roboteraufgaben werden in einem neuen Prozessbausteinsystem

¹⁴² Vgl. Neumann 2018, S. 14

¹⁴³ Vgl. Neumann 2018, S. 15

modelliert, das mit MTM-1 kompatibel ist. Somit lassen sich Ausführungszeiten für beide Ressourcen auf einer gemeinsamen Basis berechnen.¹⁴⁴

Die Programmiersprache MTM-MRK verwendet den MTM-Grundzyklus und setzt ihn für Roboterbewegungen um. Für die Zeiten bestimmter Grundbewegungen werden mathematische Formeln aufgestellt.¹⁴⁵ Bei der Berechnung von Zeiten ist auf Einflussgrößen zu beachten (Tabelle 3.16). Die Formeln für Berechnungen von Zeiten aller fünf Grundbewegungen sind in Anhang C zu finden.

Tabelle 3.16: Signifikante Einflussgrößen resultierend aus Montageaufgabe und der Durchführungsart, Quelle: Schröter 2018, S. 74

Montageaufgabe	Mensch	Roboter
• Bewegungslänge	• Konstitution	• Robotertyp
• Bauteilgewicht	• Übung	• Bewegungsart
• Teilbereitstellung	• Motivation	• Geschwindigkeit
• Art der Platzierung		• Beschleunigung
• Bauteilorientierung		• Überschleifen von Bahnpunkten
• Zugänglichkeit des Fügeorts		• Effekortyp

Mit der MTM-MRK-Prozesssprache ist es mit relativ geringem Aufwand möglich, unterschiedliche Varianten von Mensch-Roboter-Interaktionen in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses zu simulieren, ohne dass das geplante Arbeitssystem in Simulationssoftware oder in der Praxis erstellt werden muss.

¹⁴⁴ Vgl. Neumann 2018, S. 29 f.

¹⁴⁵ Vgl. Neumann 2018, S. 33

3.8 Auswahl des Robotersystems für das MRI-Arbeitssystem

Die Realisierung einer sicheren, wirtschaftlichen und produktiven Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter innerhalb des MRI-Arbeitssystems hängt von vielen miteinander verbundenen Faktoren ab. Wichtig sind neben den Richtlinien, Normen und angewandten Planungsmethoden die technischen Anforderungen an das Robotersystem, die die Machbarkeit sämtlicher Aufgaben der Mensch-Roboter-Interaktion gewährleisten müssen. Die Auswahl des richtigen Robotertyps für die aktuelle Anwendung basiert auf den durch die Planung von Arbeitssystemen definierten Randbedingungen.

Basierend auf den theoretischen Grundlagen von Robotersystemen aus dem 2. Kapitel sowie den technischen Anforderungen, die durch die Planung von MRI-Arbeitssystemen definiert wurden, umfasst Tabelle 3.17 eine Liste möglicher Faktoren, die bei der Auswahl eines Robotersystems berücksichtigt werden sollten.

Tabelle 3.17: Daten zur Auswahl von Robotersystemen, Quelle: Eigene Darstellung

Parameter	Einheit	Anmerkung
Robotertyp	-	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von Interaktionstyp ist zwischen Industrieroboter und Leichtbauroboter auszuwählen
Roboterbauformen	-	<ul style="list-style-type: none"> • Definiert den Arbeitsraum
Anzahl von angesteuerte Achsen	-	<ul style="list-style-type: none"> • Rotatorisch und/oder translatorisch • Mindestens 3, normalerweise 6 • Definiert die Freiheitsgrade
Kollaborationsfähigkeit	-	<ul style="list-style-type: none"> • Bei anderen Interaktionstypen kann auch ein Industrieroboter benutzt werden
Traglast	kg	<ul style="list-style-type: none"> • Grenzen für maximale Traglast sind bei den Roboterherstellern in entsprechenden Diagrammen zu finden • Bezieht sich auf die Gesamtlast am Werkzeugflansch (Werkzeug, Greifer, Sensoren, Werkstück)
Reichweite	mm	<ul style="list-style-type: none"> • Die Reichweite wird in den Datenblättern der Hersteller als Abstand des am weitesten entfernten Punktes des Arbeitsraums von der Mitte der Sockel angegeben
Arbeitsraum		<ul style="list-style-type: none"> • Ergibt sich aus der maximalen Reichweite und dem nicht nutzbaren Raum.
Roboterbefestigung	-	<ul style="list-style-type: none"> • Boden, Wand, Decke
Robotergewicht	kg	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Gewicht gibt die Möglichkeit den Roboter leicht zu verschieben und an der neuen Arbeitsstation zu installieren

3.8 Auswahl des Robotersystems für das MRI-Arbeitssystem
 3 Konzeptentwicklung zum Einsatz von MRI-Arbeitssystemen

Wiederholgenauigkeit	+/- mm	<ul style="list-style-type: none"> • Hängt von der Traglast ab
Sensorik	-	<ul style="list-style-type: none"> • Hängt von der Sicherheitsprinzip sowie den Anforderungen an den Arbeitsprozess ab
Geschwindigkeit	m/s	<ul style="list-style-type: none"> • Maximal zulässige Geschwindigkeit hängt von dem Interaktionstyp ab • Maximale Geschwindigkeit des Roboters ist in den Datenblättern der Hersteller auch als Maximalgeschwindigkeiten der einzelnen Achsen gegeben
Möglichkeit der Arbeitsraumvergrößerung	-	<ul style="list-style-type: none"> • Kann erreicht werden, indem man den Roboter auf einer separaten Bewegungsachse montiert • Abhängig von der Möglichkeit der Integrierbarkeit und Interpolierbarkeit von der Robotersteuerung
Effektor	-	<ul style="list-style-type: none"> • Ist je nach Anforderung, Montage und Energieform auszuwählen
IP-Klassifikation	-	<ul style="list-style-type: none"> • Ein wichtiger Faktor, wenn der Roboter unter besonderen Bedingungen wie hoher Luftfeuchtigkeit oder Staub eingesetzt werden muss

4 Hochvolt-speicherproduktion

In diesem Kapitel wird der Montageprozess von Hochvolt(HV)-Batterien im Rahmen des BIC-Projekts beschrieben. Zunächst wird der Fokus auf Lithium-Ionen-Batterien liegen, die zu Modulen verbunden werden, durch deren Verschaltung dann Hochvolt-speichern entstehen. Als Nächstes wird der Montageprozess mit der möglichen Form der Anlage sowie der Anordnung der Arbeitsplätze beschrieben. Basierend auf dieser Beschreibung wird im nächsten Kapitel das Konzept der Implementierung des MRI-Arbeitssystems mit dem Ziel angewendet, potenzielle Arbeitsplätze zu finden, an denen einige der Interaktionsszenarien realisiert werden können. Für die ausgewählten Arbeitsplätze erfolgt schließlich eine Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme.

4.1 Batteriezelle

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher, die auf dem Gebiet der Energiespeicherprodukte einzigartig sind, da sie sowohl Energie durch chemische Prozesse erzeugt als auch Energie im selben Gerät speichern. Im Vergleich muss die Energie bei anderen Energiespeichern an einem Ort erzeugt und an einem anderen gespeichert werden.¹⁴⁶ Von allen Batterietypen haben Lithium-Ionen-Batterien mit ihren Vorteilen die größte Bedeutung. Im Vergleich zu anderen Batterien verfügen sie unter anderem über eine hohe Energiedichte und sind aufgrund der ständigen technischen Verbesserung eine der am schnellsten wachsenden Batterietechnologien auf der Welt.¹⁴⁷

Anmerkung: Im Gegensatz zur ursprünglichen Verwendung, wo strikt zwischen den Begriffen „Zelle“ und „Batterie“ unterschieden wurde, werden diese in den folgenden Kapiteln als Synonyme verwendet und beziehen sich auf dieselbe, in Abbildung 4.1 dargestellte Komponente.¹⁴⁸

4.1.1 Primär- und Sekundärzelle

Je nach Lademöglichkeit lassen sich Batterien in Primär- und Sekundärbatterien einteilen. Primärbatterien sind nicht wiederaufladbar und müssen entsorgt werden, sobald sie entladen sind. Sekundärbatterien, auch Akkumulatoren genannt, sind wiederaufladbare Mehrzweckbatterien, die immer wieder aufgeladen werden können. Lithium-Ionen-

¹⁴⁶ Vgl. Warner 2015, S. 1

¹⁴⁷ Vgl. Dormann et al. 2021, S. 1

¹⁴⁸ Vgl. Korthauer 2018, S. 189

Batterien sind hauptsächlich Sekundärbatterien und aufgrund ihrer vielen Vorteile eine sehr weit verbreitete Speichertechnologie im mobilen und stationären Einsatz.¹⁴⁹

4.1.2 Aufbau der Lithium-Ionen-Batteriezelle

Eine Lithium-Ionen-Batterie (LIB) besteht aus einer negativen Elektrode (Anode) und einer positiven Elektrode (Kathode). Zwischen den Elektroden befinden sich der ionenleitende Elektrolyt und der Separator. Der Elektrolyt ermöglicht den Ladungsaustausch. Der Separator trennt die beiden Elektroden voneinander, um einen Kurzschluss zu verhindern. Während des Entladens, was in Abbildung 4.1 dargestellt ist, wandern Lithium-Ionen von der Anode durch den Elektrolyten und Separator zur Kathode.¹⁵⁰

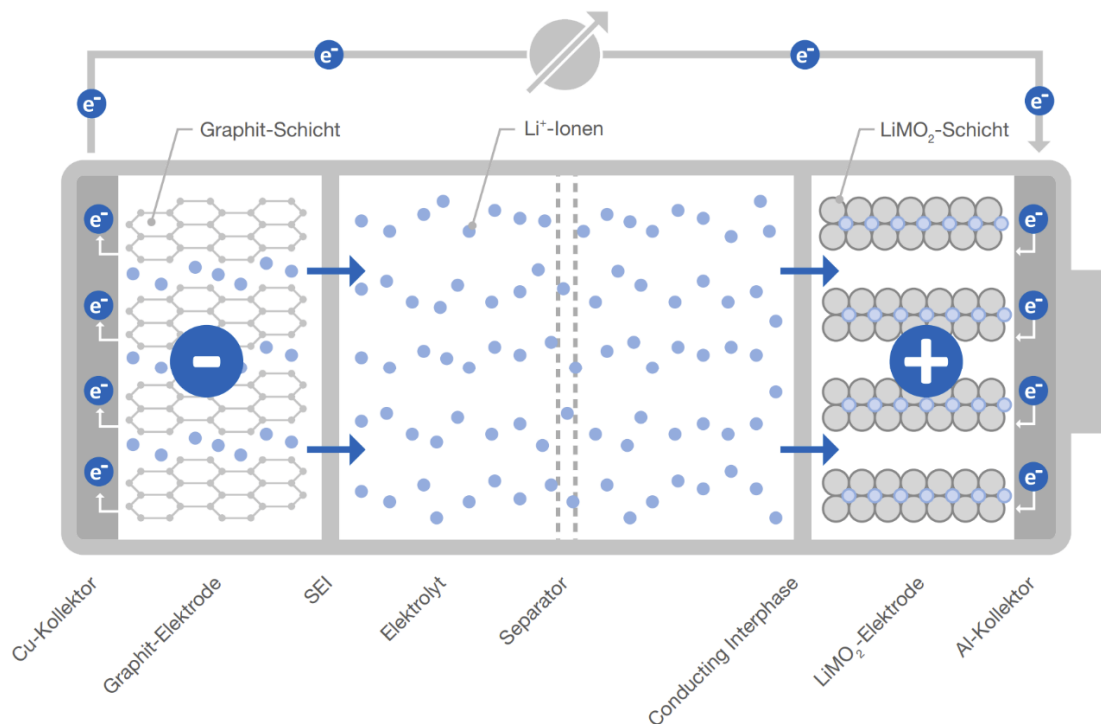


Abbildung 4.1: Innerer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (Entladezustand), Quelle: Dormann et al. 2021, S. 3

In dem Fall kommt es zum Oxidationsprozess an der Anode, durch welchen die Elektronen freigesetzt werden und über eine äußere elektrische Verbindung zur Kathode fließen. An der Kathode erfolgt ein Reduktionsprozess, durch den die Elektronen aufgenommen werden. Durch den Stromfluss über äußere Verbindung können elektrische Verbraucher betrieben werden. Beim Laden wird der Prozess umgekehrt.¹⁵¹

¹⁴⁹ Vgl. Dormann et al. 2021, S. 2

¹⁵⁰ Vgl. Dormann et al. 2021, S. 2 ff.

¹⁵¹ Vgl. Dormann et al. 2021, S. 2 ff.

Anmerkung: Die Anode und Kathode werden durch das Oxidations- bzw. Reduktionsprozess definiert. Dies hängt davon ab, ob die Batteriezelle geladen oder entladen wird.¹⁵²

4.1.3 Kenngrößen der Lithium-Ionen-Batteriezelle

Die Batteriezelle sowie die Komponenten, die sie aufbauen (Batteriemodul und Batteriepack), werden durch deren Kenngrößen beschrieben.

Zellspannung [V]:

Allgemein bezeichnet die Zellspannung die Ruhespannung der Zelle, bei der weder der Lade- noch der Entladevorgang stattfindet.¹⁵³

Nominale Kapazität [Ah]:

Ausgehend von einem vollständig geladenen Zustand, kennzeichnet die nominale Kapazität (auch Nennkapazität) die Energiemenge, die bei einem bestimmten konstanten Strom unter spezifischen Entladebedingungen einer Batterie entnommen werden kann. Dabei ist auf die Entladung bis Entladeschlussspannung zu beachten, da die Batterie ansonsten beschädigt wird. Die nominale Kapazität ist von folgenden Parametern abhängig:¹⁵⁴

- **Entladestrom [A]:**

Der Entladestrom einer Batterie kennzeichnet die Menge an Strom, die der Zelle über einen bestimmten Zeitraum entnommen werden kann.

- **Entladeschlussspannung [V]:**

Bezieht sich auf die Spannung, bei der eine Batterie entladen werden darf, ohne zur Beschädigung der Zellen zu führen.

- **Temperatur [°C]:**

Unter Berücksichtigung der Entladeeffizienz sowie der Zyklenlebensdauer beträgt die optimale Betriebstemperatur einer Lithium-Ionen-Batterie zwischen 20 °C und 50 °C. Bei hoher (≥ 50 °C) oder niedriger Temperatur (≤ 20 °C) nimmt die Kapazität von LIB unterschiedlich stark ab. Bei der Temperatur über 0°C kann die Entladekapazität von LIB grundsätzlich über 93,4 % gehalten werden. Unter 0°C beginnt die Entladekapazität abzunehmen und nimmt mit sinkender Temperatur stark ab. Eine zu tiefe Temperatur führt zu einer geringen Entladekapazität und

¹⁵² Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 3

¹⁵³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 12

¹⁵⁴ Vgl. Korthauer 2013, S. 16 ff.

zu einem hohen inneren Widerstand. Eine Abweichung dieser Art von der Idealtemperatur verursacht eine schnellere Alterung der Zelle.¹⁵⁵

- **Aktivmaterial:**

Je nach Art und Menge des Aktivmaterials wird zwischen Hochenergie- und Hochleistungszellen unterschieden. Hochenergiezellen verwenden eine große Menge an aktivem Material, um hohe Kapazitäten zu erreichen, während Hochleistungszellen dünne Schichten aus aktivem Material verwenden, um eine hohe Leistungsdichte zu erreichen.¹⁵⁶

Elektrische Energie [Wh]:

Die elektrische Energie wird als Produkt aus Kapazität und Entladespannung definiert.¹⁵⁷

Energiedichte [Wh/kg; Wh/l]:

Die Energiedichte wird als Maß für das Energiespeichervermögen einer Zelle oder eines Batteriesystem wie Batteriemodul oder Batterie-Pack bezeichnet und hat einen direkten Einfluss auf die mögliche Reichweite eines Elektrofahrzeugs. Dabei wird zwischen gravimetrischer Energiedichte (spezifische Energie) [Wh/kg] und volumetrischer Energiedichte (Energiedichte) [Wh/l] unterschieden. Erstere bezeichnet den gespeicherten Energiegehalt pro Masse und ist bei der Betrachtung des Gesamtgewichtes wichtig. Die letztere definiert den Energiegehalt pro Volumen und wird bei der Größe des Batteriesystems berücksichtigt.¹⁵⁸

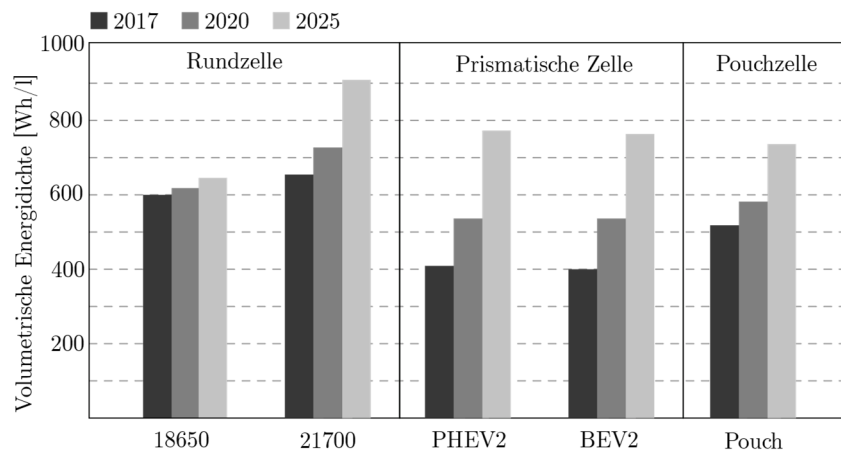


Abbildung 4.2: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität, Quelle: Fraunhofer-Allianz Batterien 2017, S. 11 (leicht modifiziert)

¹⁵⁵ Vgl. Lv et al. 2022, S. 13

¹⁵⁶ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 24

¹⁵⁷ Vgl. Korthauer 2018, S. 16 ff.

¹⁵⁸ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 9 f.

Aus Abbildung 4.2 ist ersichtlich, dass die Rundzellen und Pouch-Zellen die höchste volumetrische Energiedichte besitzen. Auf Modulebene ist die Energiedichte durch die Packungsdichte bedingt und hängt von der Geometrie der Zelle sowie von der erforderlichen Kühlmethode ab.¹⁵⁹

Leistung [W]:

Diese wird durch das Produkt aus Strom und Spannung (z. B. bei Entladung) definiert und kann in volumetrische Leistungsdichte [W/l] und gravimetrische Leistungsdichte [W/kg] unterteilt werden.¹⁶⁰

Hochstromfähigkeit bzw. C-Rate [$1/\text{zeit}$; A/Ah; $1/h$]:

Die Hochstromfähigkeit ist bei schnellen Lade- und Entladevorgängen entscheidend und wird mit C-Rate gekennzeichnet. C-Rating ist das Maß für den Strom, mit dem eine Batterie geladen und entladen wird und ist bei Entladevorgang deutlich höher als bei einem Ladevorgang. Aus Tabelle 4.1 ist ersichtlich, dass z. B. für eine C-Rate von 1C eine Batteriezelle mit 2000 mAh bei einer Stromstärke von 2000 mA in einer Stunde vollständig geladen ist.¹⁶¹

Tabelle 4.1: C-Raten einer Li-Ionen-Zelle mit 2000 mAh im Zusammenhang mit Zeit und Strom, Quelle: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., S. 11

C-Rate	Zeit für 2000 mA (theor.)	Strom pro Stunde
1C	1 Stunde	2000 mA
0,5C	2 Stunden	1000 mA
2C	30 Minuten	4000 mA
30C	2 Minuten	6000 mA

Wirkungsgrad [%]:

Beim Laden und Entladen der Batterie geht ein Teil der Energie durch Wärmeverluste verloren. Der Ladewirkungsgrad (auch Batteriewirkungsgrad) ist definiert als das Verhältnis der Energie, die der Batterie entnommen werden kann, und der beim Laden benötigten Energie.¹⁶²

Lebensdauer [a; n]:

Durch den Alterungsprozess der Batterie, der durch die Verschlechterung der elektrochemischen Eigenschaften gekennzeichnet ist, nimmt die Lebensdauer der Batteriezelle ab. Der Moment, in dem die Eigenschaften der Zelle den vorgeschriebenen Wert

¹⁵⁹ Vgl. Fraunhofer-Allianz Batterien 2017, S. 11 f.

¹⁶⁰ Vgl. Korthauer 2018, S. 16

¹⁶¹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 10 ff.

¹⁶² Vgl. Beermann et al. 2010, S. 10 ff.

unterschreiten, wird als das Ende der Batterie-Lebensdauer angenommen (End of life, EoL). Die Zeit, die vom Anfang (Begin of Life, BoL) bis zum Ende vergeht, gibt die Lebensdauer der Batteriezelle an.¹⁶³


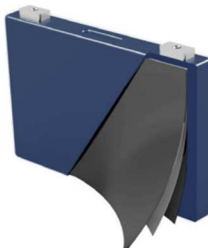
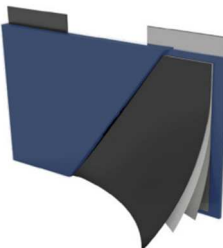
In der Praxis setzt sich diese Zeit aus einer Kombination aus zyklischer und kalendarischer Batterie-Lebensdauer zusammen. Die erste beschreibt die Anzahl der möglichen Zyklen während der Batterienutzung und die zweite die Zeit, in der die Batterie nicht verwendet wird.¹⁶⁴

4.1.4 Aufbau und Arten von Batteriezellen

Die im Automotive-Bereich verwendeten Arten von Batteriezellen können anhand ihrer Eigenschaften in drei Zelltypen unterteilt werden.

Anmerkung: In der Literatur werden die Bezeichnungen Zelltypen, Zellformate und Zellgeometrie oft als Synonyme benutzt. Hier wird unter Zelltyp die Verteilung auf Rundzelle, prismatische Zelle sowie Pouch-Zelle verstanden, die auch eine Aussage über Zellgeometrie deutlich macht. Weiterhin versteht man unter Zellformat die weitere Verteilung der Zelltypen, die sich voneinander durch den inneren Aufbau, Abmessungen und die Gehäusetechnologie unterscheiden. Somit sind in Abbildung 4.2 die drei Zelltypen mit fünf Zellformaten zu sehen (siehe Anhang B). Die Eigenschaften der verschiedenen Zelltypen sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Aufteilung und Vergleich der Zelltypen, Quelle: In Anlehnung an VDMA Batterieproduktion 2020, S. 20 ff.

	Rundzelle	Prismatische Zelle	Pouch-Zelle
Zelltyp:			
Zellgeometrie:	Zylinder	Quader	Quader mit Siegelnaht
Abmessungen:	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Typische Größe 21 x 70 (D x L, mm), aber auch andere Formate ◦ Niedrige Packungsdichte aufgrund der Raumausnutzung 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Weniger Vielfalt als bei der Pouch-Zelle ◦ Effiziente Packung des Zellverbunds ◦ Tendenz zu länglicheren Gehäusen 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Viele Größen ◦ Effiziente Platzausnutzung durch Rechteckform ◦ Gegenüber oder nebeneinander liegende Zellkontakte

¹⁶³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 13

¹⁶⁴ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 13 f.

Gehäuse:	◦ starres Metallgehäuse: - Edelstahl - Aluminium	◦ starres Metallgehäuse: - Edelstahl - Aluminium	◦ Verbundfolie: - Thermoplaste - Aluminiumfolie - PA/PET
Festigkeit:	◦ Hohe Dichtigkeit ◦ Hohe Steifigkeit ◦ Mechanisch robust ◦ Robust bei Innendruck durch Entgasung	◦ Hohe Dichtigkeit ◦ Hohe Steifigkeit ◦ Geringere mechanische Stabilität als die Rundzelle	◦ Instabiles Gehäuse ◦ Bläht sich bei Druckaufbau auf
Elektroden:	◦ gewickelte Elektroden	◦ gewickelte oder gestapelte Elektroden	◦ gestapelte Elektroden
Thermische Regulierung:	◦ Geringe Wärmeabfuhr	◦ Viel Volumen im Vergleich zur Oberfläche ◦ Wärmeleitende Oberfläche	◦ Gutes Oberflächen- zu Volumenverhältnis ◦ Effiziente Temperaturkontrolle
Volumetrische Energiedichte:	◦ Aktuell höchste Energiedichte	◦ Aktuell geringste Energiedichte der drei Zelltypen	◦ Mittlere Energiedichte
Typischer Energie-inhalt pro Zelle:	◦ 10–18 Wh	◦ 80–450 Wh	◦ 65–300 Wh

Obwohl die Produktion verschiedener Zelltypen aus ähnlichen Schritten besteht, ist eine genaue Abstimmung und Optimierung der Anlagen für den entsprechenden Batterietyp notwendig. Grund dafür sind die Unterschiede von Zelltypen, die keine Flexibilität in der Serienfertigung zulassen. Ein wesentlicher Unterschied im Herstellungsprozess besteht darin, dass die Elektroden und Separatoren in den zylindrischen Zellen aufgewickelt werden, während die Komponenten in der Pouch-Zelle im Stapelprozess zusammengefügt werden. Im Vergleich dazu können die Komponenten einer prismatischen Zelle sowohl flach gewickelt als auch gestapelt werden.¹⁶⁵

Die in Tabelle 4.2 vorgestellten Zelltypen lassen sich durch Merkmale beschreiben, die den Produktionsprozess und Nutzen in Batteriesystemen bestimmen. Einige wichtige Parameter werden als Folgenden definiert:¹⁶⁶

- **Zellgeometrie:**

Zellgeometrie dient als Grundlage für die Einteilung der Zellen in die Zelltypen, die dann mit Abmessungen der verschiedenen Zellformate einen direkten Einfluss auf Packungsdichte und damit auf die Energiedichte auf Modulebene nehmen. Deswegen ist es wichtig, eine bestmögliche Platzausnutzung auf Modul- und Packebene zu finden.

¹⁶⁵ Vgl. VDMA Batterieproduktion 2020, S. 20 f.

¹⁶⁶ Vgl. VDMA Batterieproduktion 2020, S. 20 ff.

- **Elektroden:**

Die Elektroden können gewickelt oder gestapelt sein, was einen wesentlichen Unterschied in der Herstellung darstellt. Der Vorteil des Wickelns ist die wesentlich höhere Prozessgeschwindigkeit, wobei sich beim Stapeln eine bessere Raumausnutzung innerhalb der Zelle ergibt.¹⁶⁷

- **Festigkeit:**

Die Steifigkeit ist sowohl für eine gute Handhabung als auch für eine sichere Installation der Zelle wichtig. Die Rundzelle hat die höchste Steifigkeit, aber durch mehr Kontakte ist der Montageprozess des Moduls aufwändiger. Prismatische Zellen eignen sich aufgrund ihrer Geometrie und Größe besonders gut für die Modulfertigung. Die Pouch-Zelle ist durch die Folienabdeckung weniger steif, weshalb sie nur mit einem Kunststoffrahmen montiert werden kann.

- **Thermische Regulierung:**

Die Temperatur bei allen Zelltypen lässt sich prinzipiell durch geeignete Kühlsysteme regulieren. Die Unterschiede liegen bei dem notwendigen Kühlaufwand sowie den Möglichkeiten, Wärme ab und -zuzuleiten.

Rundzelle

Die Rundzelle hat aufgrund der Geometrie die höchste volumetrische Energiedichte. Sie ist außerdem einfach zu produzieren und mechanisch sehr stabil. Auf Modulebene, je nach Moduldesign, sinkt die volumetrische Energiedichte aufgrund der Packungsdichte von Zylindern um ca. 50 % im Vergleich zur Zellebene.¹⁶⁸ Eine homogene Temperaturverteilung lässt sich aufgrund der Geometrie schwer realisieren. Das Innere der Zelle ist hohl. So kann die Zelle bei Erwärmung nach innen „atmen“ und sich nicht nach außen ausdehnen (Abbildung 4.3).¹⁶⁹

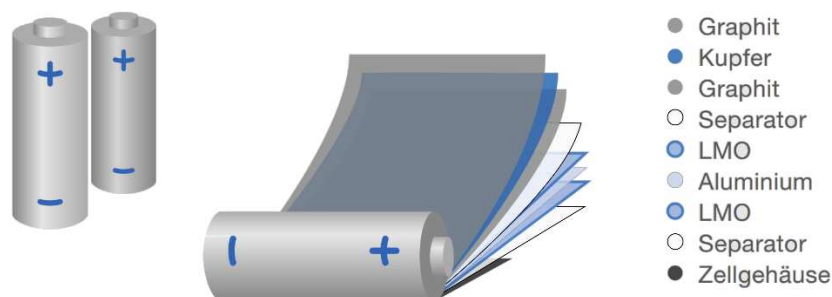


Abbildung 4.3: Aufbau einer zylindrischen Batteriezelle, Quelle: Dormann et al. 2021, S. 16 (leicht modifiziert)

¹⁶⁷ Vgl. INDUSTR.com 2018, Onlinequelle [25.11.2022]

¹⁶⁸ Vgl. VDMA Batterieproduktion 2020, S. 26

¹⁶⁹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 19

Prismatische Zelle

Die prismatische Zelle hat aufgrund des schwereren Gehäuses eine etwas niedrigere volumetrische Energiedichte im Vergleich zu anderen Zelltypen. Auf Modulebene sinkt die volumetrische Energiedichte um 20–22 % im Vergleich zur Zellebene.¹⁷⁰

Der Aufbau einer prismatischen Zelle ist jenem der zylindrischen Zelle ähnlich (Abbildung 4.4). Aufgrund der Zellform haben sie im Vergleich zur Zylinder-Bauform ein besseres Packungsdichte sowie eine bessere Wärmeabfuhr. Sie haben hingegen eine aufwendigere Zellfertigung.¹⁷¹

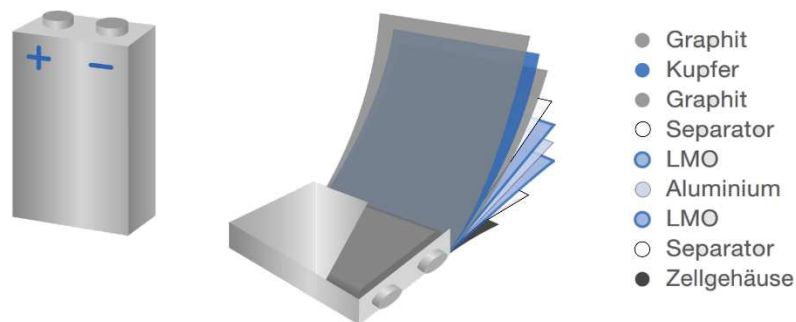


Abbildung 4.4: Aufbau einer prismatischen Batteriezelle, Quelle: Dormann et al. 2021, S. 16 (leicht modifiziert)

Pouch-Zelle

Bei der Pouch-Zelle wird ein flexibles Gehäuse verwendet (Abbildung 4.5). Sie hat eine mittlere volumetrische Energiedichte, die auf Modulebene um 30–35 % sinkt.¹⁷² Dieser Zelltyp verfügt über sehr gute Kühleigenschaften, sehr gute Wärmeableitung und formbedingt ein sehr gute Packungsdichte mit niedrigem Gewicht. Als Nachteil hat sie eine geringe mechanische Stabilität und Dichtheit. Zudem hat sie ein mögliches Aufblasen durch einen erhöhten Innendruck bei unkontrollierter Gasentwicklung.¹⁷³

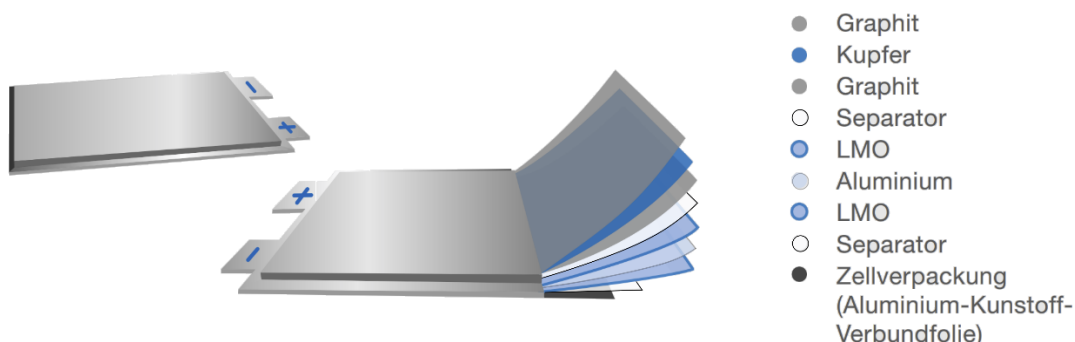


Abbildung 4.5: Aufbau einer Pouch-Zelle, Quelle: Dormann et al. 2021, S. 16 (leicht modifiziert)

¹⁷⁰ Vgl. VDMA Batterieproduktion 2020, S. 26

¹⁷¹ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 20

¹⁷² Vgl. VDMA Batterieproduktion 2020, S. 26

¹⁷³ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 20

4.1.5 Gegenwärtige Sachlagen und zukünftige Entwicklung

Zukünftige Batterietechnologien zielen darauf ab, viele Aspekte aktueller Batterien zu verbessern, von denen die wichtigsten die folgenden sind:¹⁷⁴

- höhere Energiedichte,
- kürzere Ladedauer,
- geringere Kosten,
- längere Lebensdauer,
- verbessertes Temperaturverhalten,
- erhöhte Sicherheit und
- höhere Umweltverträglichkeit.

Der Trend bei allen Zelltypen geht zu immer größeren Zellen, um eine optimierte Hochstromfähigkeit sowie mehr Energieinhalt zu erreichen. Das trifft insbesondere auf Pouch- und prismatische Zellen zu, die sich in der Automobilindustrie in der Richtung großformatiger Zellen entwickeln. Bei sehr großen Zellen ist es möglich, die Modulebene zu überspringen und die Zellen direkt zum Batteriepack zusammenzufassen. Durch den Verzicht der Modulebene ist es möglich, viele Strukturbauteile einzusparen und zudem Montageaufwände zu reduzieren.¹⁷⁵

Ein großes Potenzial in der Optimierung der Zellen liegt in neuen oder alternativen Kombinationen bereits existierender Materialien. Beispielsweise wird bei einer Festkörperbatterie anstelle eines flüssigen einen Festelektrolyten verwendet, was zur Erreichung höhere Energiedichte führt. Ein weiteres Beispiel für alternative Zellmaterialien bilden Lithium-Schwefel-Batterien. Durch die Kombination von Lithium und Schwefel kann eine hohe spezifische Energiedichte erreicht werden. Außerdem wird an Metall-Luft- und Metall-Sauerstoff-Batterien geforscht. Bei diesen Batterien wird die elektrische Energie durch die chemische Reaktion von Metallen mit Sauerstoff freigesetzt.¹⁷⁶

¹⁷⁴ Vgl. Dorrman et al. 2021, S. 22

¹⁷⁵ Vgl. VDMA Batterieproduktion 2020, S. 21 ff.

¹⁷⁶ Vgl. Dorrman et al. 2021, S. 22 f.

4.2 Batteriemodulproduktion

Folgendes Kapitel behandelt den allgemeinen Aufbau der Produktionsanlage für Batteriemodul-Fertigung sowie die darin ablaufenden Prozesse zur Assemblierung von Batteriezellen zum Batteriemodul. Der vorgestellte Produktionsprozess basiert auf den Informationen der AVL im Rahmen des BIC-Projekts und ist ein aktuelles Konzept, das bis zur praktischen Umsetzung von Änderungen und Verbesserungen beeinflusst wird.

4.2.1 Blockaufbau und modularer Aufbau von Batteriesystemen

Beim Aufbau unterschiedlicher Batteriesysteme wird generell zwischen Modul- und Blockaufbau unterschieden. Bei der Blockaufbau werden die Batteriezellen mit allen Komponenten und notwendigen Beschaltung in ein Batteriegehäuse eingesetzt. Dieser Aufbau wird meistens für kleine Batteriesysteme verwendet.¹⁷⁷

Beim modularen Aufbau, der auch im Rahmen des BIC-Projektes vorgesehen ist, wird eine bestimmte Zahl von einzelnen Zellen zu einem Modul zusammengeschaltet. Aus den Modulen wird dann ein Batterie-Pack aufgebaut (siehe Abbildung 4.14). Der Vorteil des modularen Aufbaus besteht darin, dass die Komponenten bei der Montage einfacher zu handhaben sind und das gesamte System durch die Austauschbarkeit einzelner Module gewartet werden kann. Bei größeren Batterien, die in Elektroautos eingebaut sind, wird hauptsächlich ein modularer Aufbau verwendet.¹⁷⁸

4.2.2 Serien- und Parallelschaltungen

Aus einzelnen Zellen hergestellte Module werden schließlich zum Aufbau des Batteriepacks verwendet. Durch die Kopplung von Zellen und Modulen zu einem Batteriepaket werden Daten über die Leistung des Energiespeichers, einschließlich Spannung und Kapazität, bereitgestellt. Ein Batteriesystem kann auf vielfältige Weise aufgebaut werden, indem Zellen und Module entweder in Reihe oder parallel geschaltet werden. Bei der Reihenschaltung mehrerer Zellen für energieintensive Anwendungen addiert sich zwar die Spannung jeder Zelle, doch bei Ausfall einer Zelle wird der Stromkreis komplett unterbrochen (Abbildung 4.6).¹⁷⁹

¹⁷⁷ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 22 f.

¹⁷⁸ Vgl. Rahimzei/Sann/Vogel 2015, S. 23

¹⁷⁹ Vgl. Ketterer et al. 2009, S. 22

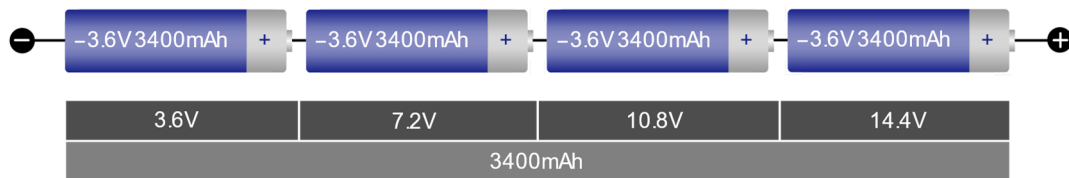


Abbildung 4.6: Serienschaltung, Quelle: ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd., [09.10.2022]

Bei Parallelschaltung von Zellen werden Zellen gleicher Ausführung parallel geschaltet. Bei gleichem Spannungsniveau der Zellen erhöht sich die Kapazität mit wachsender Zellenzahl. In diesem Fall führt der Defekt einer Zelle nicht zum Gesamtausfall der Verschaltung (Abbildung 4.7).¹⁸⁰

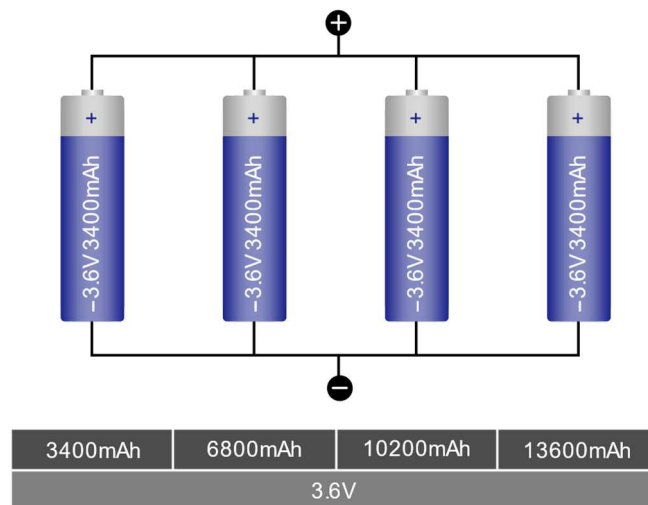


Abbildung 4.7: Parallelschaltung, Quelle: ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd., [09.10.2022]

Im industriellen Umfeld gelangt eine Kombination beider Varianten zum Einsatz, deren Stärken je nach Anwendung sowie Hersteller variieren. Aufgrund des geringeren Aufwandes an Überwachungselektronik ist die Reihenschaltung von Modulen mit parallel geschalteten Zellen in der Regel deutlich einfacher, sicherer und kostengünstiger. (Abbildung 4.8).¹⁸¹

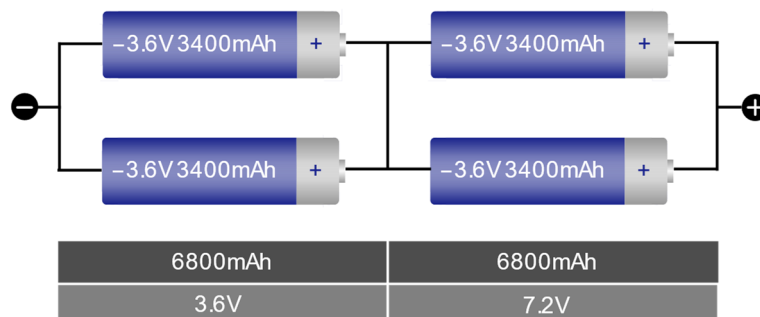


Abbildung 4.8: Kombination der Serien- und Parallelschaltung, Quelle: ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd., [09.10.2022]

¹⁸⁰ Vgl. Ketterer et al. 2009, S. 22

¹⁸¹ Vgl. Ketterer et al. 2009, S. 22 f.

4.2.3 Funktionsweise und Aufbau eines Batteriemoduls

Ein Batteriemodul sollte so ausgelegt sein, dass es während des Fahrzeugeinsatzes über einen längeren Zeitraum effektiv, konsistent sowie sicher arbeitet. Die Grundbausteine von Batteriemodulen sind Lithium-Ionen-Zellen, die besondere Anforderungen an das Batteriedesign stellen. Das Batteriemodul besteht neben elektrochemischen Speicherzellen aus mehreren mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten mit unterschiedlichen Aufgaben, die richtig aufeinander abgestimmt werden müssen.¹⁸²

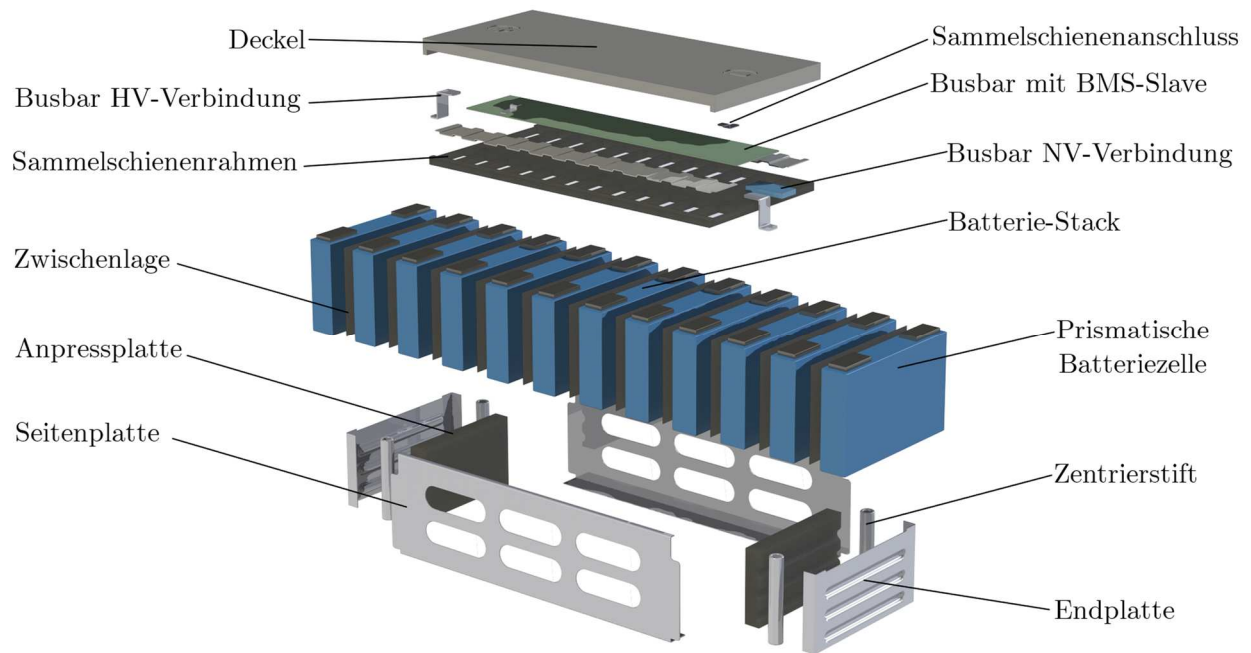


Abbildung 4.9: Allgemeiner Aufbau eines Batteriemoduls mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung

Die Größe des Batteriemoduls hängt von den verwendeten Batteriezellen sowie der Anwendung ab. Die Zusammensetzung der Module ist je nach Hersteller und Anwendung durch unterschiedliche technologische Lösungen bestimmt, wie etwa durch die Wahl der Kühlung. Im Allgemeinen sind die Hauptelemente für jedes Modul typisch. Das Batteriemodul, das in Abbildung 4.9 ersichtlich ist, basiert auf prismatischen Zellen, die hintereinander in einem Stapel (eng. Stack) angeordnet sind (Abbildung 10). Rundzellen müssen im Gegensatz zu prismatischen Zellen sowie Pouch-Zellen in einen geschlitzten Träger eingesetzt werden, um einen Stapel zu bilden. Dieser Träger kann in der Mitte der Batterien platziert und verklebt oder an der Ober- und Unterseite der Zellen befestigt werden.

Zum Schutz vor mechanischen oder anderen Beschädigungen ist jede Komponente in einem robusten Gehäuse untergebracht. Einzelne Zellen sind mit Sensoren ausgestattet,

¹⁸² Vgl. Korthauer 2018, S. 89

um die Spannung, Temperatur und Ladezustand überwachen zu können. Die Sensoren werden über eine Slave-Platine mit dem Batteriemanagementsystem (BMS) verbunden. Der Cell Supervision Circuit (CSC) gleicht kontinuierlich die verschiedenen Ladungen in den Zellen aus. Dies ermöglicht, dass sich die Belastungen zwischen den Batterien nicht stark unterscheiden, was die Lebensdauer der Batteriezellen verlängert.¹⁸³

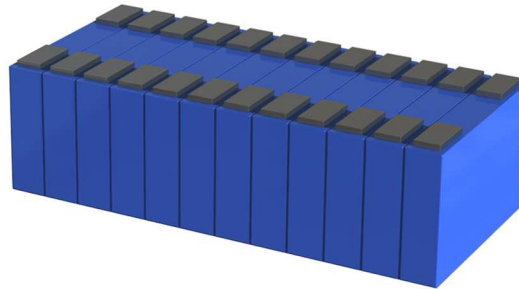


Abbildung 4.10: Batterie-Stack mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung

Die Anpressplatten drücken auf die äußere Seite der ersten Batteriezelle von beide Seiten des Batteriestacks. Zusammen mit den End- und Seitenplatten entsteht eine Verspannungseinheit, die Zellen miteinander verspannt. Mindestens eine Anpressplatte ist dabei federnd ausgebildet und übt im durch die Verspannungseinheit verspannten Zustand eine Rückstellkraft auf die Verspannungseinheit aus. Diese Verspannung ist zuständig für Kompensierung der Volumenänderung von Pouch-Zellen, die durch die Atmung der Zelle bei Lade- und Entladeprozess entsteht.

4.2.4 Batteriemodulproduktion

Der Herstellungsprozess von Batteriemodulen ist je nach Hersteller sehr unterschiedlich und mit der rasanten Entwicklung der Technik ergeben sich fortlaufend Änderungen und Optimierungen. Der hier vorgestellte Produktionsprozess ist im Rahmen des BIC-Projekts entstanden und unterliegt mehreren Änderungen bis zur praktischen Umsetzung.

Das Konzept einer Modulproduktionsanlage sollte so ausgelegt sein, dass Module mit allen drei unterschiedlichen Typen von Batteriezellen produziert werden können. Dieser Ansatz erfordert ein hohes Maß an Flexibilität sowie ein optimiert ausgelegtes Produktionsanlagenkonzept. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde eine Produktionsanlage geschaffen, die aus vier Hauptarbeitsstationen besteht (Abbildung 4.11):

- **Stackingstation:** Hier erfolgt zunächst eine Qualitätsprüfung und danach die Zusammensetzung von Batteriezellen zu einem Batteriestack. Diese Station wird

¹⁸³ Vgl. Kampker 2014, S. 57

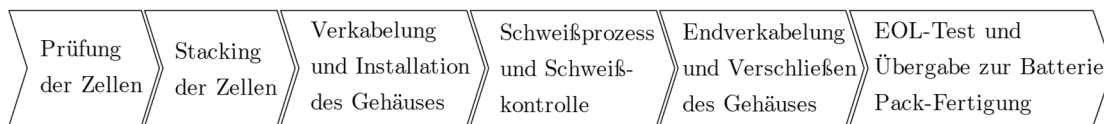
Die für den Menschen zulässige Berührungsspannung wird somit erst durch die Zusammenschaltung vieler Zellen erreicht.

Der Transport zwischen Stationen erfolgt manuell mithilfe mobiler Arbeitstische, dies kann aber künftig durch den Einsatz von sogenannten fahrerlosen Transportfahrzeugen ersetzt werden.

An jeder Arbeitsstation befinden sich die DMC(Data Matrix Code)-Scanner zum manuellen Scannen von Bauteilen, was die Identifizierung des Bauteils und die Datenspeicherung ermöglicht. Dadurch wird eine Produktrückverfolgbarkeit ermöglicht.

Der in Abbildung 4.13 dargestellte allgemeine Prozess zur Batteriemodulfertigung beschreibt die Fertigung für prismatische und Pouch-Zellen. Bei den Rundzellen fehlt der Produktionsschritt des Klebens, der auf einer Klebestation, nach dem Stackingprozess, erfolgt. Der Gesamtprozess zur Batteriemodulfertigung für alle drei Zelltypen ist schrittweise in Abbildung 4.12 dargestellt.

Prismatische und Pouch-Zelle



Rundzelle

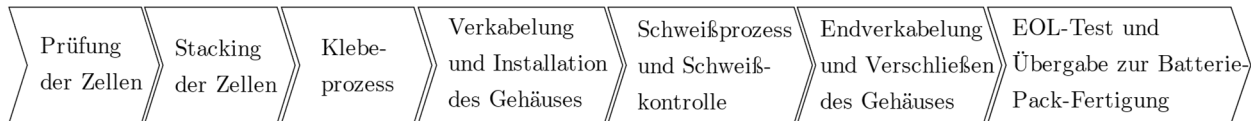


Abbildung 4.12: Schritte der Batteriemodulfertigung, Quelle: Eigene Darstellung

Prüfung von Batteriezellen

Vor dem Zusammenbau der Zellen zu Batteriepacks müssen die Zellen einer Qualitätsprüfung unterzogen werden. Hier erfolgen die elektrische und optische Prüfung der Batteriezellen sowie die Identifikation und Datenspeicherung, die eine Rückverfolgbarkeit der Produkte ermöglicht. Zum Testen von Zellen werden unterschiedliche Lösungen verwendet, die Flexibilität sowohl für unterschiedliche Zelltypen als auch für unterschiedliche Formate bieten müssen. Dieser Prozess ist ein zentraler Bestandteil der Qualitätssicherung (QS) und wird in der Masterarbeit von Herrn Gernot Schlögl beschrieben.¹⁸⁴

¹⁸⁴ Vgl. Schlögl 2020

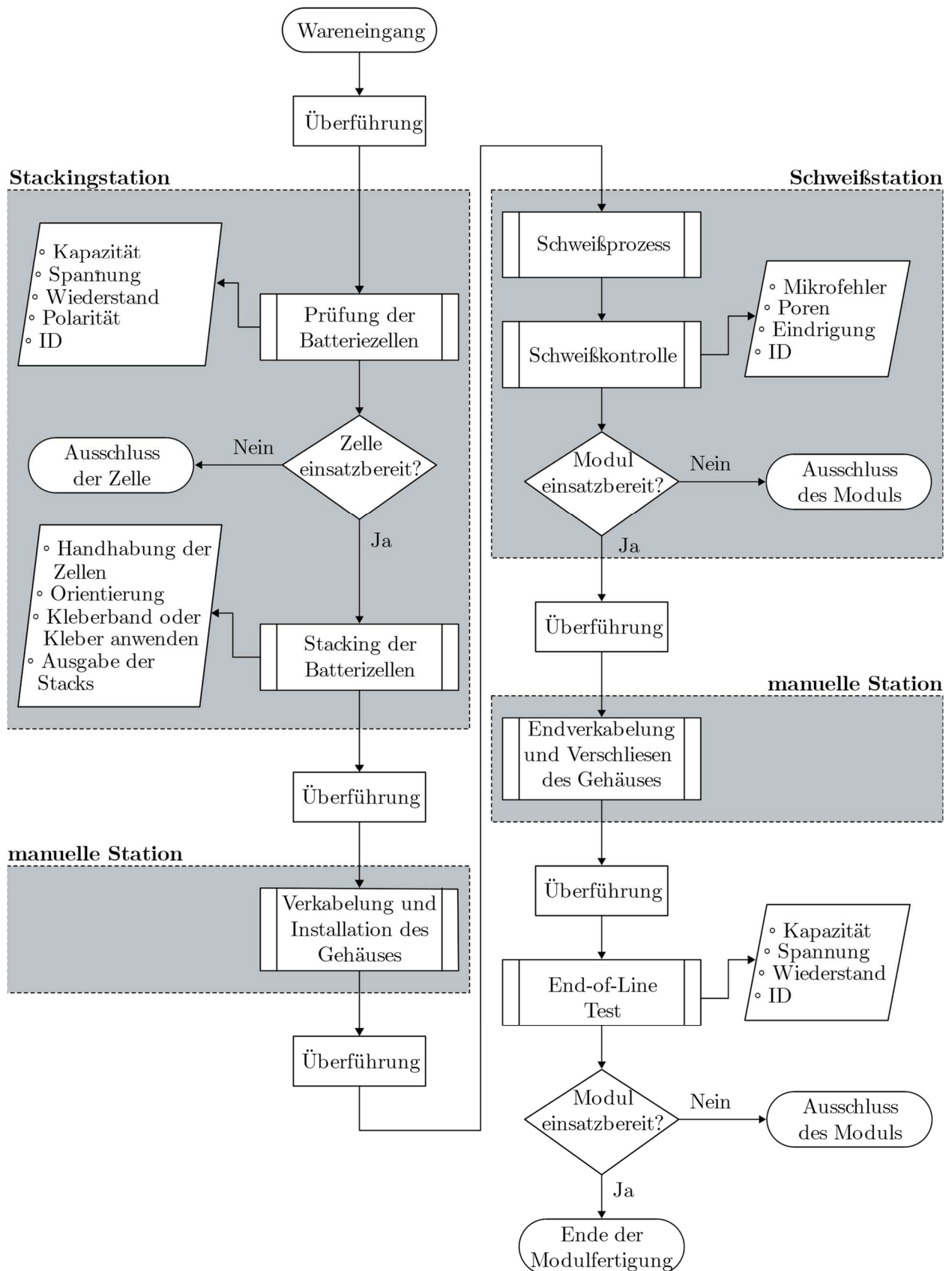


Abbildung 4.13: Allgemeiner Prozess der Batteriemodulfertigung für prismatische- und Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung

Stacking der Zellen

Nach dem QS-Prozess werden die Zellen zum „Stacking“ überführt. Dieser Prozess wurde von Herrn Mathias Prechtl in seiner Masterarbeit detailliert beschrieben.¹⁸⁵ Bei dem Prozess werden einzelne Zellen zu einem Stack zusammengefügt (siehe Abbildung 4.10). Der Prozess hängt zum Teil vom Zelltyp ab. Prismatische Zellen und Pouch-Zellen werden durch Kleben übereinander gestapelt. Rundzellen hingegen werden in den Zellträger einglegt und in der Klebestation separat verklebt.

Der Klebevorgang hängt davon ab, ob Klebeband oder Flüssigkleber verwendet wird. Für die Anwendung von Klebebändern können die Zellen in einem Rollenverfahren laminiert werden. Für die Verwendung von Kompressionspolstern mit Kleber wird ein vorgeschchnittenes Band auf einer Rolle durch Rollenniederdruckprozesse auf die Batteriezellenoberfläche aufgebracht. Für den flüssigen Klebstoff werden spezielle Spender verwendet, um den Klebstoff im richtigen Mischungsverhältnis sowie in der richtigen Position aufzutragen. Ein Roboter kann diesen Prozessschritt mit seiner Präzision unterstützen. Die Pouch-Zelle wird in einen Rahmen eingesetzt. Es ist wichtig, zu beachten, dass sich die Pouch-Zellen während des Lade- oder Entladezyklus in ihrer Dicke ausdehnen bzw. schrumpfen. Für die Rahmen muss deshalb ein elastisches Material benutzt werden, das diese Änderung der Dicke ermöglicht.

Eine detaillierte schrittweise Aufteilung des Stackingprozesses wird im nächsten Kapitel bei der Grobplanung des MRI-Arbeitssystems für die Stackingstation aufgeführt.

Verkabelung und Installation des Gehäuses

Rundzellen benötigen als Zwischenschritt eine Klebestation. Dabei werden die im Zellträger platzierte Rundzellen mit einem flüssigen Kleber befestigt. Der Kleber wird von einem Klebegerät mit einstellbarer Dosiermenge bereitgestellt. Die Ausrüstung ist jeweils von den Klebereigenschaften (z. B. der Viskosität) abhängig. Der Klebeprozess muss präzise stattfinden und wird daher von einem einzigen Roboter durchgeführt. Der nächste Schritt für die Rundzelle, der mit dem zweiten Schritt von prismatischen und Pouch-Zellen übereinstimmt, erfolgt an der manuellen Station, wo die Sammelschiene, Verkabelung und Sensoren sowie die Teile des Gehäuses am Stack angebracht werden. Die Pole werden durch Anschweißen einer vorgefertigten Kontaktierungsschiene miteinander verbunden.

Nachdem das Gehäuse am Stack zusätzlich mit notwendigen Komponenten angebracht wird und durch Vorrichtungen befestigt erfolgt die Überführung zur Schweißstation, wo die Teile des Gehäuses zusammengeschweißt werden.

¹⁸⁵ Vgl. Prechtl 2020

Schweißprozess und Schweißkontrolle

Der Schweißprozess findet an der Schweißstation statt und wird von einem Roboter durchgeführt. Eine automatische Qualitätsprüfung ist nicht vorgesehen, sondern lediglich eine einfache Sichtkontrolle.

Endverkabelung und Verschließen des Gehäuses

Das Modul wird dann wieder in die manuelle Station zurückgebracht, wo die Verkabelung beim Schließen des Modulgehäuses erfolgt. Mit diesem letzten Verfahrensschritt ist die Fertigung des Moduls abgeschlossen. Abschließend wird ein End of Line (EoL)-Test durchgeführt, um die Funktionalität sowie Sicherheit des Batteriemoduls zu prüfen. Dies erfolgt außerhalb des Modulfertigung-Bereichs.

4.3 Batterie-Pack

Am Ende der Elektroautobatterie erfolgt noch die Verbindung des Moduls und der restlichen Komponenten zu einem kompletten und funktionsfähigen Energiesystem, das nach Qualitätsprüfungen und Tests in ein Elektrofahrzeug eingebaut werden kann. Der Gesamtprozess, von Batteriezelle bis Elektroauto, ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

Die Komponenten im Elektroauto sind nach dem Prinzip der sogenannten „Skateboard“-Architektur angeordnet, bei der sich das Batterie-Pack im Unterboden des Fahrzeugs befindet und Elektromotor mit der erforderlichen Leistungselektronik an der Vorder- und/oder Hinterachse liegt. Diese Architektur ist einer der Faktoren, die Elektroautos im Vergleich zu Autos mit Verbrennungsmotor sicherer machen, da sie einen niedrigen Schwerpunkt ermöglicht und im Falle eines Unfalls den sichersten Platz für das Batterie-Pack darstellt.¹⁸⁶

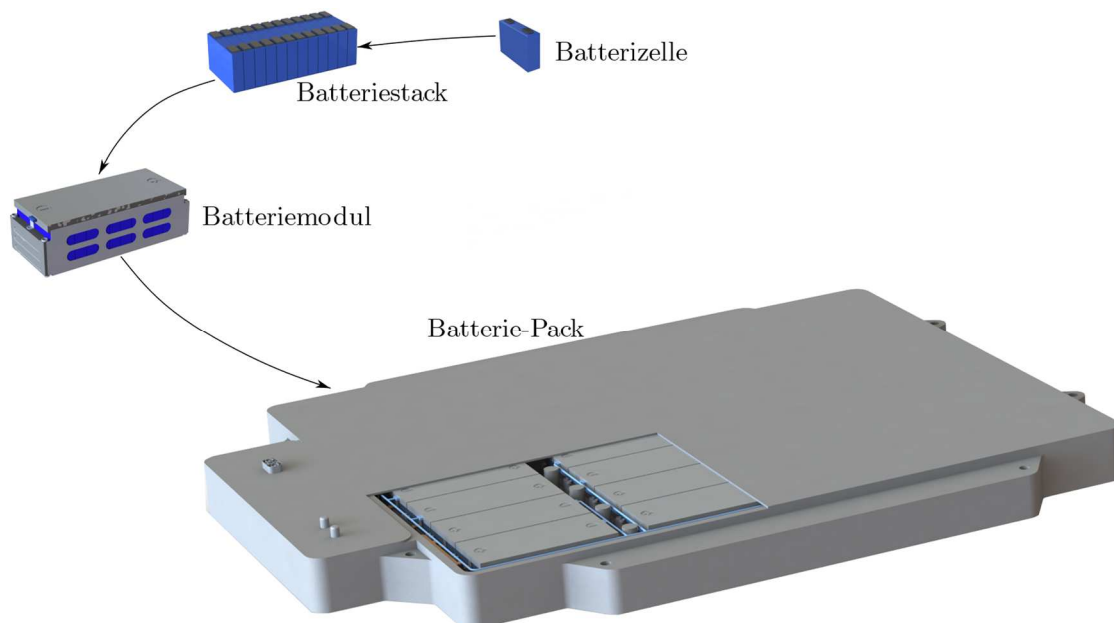


Abbildung 4.14: Aufbauprozess der Hochvolt-speicher mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung

4.3.1 Funktionsweise und Aufbau eines Batterie-Packs

Das Batterie-Pack ist ein komplexes Hochvoltspannungssystem, das den Stromfluss zu und von den Zellen steuern sowie das Leistungsniveau innerhalb des Designrahmens halten soll.¹⁸⁷ Um den sicheren und zuverlässigen Betrieb des Batterie-Packs sicherzustellen, müssen die einzelnen Komponenten wie das Gehäuse, die Batteriemodule, das Kühlsystem

¹⁸⁶ Vgl. Rudschies 2021, Onlinequelle [17.05.2022]

¹⁸⁷ Vgl. Folkson 2014, S. 617

sowie ein Batteriemanagementsystem mechanische, Sicherheits- und Serviceanforderungen erfüllen. Die meisten Anforderungen werden vom BEV oder HEV selbst definiert. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich aus Normen und Standards wie z. B. die Norm für die Sicherheitssysteme von Elektrofahrzeugen, ISO 6469 „Electrically Propelled Road Vehicles – Safety Specifications“.¹⁸⁸

Funktionale Ebenen des Batterie-Packs

Die grundsätzlichen Anforderungen an das Batteriesystem und dessen Management betreffen folgende vier funktionale Ebenen:¹⁸⁹

- **Mechanische Integration:** Die einzelnen Komponenten werden mechanisch und zielgerichtet in die Batteriebaugruppe integriert. Das Design der einzelnen Komponenten und deren Verbindung stellt sicher, dass die Batteriebaugruppe die mechanischen Anforderungen über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs erfüllt, ohne Kompromisse bei Funktionalität sowie Sicherheit einzugehen.
- **Elektrisches Management:** Das Elektromanagement stellt die elektrische Funktionsfähigkeit des Batteriesystems in sämtlichen Situationen des Fahrzeugbetriebs sicher. Dazu zählen die Bereitstellung der für den Fahrzeugantrieb erforderlichen elektrischen Energie während des Betriebs und die Steuerung des Ladevorgangs beim externen Laden sowie das regenerative Nachladen während des Fahrzeugbetriebs, das Anzeigen von sicherheitsrelevanten Zuständen wie z. B. fehlerhafte galvanische Trennung, Kurzschluss, Überhitzung, Überladung, Tiefentladung Entlastung sowie Auslösen der entsprechenden Reaktionen auf diese Zustände.
- **Thermisches Management:** Die Leistungseigenschaften und Lebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen sind stark von der Umgebungstemperatur abhängig. Daher ist eine zuverlässige Kontrolle von Temperatur und Ladeströmen essenziell, um die Batterie immer in einem angemessenen Temperaturbereich halten zu können. Bei der Auslegung des thermischen Managementsystems ist daher dafür zu sorgen, dass die entstehende Verlustwärme effizient abgeführt werden kann. Da die Kühlung zusätzliche Energie benötigt, liegt die Effizienz in der praktischen Anwendung häufig deutlich unter den optimalen Werten.
- **Kommunikation zur Fahrzeugseite:** Die Batterie eines Elektrofahrzeugs bildet eine der wichtigsten Systemkomponenten und ist daher direkt in die elektrische Fahrzeugumgebung integriert. Dies erfordert einen stetigen Datenaustausch

¹⁸⁸ Vgl. Scrosati 2015, S. 258 ff.

¹⁸⁹ Vgl. Korthauer 2018, S. 92 f.

zwischen Batteriesystem und Fahrzeug. Der Austausch von Daten, die für Betrieb des Fahrzeugs und der Batterie von größter Bedeutung sind, betrifft aktuelle Daten über Ladezustand, elektrische Leistung, Stromaufnahmefähigkeit sowie Innenwiderstand. Wesentlich sind auch sicherheitsrelevante Signale, die bei Störungen die Sicherheit des Gesamtsystems gewährleisten.

Das Design eines Batterie-Packs und seiner internen Komponenten hängt stark von den Anforderungen seiner Anwendung ab. Die verschiedenen Arten von BEVs und HEVs verfügen über unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf Leistungsbedarf und Energiegehalt. Das Fahrzeugkonzept definiert Größe und Form (Bauraum) sowie die mechanischen, elektrischen und thermischen Schnittstellen des Batteriepacks.¹⁹⁰ Der allgemeine Aufbau eines Batterie-Packs ist in Abbildung 4.15 ersichtlich.

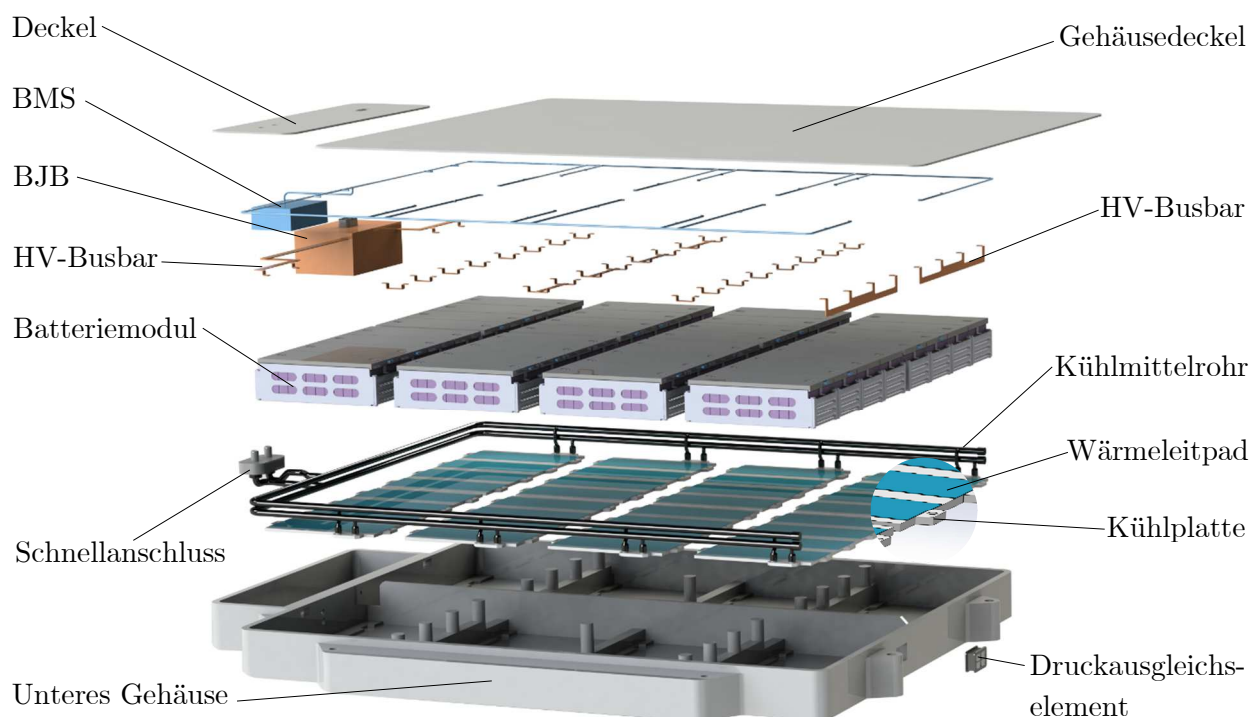


Abbildung 4.15: Allgemeiner Aufbau eines Batterie-Packs mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung

Die Hauptkomponenten eines Batteriepacks sind die Batteriemodule. Die einzelnen Module werden in der Regel elektrisch in Reihe geschaltet sowie von einem BMS überwacht. Das zentrale BMS wird BMS-Master genannt und die CSC, die die einzelnen Zellspannungen und Modultemperaturen erfassen, werden typischerweise als BMS-Slaves bezeichnet. Das BMS sammelt Informationen von den CSCs und verschiedenen Temperatur-, Spannungs- und Stromsensoren und steuert die im Schaltkasten befindlichen HV-Schalter gemäß den gemessenen Eingangsdaten. Der CSC sitzt meist sehr nah an den Batteriemodulen und misst die Spannung sämtlicher Einzelzellen eines Moduls sowie die

¹⁹⁰ Vgl. Scrosati 2015, S. 246

Temperatur an ausreichenden Messpunkten. Das BMS überwacht Größen wie die Zellenspannung, den Batteriestrom und die Temperaturen und trennt schließlich das Batteriesystem vom Fahrzeug, um gefährliche Ausfälle wie z. B. Tiefentladung oder Überladung zu verhindern. Die Schalter zum Trennen der Batterie sind zusammen mit weiteren Komponenten wie Isolationswächter und Stromsensor in einem Schaltkasten bzw. Battery Junction Box (BJB) untergebracht.¹⁹¹

Jede Batterie-Pack-Komponente ist in einem Batteriepack-Gehäuse eingeschlossen und so fest fixiert, dass sie auch den härtesten Bedingungen über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs hinweg standhält. Das Gehäuse besteht im Allgemeinen aus einem oberen und einem unteren Gehäuse, die durch eine Dichtung voneinander getrennt sind. Die Dichtung verhindert das Eindringen von Partikeln und Flüssigkeiten und ist nach einer definierten Schutzart ausgeführt. Das Gehäuse enthält auch alle Schnittstellen zum Fahrzeug, wie die HV-Stecker, Kommunikations- und Kühlschnittstellen.¹⁹²

Die Größe und Form des Batteriegehäuses werden zum einen durch den Bauraum und die vom Fahrzeug vorgegebenen Befestigungspunkte und zum anderen durch die internen Komponenten bestimmt, die in das Gehäuse passen müssen. Da das Batteriepack den größten Teil des Gewichts des gesamten Elektrofahrzeugs ausmacht, ist das Batteriegehäuse in enger Wechselwirkung mit dem Design der Fahrzeugkarosserie gestaltet. Angesichts der Größe und des Gewichts von Batteriepacks von Elektrofahrzeugen kann das Batteriegehäuse als integraler Bestandteil der gesamten Fahrzeugstruktur entworfen werden. Daher werden hohe Anforderungen an die Steifigkeit sowie Festigkeit des Gehäuses gestellt.¹⁹³

Das Kühlsystem des Batterie-Packs ist dafür verantwortlich, die Zellen in einem definierten Temperaturbereich zu halten, um eine Alterung durch hohe Temperaturen sowie eine eingeschränkte Reichweite durch sehr niedrige Temperaturen zu verhindern. Die Kühlplatten sind fester Bestandteil des Gehäuses und übernehmen Crashlasten. Die Materialeigenschaften des Wärmeleitpads optimieren zusätzlich die Wärmedämmung des Batteriegehäuses.¹⁹⁴

Weitere in das Batteriegehäuse integrierte Komponenten sind das Druckausgleichselement sowie eine Vorrichtung zur Kondensatbehandlung. Üblicherweise werden hierfür poröse Membranen verwendet, die den erforderlichen Luftaustausch bei gleichzeitiger Einhaltung der Dichtigkeitsanforderungen ermöglichen. Da das Gehäuse abgedichtet ist und der atmosphärische Druck außerhalb des Gehäuses während des Betriebs wechselt, ist es

¹⁹¹ Vgl. Scrosati 2015, S. 246 ff.

¹⁹² Vgl. Scrosati 2015, S. 246 f.

¹⁹³ Vgl. Scrosati 2015, S. 255

¹⁹⁴ Vgl. Scrosati 2015, S. 254 f.

erforderlich, diesen Druckunterschied inner- und außerhalb des Gehäuses über die Lebensdauer des gesamten Batteriepacks auszugleichen, um Schäden innerhalb des Batteriepacks zu vermeiden. Ein weiterer Vorteil der Verwendung einer Membrane betrifft die Möglichkeit, eine Überdrucksicherung zu integrieren. Bei einem Zellfehler wie z. B. einer Entlüftung muss der entstehende Überdruck an einer definierten Stelle abgebaut werden. Die Membrane ist in ein Kunststoffgehäuse integriert und so konstruiert, dass sie nach Überschreiten einer definierten Druckdifferenz reißt.¹⁹⁵

4.3.2 Batterie-Pack-Produktion

Im Gegensatz zu Batteriemodulen, deren Produktion von der Auswahl der Batteriezellen abhängt, ist die Produktion eines Batterie-Packs für sämtliche Arten von Batteriezellen identisch. Allerdings gilt hier, wie auch bei Modulen, dass sich die Produktion je nach Hersteller unterscheidet.

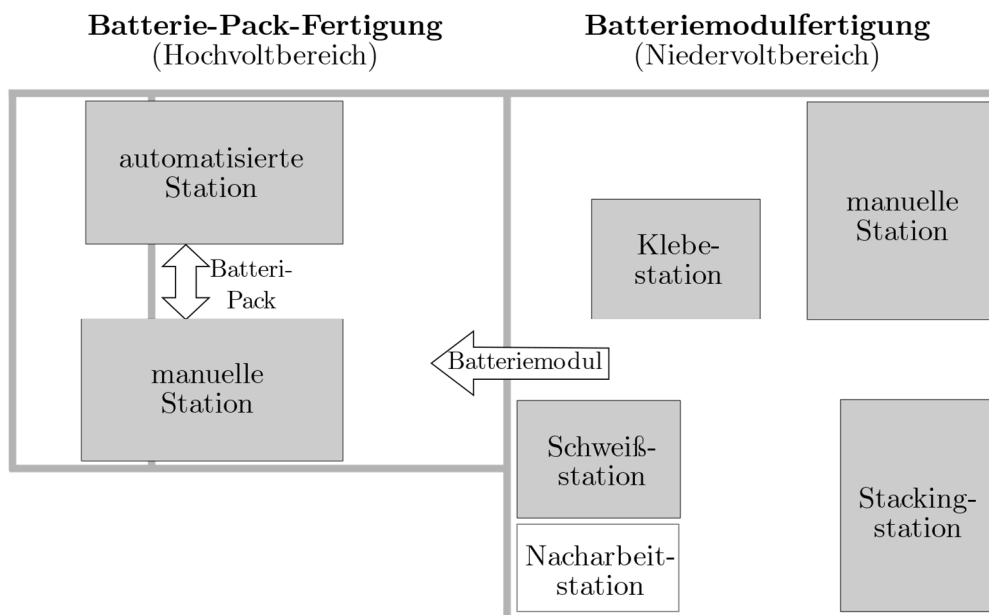


Abbildung 4.16: Allgemeines Layout der Gesamt-Batterie-Pack-Produktionsanlage, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4.16 zeigt das allgemeine Layout für die Batterie-Pack-Produktionsanlage, das aus zwei getrennten Bereichen besteht. In Hochvoltbereich sind zwei Arbeitsstationen positioniert, zwischen denen das Batterie-Pack während des Produktionsprozesses einige Male bewegt wird. Um diese Bewegung zu ermöglichen, ist die Verwendung von Arbeitstischen mit Rollengang vorgesehen. Der allgemeine Prozess zur Batterie-Pack-Fertigung wird durch Produktionsschritte bestimmt (Abbildung 4.17).

Installation der Hauptbaugruppe

¹⁹⁵ Vgl. Scrosati 2015, S. 257 f.

Vor dem eigentlichen Beginn des Montageprozesses ist es erforderlich, den DMC/Barcode des Bauteils zu lesen, um die Rückverfolgbarkeit zu ermöglichen. Der Batterie-Pack-Fertigungsprozess beginnt an der manuellen Station mit der Positionierung des Untergehäuses mittels Manipulator und Fixierung durch Spannwerkzeug. Danach folgt die Installation von HV- und LV-Anschlüssen, bei denen die Schrauben mit einem elektronisch gesteuerten Drehmomentschlüssel angezogen werden. Dieselbe Installationsmethode wird bei der Installation eines Kältekollektors verwendet, für dessen Installation ein spezielles Gerät des Herstellers erforderlich ist. Vor dem nächsten Schritt erfolgt noch die Montage der Versteifungsplatten.

Montage des thermischen Systems und Dichtheitsprüfung

Bevor die Kühlungseinheit und das Kühlmittelrohr mit einem Manipulator positioniert und dann manuell installiert werden, müssen Schaumschutz und Kompressionspolster auf die Kühlplatten angebracht werden. Danach erfolgen eine Dichtheitsprüfung des installierten Systems und die Reinigung der Klebefläche als Vorbereitung für die Installation der Batteriemodule. Danach wird das Batterie-Pack zur automatisierten Station überführt.

Montage der Module und Ausgleichsprüfung

An der automatisierten Station befindet sich ein Vision-System mit intelligenter Kamera, die das Anbringen von Wärmeleitpads oder Wärmeleitpaste überwacht. Zum Auftragen der Wärmeleitpaste wird eine spezielle Ausrüstung mit einem Dosiersystem benutzt. Die Installation der Batteriemodule wird durch eine optische Kontrolle überwacht. Der Einbau von Modulen in das Gehäuse ist durch einen Roboter durchzuführen. Die Module werden mittels Schrauben befestigt, die mit einem elektronisch gesteuerten Drehmomentschlüssel angezogen werden. Das Batterie-Pack wird dann an die manuelle Station überführt, wo die Prüfung der HV-Isolation sowie die Widerstands- und Spannungsprüfung stattfinden.

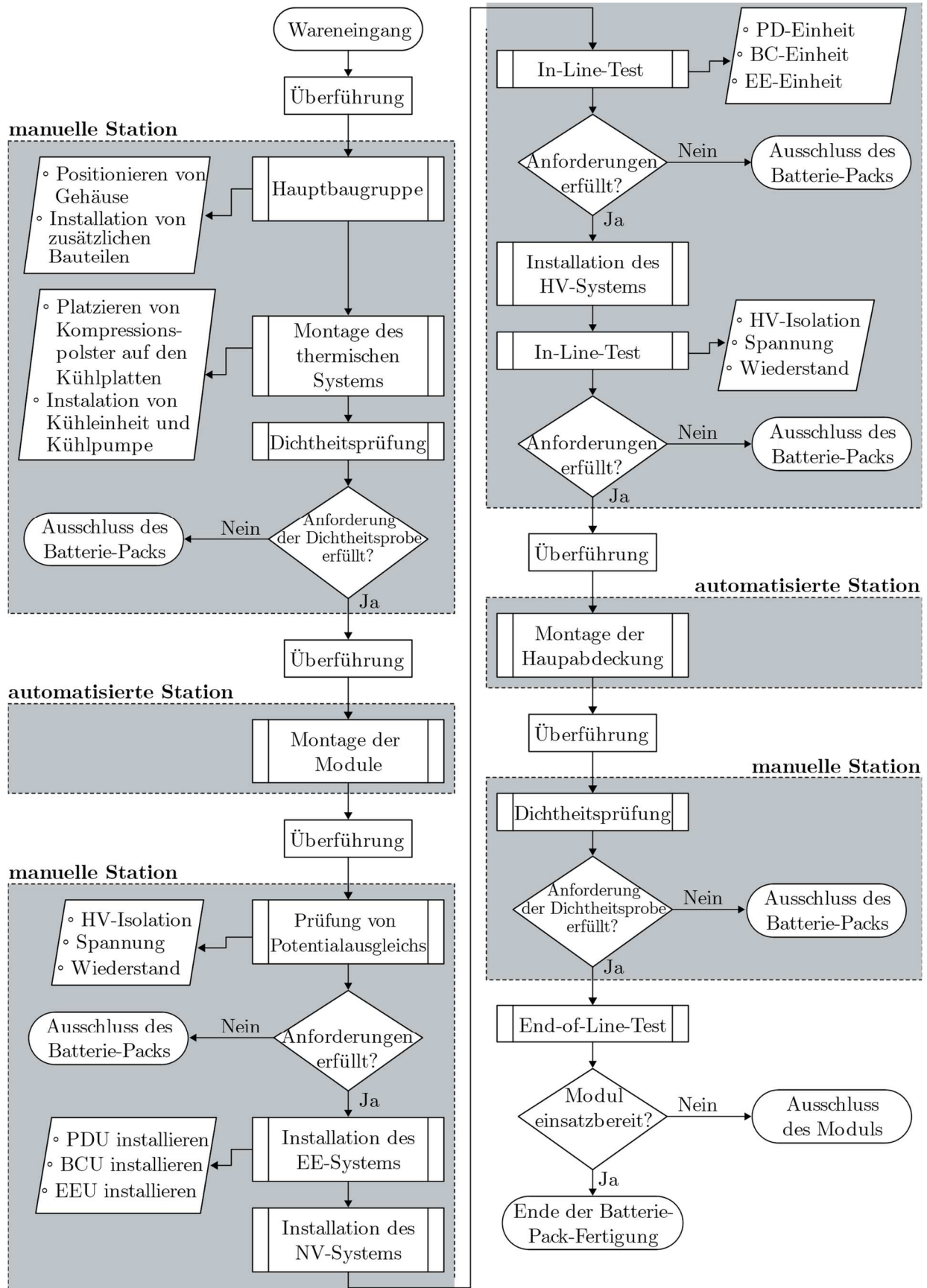


Abbildung 4.17: Allgemeiner Prozess der Batterie-Pack-Produktion, Quelle: Eigene Darstellung

Installation des EE-, NV- und HV-Systems

An der manuellen Station erfolgt eine Potenzialausgleichsprüfung, um sicherzustellen, dass keine Unterschiede zwischen den Modulpotenzialen bestehen. Danach wird, laut Abbildung 4.17, eine Reihe von verschiedenen Komponenten installiert. Nach der Installation von EE-, NV- und HV-Systemen erfolgt noch eine Prüfung in Form von In-Line-Tests.

Montage der Hauptabdeckung

Die Montage der Hauptabdeckung findet wieder an der automatisierten Station statt. Dabei wird das zum Abdichten der Batterie verwendete Dichtmittel von einem Roboter aufgetragen. Der Gehäusedeckel wird dann mit einem Manipulator an der Batterie-Pack-Gehäuse platziert sowie mittels Schrauben befestigt. Danach wird das fertige Batterie-Pack wieder an die manuelle Station angebracht, wo nur noch die Dichtheit geprüft werden muss. Am Ende muss noch der EoL-Test durchgeführt werden, was außerhalb des Hochvoltspannungsbereichs stattfindet. Somit ist die Batterie-Pack-Herstellung abgeschlossen.

Diese konzeptionelle Beschreibung der Produktion des Hochvoltspeichers in diesem Kapitel sowie des Batteriemoduls in der letzten dient als grobe Darstellung eines möglichen Produktionsprozesses und soll als Grundlage für die Anwendung des Umsetzungskonzeptes von hybriden Arbeitssystemen fungieren.

5 MRI-Arbeitssysteme in der Produktion von Hochvoltsspeichern

In diesem Kapitel wird der beschriebene Hochvoltsspeicher unter dem Aspekt der Möglichkeit analysiert, kollaborationsfähige Roboter einzusetzen sowie den Produktionsprozess durch die gemeinsame Arbeit von Mensch und Roboter zu optimieren. Dabei wird die Methodik aus Kapitel 3 verwendet. Die Rolle der Methode besteht darin, Leitfäden sowie Informationen bereitzustellen, die den Unternehmen helfen könnten, die richtigen Entscheidungen bei der Implementierung der MRI-Arbeitssysteme zu treffen.

Die erhaltenen Ergebnisse lassen sich in zwei Arten unterteilen. Zunächst werden durch die Analyse der gesamten Produktion jene Orte ausgewählt, an denen der Einsatz von MRI möglich und sinnvoll ist. Anschließend werden die ausgewählten Orte durch eine optimierte Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter geplant. Damit werden die Daten generiert, die zur Auswahl von Roboter und Peripherie herangezogen werden können. Dabei liegt der Fokus weiterhin auf MRK, die den höchsten Interaktionsgrad besitzt und die größten Vorteile mit sich bringt.

5.1 Auswahl der Arbeitsplätze für MRI-Implementierung

Laut der Implementierungsmethodik (siehe Abschnitt 3.1) umfasst der erste Schritt bei der Planung eines MRI-Arbeitssystems die Analyse der gesamten Produktion und die Auswahl geeigneter Arbeitsplätze für die Umsetzung. Als Ausgangspunkt dienen allgemeine Informationen über das Potenzial der MRI-Systemimplementierung. Als Nächstes werden unternehmensspezifische Ziele herangezogen, bzw. Anforderungen, die durch die MRI-Umsetzung erfüllt werden sollen. In Bezug auf sämtliche Arbeitsplätze, die bei dieser Analyse berücksichtigt werden, ist es notwendig, die Arbeitsaufgaben zu beschreiben sowie Eigenschaften der Werkstücke zu definieren. Basierend auf all diesen Informationen ist es dann möglich, unter Anwendung der Kriterien, eine Entscheidung über Auswahl von potenziellen MRI-Implementierungsstellen zu treffen.

5.1.1 Einleitende Überlegungen und Einschränkungen

Es muss betont werden, dass sich der beschriebene Prozess der Hochvoltsspeicher-Herstellung in der Planungsphase befindet und deshalb die tatsächlichen Erfahrungsdaten fehlen. Deshalb können die Schlussfolgerungen als Ergebnis der Analyse nicht mit den

tatsächlichen Produktionswerten verglichen werden. Eine abschließende Aussage darüber, ob der Einsatz von kollaborierenden Robotern am betrachteten Arbeitsplatz zu positiven Veränderungen in der Produktion geführt hat, sowohl unter dem Aspekt der Durchführungszeit als auch der dadurch verursachten Ergebnisse, lässt sich nicht treffen.

In dieser Übergangsphase zwischen der klassischen Produktionsweise, in der Mensch und Roboter räumlich getrennt sind, ist der Einsatz kollaborativer Roboter als eines der Merkmale von Industrie 4.0 insbesondere für mittlere und kleine Unternehmen essenziell, bei denen eine Vollautomatisierung aufgrund von geringen Stückzahlen und hohen Investitionskosten nicht sinnvoll ist. Im Rahmen dieser Analyse wird die Hochvoltpeicher-Produktion für ein KMU betrachtet. Dies deckt sich mit den Planungen der Forschungsfabrik, wo die maximale Tageskapazität mit einer Taktzeit von 41 Minuten auf 15 Modulen prognostiziert wird und wo sich stets nur ein Produkt im Produktionsprozess befindet (siehe Anhang E).

Obwohl einige Arbeitsplätze als automatisierte Stationen geplant sind, an denen klassische Roboter zum Einsatz kommen, wird die mögliche Mensch-Roboter-Interaktion mit diesen Robotern trotzdem berücksichtigt. Bei manuellen Arbeitsplätzen wird der Fokus weiterhin auf Leichtbaurobotern liegen.

5.1.2 Feststellen der Ziele und MRI-Systemanforderungen

Das Feststellen von Zielen und Anforderungen ist ein wesentlicher Faktor bei der Entscheidungsfindung über die Implementierung von MRI-Arbeitssystemen. Sie geben Leitfäden vor und bestimmen, worauf der Fokus liegt.

Da sich die hier beschriebene Produktion von Hochvoltpeicher noch in der Planungsphase befindet, werden keine klar definierten Ziele festgestellt. Im Fokus stehen daher allgemeine Ziele, wie die Verbesserung der Ergonomie bei manuellen Arbeitsplätzen sowie die Gestaltung zukunftssicherer Arbeitsplätze. Die Anforderungen werden durch die Flexibilität der Arbeitsplätze und die Anpassungsfähigkeit an schnelle Veränderungen definiert.

5.1.3 Aufgabenbeschreibung

Anhand der Informationen zu jedem Arbeitsplatz kann die Entscheidung stattfinden, wie geeignet der Arbeitsplatz für die Implementierung von MRI-Arbeitssystemen ist. Wesentliche Informationen sind eine kurze Beschreibung der wichtigsten Montageschritte sowie Angaben zu den verwendeten Bauteilen (Tabelle 3.2).

Übersicht der Hochvoltpeicher-Produktion

Der gesamte Prozess besteht aus sechs Arbeitsstationen, wobei die Klebestation lediglich bei Rundzellen benutzt wird (Abbildung 5.1). Es ist zwischen Niedervolt- und Hochvoltbereich, bzw. zwischen Batteriemodul- und Batterie-Pack-Herstellung zu unterscheiden. Der Prozess der Batteriemodul-Fertigung hängt von der Art der Batteriezellen ab, während der Prozess der Batterie-Pack-Fertigung nicht vom Batterietyp abhängt. Weiterhin ist zwischen manuellen und automatisierten bzw. halbautomatisierten Arbeitsstationen zu unterscheiden.

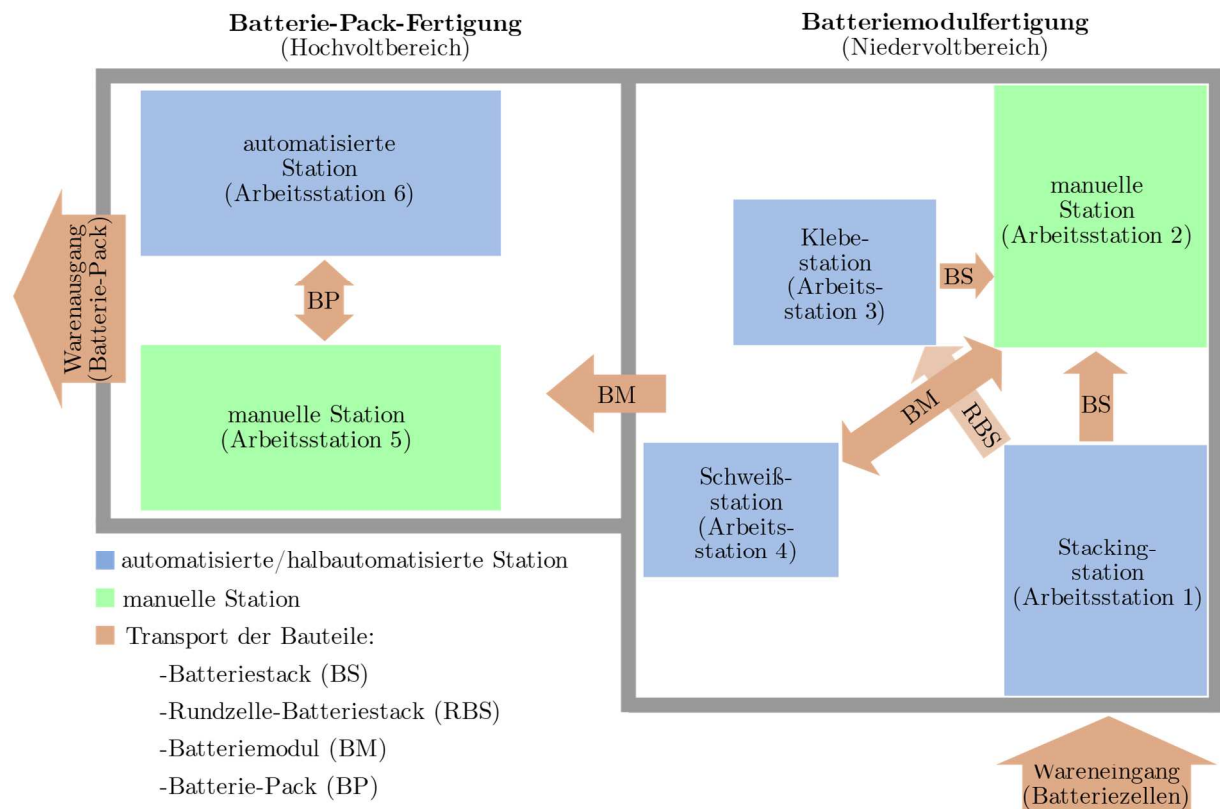


Abbildung 5.1: Allgemeines Layout der Batterie-Pack-Produktionsanlage, Quelle: Eigene Darstellung

Beschreibung von Aufgaben und Informationen der Bauteile

In Tabelle 5.1 sind sämtlichen Arbeitsstationen in beiden Arbeitsbereichen mit ihren wichtigsten Montageschritten und Aufgaben beschrieben. Diese Kurzbeschreibung baut auf Kapitel 3 auf und soll hier den Gesamtprozess der Montage mit allen Arbeitsstationen darstellen und so die Anwendung der Methode zur Implementierung von MRI-Arbeitssystemen zu erleichtern.

Tabelle 5.1: Beschreibung von Aufgaben an Arbeitsstationen, Quelle: Eigene Darstellung

Arbeitsstation	Aufgabenbeschreibung
Batteriemodulfertigung	
Stackingstation (Arbeitsstation 1):	<p>Die Stackingstation besteht aus zwei Bereichen. Im ersten Bereich erfolgt der Qualitätssicherungsprozess. Der Prozess besteht darin, Zellen zu entnehmen, diese zu scannen sowie optische und elektrische Messungen durchzuführen. Beschädigte Zellen werden dann aussortiert und von einem Arbeiter zur weiteren Überprüfung entnommen. Die anderen Zellen werden mit einer Identifikation bedruckt und dem zweiten Bereich zum Stackingprozess überführt.</p> <p>Nach der Übernahme der Zelle vom QS-Bereich erfolgt ein Handhabungsprozess, der teilweise vom Zelltyp abhängt. Der Handhabungsprozess besteht aus der Entnahme der Zelle, der Zellreinigung, dem Auftragen des Klebers sowie dem Stapeln der Zellen zu einem Stack. Am Ende erfolgt die Ausgabe des fertigen Stacks.</p>
Manuelle Station (Arbeitsstation 2):	<p>Die Aufgaben an der manuellen Arbeitsstation lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe umfasst die Vorbereitungen des Batteriestacks zum Schweißen und die zweite umfasst die Aufgaben nach dem Schweißprozess sowie die Vorbereitung des Moduls für die Batterie-Pack-Fertigung. Die erste Gruppe umfasst das Positionieren des Stacks, ID-Scan, das Fügen der vormontierten Sammelschiene, das Aufbringen der Zellstapel-schablone, Klemmung und Orientierung für den Schweißprozess. Die zweite Gruppe von Aufgaben umfasst die Verkabelung und das Verschließen des Gehäuses.</p>
Klebestation (Arbeitsstation 3):	<p>Die Klebestation umfasst folgende Aufgaben: ID-Scan des Rundzelle-Stacks, Positionierung des Stacks in der Vorrichtung, und Aufbringen von Kleber (von Roboter ausgeführt).</p>
Schweißstation (Arbeitsstation 4):	<p>Bei der Schweißstation werden die Module in die Vorrichtung eingesetzt, es wird die ID gescannt und dann erfolgt der Schweißprozess. Am Ende findet eine Qualitätsprüfung statt.</p>

Batterie-Pack-Fertigung	
Manuelle Station (Arbeitsstation 5):	An der manuellen Arbeitsstation werden die nächsten Aufgaben durchgeführt: Positionieren von Gehäuse durch einen Manipulator und Installation von Bauteilen, Montage des thermischen Systems und Dichtheitsprüfung, Ausgleichsprüfung der Module, Installation von EE- und NV-Systemen, In-Line-Test sowie Installation von HV-Systemen.
Automatisierte Station (Arbeitsstation 6):	Während der Montage wird das Batteriepack mehrfach zwischen der manuellen und automatisierten Arbeitsstation gewechselt. Bei der automatisierten Station werden die Installation der Module und die Montage der Hauptabdeckung von einem Roboter gemacht.

Um eine Entscheidung über die sinnvolle Umsetzung von MRI zu machen, sind laut Tabelle 3.2 (siehe Abschnitt 3.3) neben den Informationen über die Aufgaben an der jeweiligen Arbeitsstation auch die Informationen über die benutzten Bauteile wichtig. Diese sind aus Kapitel 4 und Anhang E zu entnehmen (Größe, Masse, Geometrie).

5.1.4 Identifikation des Potenzials für die MRI-Implementierung

An dieser Stelle werden die allgemeinen Informationen über die Einführungsgründe (siehe Abschnitt 3.2.1) und Einführungshindernisse (siehe Abschnitt 3.2.2) mit den unternehmensspezifischen Zielen (siehe Abschnitt 3.2) kombiniert, um mit den eigentlichen Beschreibungen von Aufgaben und der Anwendung von Kriterien (siehe Abschnitt 3.4.1) eine Entscheidungshilfe zur Auswahl von MRI-geeigneten Arbeitsplätzen zu erhalten.

5.1.5 Auswahl von potenziellen Arbeitsplätzen für die MRI-Implementierung

Anhand der Informationen zu jeder Arbeitsstation kann die Entscheidung stattfinden, wie geeignet der Arbeitsplatz für die Implementierung von MRI-Arbeitssystemen ist. Wesentliche Informationen sind eine kurze Beschreibung der wichtigsten Montageschritte sowie Angaben zu den verwendeten Bauteilen (Tabelle 3.2) (siehe Abschnitt 3.3).

Obwohl einige Arbeitsplätze automatisiert werden sollen, werden in folgender Tabelle alle Arbeitsplätze im Hinblick auf die an ihnen ausgeführten Aufgaben analysiert. Anschließend werden die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Automatisierungsplanung diskutiert.

Tabelle 5.2: Bewertung von Arbeitsstationen nach Kriterien, Quelle: Eigene Darstellung

K.Nr.	K.O. Kriterien							MRI ist realisierbar				MRI ist einfach zu realisieren						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
AS 1	x	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
AS 2	x	x	0	1	1	x	1	0	0	0	0	1	1	x	1	x	x	1
AS 3	x	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
AS 4	x	x	1	0	0	x	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
AS 5	x	x	0	1	1	x	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
AS 6	x	x	0	1	1	x	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0

1 – ja

0 – nein

x – nicht relevant / unbekannt

Auswahl und Begründung

Basierend auf den Daten aus Tabelle 5.2, unter Verwendung der zuvor erwähnten Informationen über MRI-AS sowie der Daten über Aufgaben und Bauteilen an einzelnen Arbeitsstationen können abschließende Schlussfolgerungen gezogen werden.

Arbeitsstation 1:

Bei der Arbeit an der Stackingstation kommen Batteriezellen aller drei Typen mit unterschiedlichen Abmessungen zum Einsatz, weshalb es wichtig ist, dass die Arbeitsstation flexibel ist. Die Zellen befinden sich in einer geordneten Position und können problemlos vom Roboter aufgenommen werden. Bedenkt man, dass jede Zelle separat zum Stack hinzugefügt werden muss, ist diese Arbeit für den Menschen monoton und könnte zudem leicht automatisiert werden, weshalb die Stackingstation für MRI geeignet ist.

Arbeitsstation 2:

Wie bereits dargelegt, besteht die Arbeit an diesem Handarbeitsplatz aus zwei Teilen. Für den zweiten Teil der Aufgaben muss kein Roboter eingesetzt werden. Für den ersten Teil ist der Einsatz eines Roboters möglich, da das Handling des Moduls notwendig ist, was aufgrund seiner Abmessungen und seines Gewichts für den Menschen problematisch sein kann. Aufgrund der unzureichenden Anzahl von Arbeitsschritten, wie einer geringen Anzahl von Modulen pro Schicht (15 Module in zwei Schichten), ist die Einführung des Roboters allerdings nicht erforderlich, da der Roboter einen Großteil der Zeit im Stillstand sein sollte. Mit der zukünftigen Skalierung der Produktion und damit der Erhöhung der Modulanzahl könnte die Arbeit an diesem Arbeitsplatz jedoch unter ergonomischen und zeitlichen Gesichtspunkten durch Einbindung einer MRI optimiert werden.

Arbeitsstation 3:

Die Arbeit an der Klebestation ist lediglich für einen Batteriestapel aus runden Zellen relevant. Ein hohes Maß an Flexibilität ist daher nicht erforderlich. Die Arbeit besteht aus nur wenigen Arbeitsschritten, wobei der Hauptschritt das Auftragen des Klebers darstellt. Für diesen Schritt ist der Einsatz von Robotern vorgesehen, da der Prozess Präzision erfordert. Die Durchführung jeglicher Form von MRI ist nicht erforderlich, da der Verzicht auf den Zaun keine Vorteile mit sich bringt.

Arbeitsstation 4:

Die Arbeit am Schweißarbeitsplatz besteht aus nur wenigen Arbeitsschritten, deren Hauptteil das Schweißen der Modulgehäuse ist, das von einem Roboter vorgenommen wird. Hier ist kein MRI-AS erforderlich. Das Entfernen des Schutzzauns ist auch aus sicherheitstechnischer sowie praktischer Sicht nicht gestattet.

Arbeitsstation 5:

Die Arbeit besteht aus einer Vielzahl von Arbeitsschritten, bei denen eine Menge unterschiedlicher Bauteile zum Einsatz gelangt, die sich in Abmessungen, Form, Steifigkeit und Masse voneinander unterscheiden. Dabei erfolgt die Montage schwerer Teile mit einem Manipulator. Obwohl der Einsatz von Roboter bei einigen Arbeitsschritten die Arbeit von Menschen erleichtern würde, gibt es eine Vielzahl von Faktoren, die diesen Einsatz erschweren oder sogar unmöglich machen. Zunächst besteht eine große Vielfalt an Schritten und verwendeten Bauteilen, die nicht dazu bestimmt sind, geordnet positioniert sowie ausgerichtet zu werden. Die Vielfalt der Schritte führt zu einem häufigen Wechseln des Effektors und zu einer notwendigen Anpassung an den nächsten Schritt. Die Vielfalt und die unorganisierte Position der Komponenten erfordern eine Lösung zur Organisation oder Verwendung von Sensoren, was in beiden Fällen die Investitionskosten erhöht, ohne große Vorteile zu erzielen. Der nächste erschwerende Faktor umfasst die Größe und Form des Arbeitsbereichs, da die Batterie-Packs große Abmessungen haben können. Dieses Problem könnte teilweise durch die Einführung einer mobilen Plattform oder einer einzelnen Linearachse gelöst werden, was jedoch die Zusammenarbeit erschwert und die Investitionskosten zusätzlich erhöht. Aus ergonomischer Sicht schließt die Vielfalt der Aufgaben Monotonie aus, was die Arbeit etwas erleichtert sowie den Einsatz eines Roboters überflüssig macht.

Arbeitsstation 6:

Die Arbeit an der automatisierten Station wird von einem Roboter unterstützt, mit dem Module installiert und die Hauptabdeckung montiert werden. Andere Aufgaben werden von Bedienern ausgeführt. Hier gibt es keinen hinreichend begründeten Grund, ein MRI-Arbeitssystem einzusetzen, da eine gemeinsame Arbeit zwischen Mensch und Roboter nicht erforderlich ist. Zudem ist der erforderliche Arbeitsraum, ähnlich wie bei der

manuellen Station, zu groß für die Umsetzung eines Leichtbauroboters. Da die Module scharfe Kanten und hohe Massen aufweisen, stellt deren Handhabung für den Menschen ein hohes Risiko dar. Die Verwendung eines Industrieroboters zur Durchführung irgendeiner Form von MRI würde keine gerechtfertigten Vorteile mit sich bringen.

5.2 Auswahl von MRI

Die Stackingstation erwies sich als die beste Option für die Implementierung einer Mensch-Roboter-Interaktion. Vor der groben Planung gilt es, den Interaktionsgrad zu wählen. An dieser Stelle werden erneut andere Arbeitsstationen berücksichtigt, an denen automatisierte Arbeit geplant ist. Im Allgemeinen, unter dem Aspekt der Flexibilität und der geringeren Investitionskosten für kollaborative Roboter, kann es unter Umständen oft wünschenswert sein, ein MRI-System geringeren Grades zu implementieren. Aufgrund des Gewichts und der Größe der Arbeitsteile können jedoch kollaborative Roboter am automatisierten Arbeitsplatz im HV-Bereich nicht eingesetzt werden. Wie die vorangegangene Analyse gezeigt hat, ist aber kein MRI-System erforderlich.

An den Klebe- und Schweißstationen können kollaborative Roboter eingesetzt werden, obwohl es keinen Grund für ein MRI-Arbeitssystem gibt. In jedem Fall ist die Implementierung von MRI-1 und MRI-2 möglich, allerdings nicht sinnvoll.

Die Stackingstation, an der zwei Gruppen von Aufgaben ausgeführt werden, kann während der Qualitätssicherung als MRI-1 (getrennte Zellen befinden sich außerhalb des Arbeitsbereichs des Roboters) oder als MRI-2 (getrennte Zellen befinden sich im Arbeitsbereich des Roboters) implementiert werden. Angesichts dessen wird die Grobplanung dieses Teils des Arbeitsplatzes nicht durchgeführt. Im Stapelprozess können MRI-3 oder MRI-4 implementiert werden, je nachdem, ob ein Mensch und ein Roboter gleichzeitig am selben Werkstück arbeiten müssen (z. B. bei der Zellreinigung).

5.3 Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme

Die in Kapitel 3.5 dargelegte Grobplanung von MRI-AS besteht aus drei Schritten. Zuerst erfolgt anhand von Aufgaben, die in Montageoperationen unterteilt sind, eine Bewertung anhand der Fähigkeiten von Mensch und Roboter. Dabei wird entschieden, ob ein Mensch oder ein Roboter den beobachteten Schritt besser ausführen kann. Anschließend wird je nach Interaktionsgrad über die Sicherheit gesprochen, wobei der Fokus in Rahmen der Grobphase auf organisatorischen Sicherheitsmaßnahmen liegt. Im letzten Schritt werden

die Montageoperationen in die optimale Reihenfolge gebracht und für jede Operation lassen sich die Ausführungszeiten mittels MTM abschätzen.

5.3.1 Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben

Für die gewählte Stapelstation gilt es zunächst, die Aufgaben in Montageoperationen zu unterteilen.

Unterteilung von Aufgaben in die Montageoperationen

Die Stackingstation besteht aus zwei Teilen: dem QS-Bereich und dem Stackingbereich. In Abbildung 5.3 sind damit die theoretische Aufteilung von Bereichen, der Ablauf und der Materialfluss angezeigt.

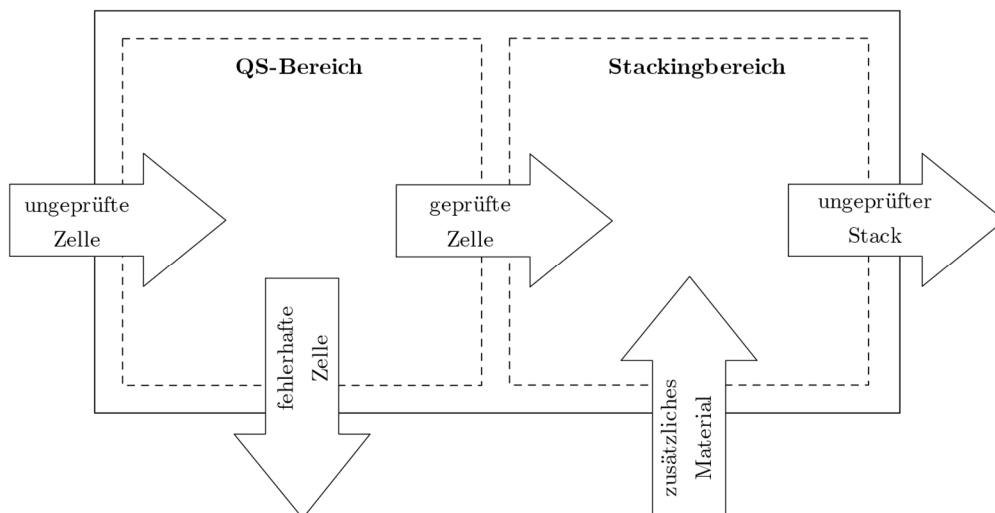


Abbildung 5.2: Theoretische Aufteilung der Stackingstation und Durchlauf, Quelle: (Prechtl 2020, S. 26)

Abbildung 5.3 teilt die Aufgaben an der Stackingstation in fünf Unterprozesse auf. Dabei ist zwischen der Handhabung von Zellen beim QS- und dem Stackingprozess zu unterscheiden.

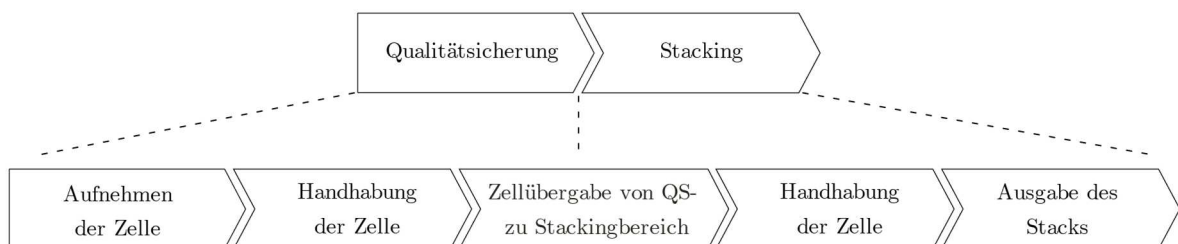


Abbildung 5.3: Hauptschritte bei Stackingstation, Quelle: Eigene Darstellung

5.3 Grobplanung der MRI-Arbeitssysteme

5 MRI-Arbeitssysteme in der Produktion von Hochvoltspeichern

Die Montageoperation von dem QS-Prozess sind in Abbildung 5.4 angezeigt. Im Allgemeinen hängt der Prozess vom Zelltyp ab. Wie schon erwähnt, kann es nur beim Aussortieren der Zelle zu einer Interaktion kommen.

Prismatische und Pouchzelle:



Rundzelle:



Abbildung 5.4: QS-Prozess der prismatische Zelle, Rundzelle und Pouch-Zelle, Quelle: In Anlehnung an Schlögl 2020, S. 83 ff.

Zwischen dem QS- und Stackingbereich erfolgt eine automatisierte Zellübergabe, die die Zellen für den Stackingprozess positioniert. Der Zellübergabeprozess ist in Abbildung 5.5 ersichtlich.

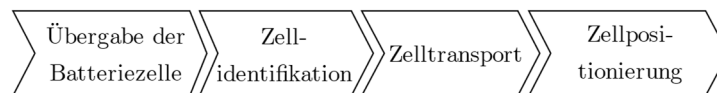


Abbildung 5.5: Zellübergabeprozess von QS zu Stacking gültig für alle drei Zelltypen, Quelle: In Anlehnung an (Prechtl 2020, S. 27)

Die zu stackenden Zellen werden in den Stackingbereich eingegliedert und durch den Roboter mittels des angebrachten Greifers gehandhabt sowie zu einem Stack assembliert. Die hierbei zu durchlaufenden Teilprozesse können weiter aufgeteilt werden und je nach Zelltyp kann eine Segmentierung stattfinden (Abbildung 5.6).

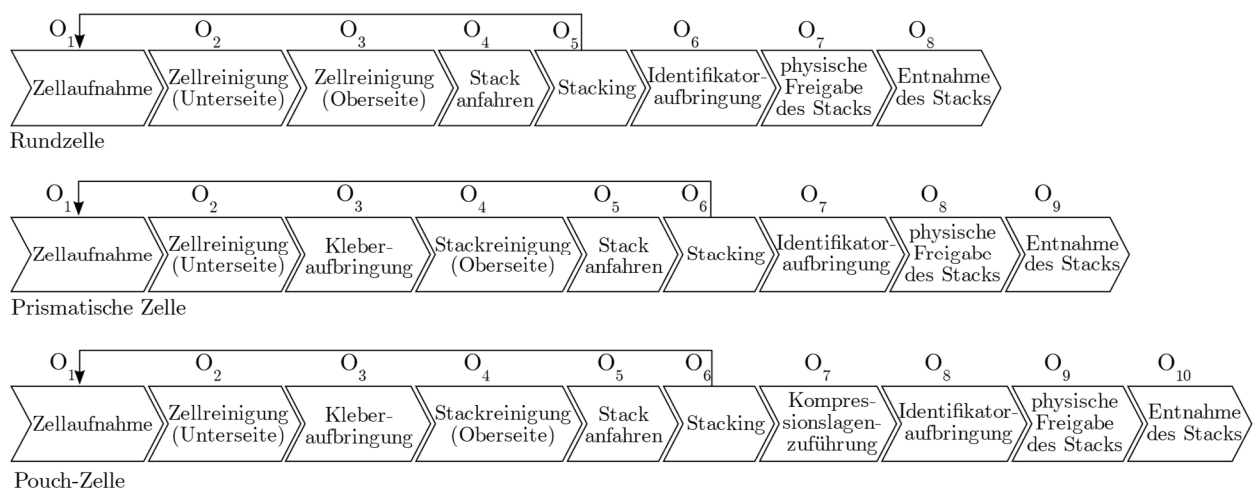


Abbildung 5.6: Montageoperationen des Stackingprozesses, Quelle: In Anlehnung an Prechtl 2020, S. 28 f.

Bewertung der Ressourcen von Mensch und Roboter

Der Prozess beginnt mit der Auswahl relevanter Kriterien für jede Montageoperation, gefolgt von der Auswahl der geeigneten Ausprägung (Wert 1) für jedes Kriterium (Tabelle 5.3). Die nicht relevanten Kriterien und Ausprägungen für die jeweilige Montageoperation werden übersprungen (Wert 0).

Tabelle 5.3: Auswahl von Ausprägungen und Bewertung von Ressourcen für die Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung

Kriterium	Ausprägung	Montageoperationen									
		O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	O ₆	O ₇	O ₈	O ₉	O ₁₀
K ₁	A _{1,1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{1,2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{1,3}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K ₂	A _{2,1}	1		0	0	1	1	0	0	0	0
	A _{2,2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	A _{2,3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₃	A _{3,1}	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	A _{3,2}	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	A _{3,3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₄	A _{4,1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{4,2}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K ₅	A _{5,1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{5,2}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	A _{5,3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₆	A _{6,1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{6,2}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K ₇	A _{7,1}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	A _{7,2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{7,3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₈	A _{8,1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{8,2}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
K ₉	A _{9,1}	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1
	A _{9,2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₁₀	A _{10,1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{10,2}	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
K ₁₁	A _{11,1}	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1
	A _{11,2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A _{11,3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₁₂	A _{12,1}	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
	A _{12,2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Für jedes Kriterium i sowie jede Ausprägung j wird eine Bewertung der Ressourcen Mensch und Roboter vorgenommen und damit quantifiziert, welche Fähigkeit der Mensch bzw. der Roboter für die betrachtete Montageoperation und das betrachtete Kriterium

aufweist (Tabelle 5.5). Um die Objektivität zu steigern, wird die betrachtete Ressource im Vergleich zu den Bewertungsaspekten gemäß Tabelle 5.4 bewertet. Dabei erfolgt eine Bewertung, ob die Ressource Mensch im Vergleich mit der Ressource Roboter besser (Bewertung mit 1), gleichwertig (Bewertung mit 0,5) oder schlechter (Bewertung mit 0) in Bezug auf die Bewertungsaspekte ist.

Tabelle 5.4: Bewertungsaspekte mit zugehörigem Wertebereich, Quelle: Schröter 2018, S. 54

Bewertungsaspekt	Formelzeichen	Wertebereich
Taktzeit	F_Z	$\in \{0; 0.5; 1\}$
Zusatzinvest	F_K	$\in \{0; 0.5; 1\}$
Prozessqualität	F_{PQ}	$\in \{0; 0.5; 1\}$
Arbeitsqualität	F_{AQ}	$\in \{0; 0.5; 1\}$

Die Bewertungsaspekte werden gewichtet, um die Normierung der Fähigkeitskennzahl zu erreichen. Durch die Gewichtung lässt sich die Wichtigkeit von Bewertungsaspekten für die jeweilige Ausprägung anpassen. Hier wird eine allgemeine Gewichtung von 0,25 angenommen.

Tabelle 5.5: Berechnung von Fähigkeitskennzahlen für die Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung

Montageoperation 1											
K.Nr.	A.Nr.	Bewertungsaspekt				Gewichtung				Normierte Fähigkeitskennzahl	
		F_Z	F_K	F_{PQ}	F_{AQ}	$g_Z \cdot F_Z$	$g_K \cdot F_K$	$g_{PQ} \cdot F_{PQ}$	$g_{AQ} \cdot F_{AQ}$	$F_{Mges,i,j}$	$F_{Rges,i,j}$
K ₁	A _{1,3}	0	0,5	0,5	0	0	0,125	0,125	0	0,375	0,625
K ₂	A _{2,1}	0	0,5	0,5	0	0	0,125	0,125	0	0,25	0,75
K ₃	A _{3,2}	0	0,5	0,5	0,5	0	0,125	0,125	0,125	0,375	0,625
K ₄	A _{4,2}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5	0,5
K ₅	A _{5,2}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5	0,5
K ₆	A _{6,2}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5	0,5
K ₉	A _{9,1}	0	0,5	0,5	0,5	0	0,125	0,125	0,125	0,375	0,625
K ₁₀	A _{10,2}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5	0,5
K ₁₁	A _{11,1}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5	0,5
K ₁₂	A _{12,1}	1	0,5	0,5	0,5	0,25	0,125	0,125	0,125	0,625	0,375

Die Berechnung von normierte Fähigkeitskennzahlen von Mensch $F_{Mges,i,j}$ und Roboter $F_{Rges,i,j}$ erfolgt nach Gleichungen 5.1 und 5.2.¹⁹⁶

$$F_{Mges,i,j} = \frac{F_Z}{4} + \frac{F_K}{4} + \frac{F_{PQ}}{4} + \frac{F_{AQ}}{4} \quad (5.1)$$

$$F_{Rges,i,j} = 1 - F_{Mges,i,j} \quad (5.2)$$

¹⁹⁶ Vgl. Schröter 2018, S. 54

Berechnung von Gesamteignungsgrad

Sobald alle Fähigkeitskennzahlen berechnet sind, werden sie gewichtet, um einen normierten Gesamteignungsgrad des Menschen e_M und des Roboters e_R gemäß Gleichung 5.3 und 5.4 für die jeweilige Montageoperation zu berechnen.¹⁹⁷ Die Wahl der Gewichte g_i erfolgt durch den Anwender abhängig von der betrachteten Montageoperation. Damit kann die Berechnung des Eignungsgrades genau auf die Gegebenheiten der betrachteten Montageoperation angepasst werden.

$$e_{M,i} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot F_M}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad e_M \in \{0, \dots, 1\} \quad (5.3)$$

$$e_{R,i} = 1 - e_M \quad e_R \in \{0, \dots, 1\} \quad (5.4)$$

Für die Montageoperation 1 ergibt sich ein Gesamteignungsgrad von $e_{M,1} = 0,41$ für den Menschen sowie $e_{R,1} = 0,59$ für den Roboter. Diese Werte sagen aus, dass ein Roboter besser für die Durchführung der ersten Montageoperation geeignet ist. Da sich die Werte jedoch nicht stark unterscheiden, könnte dieser Schritt auch von einem Menschen ausgeführt werden. In Tabelle 5.6 sind die Berechnungsergebnisse für jede Montageoperation dargestellt. Ähnliche Ergebnisse sind auch bei prismatischen sowie Rundzellen zu finden.

Tabelle 5.6: Eignungsgraden von Montageoperationen für die Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung

Montageoperation	Eignungsgrad Mensch $e_{M,i}$	Eignungsgrad Roboter $e_{R,i}$	$\Delta e_{MR,i} = e_{M,i} - e_{R,i}$
O ₁	0,41	0,59	-0,18
O ₂	0,38	0,62	-0,24
O ₃	0,43	0,57	-0,14
O ₄	0,41	0,59	-0,18
O ₅	0,5	0,5	0
O ₆	0,48	0,52	-0,04
O ₇	0,56	0,44	0,12
O ₈	0,57	0,43	0,14
O ₉	0,57	0,43	0,14
O ₁₀	0,52	0,48	0,04

Basierend auf den Berechnungen aus Tabelle 5.6 folgt, dass der Roboter besser für die Aufgaben mit den einzelnen Zellen geeignet ist. Da sich die Werte nicht drastisch voneinander unterscheiden, lässt sich schlussfolgern, dass jeder der genannten Montagevorgänge entweder von einem Menschen oder von einem Roboter durchgeführt werden kann. Der Grund dafür ist, dass die Anzahl der Werkstücke für diese Größe der

¹⁹⁷ Vgl. Schröter 2018, S. 56

geplanten Produktion gering ist und es sich um Werkstücke handelt, die weder gefährlich sind noch eine große Masse haben, die eine ergonomisch schlechte Arbeit für Mitarbeiter verursachen könnte. Erst durch eine serielle Zusammenschaltung der Batteriezellen wird die Spannung erhöht und somit eine Gefahr für den Menschen darstellen.

Ein Wert von $\Delta e_{MR,i} = 1$ aus der Tabelle 5.6 repräsentiert die maximal mögliche Eignung des Menschen für eine Montageoperation, wobei $\Delta e_{MR,i} = -1$ die maximal mögliche Eignung des Roboters für die betrachtete Montageoperation bezeichnet. So kann geschlussfolgert werden, dass die erste Gruppe von Montageoperationen zusammen mit dem Stacking eher für die Ausführung durch Roboter geeignet ist. Dabei handelt es sich um Handhabungsaufgaben, die mehr Wiederholungen und damit einen erhöhten Grad an Monotonie haben. Die zweite Gruppe von Montagevorgängen ist eher für die menschliche Leistung geeignet. Für einen Stack als Bauteil ist die Anzahl der Wiederholungen viel geringer. Diese Schlussfolgerungen führen dazu, dass es möglich ist, eine solche Sequenz von Montageoperationen zwischen Mensch und Roboter zu parallelisieren.

5.3.2 Implementierung der Sicherheit

Die maximal zulässige Bewegungsgeschwindigkeit bei kollaborativer Arbeit lässt sich im Risikominderungsprozess berechnen, wird hier aber nicht diskutiert. Im allgemeinen Fall kann bei MRI-4 von Werten von maximal 250 mm ausgegangen werden, da die Masse des Bauteils kleiner als 1 kg ist und diese keine scharfen Kanten aufweisen, die im Kontakt mit Menschen gefährlich sein könnten. Eine Gefährdung durch bewegte Bauteile ist daher ausgeschlossen und bei einer optimalen inhärenten Sicherheitsgestaltung besteht bei eintretendem Kontakt eine verminderte Verletzungsgefahr.

Bei der Kooperation hängt die Geschwindigkeit des Roboters vom Abstand zwischen Mensch und Roboter ab. Dieser Abstand lässt sich anhand der angenommenen Position von Interaktionspartnern im Arbeitsraum berechnen.

5.3.3 Ablaufplanung

Ziel der Ablaufplanung ist es, die Montagevorgänge in die optimale Reihenfolge zu bringen. Bei kollaborativer Arbeit kann dies bedeuten, dass einige Schritte kombiniert werden können. Zum anderen ist es möglich, dass ein Interaktionspartner auf den anderen warten kann. Im allgemeinen Fall ist es notwendig, eine solche Sequenz zu erstellen, bei der der Mensch stets auf den Roboter wartet.

Laut Daten aus Tabelle 5.6, ergibt sich eine mögliche Aufteilung von Montageoperationen zwischen Mensch und Roboter. Für solch eine Aufteilung ist dann möglich, eine Parallelisierung der Arbeit zu machen. Der Roboter kann dabei die Aufgaben übernehmen, die mehrfach monotone Wiederholungen und Präzision erfordern. Dies ist insbesondere der Fall bei Rundzellen, da für den Bau eines Moduls eine größere Anzahl von Zellen benötigt wird als bei anderen Zelltypen.

Bei der Parallelarbeit werden zwei Positionen benötigt, an denen der Batteriestack aufgebaut wird. Dadurch wird ein kontinuierliches Arbeiten ermöglicht, ohne dass ein Interaktionspartner auf den anderen warten muss.

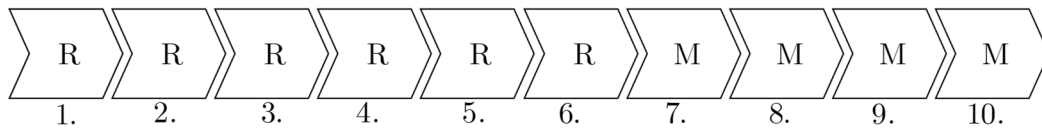


Abbildung 5.7: Mögliche Aufteilung von Montageoperationen zwischen Mensch und Roboter an der Stackingstation für Pouch-Zellen, Quelle: Eigene Darstellung

Die entwickelte Methodik ist generell für bestehende manuelle Arbeitsplätze gedacht, auf deren Basis sich reale Daten zum aktuellen Montagezustand gewinnen lassen. Basierend auf diesen Daten können die Ziele und Anforderungen bestimmt werden, die die Implementierung von MRI-Arbeitssystemen erfüllen sollten. Zu den wichtigsten Daten zählt die Durchführungszeit für jede Montageoperation. Mit dem Einsatz von MTM-MRK ist es möglich, die Zeitwerte für den Roboter zu berechnen, um sie dann mit realen menschlichen Zeiten zu vergleichen. Mit der Abfolge dieser Schritte und der Addition der Durchführungszeit zwischen Mensch und Roboter ist es möglich, eine grobe Schätzung der Taktzeit zu erhalten und festzustellen, ob MRI diese Zeit verkürzen kann.

Da keine realen Daten zur konzeptionellen Herstellung von Hochvoltspeichern vorliegen, findet diese Berechnung nicht statt.

5.3.4 Bewertung & Auswahl des Industrieroboters für das MRK-System

Um eine gemeinsame Arbeit zwischen Mensch und Roboter zu erreichen, ist es notwendig, die Komponenten des kollaborativen Robotersystems richtig auszuwählen. Die Auswahl erfolgt anhand der Daten aus Tabelle 5.7.

Tabelle 5.7: Daten zur Auswahl von Roboter-Teilsystemen, Quelle: Eigene Darstellung

Parameter	Größe	Anmerkung
• Reichweite	1080 mm	Maximale Reichweite mit Effektor oder Werkzeug
• Nennlast	~10 kg	Setzt sich aus Effektor und HdH-Objekt zusammen
• Wiederholgenauigkeit	+/- mm	Anforderung an hohe Präzision
• Geschwindigkeit	~250mm/s	Mit reduzierter Geschwindigkeit bei kollaborativem Betrieb
• Gewicht	kg	Gering, zum flexiblen Einsatz
• Effektor	-	Pneumatisch, elektrisch

Durch die breite Anwendung des Roboters und die große Varianz der Modulformate ist eine große Reichweite des Roboters zu bevorzugen. Die Abdeckung des gesamten Stacks und der Batteriezellenaufnahme ist ohne Anbringung eines zusätzlichen Hilfsmittels zu erreichen. Die Reichweite des Roboters muss etwa 1080 mm betragen (aus dem Konzept der Stackingstation)¹⁹⁸.

Das zu handhabende Gewicht ergibt sich aus Effektor sowie HdH-Objekt. Bei der Zelle bewegt es sich von etwa 45 g (Rundzelle) bis zu 1,4 kg (Prismatische Zelle). Das Gewicht des HdH-Objekts kann auch über 1,4 kg liegen. Zuzüglich zur Zelle kommen die Masse des Effektors und der damit verbundene zusätzliche Aufbau.

Die Positionierung der Batteriezellen zueinander entscheidet über die spätere Qualität der Kontaktierung sowie die Prozesssicherheit des Schweißens. Die erreichbare Genauigkeit ist bei den Rundzellen durch das Einsetzen in den Träger von besonderer Bedeutung. Im Falle einer Mehrfachhandhabung ist eine genaue Positionierung zwischen den Zellen sowie die Genauigkeit des Roboters von eminentem Charakter, um das Einfügen zu gewährleisten und eine Verkantung zu vermeiden.

¹⁹⁸ Vgl. Prechtl 2020

5.3.5 Feinplanung und Umsetzung

Der nächste Schritt in der Anwendung des Konzepts betrifft nach der Grobphase die Auswahl der Arbeitsplätze für die Feinplanungsphase. Im allgemeinen Fall wird zwischen mehreren Arbeitssystemen gewählt, die die gesetzten Ziele erfüllen. Die endgültige Entscheidung hängt davon ab, welches Arbeitssystem die wichtigsten Ziele am besten erfüllt.

In der nächsten Planungsphase erfolgt eine detaillierte Ausarbeitung sämtliche Elemente des Arbeitssystems. Hier können verschiedene 3D-Softwarelösungen zum Einsatz kommen, mit denen der Arbeitsablauf an Arbeitsplätzen simuliert werden kann. Besonders interessant sind Softwarelösungen zur Planung hybrider Arbeitssysteme bei Kooperation und Kollaboration. So lassen sich mögliche Risiken bei der Arbeit genauer bestimmen.

Nach der Planungsphase, die die Auswahl der Arbeitssysteme sowie deren Grob- und Feinplanung umfasst, folgt die Implementierung des Robotersystems in seine Arbeitsumgebung. Um den Roboter in Betrieb zu nehmen, ist es erforderlich, das CE-Zeichen zu erhalten. Der wichtigste Prozess, der zum Erhalt des Labels führt, ist die Risikobewertung.

Der durch die Methode beschriebene Gesamtprozess führt zu einer optimal angepassten und sicheren gemeinsamen Arbeit zwischen Mensch und Roboter an einem hybriden Arbeitsplatz.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden sämtliche bisher bearbeiteten Elemente der Arbeit kurz dargelegt mit dem Ziel, einen zusammengefassten aktuellen Wissensstand zu erreichen. Überdies werden mögliche zukünftige Forschungsarbeiten, die auf dieser Arbeit aufbauen, diskutiert. Abschließend wird eine mögliche Richtung vorgestellt, in die die beschriebene Technologie entwickelt werden könnte.

6.1 Zusammenfassung

Das zweite Kapitel beschreibt die theoretischen Grundlagen, die später zum Verständnis sowie zur Entwicklung der Konzepts notwendig sind. Den Ausgangspunkt stellen hybride Arbeitssysteme dar, die hinsichtlich Stückzahl, Flexibilität, Produktivität und Variantenvielfalt zwischen manuellen und vollautomatisierten Arbeitsplätzen liegen. Eine besondere Form hybrider Arbeitssysteme entsteht durch den Einsatz von Robotern zur Automatisierung bestimmter Aufgaben. Solche hybriden Systeme werden als MRI-Arbeitssysteme bezeichnet und können nach dem Interaktionsgrad in vier Formen unterteilt werden.

Durch die Grundlagen der Robotik und die beschriebenen Formen von Industrierobotern wurde gezeigt, dass der Knickarmroboter am besten für den Einsatz in einem hybriden Arbeitssystem geeignet ist. Aufgrund der hohen Freiheitsgrade, die er besitzt, kann das Werkstück jede Position und Ausrichtung in seinem Arbeitsraum einnehmen. Dadurch ist er für unterschiedlichste industrielle Aufgabenstellungen einsetzbar und lässt sich flexibel an häufig auftretende Änderungen anpassen. Mit einer gewissen Sicherheit kann dieser Robotertyp als sehr gute Lösung für MRI-Arbeitssysteme erachtet werden. Für eine Kollaboration zwischen Mensch und Roboter, den höchsten Interaktionsgrad von MRI-Arbeitssystemen, erweist sich der Einsatz eines speziellen Robotertyps als notwendig. Der sogenannte kollaborative Roboter besitzt integrierte Sensoren zur Messung von Kraft und Moment und kann sicher für die Aufgaben, bei denen ein physischer Kontakt zwischen Mensch und Roboter möglich ist, verwendet werden.

Bei sämtlichen Formen der Interaktion und insbesondere der Zusammenarbeit wird ein besonderer Fokus auf die Sicherheit gelegt. Daher ist es notwendig, vor der eigentlichen Implementierung des Roboters eine detaillierte Analyse vorzunehmen und die Arbeitsgefährdung auf ein sicheres Niveau zu reduzieren. Dieser Prozess ist in Abschnitt 2.5 beschrieben.

Nach diesen notwendigen theoretischen Grundlagen wird im dritten Kapitel ein mögliches Konzept bzw. eine Methode zur manuellen Planung von MRI-Arbeitssystemen vorgestellt. Die Methode besteht aus vier Hauptschritten, wobei die letzten zwei, welche die detaillierte Planung und die Umsetzung umfassen, nicht Gegenstand vorliegender Masterarbeit sind.

Im ersten Hauptschritt der Methode wird der Prozess der Arbeitsplatzauswahl für die Implementierung von MRI-Arbeitssystemen erörtert. Für die endgültige Entscheidung werden ausgewählte Kriterien in Kombination mit allgemeinen Informationen über die Vor- und Nachteile von MRI-Arbeitssystemen herangezogen. Ziele und Anforderungen, die MRI erfüllen sollen, sowie die Informationen über die Aufgaben und genutzten Arbeitsteile der betrachteten Arbeitsplätze ergänzen die grundlegende Aufarbeitung. Anschließend wird für jene Arbeitsplätze, die die Bedingungen erfüllen und die Durchführung der MRI ermöglichen, der gewünschte Interaktionsgrad ermittelt.

Danach erfolgt im zweiten Schritt eine Grobplanung für jeden Arbeitsplatz. Durch die Grobplanung sollten die Erfüllung von Zielen und Anforderungen überprüft, sowie Informationen generiert werden, die sich bei der Auswahl eines Robotersystems für die jeweilige Aufgabe nutzen lassen. Für diesen Teil der Methodik wird das in der Literatur diskutierte manuelle Planungsverfahren herangezogen, welches den Vorteil hat, dass es eine gewisse Objektivität bei der Beurteilung bietet.

Anschließend können die MRI-geeigneten Arbeitsplätze evaluiert und diejenigen ausgewählt werden, die den Zielen und Anforderungen am besten entsprechen. Bei diesem Schritt werden auch Zahlen generiert, wie z. B. Masse der handhabenden Bauteile, Größe des Arbeitsraums, Wiederholgenauigkeit, die bei der Auswahl des Robotersystems benutzt werden.

Kapitel 4 beschreibt einen konzeptionellen Prozess zur Herstellung von Hochvoltbatterien für Elektroautos im Rahmen des von AVL initiierten Forschungsprojekts BIC. Ziel dieses Projekts ist es, eine Forschungsfabrik zu schaffen, mit der die besten Wege und Lösungen für die Produktionsanlage der Zukunft analysiert werden sollen. Der gesamte Produktionsprozess besteht aus dem Fügen von Batteriezellen zu Modulen, was im Niedervolt-Bereich der Forschungsfabrik stattfindet, sowie von Modulen zu einem Batteriepack, was im Hochvolt-Bereich stattfindet. Der gesamte Prozess muss so konzipiert sein, dass er flexibel genug ist, um Hochvoltbatterien mit allen drei Typen von Batteriezellen herzustellen.

Im letzten Kapitel wird der beschriebene Herstellungsprozess analysiert und die zuvor entwickelte Methode zur Implementierung von MRI-Arbeitssystemen darauf angewendet. Ziel hier ist es, Arbeitsplätze zu finden, an denen ein gemeinsames Arbeiten von Mensch und Roboter möglich ist. Es zeigte sich, dass aufgrund der Bedingungen und

Einschränkungen dieser Produktion der einzige geeignete Ort für die Umsetzung die Stackingstation darstellte. Es ist der einzige Ort, an dem es eine ausreichende Anzahl monotoner Schritte gibt, die die menschliche Ergonomie beeinträchtigen und somit einen geeigneten Platz für einen Roboter darstellen.

6.2 Ausblick

Die im Zuge dieser Masterarbeit ausgearbeiteten Themen sollen als Grundlage dienen, das Battery Innovation Center als Produktionsanlage der Zukunft gestalten zu können. Eine flexible Produktion, die auf Aufgabenänderungen sowie neue Produktspezifikationen schnell reagieren kann, wird somit im BIC verwirklicht. Die Implementierungsmethodik kann dabei benutzt werden, um die potenziellen MRI-Arbeitsplätze zu analysieren sowie eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter zu planen.

Die LIB-Technologie, wie auch die gesamte Automobilindustrie, befindet sich derzeit in einem evolutionär wichtigen Schritt des Übergangs vom Verbrennungsmotor zum elektrischen Antrieb. Diese beschleunigte Entwicklung und Innovation werden sich in den kommenden Jahren im gleichen Tempo fortsetzen. Daher ist die Anwendung flexibler Arbeitssysteme in diesem Industriebereich äußerst wichtig.

Dies eröffnet viele Möglichkeiten, sodass innerhalb des BIC-Projekts in naher Zukunft Raum für zukünftige Masterarbeiten sein wird. Am IFT ist eine detaillierte Beschreibung der Stackingstation bereits im Rahmen von zwei Masterarbeiten beschrieben worden: nämlich in jener von Herrn Mathias Prechtel mit dem Titel „Konzeption eines flexiblen Stackingprozesses für verschiedene Zelltypen in der Batteriemodulfertigung“ und in jener von Herrn Gernot Schlögl mit dem Titel „Flexible Prozesse zur Qualitätssicherung in der Batteriemodulfertigung“.

Auch der Einsatz der kollaborativer Roboter in der Industrie wird in den kommenden Jahren zunehmen und damit zu einer Weiterentwicklung von MRI-Arbeitssystemen sowie der Implementierungsmethode führen. Erwartet werden Softwarelösungen sowie die Unternehmen, die sich für MRI-Implementierung spezialisieren und damit einfachere und schnellere Umsetzung ermöglichen.

Eine mögliche Entwicklung dieser Technologie könnte in Richtung humanoider Roboter gehen. Aufgrund seiner großen Mobilität und Flexibilität sowie der Fähigkeiten, die dem Menschen durchaus Konkurrenz machen, könnte dieser Robotertyp sehr schnell einen festen Platz in der Industrie finden. Einer der wichtigen Faktoren, die diese Roboter so besonders machen, ist der Einsatz künstlicher Intelligenz, die ein erweitertes Verständnis der Umgebung wahrnehmen können, sowie eine ständige Verbesserung durch ihren Einsatz ermöglicht.

Literaturverzeichnis

- ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd.: 18650 Lithiumbatterieanschluss. URL: <https://de.ainbattery.com/18650-lithium-battery-connection.html> (09.10.2022).
- Bartenschlager, Jörg/Hebel, Hans/Schmidt, Georg (1998): Handhabungstechnik mit Robotertechnik. Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-663-12166-4.
- Bauer, W./Bender, M./Braun, M./Rally, P./Scholtz, O. (2016): Roboter ohne Schutzzaun in der Montage/Robots without protective fence - Status of collaborative applications in German assemblies. In: wt Werkstattstechnik online, 106. Jg. (09), S. 616–621.
- Bauer, Wilhelm et al. (Hrsg.) (2016): Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen.
- Beermann, M./Jungmeier, G./Wenzel, J./Spitzer, J./Canella, L./Engel, A./Schmuck, M./Koller, S. (2010): Quo Vadis Elektroauto? – Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich. Graz.
- Behrens, Roland/Saenz, Jose/Vogel, Christian/Elkman, Norbert (2015): Upcoming Technologies and Fundamentals for Safeguarding All Forms of Human-Robot Collaboration. In: Proceedings of the 8th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2015).
- Berg, Julia/Merhar, Laura/Lottermoser, Albrecht/Härdtlein, Christian/Henke, Maximilian (2019): Roboter für den Mittelstand. Praxisleitfaden für Leichtbauroboter in der Produktion. Augsburg: Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV.
- Beumelburg, Katharina (2005): Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Heimsheim: Jost-Jetter. ISBN: 3-936947-52-X.
- Bloech, Jürgen/Bogaschewsky, Ronald/Götze, Uwe/Roland, Folker (1993): Einführung in die Produktion. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg/s.l.: Physica-Verlag HD. ISBN: 978-3-662-41580-1.
- Böge, Alfred (2011): Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 20. Auflage // Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik ; mit 412 Tabellen. 20., überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag. ISBN: 978-3-8348-1025-0.
- Bokranz, Rainer/Landau, Kurt (2012): Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. ISBN: 978-3-7910-2863-7.
- Bruderer, Herbert (2019): Leonardo da Vincis Roboterlöwe: ETH Zurich.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Hrsg.) (2016): Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle. Dortmund.

- Buxbaum, Hans-Jürgen/Bendel, Oliver (Hrsg.) (2020): Technische und philosophische Aspekte. Dortmund.
- Collaborative Robotics Trends (2020): Cobots vs. industrial robots: what are the differences? URL: <https://www.cobottrends.com/cobots-vs-industrial-robots-what-are-differences/> (25.07.2022).
- Deutsche MTM-Vereinigung e. V. (2016): Basic MTM - MTM-1 und MTM-UAS Lehrgangsunterlagen. Hamburg: Eigenverlag Deutsche MTM-Vereinigung e. V.
- Deutsches Institut für Normung (2016): DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Mechatronisches Design des LBR III. URL: https://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-12464/21732_read-49777/ (25.07.2022).
- Dogan, Erkan (2022): Arbeitssystem. URL: <https://industrial-engineering-vision.de/arbeitsystem/> (29.11.2022).
- Dorrmann, Lydia/Sann-Ferro, Kerstin/Heininger, Patrick/Mähliß, Jochen (2021): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen.
- Europäisches Parlament: CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten (Infografik) | Aktuelles | Europäisches Parlament. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (10.09.2022).
- Folkson, Richard (Hrsg.) (2014): Alternative fuels and advanced vehicle technologies for improved environmental performance. Towards zero carbon transportation. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Fraunhofer IMW (Hrsg.) (2019): Für die Zukunft Gerüstet: Wirtschaftlicher Einsatz von Mensch-Roboter-Kollaborationen. Erste Auflage. Leipzig: Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW.
- Fraunhofer-Allianz Batterien (Hrsg.) (2017): Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen Batterien in der Elektromobilität. Pfinztal.
- Gerke, Wolfgang (2014): Technische Assistenzsysteme. Vom Industrieroboter zum Roboterassistenten. Berlin: De Gruyter Oldenbourg. ISBN: 978-3-11-034370-0.
- Gillhuber, Andrea (2017): Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/zusammenarbeit-von-mensch-und-roboter-a-665630/> (26.05.2022).
- Helms, Evert/Schraft, Rolf Dieter/Hagele, Martin (2002): rob@work: Robot assistant in industrial environments. In: Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Program Comprehension, S. 399–404.
- Hesse, Stefan (1998): Industrieroboterpraxis. Automatisierte Handhabung in der Fertigung. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg. ISBN: 978-3-322-88982-9.
- Hesse, Stefan (2013): Grundlagen der Handhabungstechnik. Mit 25 Tabellen, 5 Tafeln sowie 26 Übungsaufgaben und 115 Kontrollfragen ; mit einer CD-ROM mit Zusatzmaterialien,

- Videos und Wörterbüchern Deutsch - Englisch und Englisch - Deutsch. 3., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-43596-4.
- Hesse, Stefan (2020): Grundlagen der Handhabungstechnik. 5., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-46359-2.
- Hesse, Stefan/Schmidt, Heinz/Schmidt, Uwe (2001): Manipulatorpraxis. Manuell geführte Handhabungssysteme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-663-07983-5.
- Hesse, Stefan/Seitz, Günter (1996): Robotik. Grundwissen für die berufliche Bildung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-322-89873-9.
- HiSoUR: Geschichte der Roboter. URL: <https://www.hisour.com/de/history-of-robots-42814/> (28.10.2022).
- HowToRobot: Benefits and Disadvantages of Cobots - Flexibility vs. Efficiency. URL: <https://www.howtorobot.com/expert-insight/pros-and-cons-collaborative-robots-flexibility-vs-efficiency> (25.07.2022).
- INDUSTR.com (2018): Gestapelt, nicht gewickelt. Effizientere Lithium-Ionen-Batterien. URL: <https://www.industr.com/de/gestapelt-nicht-gewickelt-2318251> (25.11.2022).
- Kampker, Achim (2014): Elektromobilproduktion. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-42022-1.
- Ketterer, B./Karl, U./Möst, D./Ulrich, S. (2009): Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen.
- Khalid, Azfar/Kirisci, Pierre/Ghraiiri, Zied/Thoben, Klaus-Dieter/Pannek, Jürgen (2016): A methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments. In: Logistics Research, 9. Jg. (1).
- Kirk, Karin (2022): Electrifying transportation reduces emissions and saves massive amounts of energy. Electric vehicles are far more energy-efficient than traditional internal combustion vehicles. URL: <https://yaleclimateconnections.org/2022/08/electrifying-transportation-reduces-emissions-and-saves-massive-amounts-of-energy/> (12.09.2022).
- Kopp, Tobias/Schäfer, Arndt/Kinkel, Steffen (2020): Kollaborierende oder kollaborationsfähige Roboter? Welche Rolle spielt die Mensch-Roboter-Kollaboration in der Praxis?
- Korthauer, Reiner (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-30652-5.
- Korthauer, Reiner (2018): Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-53069-6.
- Krüger, J./Lien, T. K./Verl, A. (2009): Cooperation of human and machines in assembly lines. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology (58 (2)), S. 628–646.
- Learnchannel: Klassifizierung von Roboter. Klassifizierung Roboter nach Kinematik und Arbeitsraum. URL: <http://learnchannel.de/de/robo/kinematik-der-roboter/klassifizierung-von-roboter/> (06.09.2022).
- Liu, Hongyi/Fang, Tongtong/Zhou, Tianyu/Wang, Lihui (2018): Towards Robust Human-Robot Collaborative Manufacturing: Multimodal Fusion. In: IEEE Access, 6. Jg., S. 74762–74771.

- Lotter, Bruno/Wiendahl, Hans-Peter (2006): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Berlin/New York: Springer. ISBN: 3540214135.
- Lv, Shuaishuai/Wang, Xingxing/Lu, Wenfan/Zhang, Jiaqiao/Ni, Hongjun (2022): The Influence of Temperature on the Capacity of Lithium Ion Batteries with Different Anodes. In: Energies, 15. Jg. (1), S. 60.
- Markis, Alexandra/Montenegro, Harold/Neuhold, Michael/Oberweger, Andreas/Schlosser, Christian/Schwald, Christoph (2016): White Paper: Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration. Grundlagen, Herausforderungen, Ausblick. 1. Ausgabe. Wien.
- Markis, Alexandra/Ranz, Fabian/Brandstötter, Mathias (2017): White Paper: Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration. Risikobeurteilung und -minimierung. 2. Ausgabe. Wien.
- Marquiss, Ray: Five Types of Industrial Robots And How To Choose The Best Fit. URL: <https://www.valin.com/resources/articles/five-types-of-industrial-robots-and-how-to-choose-the-best-fit> (06.09.2022).
- Miljković Jevtić, Ivanka (2022): Kolaborativni roboti – koboti spremni za rad u osnovnim školama. URL: <https://www.its.edu.rs/2022/06/24/kolaborativni-roboti-koboti-spremni-za-rad-u-osnovnim-skolama/> (25.07.2022).
- Müller, Rainer et al. (Hrsg.) (2019): Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Neubauer, Wilm/Heyn, Holger (2015): Auf dem Weg zur Mensch-Roboter-Kooperation: Anwendungsbeispiele und Vorgehensweisen im Volkswagen Konzern. Magdeburg: Faunhofer IFF.
- Neumann, Maria Ausgabe 11 (2018): Die Prozesssprache MTM-MRK in ihrer praktischen Anwendung. Zeuthen/Hamburg: Deutsche MTM-Vereinigung e.V. MTM-Institut. ISBN: 978-3-945-635-15-5.
- Niewerth, Claudia/Miro, Michael/Schäfer, Marvin (2019): Leitfaden zur Einführung von Mensch-Roboter-Kollaboration: Perspektiven der betrieblichen Interessenvertretung.
- Peterson, David (2020): Safety Requirements for Cobots. URL: <https://control.com/technical-articles/safety-requirements-for-collaborative-robots/> (25.07.2022).
- Prechtel, Mathias (2020): Konzeption eines flexiblen Stackingprozesses für verschiedene Zelltypen in der Batteriemodulfertigung.
- Rahimzei, Ehsan/Samm, Kerstin/Vogel, Moritz (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen.
- REFA Fachverband e.V. Band 3 (2021): REFA-Grundausbildung 4.0 - Begriffe und Formeln. 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-47177-1.
- REFA: Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (Hrsg.) (2002): Ausgewählte Methoden zur prozessorientierten Arbeitsorganisation. 1. Auflage. Darmstadt.
- Ronzhin, Andrey/Rigoll, Gerhard/Meshcheryakov, Roman (2018): Interactive Collaborative Robotics. Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18-22,

- 2018, Proceedings. Cham: Springer International Publishing AG. ISBN: 978-3-319-99582-3.
- Rudschies, Wolfgang (2021): Der Elektroantrieb – so funktioniert ein Elektroauto. URL: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/elektroantrieb/> (17.05.2022).
- SAI Industrial LLC: Cobots. URL: <https://www.saiindustrial.com/cobots/> (25.07.2022).
- Schlögl, Gernot (2020): Flexible Prozesse zur Qualitätssicherung in der Batteriemodulfertigung. Graz.
- Schröter, Daniel (2018): Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Dissertation. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung; Universität Stuttgart.
- Scrosati, Bruno (2015): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. Burlington: Elsevier Science. ISBN: 978-1-78242-398-0.
- Southwest Research Institute: Cobot Roles Compared To Industrial Robots. URL: <https://www.swri.org/industry/industrial-robotics-automation/blog/choosing-cobot-vs-industrial-robot> (25.07.2022).
- Staut, Sarah: Ergonomie-Analyse: Methoden und Verfahren / 3 Ergonomie-Analyse. URL: https://www.haufe.de/personal/haufe-personal-office-platin/ergonomie-analyse-methoden-und-verfahren-3-ergonomie-analyse_idesk_PI42323_HI11198080.html (06.09.2022).
- Steger, Sabrina/Alexandra Markis/Montenegro, Harold/Neuhold, Michael (2018): Safety & Security in der Mensch-Roboter-Kollaboration: Einfluss der IT-Security. 3. Ausgabe. Wien.
- VDMA Batterieproduktion (Hrsg.) (2020): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH.
- Warner, John (2015): The handbook of lithium-ion battery pack design. Chemistry, components, types and terminology. Amsterdam: Elsevier. ISBN: 978-0-12-801668-8.
- Weber, Wolfgang (2017): Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung. 3., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-43578-0.
- Weck, Manfred/Brecher, Christian (2005): Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 6., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-642-38744-9.
- WEKA MEDIA GmbH & Co. KG (2020): Risikobeurteilung, Risikoanalyse & Risikobewertung. URL: <https://www.weka-manager-ce.de/risikoanalyse/risikobeurteilung-risikoanalyse-risikobewertung/> (13.08.2022).
- Xpertgate: Lieferantenverzeichnis: Scara-Roboter. URL: <http://www.xpertgate.de/produkte/Scara-Roboter.html> (06.09.2022).
- Zamalloa, Irati/Kojcev, Risto/Hernández, Alejandro/Muguruza, Iñigo/Usategui, Lander/Bilbao, Asier/Mayoral, Víctor (2017): Dissecting Robotics - historical overview and future perspectives. URL: <http://arxiv.org/pdf/1704.08617v1>.

Zeller, Frauke (2005): Mensch-Roboter Interaktion: Eine sprachwissenschaftliche Perspektive.
ISBN: 3-89958-130-X.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Arbeitssystem nach REFA, Quelle: REFA Fachverband e.V. 2021, S. 1 (leicht modifiziert).....	4
Abbildung 2.2: Einsatzbereiche manueller, hybrider und automatischer Montagekonzepte, Quelle: Lotter/Wiendahl 2006, S. 193 (leicht modifiziert).....	5
Abbildung 2.3: Übersicht über Interaktionsformen und deren Merkmale, Quelle: In Anlehnung an Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 9 und Kopp/Schäfer/Kinkel 2020, S. 21.....	8
Abbildung 2.4: Funktionen des Handhabens, Quelle: In Anlehnung an Hesse 2020, S. 12.....	12
Abbildung 2.5: Einteilung der Handhabungssysteme nach dem Steuerungsniveau, Quelle: Weber 2017, S. 16 (leicht modifiziert).....	13
Abbildung 2.6: Spezifikation von Handhabungsgeräten, Quelle: Weck/Brecher 2005, S. 540 (leicht modifiziert).....	14
Abbildung 2.7: Knickarmroboter mit Achsen, Quelle: In Anlehnung an Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 38.....	15
Abbildung 2.8: Traglastkennlinie für Industrieroboter mit 15 kg Nennlast, Quelle: Hesse 1998, S. 344 (leicht modifiziert).....	16
Abbildung 2.9: Messungen zur Wiederhol- und Absolutgenauigkeit eines Industrieroboters, Quelle: Müller et al. 2019, S. 299 (leicht modifiziert).....	17
Abbildung 2.10: Komponenten eines Robotersystems, Quelle: In Anlehnung an Bartenschlager/Hebel/Schmidt 1998, S. 21.....	18
Abbildung 2.11: Klassifizierung von Industrierobotern nach ihrem mechanischen Aufbau, Quelle: Hesse 2013, S. 408 (leicht modifiziert).....	21
Abbildung 2.12: Leistungsgrenzen von Roboterbauarten, Quelle: In Anlehnung an Weck/Brecher 2005, S. 547.....	23
Abbildung 2.13: Kollaborationsfähige Roboter: 1. Stäubli: TX2, 2. KUKA: LBR IIWA, 3. Universal Robots: UR3, UR5, UR10, 4. Fanuc: CR-35iA, 5. AUBO: OUR, 6. Techman: TM5, 7. ABB: Yumi, 8. Rethink Robotics: Sawyer, 9. Kawada: Nextage, Quelle: SAI Industrial LLC, Onlinequelle [25.07.2022] (leicht modifiziert).....	24
Abbildung 2.14: Gelenkkomponenten eines Leichtbauroboters, Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Onlinequelle [25.07.2022].....	25
Abbildung 2.15: Mensch-Roboter-Kollaboration, Quelle: Liu et al. 2018, S. 74763 (leicht modifiziert).....	31
Abbildung 2.16: Ablauf der CE-Kennzeichnung, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 313.....	37
Abbildung 2.17: Vorgehensweise zur Risikobeurteilung nach EN ISO 12100, Quelle: In Anlehnung an WEKA MEDIA GmbH & Co. KG 2020, Onlinequelle [13.08.2022].....	38

Abbildung 2.18: Lebensdauerphasen einer MRK-Applikation, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 14.....	39
Abbildung 2.19: Identifizierte Kollisionsgefährdungen, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 14.....	39
Abbildung 2.20: Schematische Darstellung eines Risikographen zur Ermittlung einer Risikokategorie, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 15.....	41
Abbildung 2.21: Klassifizierung von Kollisionssituationen, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 17.....	41
Abbildung 2.22: Relevante Normen aus der Sicht einer MRK-Applikation (Auszug), Quelle: Markis et al. 2016, S. 10.....	43
Abbildung 2.23: Schutzprinzipien nach TS 15066: 1. Sicherheitsüberwacher Halt, 2. Handführung, 3. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, 4. Leistungs- und Kraftbegrenzung, Quelle: Ronzhin/Rigoll/Meshcheryakov 2018, S. 98.....	44
Abbildung 3.1: Allgemeiner Prozess für die Umsetzung des MRI-Arbeitssystems, Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abbildung 3.2: Allgemeiner Prozess für die Umsetzung des MRI-Arbeitssystems mit wichtigsten Aufgaben, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abbildung 3.3: Anzahl zu analysierender Arbeitsplätze, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Abbildung 3.4: Ablaufdiagramm zur Implementierung von MRI, Quelle: Eigene Darstellung.....	50
Abbildung 3.5: Applikationsgrund (Mehrfachnennungen möglich), Quelle: Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 17 (leicht modifiziert).....	53
Abbildung 3.6: Mensch-Roboter-Interaktion als Zwischenstufe von manueller Arbeit und Vollautomatisierung, Quelle: In Anlehnung an Neubauer/Heyn 2015.....	54
Abbildung 3.7: Mensch-Roboter-Kollaboration als Zwischenstufe von manueller Arbeit und Vollautomatisierung, Quelle: Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 13 (leicht modifiziert).....	56
Abbildung 3.8: Variable und fixe Stückkosten manueller und automatisierter Produktionen, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 335.....	57
Abbildung 3.9: MRK als Mittelweg zwischen manueller Produktion und Vollautomatisierung, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 336.....	58
Abbildung 3.10: Wirtschaftliche Anwendbarkeit von verschiedenen Produktionsparadigmen, Quelle: Markis et al. 2016, S. 9 (leicht modifiziert).....	58
Abbildung 3.11: Elemente einer Lebenszykluskostenrechnung, Quelle: Fraunhofer IMW 2019, S. 39 (leicht modifiziert).....	59
Abbildung 3.12: MRK-Treiber und -Hemmnisse als Alternative gegenüber einer manuellen Fertigung oder einer Vollautomatisierung, Quelle: In Anlehnung an Müller et al. 2019, S. 9.....	63
Abbildung 3.13: Auswahl des Mensch-Roboter-Interaktionstyps für ein Arbeitssystem, Quelle: In Anlehnung an Behrens et al. 2015.....	66
Abbildung 3.14: Merkmale verschiedener Interaktionsszenarien, Quelle: Eigene Darstellung.....	67

Abbildung 3.15: Schritte der Grobplanung von MRK-Arbeitssystemen, Quelle: Eigene Darstellung.....	67
Abbildung 3.16: Bewertung der Ressourcen von Mensch und Roboter für jede Ausprägung und alle Kriterien, Quelle: Eigene Darstellung	69
Abbildung 3.17: Berechnung von Gesamteignungsgrad anhand von gewichteten Fähigkeitskennzahlen, Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Abbildung 3.18: Sprachelemente des MTM-Prozessbausteinsystems, Quelle: Bokranz/Landau 2012, S. 386 (leicht modifiziert)	79
Abbildung 3.19: Der Grundzyklus, Quelle: Deutsche MTM-Vereinigung e. V. 2016, S. 33	80
Abbildung 4.1: Innerer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (Entladezustand), Quelle: Dorrman et al. 2021, S. 3.....	85
Abbildung 4.2: Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität, Quelle: Fraunhofer-Allianz Batterien 2017, S. 11 (leicht modifiziert).....	87
Abbildung 4.3: Aufbau einer zylindrischen Batteriezelle, Quelle: Dorrman et al. 2021, S. 16 (leicht modifiziert).....	91
Abbildung 4.4: Aufbau einer prismatischen Batteriezelle, Quelle: Dorrman et al. 2021, S. 16 (leicht modifiziert).....	92
Abbildung 4.5: Aufbau einer Pouch-Zelle, Quelle: Dorrman et al. 2021, S. 16 (leicht modifiziert).....	92
Abbildung 4.6: Serienschaltung, Quelle: ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd., [09.10.2022]	95
Abbildung 4.7: Parallelschaltung, Quelle: ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd., [09.10.2022]	95
Abbildung 4.8: Kombination der Serien- und Parallelschaltung, Quelle: ALL IN ONE Battery Technology Co., Ltd., [09.10.2022]	95
Abbildung 4.9: Allgemeiner Aufbau eines Batteriemoduls mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung.....	96
Abbildung 4.10: Batterie-Stack mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung.....	97
Abbildung 4.11: Allgemeines Produktionslayout der Batteriemodulfertigung, Quelle: Eigene Darstellung nach AVL-Produktionslayout	98
Abbildung 4.12: Schritte der Batteriemodulfertigung, Quelle: Eigene Darstellung.....	99
Abbildung 4.13: Allgemeiner Prozess der Batteriemodulfertigung für prismatische- und Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	100
Abbildung 4.14: Aufbauprozess der Hochvoltspeicher mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung	103
Abbildung 4.15: Allgemeiner Aufbau eines Batterie-Packs mit prismatischen Zellen, Quelle: Eigene Darstellung.....	105
Abbildung 4.16: Allgemeines Layout der Gesamt-Batterie-Pack-Produktionsanlage, Quelle: Eigene Darstellung.....	107

Abbildung 4.17: Allgemeiner Prozess der Batterie-Pack-Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.....	109
Abbildung 5.1: Allgemeines Layout der Batterie-Pack-Produktionsanlage, Quelle: Eigene Darstellung.....	113
Abbildung 5.2: Theoretische Aufteilung der Stackingstation und Durchlauf, Quelle: (Prechtl 2020, S. 26).....	119
Abbildung 5.3: Hauptschritte bei Stackingstation, Quelle: Eigene Darstellung.....	119
Abbildung 5.4: QS-Prozess der prismatische Zelle, Rundzelle und Pouch-Zelle, Quelle: In Anlehnung an Schlögl 2020, S. 83 ff.....	120
Abbildung 5.5: Zellübergabeprozess von QS zu Stacking gültig für alle drei Zelltypen, Quelle: In Anlehnung an (Prechtl 2020, S. 27).....	120
Abbildung 5.6: Montageoperationen des Stackingprozesses, Quelle: In Anlehnung an Prechtl 2020, S. 28 f.....	120
Abbildung 5.7: Mögliche Aufteilung von Montageoperationen zwischen Mensch und Roboter an der Stackingstation für Pouch-Zellen, Quelle: Eigene Darstellung.....	125
Abbildung 0.1: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm mit der Unterteilung der Bewegungszeiten für eine lineare Roboterbewegung, Quelle: Schröter 2018, S. 79.....	146
Abbildung 0.2: Berechnung der Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Quelle: Schröter 2018, S. 81.....	147
Abbildung 0.3: Überschleifen des Bahnpunktes P_i , Quelle: Schröter 2018, S. 88.....	148
Abbildung 0.4: Kodierung des MRK-Prozessbausteins <i>Hinlangen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 90.....	149
Abbildung 0.5: Geschwindigkeitsverlauf der Finger bei einer Positionsgeregelten Schließbewegung, Quelle: Schröter 2018, S. 91.....	150
Abbildung 0.6: Kodierung des Prozessbausteins <i>Greifen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 94.....	151
Abbildung 0.7: Kodierung des Prozessbausteins <i>Bringen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 98.....	152
Abbildung 0.8: Kodierung des Prozessbausteins <i>Fügen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 101.....	153
Abbildung 0.9: Kodierung des Prozessbausteins <i>Loslassen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 102.....	154
Abbildung 0.10: Mindestabstand bei orthogonaler Anordnung des Schutzfelds zur Gefahrenstelle in Abhängigkeit der Nachlaufzeit.....	155
Abbildung 0.11: Hinüberreichen über ein senkrecht wirkendes Schutzfeld nach DIN EN ISO 13855: 2010, Quelle: Schröter 2018, S. 63.....	155
Abbildung 0.12: Geforderte Prozesszeiten der Batteriemodulfertigung, Quelle: AVL List GmbH.....	159
Abbildung A.0.13: Geforderte Prozesszeiten der Batterie-Pack-Fertigung, Quelle: AVL List GmbH.....	160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Robotergenerationen, Quelle: In Anlehnung an Zamalloa et al. 2017, S. 2.....	11
Tabelle 2.2: Vorteile und Nachteile der Leichtbauroboter in Vergleich zu den klassischen Industrie-robotern, Quelle: Eigene Darstellung	27
Tabelle 2.3: Überblick über Stärken und Schwächen von Mensch und Leichtbaurobotern in unterschiedlichen Interaktionsszenarien, Quelle: Berg et al. 2019, S. 20 (leicht modifiziert).....	29
Tabelle 2.4: Relevante interne und externe Sensoren im Kontext der MRK, Quelle: Müller et al. 2019, S. 74 (leicht modifiziert)	33
Tabelle 2.5: Kriterien zur Bewertung von Gefährdung, Quelle: In Anlehnung an Markis/Ranz/Brandstötter 2017, S. 15.....	40
Tabelle 3.1: Gründe für Umsetzung von MRI in Produktionsprozess in Bezug auf manuelle (M) oder automatisierte (A) Arbeitssysteme, Quelle: Eigene Darstellung	54
Tabelle 3.2: Informationen über Arbeitssystemen, Quelle: Eigene Darstellung	62
Tabelle 3.3: Kriterien für die Entscheidung über die Eignung eines Arbeitssystems für die MRI-Umsetzung, Quelle: Eigene Darstellung	65
Tabelle 3.4: Vor- und Nachteile von Mensch und Roboter in der Montage, Quelle: (Bauer, Wilhelm et al. 2016, S. 24)	68
Tabelle 3.5: Bewertungsaspekte und zugehöriges Formelzeichen, Quelle: Schröter 2018, S. 54	69
Tabelle 3.6: Kriterienkatalog zur Ablaufplanung von Arbeitssystemen, Quelle: Schröter 2018, S. 51	70
Tabelle 3.7: Bestimmung des Gewichts g_i je nach Wichtigkeit des Kriteriums, Quelle: In Anlehnung an Beumelburg 2005, S. 57	72
Tabelle 3.8: Zusammenfassung der Formelzeichnung, Quelle: Eigene Darstellung.....	73
Tabelle 3.9: Beispiel zur Berechnung von normierten Fähigkeitskennzahlen, Quelle: Eigene Darstellung.....	73
Tabelle 3.10: Gewichtung von Kriterien bei zwei verschiedenen Fällen, Quelle: Eigene Darstellung.....	74
Tabelle 3.11: Berechnung von Eignungsgraden für Fall 1, Quelle: Eigene Darstellung	75
Tabelle 3.12: Berechnung von Eignungsgraden für Fall 2, Quelle: Eigene Darstellung	75
Tabelle 3.13: Schutzprinzipien nach DIN EN ISO 10218-1 und ihre Auswirkung auf Planung von MRI, Quelle: Eigene Darstellung.....	76
Tabelle 3.14: Kollaborationskonzepte und benötigte Technologien, Quelle: In Anlehnung an Khalid et al. 2016, S. 8	77
Tabelle 3.15: Wichtigste Grundbewegungen, Quelle: In Anlehnung an Neumann 2018, S. 14 ...	80

Tabelle 3.16: Signifikante Einflussgrößen resultierend aus Montageaufgabe und der Durchführungsart, Quelle: Schröter 2018, S. 74	81
Tabelle 3.17: Daten zur Auswahl von Robotersystemen, Quelle: Eigene Darstellung.....	82
Tabelle 4.1: C-Raten einer Li-Ionen-Zelle mit 2000 mAh im Zusammenhang mit Zeit und Strom, Quelle: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., S. 11.....	88
Tabelle 4.2: Aufteilung und Vergleich der Zelltypen, Quelle: In Anlehnung an VDMA Batterieproduktion 2020, S. 20 ff.	89
Tabelle 5.1: Beschreibung von Aufgaben an Arbeitsstationen, Quelle: Eigene Darstellung.....	114
Tabelle 5.2: Bewertung von Arbeitsstationen nach Kriterien, Quelle: Eigene Darstellung	116
Tabelle 5.3: Auswahl von Ausprägungen und Bewertung von Ressourcen für die Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	121
Tabelle 5.4: Bewertungsaspekte mit zugehörigem Wertbereich, Quelle: Schröter 2018, S. 54 ...	122
Tabelle 5.5: Berechnung von Fähigkeitskennzahlen für die Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	122
Tabelle 5.6: Eignungsgraden von Montageoperationen für die Pouch-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	123
Tabelle 5.7: Daten zur Auswahl von Roboter-Teilsystemen, Quelle: Eigene Darstellung	126
Tabelle 0.1: Harmonisierte Normen, Quelle: Müller et al. 2019, S. 314.....	144
Tabelle 0.2: Auswahl von Verfahren zur physischen Belastung, Quelle: Staut, Onlinequelle [06.09.2022].....	145
Tabelle 0.3: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein <i>Hinlangen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 78	146
Tabelle 0.4: Zeitelemente einer linearen Roboterbewegung beim <i>Hinlangen</i> , Quelle: In Anlehnung an Schröter 2018, S. 79	146
Tabelle 0.5: Berechnungsformeln für die lineare Roboterbewegung beim <i>Hinlangen</i> , In Anlehnung an Schröter 2018, S. 80 f.	147
Tabelle 0.6: Berechnung der Bewegungszeit für verschieden Bewegungsfälle, Quelle: In Anlehnung an Schröter 2018, S. 89	148
Tabelle 0.7: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein <i>Bringen</i> bei unterschiedlichen Bewegungsfällen, Quelle: Neumann 2018, Anlage 2.....	149
Tabelle 0.8: Zeitelemente einer Greifbewegung, Quelle: Schröter 2018, S. 92	150
Tabelle 0.9: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein <i>Greifen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 92.....	150
Tabelle 0.10: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein <i>Greifen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 93.....	151
Tabelle 0.11: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein <i>Bringen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 95.....	152

Tabelle 0.12: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein <i>Bringen</i> , Quelle: Neumann 2018, Anlage 2.....	152
Tabelle 0.13: Signifikante Einflussgrößen für den Prozessbaustein <i>Fügen</i> , Quelle: In Anlehnung an Neumann 2018, S. 47.....	153
Tabelle 0.14: Berechnungsformel für den MRK-Prozessbaustein <i>Fügen</i> , In Anlehnung an Neumann 2018, S. 46.....	153
Tabelle 0.15: Zeit zur Durchführung der Suchfahrt in Abhängigkeit der Passungsklasse, Quelle: Schröter 2018, S. 100.....	153
Tabelle 0.16: Zeit für das Fügen in Abhängigkeit der Fügetiefe, Quelle: Schröter 2018, S. 100.....	153
Tabelle 0.17: Signifikante Einflussgrößen für den Prozessbaustein <i>Loslassen</i> , Quelle: In Anlehnung an Neumann 2018, S. 47.....	154
Tabelle 0.18: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein <i>Loslassen</i> , Quelle: Schröter 2018, S. 101.....	154
Tabelle 0.19: Grenzwerte für Transienten und Quasistatischen Kontakt gemäß ISO TS 15066, Quelle: Schröter 2018, S. 69.....	156
Tabelle 0.20: Maximale Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit der effektiven Robotermasse in mm/s (ISO/TS 15066: 2016), Quelle: Schröter 2018, S. 71.....	157
Tabelle 0.21: Grenzen für die Produktionszellenkonzepte, Quelle: AVL List GmbH.....	158
Tabelle 0.22: Grenzen für die Produktionszellenkonzepte nach AVL List GmbH, Quelle: Prechtl 2020, S. 32.....	158
Tabelle 0.23: Übersicht der Zellformate, Quelle: Fraunhofer-Allianz Batterien 2017, S. 7.....	158

Anhang

Anhang A

Tabelle 0.1: Harmonisierte Normen, Quelle: Müller et al. 2019, S. 314

Standard	Typ	Harmo-nisiert	Titel
EN ISO 12100:2010	A	2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010)
EN ISO 10218-1:2011	C	2006/42/EC	Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011)
EN ISO 10218-2:2011	C	2006/42/EC	Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011)
ISO/TS 15066:2016	C	–	Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter
EN ISO 11161:2007	B1	2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Integrierte Fertigungssysteme – Grundlegende Anforderungen (ISO 11161:2007)
EN ISO 13849-1:2015	B1	2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2006)
EN ISO 13849-2:2012	B1	2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung (ISO 13849-2:2012)
EN ISO 13850:2015	B2	2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze (ISO 13850:2006)
EN 1037:1995+A1:2008	B1	2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Vermeidung von unerwartetem Anlauf
EN 60204-1:2006	B1	2014/35/EU 2006/42/EC	Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
EN 61000-6-2:2005	-	2014/30/EU	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-2: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Industriebereiche
EN 61000-6-4:2011	-	2014/30/EU	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 6-4: Fachgrundnormen – Störaussendung für Industriebereiche

Anhang B

Tabelle 0.2: Auswahl von Verfahren zur physischen Belastung, Quelle: Staut, Onlinequelle [06.09.2022]

		Belastungsarten					
		Manuelle Lastenhandhabung ¹			Körperhaltung ²	Aktionskräfte ³	Repetitive Tätigkeiten ⁴
		HHT	Z/S	Kombi-niert			
Grob-Screening-Verfahren	DGUV-I 240-460/DGUV-I 208-033	(X)	(X)		(X)	(X)	
	AWS light	(X)	(X)		(X)	(X)	(X)
Spezielle Screening-Verfahren	LMM-HHT	X					
	LMM-Z/S		X				
	LMM-MAP						
	RULA				X		(X)
	OCRA Checkliste						X
	Multiple-Lasten-Tool	X	X	X			
	IAD-BkB	X	X		X	X	X
Expertenverfahren	EAWS/AAWS+	X	X		X	X	X
	Kraftbewertungsverfahren					X	
	NIOSH-Verfahren	X					
	OWAS				X		
	OCRA-Verfahren						X
Messverfahren	CUELA und andere Messverfahren	Kontinuierliche Messung von biomechanischen Belastungsgrößen und/oder physiologischen Messgrößen					

1 HHT: Heben, Halten, Tragen; Z/S: Ziehen, Schieben; "kombiniert" für die kombinierte Bewertung.

2 Durch die Tätigkeit erzwungene Körperhaltungen mit geringem äußeren Kraftaufwand.

3 Erhöhte Kraftanstrengungen und/oder Krafteinwirkungen (Ganzkörper oder Hand-Arm).

4 Finger-Hand-Arm-Belastungen durch repetitive Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen.

Anhang C

Hinlangen

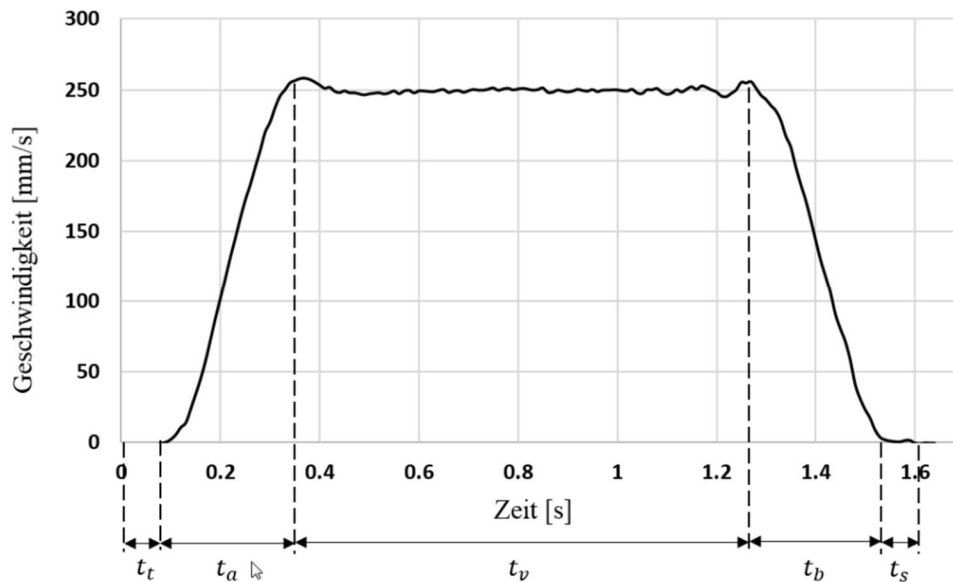


Abbildung 0.1: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm mit der Unterteilung der Bewegungszeiten für eine lineare Roboterbewegung, Quelle: Schröter 2018, S. 79

Tabelle 0.3: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Hinlangen*, Quelle: Schröter 2018, S. 78

Einflussgröße	Anmerkung
Bewegungslänge	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ² , Angabe optional
Bewegungsart	Linear oder achsspezifisch
Art des Stopps	Genauhalt oder Überschleiff

Tabelle 0.4: Zeitelemente einer linearen Roboterbewegung beim *Hinlangen*, Quelle: In Anlehnung an Schröter 2018, S. 79

Formelzeichen	Bewegungszeit	Beschreibung
t_{gr}	Gesamtzeit für das Hinlangen	$t_{gr} = t_t + t_a + t_v + t_b + t_s$
t_t	Totzeit	Angabe im Datenblatt des Roboters
t_a	Zeitanteil der Beschleunigung	$t_a = \frac{v_{TCP}}{a_{TCP}}$ v_{TCP} : Beschleunigung des Endeffektors v_{TCP} : Geschwindigkeit des Endeffektors

t_v	Zeitanteil der konstanten Geschwindigkeit	$t_a = \frac{s_g}{v_{TCP}} - \frac{v_{TCP}}{a_{TCP}}$ s_g , zurückgelegte Strecke
t_b	Zeitanteil der Entschleunigung	$t_b = t_a$
t_s	Ausschwingzeit	Angabe im Datenblatt des Roboters

Tabelle 0.5: Berechnungsformeln für die lineare Roboterbewegung beim *Hinlangen*, In Anlegung an Schröter 2018, S. 80 f.

Berechnungsformel

$$t_{g,lin} = \begin{cases} t_t + \frac{s_g}{v_{TCP}} + \frac{v_{TCP}}{a_{TCP}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{TCP}} \right) \geq 0 \quad (\text{große Wegstrecken}) \\ t_t + 2 \sqrt{\frac{s_g}{a_{TCP}}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{TCP}} \right) < 0 \quad (\text{kleine Wegstrecken}) \end{cases}$$

$$a_{TCP} = \begin{cases} a_{a1} \cdot v_{TCP} + c_{a2} & \text{für } v < v_g \\ a_{max} & \text{für } v > v_g \end{cases}$$

c_{a1} : Angabe im Datenblatt des Roboters

c_{a2} : Angabe im Datenblatt des Roboters

*Die Konstanten sind abhängig vom jeweiligen Robotertyp.

* Sofern der Robotertyp zum Planungszeitpunkt noch nicht bekannt ist, werden sie mit Standardwerten belegt.

v_g : Grenzggeschwindigkeit zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit

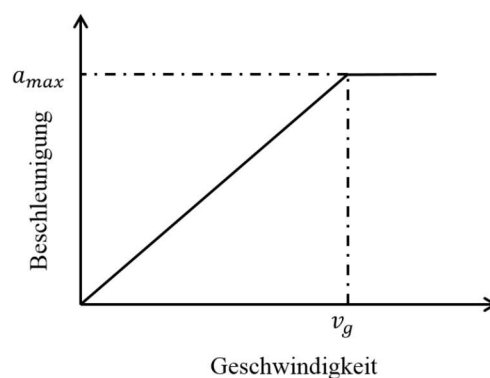


Abbildung 0.2: Berechnung der Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Quelle: Schröter 2018, S. 81

Überschleifen von Bahnpunkten

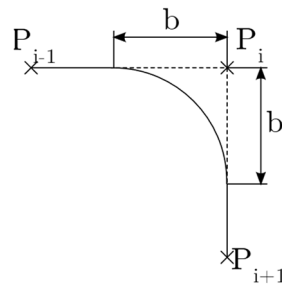


Abbildung 0.3: Überschleifen des Bahnpunktes P_i , Quelle: Schröter 2018, S. 88

Tabelle 0.6: Berechnung der Bewegungszeit für verschieden Bewegungsfälle, Quelle: In Anlehnung an Schröter 2018, S. 89

Fall	P_k	P_i	Ausgangsformel	Geschwindigkeitsdiagramm
1	Genauhalt	Genauhalt	$t_{gr1} = t_t + t_a + t_v + t_b + t_s$	
2	Überschliff	Genauhalt	$t_{gr2} = t_v + t_b + t_s$	
3	Genauhalt	Überschliff	$t_{gr3} = t_t + t_a + t_v - t_{bl}$	
4	Überschliff	Überschliff	$t_{gr4} = t_v - t_{bl}$	
$s_{bl} = 2b - \frac{\pi b}{2}$ $t_{bl} = \left(2b - \frac{\pi b}{2}\right) \frac{1}{v_{TCP}}$ <p>s_{bl}: effektive Bewegungslänge wird beim Überschleifen um die Strecke s_{bl} verringert</p> <p>t_{bl}: Zeitanteil für das Verkürzen der Bewegungsbahn beim Überschleifen eines Punktes</p>				

Tabelle 0.7: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein *Bringen* bei unterschiedlichen Bewegungsfällen, Quelle: Neumann 2018, Anlage 2

Fall	Berechnungsformel
1	$t_{gr1} = \begin{cases} t_t + \frac{s_g}{v_{TCP}} + \frac{v_{TCP}}{a_{TCP}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{TCP}} \right) \geq 0 \quad (\text{große Wegstrecken}) \\ t_t + 2 \sqrt{\frac{s_g}{a_{TCP}}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{TCP}} \right) < 0 \quad (\text{kleine Wegstrecken}) \end{cases}$
2	$t_{gr2} = \frac{s_g}{v_{TCP}} + t_s$
3	$t_{gr3} = \begin{cases} t_t + \frac{s_g}{v_{TCP}} - \left(2b - \frac{\pi b}{2} \right) \frac{1}{v_{TCP}} & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{TCP}} \right) \geq 0 \quad (\text{große Wegstrecken}) \\ t_t + \sqrt{\frac{s_g}{a_{TCP}}} - \left(2b - \frac{\pi b}{2} \right) \frac{1}{v_{TCP}} & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{TCP}} \right) < 0 \quad (\text{kleine Wegstrecken}) \end{cases}$
4	$t_{gr4} = \frac{s_g}{v_{TCP}} - \left(2b - \frac{\pi b}{2} \right) \frac{1}{v_{TCP}}$

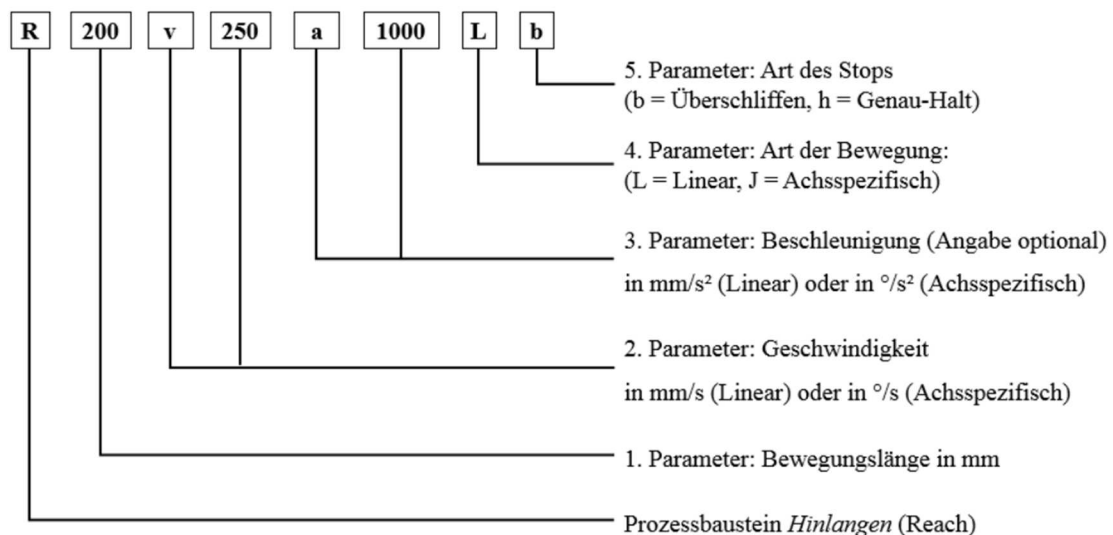


Abbildung 0.4: Kodierung des MRK-Prozessbausteins *Hinlangen*, Quelle: Schröter 2018, S. 90

Greifen

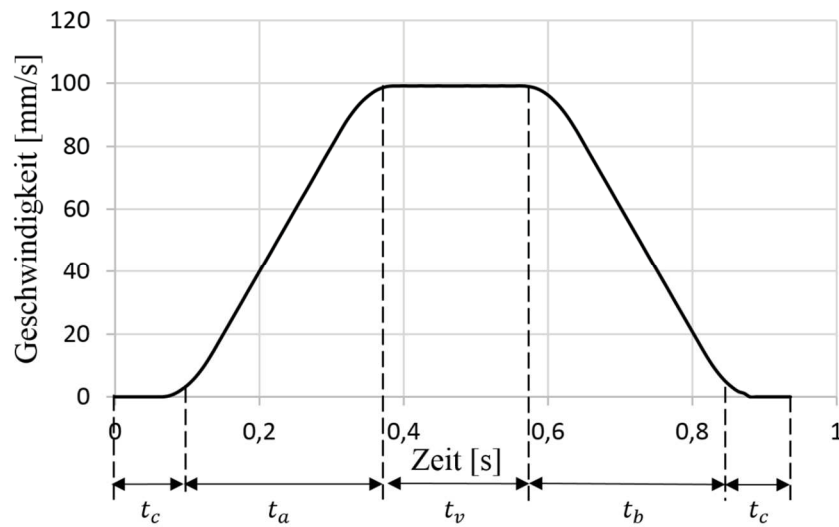


Abbildung 0.5: Geschwindigkeitsverlauf der Finger bei einer positionsregulierten Schließbewegung, Quelle: Schröter 2018, S. 91

Tabelle 0.8: Zeitelemente einer Greifbewegung, Quelle: Schröter 2018, S. 92

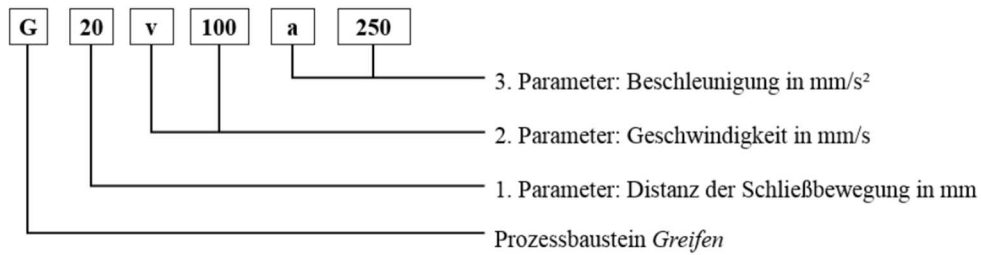
Element	Beschreibung
t_c	Zeitanteil Kommunikation
t_a	Zeitanteil Beschleunigung
t_v	Zeitanteil konstanter Geschwindigkeit
t_b	Zeitanteil Verzögerung

Tabelle 0.9: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Greifen*, Quelle: Schröter 2018, S. 92

Einflussgröße	Ausprägung
Kommunikation zw. Roboter und Greifer-Steuerung	Absolutwert in s
Distanz der Schließbewegung	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ² , Angabe optional

Tabelle 0.10: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein *Greifen*, Quelle: Schröter 2018, S. 93

Berechnungsformeln	
$t_{gr} = t_c + t_a + t_v + t_b + t_c$	
$t_{gr} =$	$\begin{cases} 2 t_c + \frac{v_{gr}}{a_{gr}} + \frac{s_{gr}}{v_{gr}} & \text{für } \left(s_{gr} - \frac{v_{gr}^2}{a_{gr}} \right) \geq 0 \text{ (große Wegstrecken)} \\ 2 t_c + 2 \sqrt{\frac{s_{gr}}{a_{gr}}} & \text{für } \left(s_{gr} - \frac{v_{gr}^2}{a_{gr}} \right) < 0 \text{ (kleine Wegstrecken)} \end{cases}$

Abbildung 0.6: Kodierung des Prozessbausteins *Greifen*, Quelle: Schröter 2018, S. 94

Bringen

Tabelle 0.11: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Bringen*, Quelle: Schröter 2018, S. 95

Einflussgröße	Ausprägung
Bewegte Masse	Absolutwert in s
Bewegungslänge	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ²
Bewegungsart	Linear oder achsspezifisch
Art des Stops	Genauhalt oder überschliften

Tabelle 0.12: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein *Bringen*, Quelle: Neumann 2018, Anlage 2

Fall	Berechnungsformel
1	$t_{gm1} = \begin{cases} t_t + \frac{s_g}{v_{TCP}} + \frac{v_{TCP}}{a_{mTCP}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{mTCP}} \right) \geq 0 & \text{(große Wegstrecken)} \\ t_t + 2 \sqrt{\frac{s_g}{a_{mTCP}}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{mTCP}} \right) < 0 & \text{(kleine Wegstrecken)} \end{cases}$
2	$t_{gm2} = \frac{s_g}{v_{TCP}} + t_s$
3	$t_{gm3} = \begin{cases} t_t + \frac{s_g}{v_{TCP}} - \left(2b - \frac{\pi b}{2} \right) \frac{1}{v_{TCP}} & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{mTCP}} \right) \geq 0 & \text{(große Wegstrecken)} \\ t_t + \sqrt{\frac{s_g}{a_{mTCP}}} - \left(2b - \frac{\pi b}{2} \right) \frac{1}{v_{TCP}} & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{mTCP}} \right) < 0 & \text{(kleine Wegstrecken)} \end{cases}$
4	$t_{gm4} = \frac{s_g}{v_{TCP}} - \left(2b - \frac{\pi b}{2} \right) \frac{1}{v_{TCP}}$

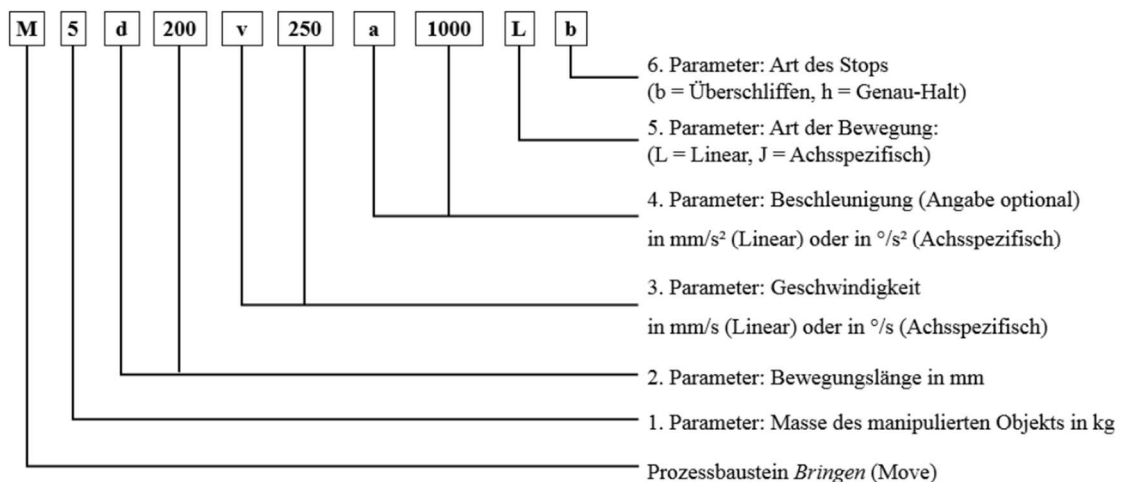


Abbildung 0.7: Kodierung des Prozessbausteins *Bringen*, Quelle: Schröter 2018, S. 98

Fügen

Tabelle 0.13: Signifikante Einflussgrößen für den Prozessbaustein *Fügen*, Quelle: In Anlehnung an Neumann 2018, S. 47

Einflussgröße	Ausprägung
Passungsklasse	Lose, eng, fest
Fügetiefe	Absolutwert in mm
Erforderliche Fügekraft	Absolutwert in N (Angabe optional)

Tabelle 0.14: Berechnungsformel für den MRK-Prozessbaustein *Fügen*, In Anlehnung an Neumann 2018, S. 46

Element	Beschreibung
$t_{gp} = t_{sp} + t_{sl}$	Gesamtzeit eines Fügeprozesses
t_{sp}	Zeit zur Durchführung der Suchfahrt in Abhängigkeit der Passungsklasse
t_{sl}	Zeit für das Fügen in Abhängigkeit der Fügetiefe

Tabelle 0.15: Zeit zur Durchführung der Suchfahrt in Abhängigkeit der Passungsklasse, Quelle: Schröter 2018, S. 100

Passungsklasse	P1	P2	P3
Passung	Lose: Kein Druck - Gegenstände fallen ineinander	Eng: Leichter Druck - Gegenstände fallen nicht mehr ineinander	Fest: Starker Druck - Gegenstände werden ineinander gepresst
t_{sp}	0,5 s	0,7 s	0,9 s

Tabelle 0.16: Zeit für das Fügen in Abhängigkeit der Fügetiefe, Quelle: Schröter 2018, S. 100

Fügetiefe	$d_{sl} < 20 \text{ mm}$	$20 \text{ mm} \leq d_{sl} < 50 \text{ mm}$	$d_{sl} \geq 50 \text{ mm}$
t_{sl}	0,6 s	0,9 s	1,8 s

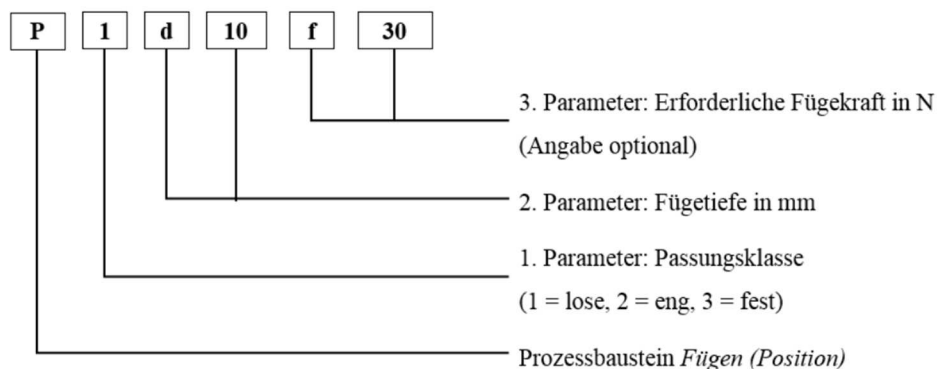


Abbildung 0.8: Kodierung des Prozessbausteins *Fügen*, Quelle: Schröter 2018, S. 101

Loslassen

Tabelle 0.17: Signifikante Einflussgrößen für den Prozessbaustein *Loslassen*, Quelle: In Anlehnung an Neumann 2018, S. 47

Einflussgröße	Ausprägung
Kommunikation zwischen Roboter- und Greifersteuerung	Absolutwert in s
Distanz des Öffnens	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ² , Angabe optional

Tabelle 0.18: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein *Loslassen*, Quelle: Schröter 2018, S. 101

Berechnungsformel
$t_{gm1} = \begin{cases} t_t + \frac{s_g}{v_{TCP}} + \frac{v_{TCP}}{a_{mTCP}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{mTCP}} \right) \geq 0 & \text{(große Wegstrecken)} \\ t_t + 2 \sqrt{\frac{s_g}{a_{mTCP}}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{TCP}^2}{a_{mTCP}} \right) < 0 & \text{(kleine Wegstrecken)} \end{cases}$
* Berechnung der benötigten Zeit des Loslassens mit dieselben Formelzusammenhänge wie für das Greifen

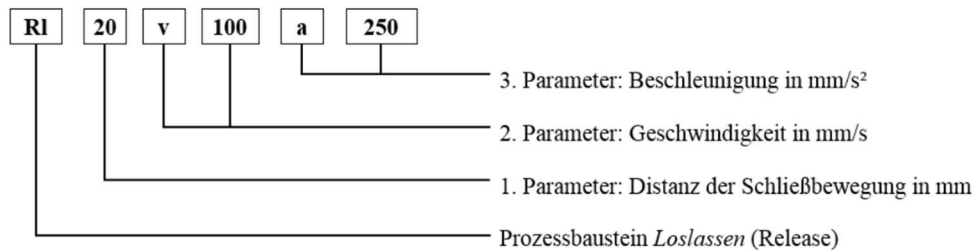


Abbildung 0.9: Kodierung des Prozessbausteins *Loslassen*, Quelle: Schröter 2018, S. 102

Anhand D

Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

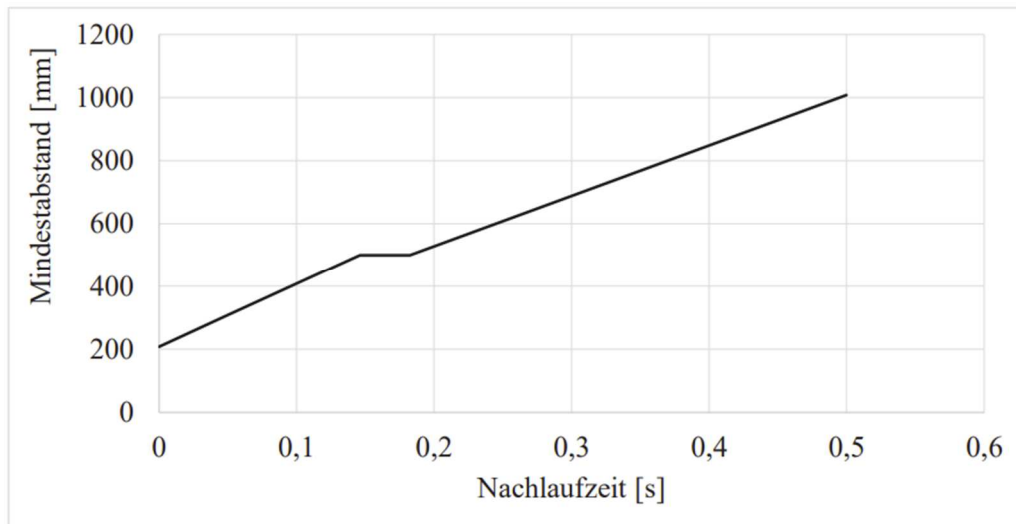
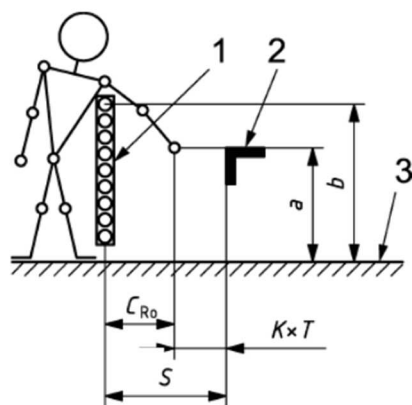


Abbildung 0.10: Mindestabstand bei orthogonaler Anordnung des Schutzfelds zur Gefahrenstelle in Abhängigkeit der Nachlaufzeit

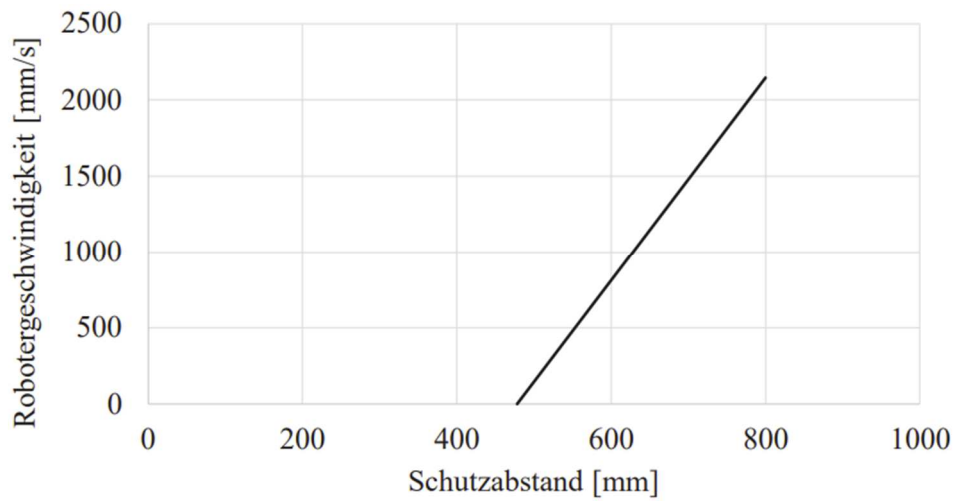
$$S = \begin{cases} \left(2000 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * T\right) + C & 0,05 > T \leq 0,15 \\ 500 \text{ mm} & 0,15 > T \leq 0,1825 \\ \left(1600 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * T\right) + C & T > 0,1825 \end{cases}$$



- 1: Berührungslos wirkende Schutzeinrichtung
- 2: Gefährdungsbereich
- 3: Bezugsebene
- a: Höhe des Gefährdungsbereichs
- b: Höhe des Schutzfeldes
- C: Eindringtiefe
- S: Mindestabstand

Abbildung 0.11: Hinüberreichen über ein senkrecht wirkendes Schutzfeld nach DIN EN ISO 13855: 2010, Quelle: Schröter 2018, S. 63

Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung



Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit des minimal zulässigen Schutzabstandes bei Sensor mit einem Auflösungsvermögen $d < 40$ mm und konstant angenommenen Geschwindigkeit des Menschen von 1600 mm/s, Quelle: Schröter 2018, S. 66

Leistungs- und Kraftbegrenzung

Tabelle 0.19: Grenzwerte für Transienten und Quasistatischen Kontakt gemäß ISO TS 15066, Quelle: Schröter 2018, S. 69

Körperregion	Körperstelle		Quasi-statischer Kontakt		Transienter Kontakt	
			$p_s [N/cm^2]$	$F_{max} [N]$	P_T	F_T
Kopf	1	Stirn	130	130	Nicht zutreffend	
	2	Schläfe	110			
Gesicht	3	Kaumuskel	110	65		
Nacken	4	Nackenmuskel	140	150	2	2
Rücken	6	Schultergelenk	160	210	2	2
Hand/Finger	17	Finger	300	140	2	2
	22	Handfläche	260		2	
	24	Handrückseite	200		2	
Oberschenkel	26	Oberschenkelmuskel	250	220	2	2
	27	Kniescheibe	220	220	2	

Tabelle 0.20: Maximale Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit der effektiven Roboter­masse in mm/s (ISO/TS 15066: 2016), Quelle: Schröter 2018, S. 71

Körperregion	Effektive Roboter­masse					
	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg	15 kg	20 kg
Hand/Finger	2400	2200	2000	2000	2000	1900
Unterarm	2200	1800	1500	1400	1400	1300
Oberarm	2400	1900	1500	1400	1300	1300
Abdomen	2900	2100	1400	1000	870	780
Hüfte	2700	1900	1300	930	800	720
Oberschenkel	2000	1400	920	670	560	500
Unterschenkel	1700	1200	800	580	490	440
Schultern	1700	1200	790	590	500	450
Brust	1500	1100	700	520	440	400

Anhang E

Tabelle 0.21: Grenzen für die Produktionszellenkonzepte, Quelle: AVL List GmbH

Fahrzeug	Batteriemodul			Batterie-Pack	
	Größe [mm]	Gewicht [kg]	Anzahl [#]	Größe [mm]	Gewicht [kg]
Enersys Basis	455x385x120	45	14	1000x900x700	1000
JLR	370x k.A.	~13	36	2276x1516x255	608
Fuso	1100x400x180	88,5	6	2254x1120x454	740
MacLaren	240x110x80	~2,5	36	1400x800x500	56
Renault Twingo	435x120x168	k.A.	8	1329x782x193	170
Isuzu	390x152x108	~14	8	685x450x265	150
Gesetzte Grenzen					
Minimal	k.A.	-	-	250x150x110	5
Maximal	2100x510x200	200	-	3500x2000x1000	2000

Tabelle 0.22: Grenzen für die Produktionszellenkonzepte nach AVL List GmbH, Quelle: Prechtl 2020, S. 32

Batteriezelle	Batteriezellgröße [LxBxH; DxH] [mm]
Rundzelle	18x65 - 33x100
Prismatische Zelle	120x85x12,5 - 173x45x115
Pouch-Zelle	121x243x2 - 560x112x7,5

Tabelle 0.23: Übersicht der Zellformate, Quelle: Fraunhofer-Allianz Batterien 2017, S. 7

Zelltyp	Zellformat	Zellgröße [LxBxH; DxH] [mm]
Rundzelle	18650	18x65
	21700	21x70
Prismatische Zelle	PHEV2	115x173x45
	BEV2	115x173x45
Pouch-Zelle		162x330x7

Abbildung A.0.13: Geforderte Prozesszeiten der Batterie-Pack-Fertigung, Quelle: AVL List GmbH

Takt Time Calculation			
Customer Input		Available Time	
Volume/Year	Use drop-down list	Shift 1	Shift 2
Volume	600 Pieces	450	450
Working Days/Year	120 Days	27.000	27.000
Days / Week	5 Days	315	315
Total Hours /		18.900	18.900
Shift 1	8 Hours		
Shift 2	8 Hours		
Shift 3	8 Hours		
Break time/shift	15 Minutes		
Lunch time/shift	15 Minutes		
Planned down time/shift	Minutes		
Production Demand		Takt Time	
Year	600	Minutes	126,00
Month	50	Seconds	7.560,00
Week	25		
Day	5		
Production Efficiency		Takt Time for calculation	
Type of Loss	% Remark	Minutes	126,00
Availability Losses	95,00% Downtime, Setup	Seconds	7.560,00
Performance Losses	95,00% No parts, Short Breakdown		
Quality Losses	95,00% Parts Failure		
Total Efficiency	85,74% Result		
Calculated efficiency	85,00% Result		
Production Quantity			
	Day	Week	Month
Shift 1	2,5	12,5	25,0
Shift 2	2,5	12,5	25,0
Shift 3			
	Year	Year	Year
			300,0
			300,0
			Pieces