



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion und Logistik

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.-Ing. Prof.e.h. Dr.h.c. Wilfried Sihl

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.techn. Philipp Hold

(Fraunhofer Austria Research GmbH, Geschäftsbereich: Advanced Industrial Management)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Fabian Holly, BSc

Matr.Nr.: 1325954 (066 482)

Semperstraße 35

1180 Wien

Wien, Jänner 2021

Fabian Holly



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

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

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

Wien, Jänner 2021

Fabian Holly

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Diplomarbeit fachlich sowie persönlich auf verschiedensten Wegen unterstützt haben.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.-Ing. Prof.e.h. Dr.h.c. Wilfried Sihm bedanke ich mich, dass ich diese Arbeit am Institut für Managementwissenschaften der Technischen Universität Wien verfassen durfte.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.techn. Philipp Hold für die fachliche und wissenschaftliche Betreuung, für seine konstruktive Kritik und Hilfsbereitschaft beim Verfassen der Arbeit.

Bedanken will ich mich auch bei Herrn Dipl. Ing. Thomas Edtmayr für die Möglichkeit, in diesem spannenden Forschungsgebiet bei Fraunhofer Austria Research GmbH mitarbeiten zu dürfen, sowie bei Frau Dipl. Ing. Tanja Zigart vom Institut für Managementwissenschaften für ihre hilfreichen und wertvollen Anregungen.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Ing. Wolfgang M. Baumann von der Firma awb Schraubtechnik- und Industriebedarf GmbH sowie bei Herrn Dr. Samuel Reimer von der Firma Ottobock SE & Co. KGaA für die Bereitstellung der Exoskelette bedanken.

Nicht zuletzt gebührt meiner Familie Dank, die mich nicht nur während meines Studiums, sondern auf meinem ganzen Lebensweg unterstützt und gestärkt hat.

Zudem möchte ich mich bei meiner Freundin und allen Freunden für ihren Rückhalt und ihre Unterstützung während meines Studiums bedanken.

Gender Erklärung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Diplomarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

Kurzfassung

Der demografische Wandel stellt produzierende Unternehmen in Europa vor zentrale Herausforderungen in der Arbeitsgestaltung. Einer zunehmend älter werdenden Belegschaft steht eine immer geringer werdende Anzahl junger Erwerbstätiger gegenüber. Um Mitarbeiter langfristig im Unternehmen zu halten, ist die gesundheitsschonende Gestaltung der Arbeitstätigkeiten unabdingbar.

Die mittel- bis langfristigen Automatisierungspotenziale stehen bei der Bewältigung der unmittelbaren Auswirkungen des demografischen Wandels nicht im Vordergrund. Vielmehr werden technische Assistenzsysteme der alternden Arbeitsgesellschaft als Unterstützung beiseite stehen. Sie bieten die Möglichkeit, Arbeitsplätze ergonomischer zu gestalten und körperliche Belastungen der Arbeitnehmer zu reduzieren. Insbesondere der Einsatz der am Körper getragenen Exoskelette stellt eine effektive Maßnahme zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen dar. Aufgrund der Komplexität dieses Assistenzsystems, sowie der sich aus dem Aufbau und der Anwendung von Exoskeletten ergebenden Variantenvielfalt, ergeben sich Schwierigkeiten in Bezug auf die Auswahl passender Exoskelette für den jeweiligen Anwendungsfall.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Vorgehensmodell entwickelt, welches zur Unterstützung von Produktions- und Logistikunternehmen bei der Auswahl eines zu ihrem Anwendungsfall passenden Exoskeletts anwendungsgerechte Verwendung findet. Das Modell besteht aus der systematischen Verknüpfung von Methoden zur Arbeitsablaufanalyse und Ermittlung objektiv vorhandener, physischer Arbeitsbelastungen mit den Ergebnissen einer umfangreichen Marktanalyse zum aktuellen Stand der Technik von Exoskeletten und deren Morphologie.

Zur Validierung des Vorgehensmodells dienen zwei, in der TU Wien Pilotfabrik aufgebaute Use-Cases in den Bereichen Montage und Logistik. Mit Hilfe des Modells können für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Exoskelette identifiziert werden. Nach Durchführung der Use-Cases durch Studierende aus dem Ingenieurbereich folgt eine Anwenderbefragung mittels einer quantitativen Usability Analyse auf Basis des System Usability Scale Fragebogens. Die eingesetzten Exoskelette wurden von den Probanden als gut geeignet empfunden und bieten die, für die Arbeitsausführung nötige, Unterstützung. Durch den Einsatz des Assistenzsystems wird die Arbeitsdauer nicht erhöht. Alle Testpersonen geben an, dass sie das Exoskelett während ihrer Arbeitstätigkeit regelmäßig benutzen würden. Aufgrund des entwickelten Vorgehensmodells war es sohin möglich die passenden Exoskelette für den jeweiligen Use-Case zu bestimmen.

Abstract

Demographic change is confronting manufacturing companies in Austria with central challenges in work organization. An increasingly aging population of employees is confronted with an ever-decreasing number of young workers. In order to keep employees in the company in the long term, it is essential that work activities are organized in a way that protects their health.

The medium to long-term automation potential is not the main focus when dealing with the direct effects of demographic change. Rather, technical assistance systems will be available to support the aging work society. They offer the possibility of making workplaces more ergonomic and reducing physical stress on employees. In particular, the use of the novel exoskeletons worn on the body is an effective measure to improve working conditions. Due to the complexity of this assistance system, as well as the variety of variants resulting from the construction and application of exoskeletons, difficulties arise in the selection of suitable exoskeletons for the respective application.

In this thesis a process model is developed, which is used to support Austrian companies in the selection of an exoskeleton suitable for their application. The model consists of the systematic combination of methods for workflow analysis and determination of objectively existing, physical workloads with the results of an extensive market analysis of the current state of the art of exoskeletons and their morphology.

For the validation of the procedure model two use cases in the areas of assembly and logistics, which were built up in the TU Vienna pilot factory, are used. With the help of the model, suitable exoskeletons can be identified for the respective application case. After the implementation of the use cases by students from the engineering sector, a user survey follows by means of a quantitative usability analysis based on the System Usability Scale questionnaire. The exoskeletons used were found to be well suited by the test persons and offer the necessary support for the work execution. The use of the assistance system does not increase the work duration. All test persons state that they would use the exoskeleton regularly during their work activity. Due to the developed selection model it was possible to determine the appropriate exoskeletons for the respective use case.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Motivation und Problemstellung	1
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1	Mensch und Organisation in der Produktion	5
2.1.1	Demografischer Wandel und Gesundheitsentwicklung	5
2.1.2	Tätigkeiten des Menschen in der Produktion.....	10
2.1.3	Humanzentrierte Arbeitsgestaltung	12
2.2	Exoskelette zur humanzentrierten Arbeitsgestaltung	20
2.2.1	Definition und Klassifizierung.....	20
2.2.2	Potentiale und Risiken von Exoskeletten.....	23
2.2.3	Anforderungen zur betrieblichen Anwendung.....	26
2.3	Methode zur Auswahl von Exoskeletten.....	31
2.3.1	Anforderungen an Methoden zur Auswahl von Exoskeletten	31
2.3.2	Modelle und Vorgehensweisen zur Auswahl von Exoskeletten.....	34
2.3.3	Stärken, Schwächen und Herausforderungen	41
2.4	Zusammenfassung und Fazit	43
3	Forschungsbedarf, Ziel und Abgrenzung	46
3.1	Forschungsbedarf.....	46
3.2	Ziel der Arbeit	46
3.3	Abgrenzung der Arbeit.....	48
4	Konzeption und Entwicklung	49
4.1	Konzeption des Vorgehensmodells	49
4.2	Entwicklung des Vorgehensmodells	52
4.2.1	Morphologie, Technologie und Marktübersicht.....	52
4.2.2	Arbeitsablaufanalyse und Leitmerkalmethode	58
4.2.3	Regelwerk zur Identifikation und Auswahl	63
4.3	Kritische Reflexion des Vorgehensmodells	70

5	Validierung	71
5.1	Anwendung in der Montage.....	71
5.1.1	Beschreibung des Use-Cases	71
5.1.2	Anwendung des Vorgehensmodells	72
5.1.3	Ergebnisse und Fazit	77
5.2	Anwendung in der Logistik	80
5.2.1	Beschreibung des Use-Cases	80
5.2.2	Anwendung des Vorgehensmodells	81
5.2.3	Ergebnisse und Fazit	84
5.3	Reflexion der Ergebnisse	85
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
6.1	Zusammenfassung	87
6.2	Diskussion der Ergebnisse	88
6.3	Ausblick	89
7	Anhang	91
8	Literaturverzeichnis	104
9	Abbildungsverzeichnis.....	113
10	Tabellenverzeichnis.....	114
11	Abkürzungsverzeichnis	116

1 Einleitung

Im Jahr 2030 werden etwa 15% der Österreicher der Altersgruppe zwischen 55 und 65 Jahre angehören und bereits mehr als 25% sind zu diesem Zeitpunkt über 60 Jahre alt (Statistik Austria, 2012). Einer zunehmend älter werdenden Belegschaft steht eine immer geringer werdende Anzahl junger Erwerbstätiger gegenüber. Dieser demografische Wandel stellt europäische Unternehmen aller Branchen vor die Herausforderung, qualifiziertes Personal zu finden und langfristig zu binden. Die Entwicklung und Bereitstellung von technischen Assistenzsystemen ist eine Möglichkeit, damit Mitarbeiter die beruflichen Anforderungen länger erfüllen können (Weidner et al., 2015, S. 12).

1.1 Ausgangssituation

In allen Lebenssituationen macht sich eine zunehmende Verbindung von Mensch und Technik bemerkbar. Auch der Arbeitnehmer wird beim Ausführen seiner Tätigkeit im Bereich der Produktion und Logistik bereits durch diverse technische Assistenzsysteme unterstützt. Hierzu zählen beispielsweise physische Hilfssysteme wie Mensch-Roboter-Kollaborationen und Hebehilfen oder digitale Assistenzsysteme wie Augmented Reality und Picking-Technologien.

Trotz der erheblichen Anstrengung ergonomisch schädliche Arbeitsbedingungen in industriellen Umgebungen, wie schwere oder sich wiederholende Hebe- und Tragetätigkeiten, nicht neutrale Körperhaltungen oder Ganzkörpervibrationen zu reduzieren, sind diese in vielen Berufsbereichen nach wie vor zu hoch. Die Folgen daraus, Erkrankungen des Stütz- und Bewegungsapparates, zählen zu den am häufigsten auftretenden Erkrankungen am Arbeitsplatz und sind die Ursache von etwa einem Fünftel aller jährlichen Krankenstandstage (AUVA, 2019). Vor allem im Hinblick auf die Alterung der Erwerbsbevölkerung hat sich die Reduktion von physischen, ergonomischen Risiken am Arbeitsplatz insbesondere in Unternehmen europäischer Länder als vorrangiges Ziel herausgestellt. Systeme, welche an die individuellen Bedürfnisse des Menschen angepasst werden und ihn präventiv und operativ bei der Ausübung seiner spezifischen Arbeitsfähigkeiten unterstützen, stellen hierfür einen vielversprechenden Ansatz dar. Dabei hat die Erfüllung der Anforderungen des Menschen und der Unternehmen höchste Priorität (Weidner et al., 2015, S. 12).

1.2 Motivation und Problemstellung

Eine Möglichkeit, Mitarbeiter bei körperlichen Tätigkeiten zu unterstützen, stellt der Einsatz von Exoskeletten dar. Exoskelette sind äußere, am Körper getragene, physisch unterstützende Stützstrukturen (Looze et al. 2016) und haben sich als technische Hilfsmittel insbesondere in der Rehabilitation etabliert. Mittlerweile finden Exoskelette zunehmend auch in der produzierenden Industrie Anwendung (IFR, 2017).

Sie werden eingesetzt, um bei Hebetätigkeiten als Kraftunterstützung zu dienen oder den Körper oder einzelne Körperteile des Anwenders bei physisch anspruchsvollen Tätigkeiten zu entlasten. Anwendungsbereiche für Exoskelette finden sich im Produktionsbereich, speziell in der Fertigung und Montage sowie in der Logistik wieder. In diesen Bereichen bewirkt der Einsatz von Exoskeletten eine Verbesserung der Arbeitssicherheit und Ergonomie, insbesondere bei Tätigkeiten, welche schweres Heben, Zwangspositionen oder lang andauernde Überkopfarbeiten fordern und bei denen auf Grund ihrer Arbeitssituation bis dato keine oder nur bedingt technische Hilfsmittel eingesetzt werden konnten (DGUV, 2018; Hold et al., 2020).

Hohe physische Belastungen auf Mitarbeiter gefährden langfristig nicht nur die Gesundheit, sondern auch Produktivität und Effizienz der Mitarbeiter und somit des gesamten Produktionssystems. Der Einsatz von Exoskeletten als Assistenzsystem am Arbeitsplatz trägt somit zur Produktivitätserhöhung, Effizienzsteigerung und Erhöhung der Mitarbeiterzufriedenheit bei (Schmalz et al., 2019).

Aufgrund der Komplexität dieses Assistenzsystems, sowie der, sich aus dem Aufbau sowie der Anwendung von Exoskeletten ergebenden Variantenvielfalt, steht die Arbeitsvorbereitung von Industrie- und Logistikunternehmen vor Schwierigkeiten bei der Auswahl passender Exoskelette für ihren jeweiligen Anwendungsfall. Die aktuelle Entwicklung von Exoskeletten konzentriert sich auf technische Details und nicht auf die organisatorischen Herausforderungen. Die Notwendigkeit von Methoden zur Auswahl geeigneter Exoskelette für die unternehmensspezifischen Anwendungen wird jedoch hervorgehoben (Dahmen et al., 2018). Derzeit erfolgt sowohl die Auswahl als auch die Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz weitgehend auf subjektiver Basis. Diese sollten aufgrund der hohen Variantenvielfalt und der vielseitig möglichen Einsetzbarkeit von Exoskeletten jedoch wissenschaftlich fundiert und objektiv sein und einem definierten Prozess folgen. Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Unterstützung von österreichischen Unternehmen bei der Auswahl eines, zu ihrem Anwendungsfall passenden Exoskeletts. Die Arbeit stellt somit einen methodischen Ansatz für die Auswahl von Exoskelettsystemen vor.

1.3 Aufbau der Arbeit

Wissenschaftliche Prozesse finden bewusst oder unbewusst in verschiedenen Phasen statt. Um Probleme oder Aufgaben systematisch zu lösen, empfiehlt sich ein gezieltes Vorgehen mit Hilfe eines Phasenmodells. In der Literatur werden Phasenmodelle mit unterschiedlicher Anzahl von Phasen vorgestellt. Um die Forschungsfrage zu beantworten bzw. das oben genannte Vorgehensmodell zu entwickeln, kommt der iterative Problemlösungsansatz Design Science zur Anwendung. Die Designwissenschaft (Design Science, kurz DS) ist ein Problemlösungsansatz zum effizienteren und effektiveren Analysieren, Entwerfen, Implementieren und Nutzen von Informationssystemen (Hevner et al., 2004). Peffers et al. präsentieren in der

Publikation mit dem Titel A Design Science Research Methodology (DSRM) for Information Systems Research eine an die bisherige Literatur angelehnte Methode der Designwissenschaftsforschung (DS-Forschung). Diese Methode beinhaltet ein Prozessmodell für die Durchführung von DS-Forschungen. Der DS-Prozess umfasst die sechs Schritte Problemidentifikation und -motivation, Definition der Ziele für eine Lösung, Entwerfen und Entwicklung, Demonstration, Evaluierung und Publikation (Peppers et al., 2007, S. 4) welche im Folgenden erklärt werden (Peppers et al., 2007, S. 12–14). In dieser Diplomarbeit findet anstelle der Evaluierung des Modells in der fünften Phase die Validierung des Modells statt.

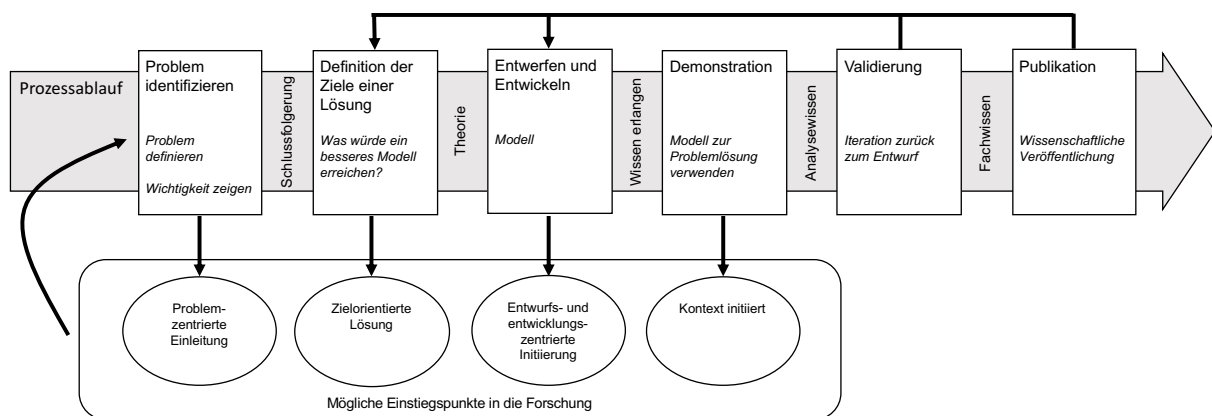


Abbildung 1: Design Science Research Methode (DSRM) Prozessmodell (Peppers et al., 2007)

1. Problemidentifikation und Motivation: Definition des spezifischen Forschungsproblems sowie die Begründung des Wertes seiner Lösungen
2. Definition der Ziele: Definition der Ziele der Lösung aus der Problemdefinition unter Berücksichtigung seiner Machbarkeit
3. Entwurf und Entwicklung: Erstellung des Modells
4. Demonstration: Verwendung des Modells zur Lösung des Problems
5. Validierung: Überprüfung der Ergebnisse des Modells
6. Kommunikation: Präsentation des Problems und seiner Bedeutung, des Modells, seines Nutzens, seiner Neuartigkeit und seiner Wirksamkeit

Um eine spezifische Handlungsanleitung in Form eines Vorgehensmodells zur Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion und Logistik zu entwickeln, ist die vorliegende Arbeit in fünf weitere Kapitel strukturiert, vgl. Abbildung 2. Zunächst wird in Kapitel 2 ein kurzer Überblick über das Thema Mensch und Organisation in der Produktion gegeben. Es folgen die theoretischen Grundlagen von Exoskeletten für den Einsatz in der industriellen sowie bereits bestehende Methoden zu deren Auswahl. In Kapitel 3 werden der Forschungsbedarf, die Zielsetzung und die Abgrenzung dieser Arbeit beschrieben.

Kapitel 4 beinhaltet die Ausarbeitung eines Vorgehensmodells, welches zur Auswahl von Exoskeletten dient. Zunächst wird ein grundlegende Vorgangsweise zur

Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz entworfen und anschließend folgt die Entwicklung des Modells. Stärken und Schwächen des Modells werden in diesem Kapitel kritisch reflektiert.

Die Anwendung des Vorgehensmodells erfolgt an zwei Use-Cases, die in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um einen praxisorientierten Montage Use-Case und einen weiteren, für den Logistikbereich typischen Use-Case.

Im abschließenden Kapitel wird das Vorgehensmodell nochmals zusammengefasst. Es folgt eine Diskussion über die erzielten Ergebnisse und weitere Untersuchungen zum Thema Exoskelette werden angeregt.

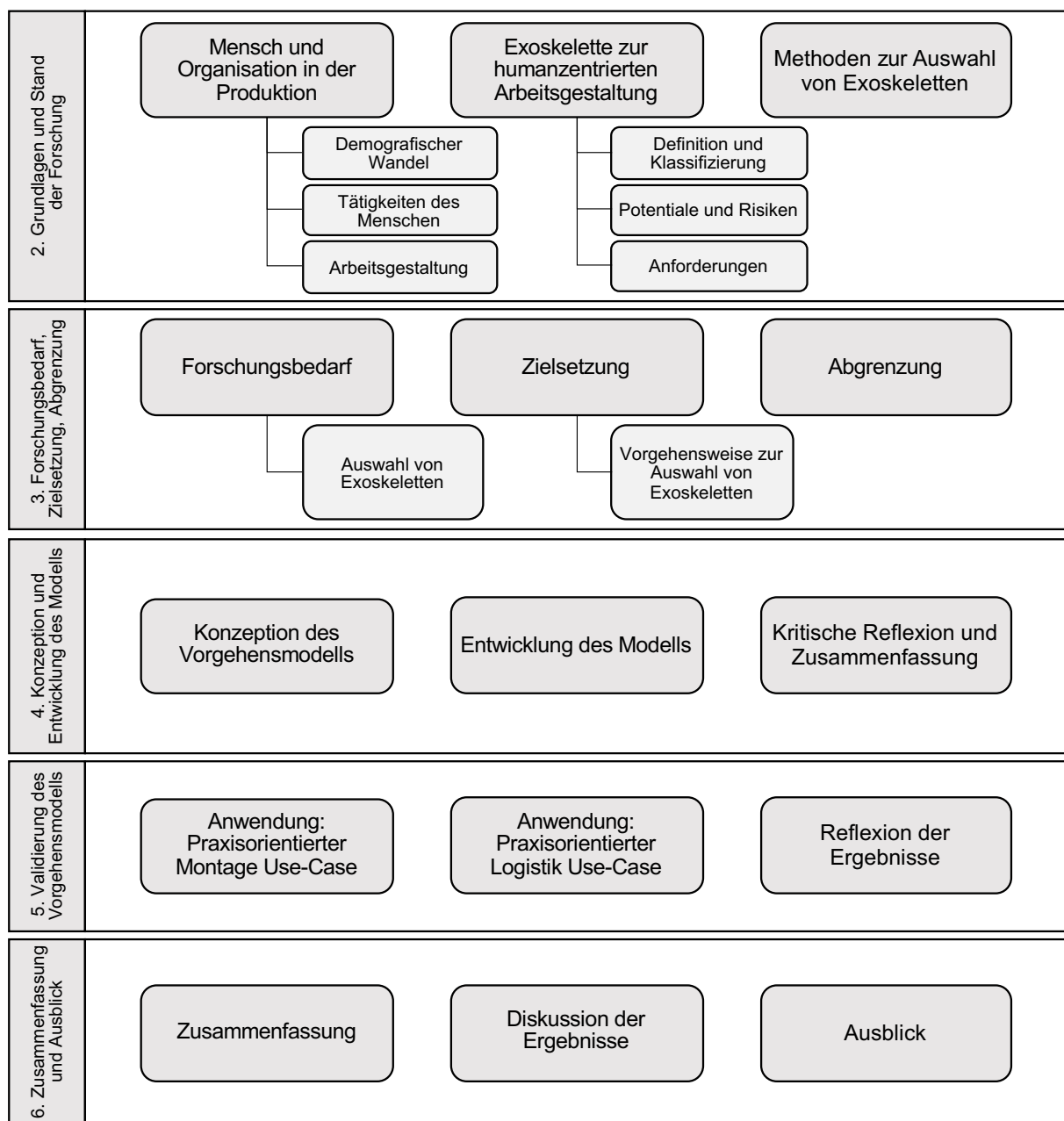


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Das folgende Kapitel hat als Ziel, die theoretischen Grundlagen, auf welche diese Arbeit aufbaut, zu beschreiben, Anforderungen an das Vorgehensmodell zu identifizieren und bestehende Methoden zur Auswahl von Exoskeletten für Produktion und Logistik vorzustellen.

Kapitel 2.1 beschäftigt sich mit allgemeinen Herausforderungen, vor denen die produzierende Industrie derzeit steht. Es werden der demografische Wandel und seine Auswirkungen, die humanzentrierte Arbeitsgestaltung sowie ihre aktuellen Trends erörtert. Im Anschluss folgte eine Darstellung des aktuellen Standes der Technik von industriell einsetzbaren Assistenzsystemen. Im zweiten Teil werden die theoretischen Grundlagen von Exoskeletten im industriellen Kontext präsentiert. Auf die Definition und Klassifizierung von Exoskeletten folgen die Anforderungen an Exoskelette sowie Potentiale, Risiken und aktuelle Normen und Richtlinien. Das dritte Unterkapitel widmet sich den Anforderungen, welche an die Auswahl von Exoskeletten gestellt werden und einer durchgeführten Meta- und Desktoprecherche zu aktuellen Auswahlmethoden. Es werden bereits existierende Ansätze bzw. Vorgehensweisen vorgestellt und deren Stärken und Schwächen und Herausforderungen in diesem Zusammenhang erläutert. Zum Abschluss folgen eine Zusammenfassung des Kapitels und das Fazit.

2.1 Mensch und Organisation in der Produktion

Die Zukunft der Arbeit bringt einige Herausforderungen für Unternehmen aller Branchen aber insbesondere der industriellen Produktion mit sich. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen des demografischen Wandels, die Erkrankungen am Arbeitsplatz und die wichtigsten manuellen Arbeitstätigkeiten erläutert. Außerdem folgt ein allgemeiner Überblick über die Arbeitsgestaltung sowie den Einsatz von Assistenzsystemen in Produktion und Logistik.

2.1.1 Demografischer Wandel und Gesundheitsentwicklung

Anhand der aktuellen demografischen Untersuchungen in Österreich ist eindeutig ein stetiges Altern der Durchschnittsbevölkerung erkennbar. Diese Veränderung der Zusammensetzung der österreichischen Bevölkerung lässt sich auf zwei Ursachen zurückführen. Einerseits schrumpft aufgrund des Geburtenrückganges die junge Bevölkerung in Relation zur Gesamtbevölkerung und andererseits steigt aufgrund der immer höher werdenden Lebenserwartung der Anteil der älteren Bevölkerung (BMSGPK, 2019).

Eine Prognose der Bevölkerungsentwicklung in Österreich liefert Statistik Austria. Die Relationen der Altersgruppen entwickeln sich demnach wie in Tabelle 1 abgebildet.

Jahr	Bevölkerung in Österreich		
	Insgesamt	Unter 65 Jahre	65 und mehr Jahre
2011	8.420.900	6.934.459	1.486.441
2020	8.713.178	6.994.222	1.718.956
2060	9.378.251	6.671.080	2.707.171

Tabelle 1: Bevölkerungsentwicklung Österreichs (Statistik Austria, 2012)

Bei einer steigenden Gesamtbevölkerung in Österreich von knapp unter 8,5 Millionen Einwohnern im Jahr 2011 auf knapp unter 9,5 Millionen Einwohnern im Jahr 2060 sinkt der Anteil der unter 65-Jährigen in absoluten Zahlen. Die Anzahl der Bevölkerung mit 65 oder mehr Jahren verdoppelt sich hingegen beinahe im selben Zeitraum und das Durchschnittsalter steigt von 41,8 auf 47,1 Jahre.

Folgende Abbildung 3 zeigt die Bevölkerungspyramide der österreichischen Bevölkerung für die Jahre 2018, 2030 und 2060.

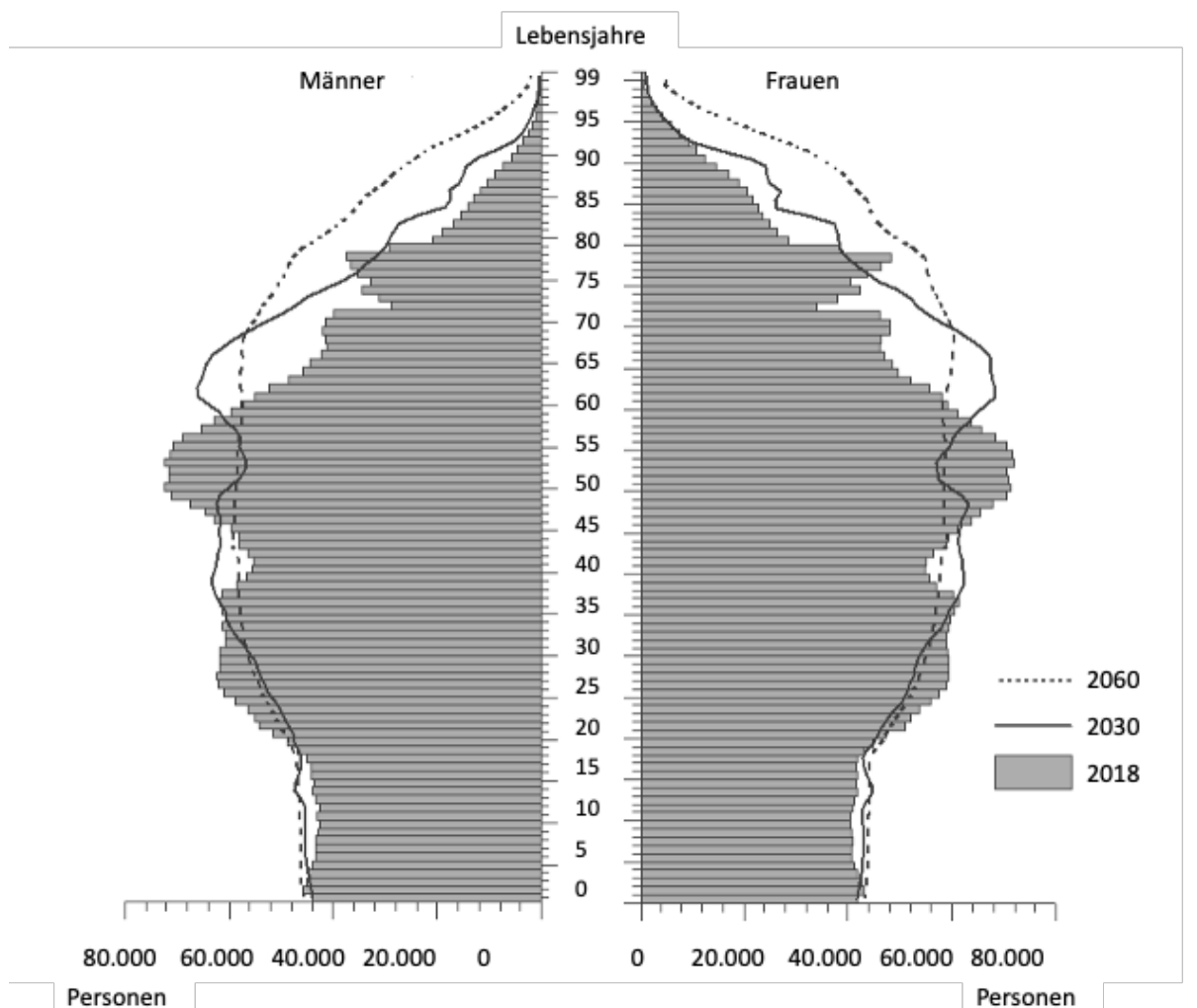


Abbildung 3: Bevölkerungspyramide 2018, 2030, 2060 (Statistik Austria, 2019a)

Das Altern der Durchschnittsbevölkerung spiegelt sich auch in der erwerbstätigen Bevölkerung wider. Die Personengruppe des zentralen Erwerbsalters (30 bis 54 Jahre) nimmt künftig nicht mehr zu, sondern es werden sogar leichte Rückgänge erwartet. Der Anteil an älteren Arbeitskräften steigt jedoch deutlich mit +33% im Jahr 2025 im Vergleich zum Jahr 2011. Gleichzeitig reduziert sich der Anteil der jungen Erwachsenen (18 bis 29 Jahre) bis 2030 auf 1,17 Millionen und liegt somit um 10% niedriger als 2011 (1,29 Mio.) (Statistik Austria, 2012).

Der prozentuelle Anteil aller Arbeitnehmer im Alter von 30 bis 44 Jahren in Österreich im Jahr 2011 lag bei 38,9%. Dieser Anteil sinkt bis 2050 auf 35,4% während sich der Anteil der erwerbstätigen Personen über 45 Jahren von 36,1% in 2011 auf 41,8% im Jahr 2050 erhöht (Statistik Austria, 2019b). Diese Entwicklung wird in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

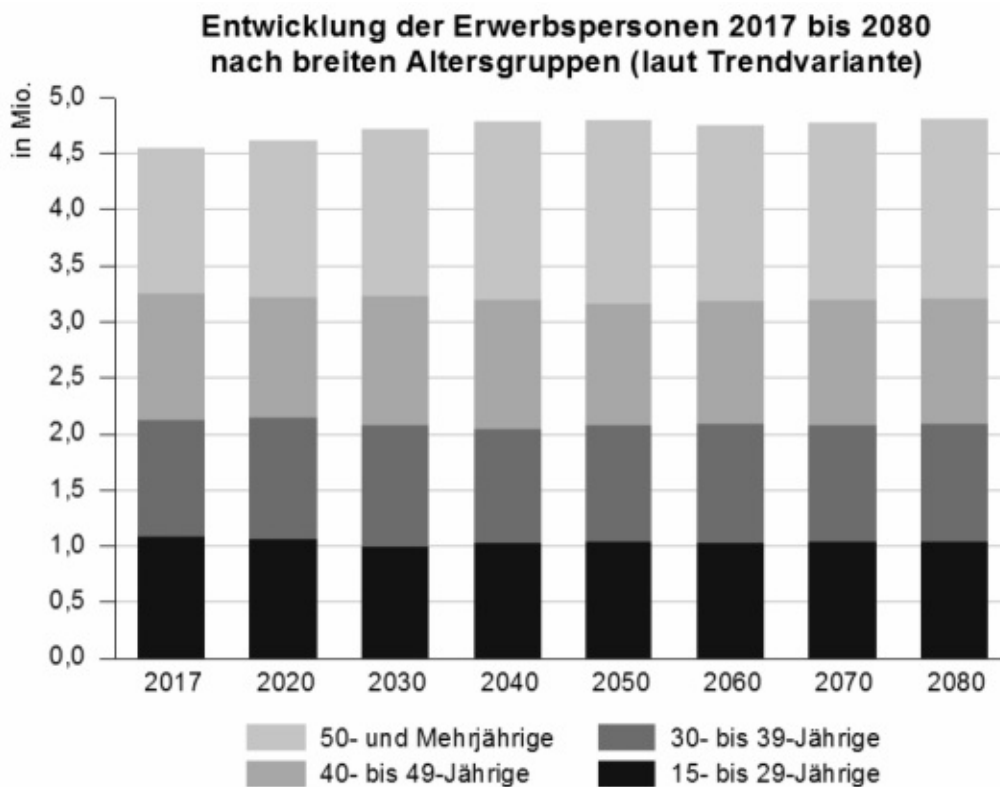


Abbildung 4: Erwerbsprognose Österreich 2018

Es lässt sich festhalten, dass die österreichische Industrie aufgrund des demografischen Wandels mit einem stetig höher werdenden Durchschnittsalter ihrer Mitarbeiter konfrontiert ist. Den in das Berufsleben einsteigenden Erwerbspersonen steht eine immer größer werdende ältere Belegschaft gegenüber. Dadurch ergeben sich zwei Herausforderungen auf Unternehmensebene. Einerseits wird es zunehmend schwieriger, geeignete Fachkräfte zu finden und langfristig zu binden und andererseits sinkt mit Zunahme des Alters die Produktivität der Mitarbeiter (Hellerstein and Neumark, 2004) und es steigt das Risiko eines gesundheitsbedingten, frühzeitigen Ausscheidens aus dem Erwerbsleben (DZA, 2009).

Mit zunehmendem Alter nimmt die Anzahl an Gesundheitsproblemen deutlich zu. Eine Analyse des Mikrozensus des statistischen Bundesamts in Deutschland im Jahr 2005 zeigt einen Anstieg des Anteils an Erkrankten und Unfallverletzten in den letzten vier Wochen vor der Befragung von 10% in der Altersgruppe der 40-44 Jährigen und auf 15% in der Altersgruppe der 50-54 Jährigen. In der Altersgruppe der bereits länger aus dem Erwerbsleben ausgeschiedenen Personen (75+) beträgt der Anteil mehr als 25%.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf des Anteils an Erkrankten und Unfallverletzten nach Geschlecht in Prozent pro Altersgruppe (DZA, 2009, S. 32).

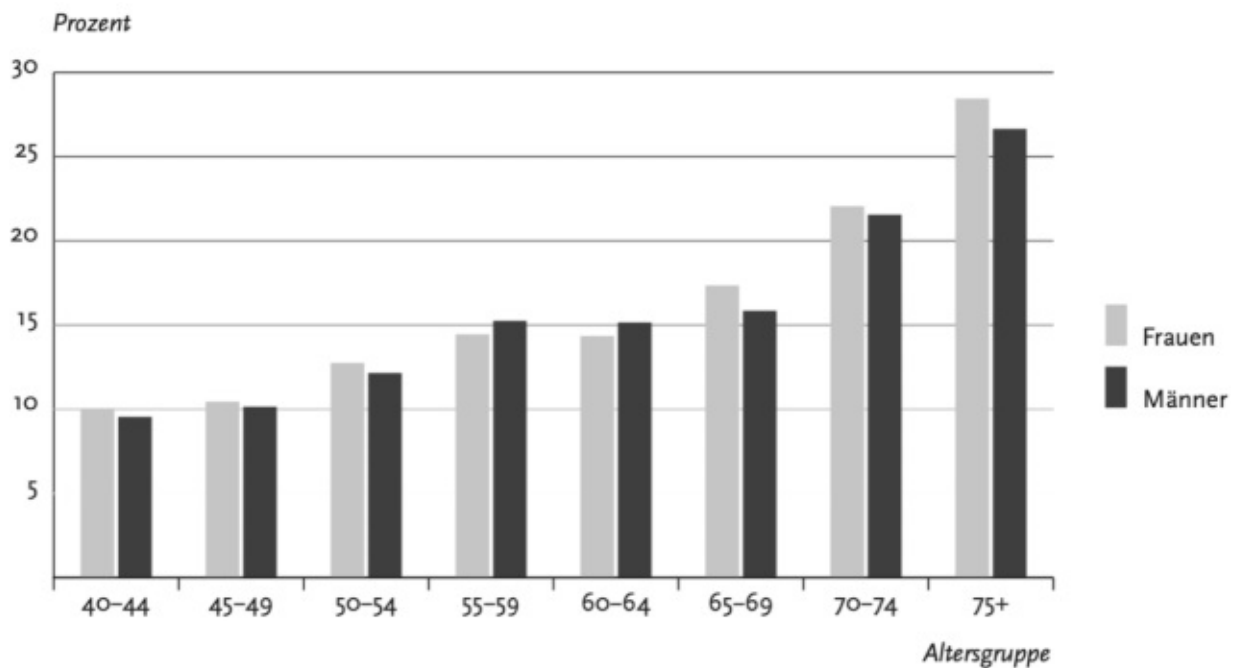


Abbildung 5: Erkrankte/Unfallverletzte nach Alter und Geschlecht 2005 (DZA, 2009, S. 32)

Einer Erhebung des Statistischen Bundesamts zufolge litten in Deutschland im Jahr 2013 insgesamt 8,3% der Erwerbstätigen an arbeitsbedingten Gesundheitsproblemen. Während lediglich 3% der Erwerbstätigen in der jüngsten Altersgruppe (15 bis 24 Jahre) von arbeitsbedingten Gesundheitsproblemen betroffen sind, liegt der Anteil in der ältesten Altersgruppe (55 bis 64 Jahre) bei über 11% (Liersch, 2014, S. 566).

<i>Nach Altersgruppen</i>			
<i>Insgesamt</i>	8,3 %	<i>15 bis 24 Jahre</i>	3,0 %
<i>Männer</i>	7,8 %	<i>25 bis 34 Jahre</i>	6,5 %
<i>Frauen</i>	8,9 %	<i>35 bis 44 Jahre</i>	8,3 %
		<i>45 bis 54 Jahre</i>	10,1 %
		<i>55 bis 64 Jahre</i>	11,6 %

Tabelle 2: Arbeitsbedingte Gesundheitsprobleme in Deutschland 2013 (Liersch, 2014, S. 566)

Der Anteil der in Österreich beschäftigten Erwerbstätigen, welche an zumindest einem arbeitsbezogenen Gesundheitsproblem leiden, lag 2013 mit 15,6% noch deutlich höher als in Deutschland. Männer (16,2%) sind hier öfter betroffen als Frauen (14,9%).

Schmerzen im Bereich des Rückens stellen mit Abstand das größte Gesundheitsproblem dar. Fast ein Drittel der befragten Personen (32,2% bzw. 329.100 Personen) gab an, im Jahr vor der Befragung arbeitsbedingte Rückenprobleme gehabt zu haben, 19,0% (193.600 Personen) berichteten über Probleme mit dem Nacken, den Schultern, den Armen oder Händen und 16,3% (166.300 Personen) über Probleme mit den Hüften, Beinen oder Füßen. Während Männer häufiger über Rückenprobleme (33,7% zu 30,6% der Frauen) oder Hüft- und Fußprobleme (18,1% zu 14,3% der Frauen) klagten, gaben Frauen deutlich häufiger Probleme mit dem Nacken, den Schultern, den Armen oder Händen an (23,4% zu 14,9% der Männer). Unter den befragten Erwerbstätigen waren mit 26,8% Land- und Forstwirte am häufigsten von arbeitsbedingten Gesundheitsproblemen betroffen, mit 19,5% folgt die Baubranche und mit 18,5% das Gesundheits- und Sozialwesen. Der Wirtschaftszweig Warenherstellung befindet sich mit 14,7% auf dem neunten Platz, gereiht nach den Wirtschaftszweigen Dienstleistungen (17,8%), Beherbergung und Gastronomie (16,7%), Verkehr und Lagerei (16,3%), Öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung (15,7%), Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden (14,7%) (Statistik Austria, 2014).

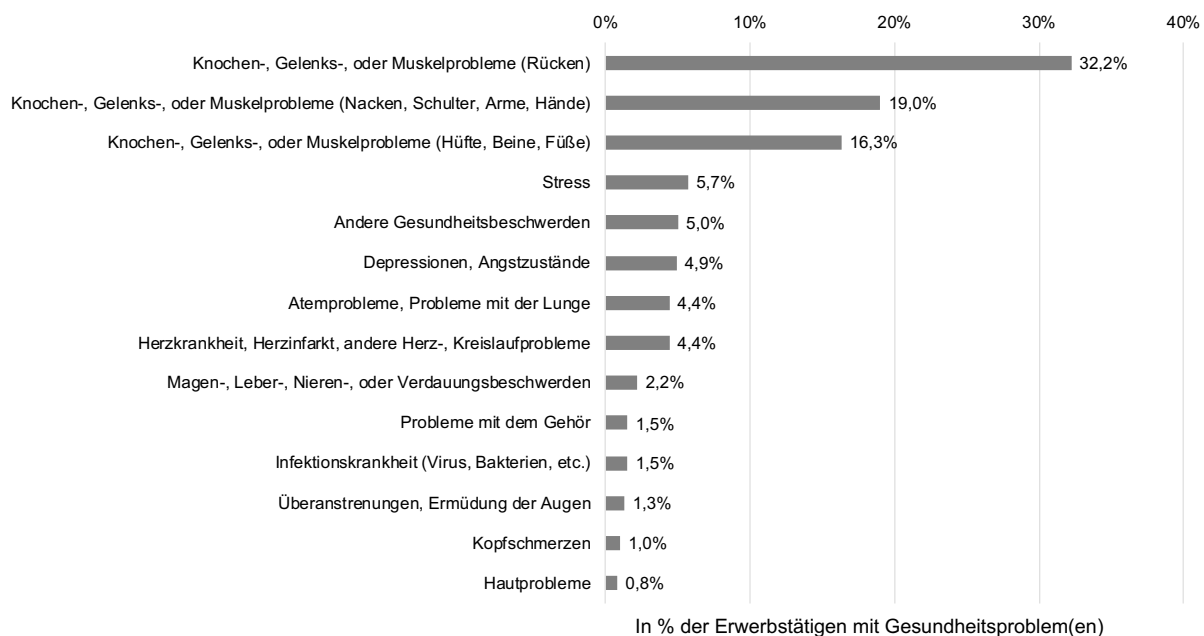


Abbildung 6: Arbeitsbedingte Gesundheitsprobleme (Statistik Austria, 2014)

Arbeitsbedingte Gesundheitsbeeinträchtigungen führen in vielen Fällen zu krankheitsbedingten Arbeitsausfällen der Arbeitnehmer. Über alle Altersgruppen hinweg lassen sich etwa 21,4% aller Krankenstandstage und 15,8% aller Krankenstände auf Erkrankungen des Muskel-Skeletts zurückführen (AUVA, 2019).

Darunter werden Erkrankungen des sogenannten Stütz- und Bewegungssystems sowie der Muskeln, Gelenke, Sehnen und Bänder verstanden. Zu den arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen zählen unter anderem (DGUV, 2019):

- Bandscheibenbedingte Wirbelsäulenerkrankungen
- Gonarthrose
- Carpaltunnel-Syndrom
- Hypothenar-Thenar-Hammer Syndrom

Nach Schätzungen des österreichischen Bundesministeriums für soziale Sicherheit, Generationen und Konsumentenschutz und der Statistik Austria betragen 2015 volks- und betriebswirtschaftliche Kosten im Zusammenhang mit Unfällen und Krankheiten unselbstständiger Beschäftigter rund 9,1 Mrd. Euro, wobei rund 3,5 Mrd. Euro direkte Kosten (direkte Zahlungen) und rund 5,6 Mrd. Euro indirekte Kosten (Wertschöpfungsverluste, u.a. aufgrund geringerer Produktivität) darstellen (WIFO, 2018).

Abgesehen davon, dass Gesundheitsprobleme und insbesondere das sich daraus möglicherweise ergebende frühzeitige Ausscheiden aus der Erwerbstätigkeit zu persönlichem Leid der betroffenen Person führt, entsteht außerdem aufgrund der Krankenstände ein großer betriebswirtschaftlicher Schaden. Es ist somit im Sinn der Unternehmen, Maßnahmen zur Reduzierung von arbeitsbedingten Erkrankungen zu finden und einzusetzen.

2.1.2 Tätigkeiten des Menschen in der Produktion

Während seiner betrieblichen Arbeitszeit führt der Mensch unterschiedliche Arbeitstätigkeiten aus. Um die Komplexität zu reduzieren und die Vielfalt zu ordnen werden verschiedene Typen gebildet. Arbeitsformen werden nach dem Prinzip eines aussagefähigen minimalen Satzes von Beurteilungsgrößen zusammengefasst. Die wohl geläufigste Gliederung von Arbeitsformen ist die Unterscheidung von geistiger und körperlicher Arbeit, wobei üblicherweise das Überwiegen einer der beiden Aspekte gemeint ist, da in realen Arbeitstätigkeiten keine reinen geistigen oder körperlichen Arbeiten vorkommen (Schlick et al., 2018, S. 142).

Rohmert teilt Arbeitstätigkeiten in die zwei Typen energetische Arbeit und informatorische Arbeit ein (Rohmert, 1983). Diese beiden Arbeitstypen lassen sich weiter hinsichtlich ihrer Art unterscheiden. Die folgende Tabelle 3 zeigt die fünf Mischformen von idealtypischen Arbeitsformen die sich nach dem Prinzip des aussagefähigen minimalen Satzes von Beurteilungsgrößen bilden lassen.

Typ der Arbeit	Energetische Arbeit				
				Informatorische Arbeit	
Art der Arbeit	Mechanisch	Motorisch	Reaktiv	Kombinativ	Kreativ
Was verlangt die Erledigung der Aufgabe primär vom Menschen?	Kräfte abgeben	Bewegungen ausführen	Reagieren und Handeln	Informationen kombinieren	Wissen erzeugen
Welche Organe oder Funktionen werden beansprucht?	Mechanische Arbeit im Sinne der Physik	Genauere Bewegungen bei geringer, geregelter Kraftabgabe	Information aufnehmen und darauf reagieren	Informationsmit Gedächtnisinhalten verknüpfen	Transformation von Informationsinhalten zu neuen, erklärenden Informationen
Beispiele	Muskeln, Sehnen, Skelett, Atmung	Sinnesorgane, Muskeln, Sehnen, Kreislauf	Sinnesorgane, Reaktions- und Merkfähigkeit sowie Muskeln	Denk- und Merkfähigkeit sowie Muskeln	Denk-, Merksowie Schlussfolgerungsfähigkeit
	Tragen	Montieren	Auto fahren	Konstruieren	Erfinden

Tabelle 3: Verschiedene Arbeitsformen (Schlick et al., 2018, S. 142)

Das Erzeugen von Bewegungen und Kräften durch Inanspruchnahme der Skelettmuskulatur wird als energetischer Anteil von Arbeitstätigkeiten bezeichnet. Diese Arbeitsmöglichkeit eines Muskels lässt sich nach zwei Grundformen unterscheiden (Schlick et al., 2018, S. 142):

- Statische Muskelarbeit:
Bei einer einwirkenden Kraft wird das Gleichgewicht gehalten. Es findet keine Bewegung statt, somit liegt im physikalischen Sinn keine Arbeit vor.
- Dynamische Muskelarbeit:
Einzelne Muskeln spannen und entspannen sich abwechselnd. Physikalische Arbeit wird geleistet.

Insbesondere die statische Muskelarbeit ist aus physiologischer Sicht problematisch. Dauerkontraktionen führen zu verringerter Durchblutung des Muskels und somit zu verringerter Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen. Abwechselndes Spannen und Entspannen eines Muskels bei dynamischer Arbeit fördert bei günstigen zeitlichen Verhältnis sogar die Durchblutung (Rohmert, 1983).

2.1.3 Humanzentrierte Arbeitsgestaltung

42,5 Stunden leisten vollbeschäftigte Österreicher durchschnittlich pro Woche (Eurostat, 2018). Allein dieser Zeitaufwand macht die Arbeitswelt zu einem der zentralsten Bereiche des menschlichen Lebens und hat einen erheblichen Einfluss auf die Lebensweise der Menschen. Die am Arbeitsplatz herrschenden Arbeitsbedingungen schaffen somit eine wichtige Grundlage nicht nur für das psychische Wohlbefinden, sondern auch für die körperliche Gesundheit des Einzelnen. Belastungen am Arbeitsplatz können sich jedoch negativ auf den Arbeitnehmer auswirken. Die Folgen reichen von der Entstehung psychischer Probleme bis hin zu körperlichen Erkrankungen. Ein von der Statistik Austria im Jahr 2013 durchgeführter Mikrozensus der Beschäftigten ergab, dass rund 80% aller Erwerbstätigen am Arbeitsplatz einem Gesundheitsrisiko ausgesetzt sind (Statistik Austria, 2014). So gaben etwa sieben von zehn Erwerbstätigen an, körperlichen Risiken und vier von zehn Erwerbstätigen, psychischen Risiken am Arbeitsplatz ausgesetzt zu sein. Die häufigsten körperlichen Erkrankungsrisiken sind hierbei Überanstrengung der Augen, ergonomische Risiken und Unfallgefahren. Unter diesen Aspekten wird der Gestaltung der Arbeitsplätze beziehungsweise der Arbeit im Allgemeinen hohe Bedeutung zugemessen.

Grundlegend werden unter dem Begriff Arbeitsgestaltung bewusste Maßnahmen zur Festlegung bzw. Veränderung der menschlichen Arbeit verstanden, auch wenn sie nicht primär auf sie bezogen sind. Die Maßnahmen können hierbei technischer, organisatorischer oder ergonomischer Natur sein und auch die Funktionen des Personalbereichs bzw. der Personalwirtschaft umfassen (Kubitscheck et al., 2013, S. 3). Eine Unterscheidung erfolgt zwischen Maßnahmen, welche auf mitarbeiterbezogene Interessen abzielen und jene, welche unternehmensbezogene Ziele verfolgen. Die Ziele der Arbeitsgestaltung sind Humanität und Wirtschaftlichkeit. So stehen neben den unternehmensbezogenen Zielen wie z.B. Produktivitätssteigerung auch die Erhaltung der Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Beschäftigten sowie deren Persönlichkeits- und Kompetenzentwicklung im Vordergrund. Aus diesem Grund sollen Arbeitstätigkeiten keine einseitigen Belastungen und Beanspruchungen aufweisen, unterschiedliche Anforderungen stellen und lernförderlich gestaltet sein (Nerdinger et al., 2014, S. 372). Die folgende Tabelle gibt eine kurze Erklärung der Humankriterien der Arbeitsgestaltung (Kauffeld, 2019, S. 273).

<i>Bewertungsebene</i>	<i>Zentrale Frage</i>	<i>Mögliche Kriterien</i>
<i>Ausführbarkeit</i>	Sind die Voraussetzungen für ein zuverlässiges, forderungsrechtes, langfristiges Ausführen gegeben?	Anthropometrische Normen Sinnesphysiologische Normwerte Klare Anweisungen Geeignete Arbeitsmittel
<i>Schädigungslosigkeit</i>	Sind körperliche und psychische Gesundheitsschäden ausgeschlossen?	Vermeidung von Gasen, Lärm, Strahlung, Unfälle
<i>Beeinträchtigungsfreiheit</i>	Sind geringe und kurzfristige Fehlbeanspruchungen ohne Auswirkungen auf die Gesundheit?	Negative Veränderungen psycho-physiologischer Kennwerte Beeinträchtigungen des Befindens
<i>Persönlichkeitsförderlichkeit</i>	Wird die Persönlichkeitsentwicklung gefördert?	Zeitanteil für selbstständige oder schöpferische Verrichtungen Erforderliche Lernaktivitäten

Tabelle 4: Humankriterien der Arbeitsgestaltung (Kauffeld, 2019, S. 273)

Nerdinger et al. definieren sechs Bereiche, welche zum Gegenstand der Arbeitsgestaltung zählen. Diese sind die Gestaltung der Arbeitsumgebung, der Arbeitsmittel, des Arbeitsplatzes, der Arbeitshinhalte, der Arbeitszeit und des Arbeitsablaufes bzw. der Arbeitsorganisation (Nerdinger et al., 2014, S. 372).

Arbeitsumgebung: Die Arbeitsumgebung soll so gestaltet sein, dass Gesundheitsrisiken, Unfälle, Belästigungen und Störungen reduziert werden. Außerdem soll sie die Arbeit und Produktivität fördern und einen optimalen Wert für Komfort und Wohlbefinden erreichen (Kubitscheck et al., 2013).

Arbeitsmittel: Arbeitsmittel müssen im Hinblick auf Ergonomie und Sicherheit gestaltet werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Auswirkungen des Arbeitsgegenstands, der Technologie, der Technisierung (z.B. Automatisierung) und der technischen Rationalisierung zu legen (Kubitscheck et al., 2013).

Arbeitsplatz: Der Arbeitsplatz ist so zu gestalten, dass die Anforderungen an Körperhaltung und -position bei der Ausführung der Arbeit berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass die Aspekte der Ergonomie des Arbeitsplatzes berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus finden bei der Planung des Arbeitsplatzes die unterschiedlichen Abmessungen des Aufbaus und der erforderlichen Arbeitsmittel Beachtung (Kubitscheck et al., 2013).

Arbeitsinhalt: Gestaltungsmaßnahmen werden als nützlich für Gesundheit und Persönlichkeit angesehen, wenn sie auf die Erfüllung vollständiger Arbeitsaufgaben abzielen.

Arbeitszeit: Die Regelung der Arbeitszeiten ist ein wichtiges und komplexes Thema in Arbeitsorganisationen. Neben dem klassischen Arbeitszeitmodell erfreuen sich flexible Arbeitszeitmodelle seit einigen Jahren zunehmender Beliebtheit (Nerdinger et al., 2014).

Arbeitsablauf bzw. Arbeitsorganisation: Um die Gestaltung und Organisation von Arbeitsabläufen zu verbessern, werden Maßnahmen ergriffen, die beispielsweise unnötige Wegzeiten in der Produktion vermeiden oder einen optimalen Zugang zu Arbeitsmaterialien gewährleisten (Nerdinger et al., 2014).

Eberhard Ulich beschreibt fünf Herangehensweisen zur Gestaltung von Arbeit, die korrektive, präventive, prospektive, differenzielle und dynamische Arbeitsgestaltung (Ulich, 2011). Nerdinger et al. fügen weiters noch die flexible Arbeitsgestaltung (Nerdinger et al., 2014, S. 380) hinzu. Diese sechs Strategien werden in Tabelle 5 erklärt:

<i>Strategie der Arbeitsgestaltung</i>	<i>Zweck</i>
<i>Korrektiv</i>	Korrektur erkannter Mängel
<i>Präventiv</i>	Vorwegnehmende Vermeidung gesundheitlicher Schädigungen und psychosozialer Beeinträchtigung
<i>Prospektiv</i>	Schaffen von Möglichkeiten der Persönlichkeitsentwicklung
<i>Flexibel</i>	Einbeziehen interindividueller Differenzen bei der Bewältigung von Arbeit und Unterstützung persönlichkeitsförderlicher Aufgabengestaltung
<i>Differenziell</i>	Förderung des gleichzeitigen Angebotes von verschiedenen Arbeitsstrukturen, zwischen denen Beschäftigte wählen können
<i>Dynamisch</i>	Möglichkeit der Erweiterung bestehender bzw. Schaffung neuer Arbeitsstrukturen, durch welche die Lernfortschritte und Prozesse der Persönlichkeitsentwicklung Rechnung tragen

Tabelle 5: Arten der Arbeitsgestaltung (Kauffeld, 2019, S. 274; Nerdinger et al., 2014, S. 381; Ulich, 2011, S. 190)

Aufgrund der zunehmenden Verbreitung neuer Technologien im Bereich der Arbeitsgestaltung wird sich die Arbeitswelt stark verändern. Neue Technologien auf Organisationsebene ermöglichen beispielsweise die Entwicklung alternativer Arbeitsformen, wie mobiles Arbeiten und die Umwandlung von Arbeitsstrukturen in Wertschöpfungsnetzwerke. Assistenzsysteme und Arbeitsteilung mit Maschinen unterstützen den Menschen bei beruflichen Tätigkeiten. Damit eröffnen sich zwischen

den drei Dimensionen Mensch, Technik und Organisation völlig neue Möglichkeiten der Arbeitsgestaltung.

Der Mensch ist bei der Realisierung von Produktivität in Unternehmen das zentrale Stellglied neben Technik und Organisation. Eine Verdeutlichung dieses Zusammenhangs beschreibt Ulich in seinem 1997 erschienenen, sogenannten Mensch-Technik-Organisations-Konzept (kurz MTO-Konzept) (Ulich, 2011). Das MTO-Konzept, wie in Abbildung 5 dargestellt, basiert auf dem Prinzip, dass Menschen, Technologien und Organisationen voneinander abhängig sind und widerspiegelt die Interaktion zwischen ihnen. Die Arbeitsaufgabe spielt in diesem Prozess eine zentrale Rolle. Sie verknüpft das soziale mit dem technischen Teilsystem und verbindet den Menschen mit den organisationalen Strukturen. Das MTO-Konzept stellt den zentralen Bezugsrahmen zur Gestaltung von Arbeitssystemen dar.

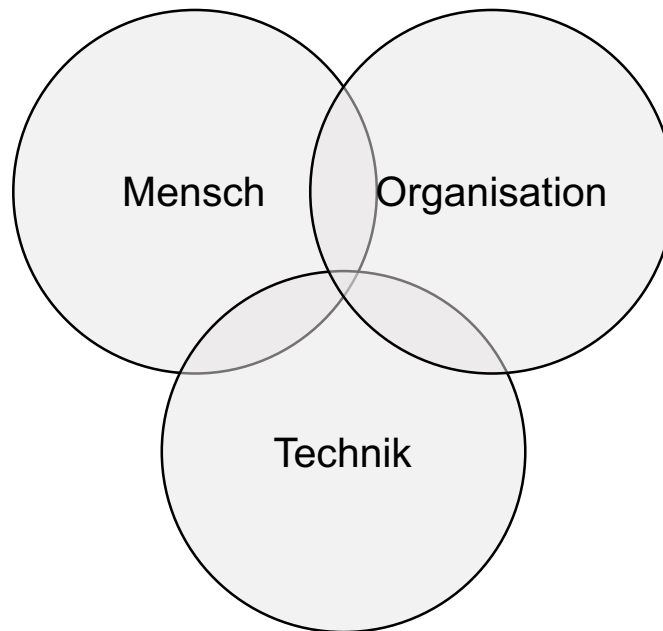


Abbildung 7: Mensch, Technik, Organisation (Ulich, 2011)

Das MTO-Konzept macht deutlich, dass die Gestaltung eines funktionierenden Arbeitssystems in einem Produktionsunternehmen nur dann zum gewünschten Erfolg führt, wenn die menschlichen, technischen und organisatorischen Aspekte in einem ausgeglichenen Verhältnis stehen. Folgende Zusammenhänge lassen sich unterscheiden:

- Mensch und Technik: Dieser Zusammenhang betrifft die Interaktion bzw. die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine.
- Mensch und Organisation: Dieses Zusammenwirken ist an die Rolle des Individuums im kollektiven Arbeitssystem adressiert.
- Technik und Organisation: Diese Schnittmenge hängt mit dem sozialen und technischen System zusammen. Es geht um die Organisation von Menschen (Arbeitern) und der mit ihnen verbundenen Technologie in einem Montagesystem, das auf eine bestimmte Art und Weise strukturiert ist, um ein bestimmtes Ergebnis zu erzielen.

Durch die hohe Dynamik des internationalen Marktes sowie dem Trend von der Massenproduktion hin zur kundenorientierten Produktion (Stichwort Mass Customization und Personalization) werden produzierende Unternehmen vor neue Herausforderungen gestellt (Hu, 2013). Um eine nachhaltige Produktion in dieser zunehmend globalisierten Industrie aufrechtzuerhalten, sind die derzeitigen Praktiken für die Gestaltung von Produktionsprozessen möglicherweise nicht für die zukünftigen Bedürfnisse, denen die Industrie gegenübersteht, anwendbar. Rasche Änderungen von Anforderungen und Bedürfnissen lösen häufig Änderungen in verschiedenen Fertigungsbereichen aus. Dies erfordert ein hohes Maß an Flexibilität und eine dynamischere Entscheidungsfindung zu einem späteren Zeitpunkt in der Produktionskette (Chryssolouris, 2006). Flexibilität und Veränderbarkeit sind die wichtigsten Voraussetzungen, um den Herausforderungen eines globalen Marktes zu begegnen (Wiendahl et al., 2007). Eine zunehmende Kundenorientierung führt zu einer deutlichen Zunahme der Anzahl an Varianten, was wiederum zu einer steigenden Komplexität von Produkten, Produktionsprozessen und Systemen führt (EIMaraghy and EIMaraghy, 2014). Hier ist die Montage eine der wirtschaftlichsten Möglichkeiten, eine große Anzahl von Varianten zu erzeugen (Hu et al., 2011).

Das Konzept der Mixed-Model Montage findet zum Beispiel zunehmend Anwendung. Kapazitätsauslastend, flexibel und wandlungsfähig können eine Vielzahl ähnlicher, aus einer Produktfamilie stammenden Produkte, aber auch Produkte unterschiedlicher Produktfamilien montiert werden. Dieses Konzept führt jedoch zu einer komplexeren Koordination von Informations- und Materialflüssen. In vielen Fällen ist diese Form der Montage mit einem hohen Anteil an Montagearbeit verbunden. Ihre Automatisierung ist nicht wirtschaftlich und wird deshalb von Menschen durchgeführt (Fath-Berglund and Stahre, 2013).

Der Mensch bleibt somit aufgrund seines hohen Maßes an Flexibilität und Intelligenz ein unverzichtbarer Bestandteil der Produktion der Zukunft. Im Zuge der Veränderungen unter dem Deckmantel Industrie 4.0 wachsen Mensch und Technik noch enger zusammen und auch die Forschung an Möglichkeiten von Mensch-Roboter-Kollaborationen schreitet rasch voran. In der Gestalt der zukünftigen Technologie lassen sich zwei Ansätze erkennen: Sollen menschliche Fähigkeiten ersetzt oder unterstützt und verstärkt werden? Anhand des Mixed Model Montage Beispiels sieht man die hohen Anforderungen nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit und daraus resultierende Risiken wie kognitive, psychische aber auch physische Belastungen, welchen Mitarbeiter zukünftig gegenüberstehen. Insbesondere jene physischen Risiken, welche durch Tätigkeiten in ermüdenden oder unergonomischen Positionen und sich wiederholende Hand- und Armbewegungen hervorgerufen werden, haben in den letzten 20 Jahren zugenommen und werden voraussichtlich auch weiterhin steigen (Parent-Thirion et al., 2012).

Seit bereits vielen Jahren wird die Technik so entwickelt, dass sie den Menschen in seinen Arbeitstätigkeiten unterstützen kann. Einerseits wird damit die körperliche Last

auf den menschlichen Körper verringert, andererseits erhofft man sich durch die Unterstützung eine Steigerung der Produktivität. Im industriellen Bereich lässt sich mittlerweile eine enge Verknüpfung von Mensch und Maschine feststellen. Mit der Zuhilfenahme von Werkzeugen, beginnend beim Schraubenzieher bis hin zu Drehmaschinen oder dem Einsatz von vollautomatisierten Systemen wie Industrieroboter, Mensch-Roboter-Kollaborationen und der Hybridisierung von biomechanischen und technischen Elementen in einem System wachsen Mensch und Technik schrittweise zusammen (Weidner et al., 2015).

Der Begriff Assistenzsystem umfasst alle Technologien, die den Mitarbeitern bei der Ausführung ihrer Arbeit assistieren und es ihnen ermöglichen, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren (Bischoff et al., 2015, S. 90) wobei grundsätzlich zwischen zwei Arten von technischen Hilfssystemen unterschieden wird:

- Technische Systeme, welche Personen substituieren und dadurch zu einer Entlastung führen, indem die Technik die Arbeit für die Person ausführt, und
- Technische Systeme, die die Menschen bei der Ausführung ihrer Aufgaben unterstützen aber nicht ersetzen, wodurch die Menschen die Hoheit bei der Ausführung der Tätigkeiten behalten.

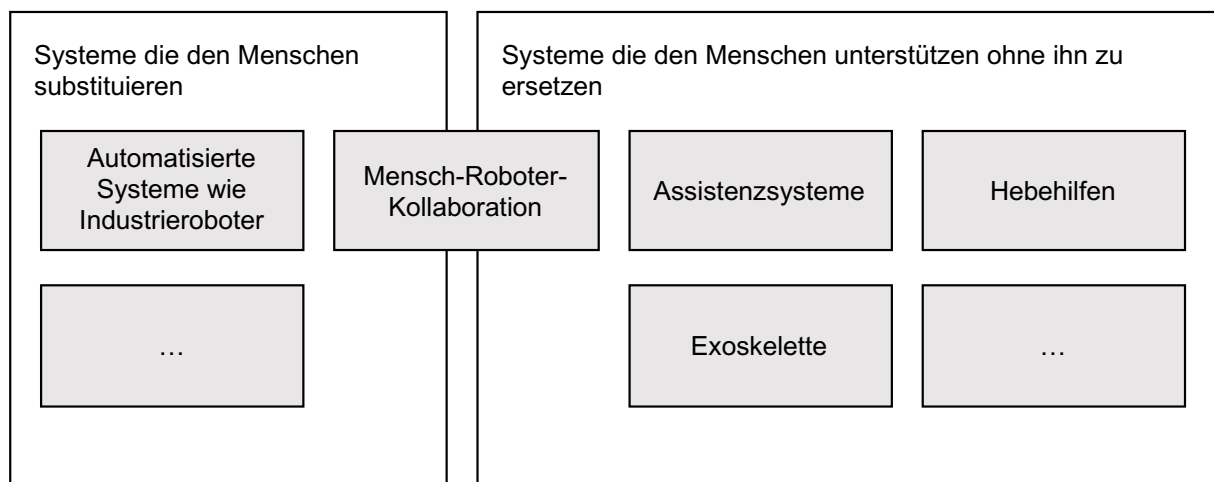


Abbildung 8: Unterstützungssysteme in Produktion und Logistik (Weidner et al., 2015, S. 14)

Für die Definition des Assistenzsystems gelten außerdem folgende Kriterien (Weidner et al., 2015, S. 13):

- Der Mensch wird bei seiner Tätigkeit unterstützt und nicht ganz oder teilweise substituiert.
- Es handelt sich bei dem Menschen um den Systembediener und er behält die Hoheit über die Ausführung der Tätigkeiten.
- Vom System geht keine Gefahr für den Bediener und für Dritte aus.

Die Bandbreite von Auswahlmöglichkeiten an Assistenzsystemen für die Produktion ist groß. Sie beginnt mit der Unterscheidung zwischen digitalen (Hold et al., 2017) und technischen (Ranz et al., 2018) Assistenzsystemen und reicht vom Einsatz intelligenter Informationssysteme mit Darstellungsformen, wie Augmented Reality, bis hin zu

intelligenten Mensch-Roboter-Interaktionen in Fertigung, Montage und Logistik. Die Art des Assistenzsystems variiert dabei je nach Anforderungsniveau der Arbeitsaufgaben, welche grundlegend wie folgt eingeteilt werden (BMAS, 2018):

- **Niedrig:** Systeme geben entweder reine Handlungsanweisungen für einfache Arbeitssituationen oder unterstützen die Ausführung von Bewegungen.
- **Mittel:** Systeme können bei regelbasierten Entscheidungen mittlerer Komplexität unterstützen und Empfehlungen an den Nutzer kommunizieren.
- **Hoch:** Systeme können bei regelbasierten Entscheidungen hoher Komplexität bzw. bei auf Expertise basierenden Entscheidungen unterstützen und Empfehlungen an den Nutzer kommunizieren.
- **Variabel:** Systeme können bei Handlungen und Entscheidungen unterschiedlicher Komplexität unterstützen bzw. auch regelbasierte kognitive Tätigkeitsbestandteile übernehmen.

Darüber hinaus lassen sich Assistenzsysteme in Wahrnehmungsassistenzsysteme, Entscheidungsassistenzsysteme und Ausführungsassistenzsysteme einteilen (Bengler et al., 2017):

- **Wahrnehmungsassistenzsysteme:** Arbeitshilfen, welche Mitarbeiter mit Hilfe von Augmented Reality unterstützen. Beispiel: Datenbrillen oder Pick-by-Voice-Systeme
- **Entscheidungsassistenzsysteme** verwenden Echtzeitdaten und erstellen so Prognosen bezüglich Prozessverhalten bzw. Prozessergebnissen.
- **Ausführungsassistenzsysteme** haben das Ziel, Arbeitsbelastungen der Mitarbeiter zu reduzieren und assistieren somit auch in ergonomischer Hinsicht. Mit dieser Art der Unterstützung lassen sich neben der Ergonomie auch die Ausführungsgeschwindigkeit sowie die Präzision der Tätigkeit beeinflussen.

Arbeitsmittel wie Drehmomentschlüssel und Hebehilfen finden ebenso wie Telefone und Terminals bereits seit über hundert Jahren Anwendung in der Industrie. Auch Robotersysteme dienen dem Menschen schon viele Jahrzehnte als Hilfsmittel. Fahrerlose Transportsysteme und Werkerassistenzsysteme finden ebenfalls bereits seit 40 Jahren Anwendung in der Produktion. Zu den neuesten Typen von Assistenzsystemen gehören Digital Twins und Drohnen, ebenso wie das am Körper getragenen Unterstützungssystem Exoskelett (Schlund, 2019).

In folgender Abbildung 9 wird ein Überblick über die geschichtliche Entwicklung von Assistenzsystemen gegeben.

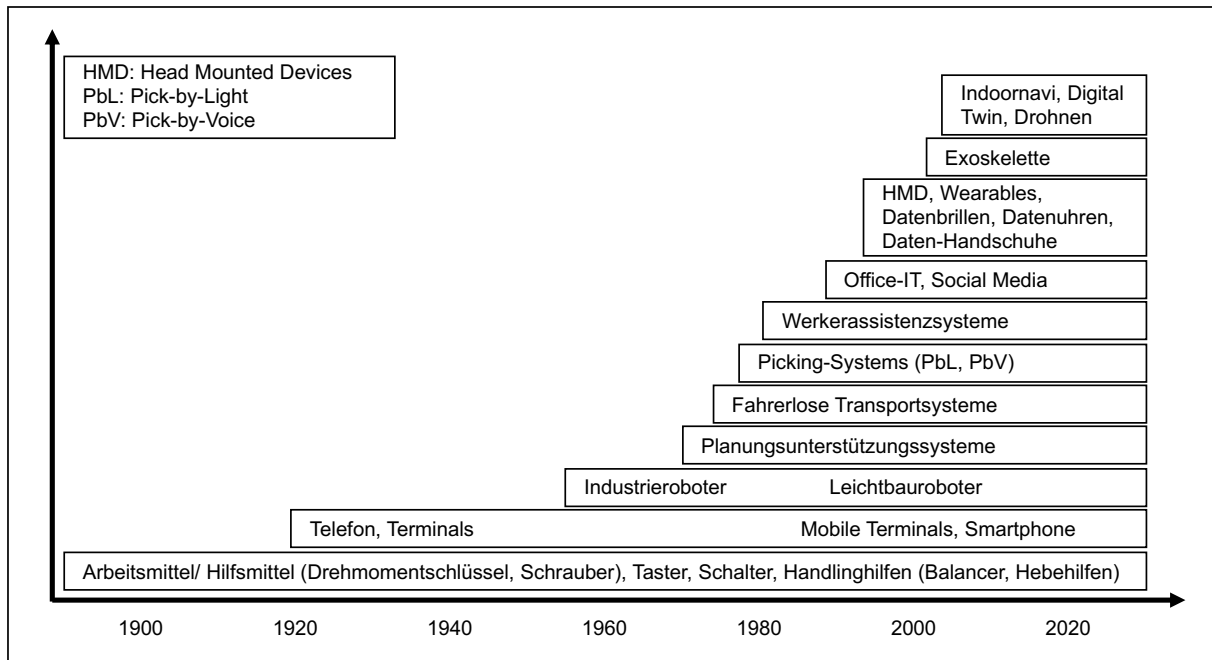


Abbildung 9: Entwicklungspfad von Assistenzsystemen in der Produktion (Schlund, 2019)

Die Anwendung der verschiedenen Assistenzsysteme bezieht sich auf teils sehr unterschiedliche Bereiche und ist oft mit unterschiedlichen Zwecken und Interessen verbunden. Im industriellen Bereich kann die Unterstützung beispielsweise darauf abzielen, vorhandene Fähigkeiten zu verbessern, Krankheiten vorzubeugen oder geistige Prozesse zu beschleunigen. Folgend werden noch weitere mögliche Ziele genannt (Wischmann and Hartmann, 2018, S. 36):

- Reduktion der Komplexität und des Aufwands bei der Einarbeitung von Mitarbeiter unterschiedlicher Leistungsniveaus und fachlichem Hintergrund
- Erhaltung bzw. Verbesserung der Motivation und Arbeitsfähigkeit von älteren und leistungsgeminderten Mitarbeitern
- Reduktion der Anzahl an Produktionsfehlern
- Reduktion der kognitiven Beanspruchung und des Stresslevels der Mitarbeiter
- Vorbeugung verschleißbedingter Erkrankungen und Unterstützung eines gesunden Arbeitsverhaltens durch Integration ergonomischer Elemente
- Inklusion bzw. Wiedereingliederung leistungsgeminderter und -gewandelter Personen in die Arbeitsumgebung
- Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen

Eine Schwierigkeit besteht darin, die zu unterstützende Aktivität zu bestimmen und das dafür geeignete Assistenzsystem zu wählen. Eine zweite Herausforderung besteht in der Implementierung des Unterstützungssystems in den Arbeitsprozess und in der Nutzerakzeptanz. Akzeptanzfragen werden im Detail auf der Ebene der Arbeitsorganisation aber auch auf gesellschaftlicher Ebene (politisch, wirtschaftlich, rechtlich, gemeinschaftlich) geklärt (Weidner et al., 2015, S. 66).

2.2 Exoskelette zur humanzentrierten Arbeitsgestaltung

Dieses Kapitel behandelt den Einsatz von Exoskeletten als Assistenzsystem in der industriellen Produktion. Das erste Unterkapitel gibt eine kurze Einführung in das Thema. Danach folgt die Klassifizierung von Exoskeletten. Anschließend werden die Anforderungen an Exoskelette erläutert und die aktuellen Normen und Richtlinien aufgelistet. Zuletzt wird ein Überblick über die Potentiale und Risiken von Exoskeletten gegeben.

2.2.1 Definition und Klassifizierung

Grundsätzlich sind Exoskelette am Körper getragene, mechanische Stützstrukturen und dienen dem Träger als Unterstützung bei seinen Körperbewegungen (de Looze et al., 2016).

Das Konzept des Exoskeletts wurde erstmals in den 60er Jahren von General Electric in dem als Hardiman benannten Projekt beschrieben. Dieses Projekt begann 1965 und hatte die Entwicklung eines angetriebenen Ganzkörperexoskeletts zur Unterstützung von Hebe- und Tragetätigkeiten von Lasten bis zu knapp 700 kg als Ziel. Das Projekt wurde 1971 abgeschlossen, war jedoch aufgrund der beträchtlichen Masse des Exoskeletts von 680 kg und einer kaum beherrschbaren Bedienung nicht erfolgreich (Groshaw, 1969; Sudonull, 2020). Etabliert hat sich die Anwendung von Exoskeletten in weiterer Folge in zwei anderen, sich voneinander stark unterscheidenden Bereichen. In der Medizin dienen Exoskelette beispielsweise in der Rehabilitation, wo sie Patienten als technische Hilfsmittel während ihres Rehabilitationsprozesses zur Verfügung stehen oder behinderten Menschen den Alltag erleichtern. Eine weitere Anwendung wurde im militärischen Bereich gefunden, um die Stärken der Soldaten zu erhöhen (Marcheschi et al., 2011, S. 661). Die Motivation für den Einsatz von Exoskeletten in der Industrie, um Arbeitnehmer bei der Bewältigung ihrer täglichen Aufgaben zu unterstützen und ihnen zu helfen, beruht auf diesen beiden unterschiedlichen Ansätzen. In jüngster Zeit werden Exoskelette somit auch zunehmend für produzierende Industrien wieder interessant.

In der Produktion sind Exoskelette überwiegend präventiv eingesetzt, um die tatsächliche ergonomische Arbeitssituation der Arbeitnehmer zu verbessern. Studien belegen, dass eine solche präventive Investition auch langfristige finanzielle Vorteile für das Unternehmen hat (Bräunig and Kohstall, 2013, S. 34–38), immerhin werden gegenwärtig in Deutschland ungefähr 30% aller verlorenen Arbeitstage durch Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) verursacht (Bungard et al., 2013, S. 16–22). Europaweit entspricht der durch MSE entstandene wirtschaftliche Schaden in etwa 240 Milliarden Euro (dies entspricht etwa 2% des BIP) (Bevan, 2012, S. 3–4).

Der Hauptvorteil des Einsatzes eines Exoskeletts gegenüber jeder Art von Robotersystemen ist, dass man speziell in dynamischen Umgebungen von der Kreativität und Flexibilität des Menschen und gleichzeitig von der hohen Wiederholgenauigkeit und Ausdauer der Technik profitiert und keine

Roboterprogrammierung erforderlich ist. Es lassen sich somit positive Wirkungen im Bereich der Produktion, z.B.: Produktivitäts- und Effizienzsteigerung erzielen. Eine flexible Produktion durch Automatisierung kann nicht erreicht werden, wenn sich die Tätigkeiten, Produkttypen und Auftragsgrößen häufig ändern. Wenn die Aufgabenausführung nicht an einem bestimmten Ort stattfindet, die zu verarbeitenden Teile jedoch zu schwer sind, um von einer Person sicher gehandhabt zu werden, bietet sich der Einsatz von Exoskeletten als intuitivere und schnellere Alternative zu teuren Hebehilfen an. Exoskelette werden zukünftig in der Lage sein, Arbeitnehmern nach einer Verletzung oder Erkrankung den Einstieg ins Berufsleben zu erleichtern und somit die Wiedereingliederung zu beschleunigen (Constantinescu et al., 2016, S. 740–745).

Unter den vielen Möglichkeiten anhand derer Exoskelette klassifizierbar sind, ist die Einteilung hinsichtlich ihres Aufbaus und der verbauten Komponenten in aktive oder passive Exoskelette am weitesten verbreitet (de Looze et al., 2016).

Rein passive Exoskelette bestehen entweder aus Feder-Dämpfer-Systemen, welche durch menschliche Bewegungen gewonnene Energie speichern und diese bei Bedarf zur Unterstützung freigeben, oder leiten Belastungen entweder in die Hüfte oder direkt in den Boden ab. Auftretende Belastungen werden somit wie durch eine Art Gegengewicht aufgefangen und Bewegungen in der Belastungsrichtung erleichtert. Dies hat eine Erhöhung des Komforts am Arbeitsplatz zur Folge. Da diese Assistenzsysteme ohne den Einsatz von Motoren, Sensorik sowie deren Stromversorgung arbeiten, ist deren Aufbau einfacher als jener von aktiven Exoskeletten (de Looze et al., 2016).

Aktive Exoskelette bestehen aus einem oder mehreren Aktuatoren, die die Kraft des Menschen erhöhen und menschliche Gelenke bei ihrer Bewegung unterstützen (Gopura and Kiguchi, 2009). Sie bieten dem Anwender eine aktive mechatronische Kraftunterstützung bei einzelnen oder kombinierten physischen Belastungsfaktoren. Da sie pneumatisch oder durch Motoren betrieben sind, über eine Stromversorgung verfügen und meist modular aufgebaut und erweiterbar sind, weisen sie eine wesentlich höhere Komplexität auf (Yao et al., 2015). Die Mechanismen wirken an den Gelenken oder anderen neuralgischen Punkten des Trägers und erlauben daher einen weitgehend höheren Unterstützungsgrad. Jedoch erhöht der kompliziertere Aufbau das Eigengewicht des Anzugs stark. Die Energieversorgung erfolgt bei aktiven Exoskeletten meist elektrisch. Es befindet sich entweder ein integrierter Akku in der Stützstruktur oder das Exoskelett ist direkt am Stromnetz angeschlossen. Darüber hinaus kann der Antrieb auch pneumatisch erfolgen. Ähnlich wie bei elektrisch betriebenen Varianten gibt es auch hierbei eine Unterteilung in stationäre (Druckluftsystem) und instationäre (Gasflaschen) Versorgungsungen (Gull et al., 2020).

Man kann Exoskelette auch nach dem unterstützten Körperteil bzw. den unterstützten Körperteilen unterscheiden: untere Extremitäten, obere Extremitäten, Lendenwirbelsäule, Schultern, etc. Zusätzlich gibt es auch bereits

Ganzkörperexoskelette oder einseitige Exoskelette (z.B.: nur für eine Extremität) (Lee et al., 2012).

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ist die Art der Energiezufuhr bei aktiven Systemen, bzw. Energiespeicherung bei passiven Systemen. Hier kann zwischen elektrischer, pneumatischer oder hydraulischer Energie, oder der Verwendung von mechanischen Federn und Dämpfern unterschieden werden (Ho et al., 2011).

<i>Grundprinzip</i>	<i>Passive Exoskelette</i>	<i>Aktive Exoskelette</i>
<i>Eigenschaften</i>	Passive Unterstützung der Körperregionen bei bestimmten Haltungen und Bewegungen	Aktive Unterstützung der Körperregionen bei bestimmten Haltungen und Bewegungen
<i>Unterstützte Körperregion</i>	Arme, Hände, Beine, Schultern, Rumpf, Ganzkörper	Arme, Hände, Beine, Schultern, Rumpf, Ganzkörper
<i>Funktionsweise</i>	Mechanische Feder, Seilzug, Gasdruckfeder; einfache Regelungs- und Steuerungsfunktion	Elektrischer, pneumatischer, hydraulischer Antrieb; Regelungs- und Steuerungsfunktionen komplex
<i>Energieversorgung/-umleitung</i>	Speicherung kinetischer Energie, Umleitung der Energie auf Hüfte, Beine, etc.	Elektrische Energie, Druckluft

Tabelle 6: Klassifizierung von Exoskeletten (DGUV, 2018)

Nach Lee et al. können Exoskelette noch nach dem Grad ihrer Übereinstimmung oder Ähnlichkeit mit dem menschlichen Körper (Anthropometrie) klassifiziert werden. Anthropomorphe Exoskelette haben Gelenke, deren Rotationsachse mit der Rotationsbewegung menschlicher Gelenke zusammenfällt, während dies bei nicht-anthropomorphen Typen nicht der Fall ist. Dem vollständig anthropomorphen Typ ist es möglich, die gleichen Bewegungen wie der Träger auszuführen und bietet somit eine große Bewegungsfreiheit (Lee et al., 2012). Abgesehen von der Anthropometrie, von Weidner et al. Kraftweg genannt, definieren Weidner et al. außerdem die beiden Aspekte Steifigkeit der Strukturelemente und Anzahl der Freiheitsgrade. Die aktuellen kommerziellen Exoskelette verwenden hauptsächlich starre Strukturelemente in der Nähe des Körpers und stützen sich auf die passive Betätigung einzelner Freiheitsgrade. Viele, sich derzeit noch in der Forschung befindlichen, aktiven Exoskelette verwenden elektrische Betätigungen mit mehreren Freiheitsgraden. Primär müssen Exoskelette die Bewegungen des Trägers ermöglichen. Dies kann entweder durch geeignete Kopplung von harten Strukturelementen mit diskreten Freiheitsgraden erfolgen oder mit weichen (Textil-) Elementen wie Gurten und Seilen. In technikaffinen Bereichen wie der industriellen Produktion bestehen nur geringe Hemmungen technisch aussehende Systeme mit starren Strukturelementen einzusetzen, wohingegen in Bereichen wie der Pflege eine weichere Systemstruktur zu bevorzugen ist (Weidner et al., 2018, S. 598).

2.2.2 Potentiale und Risiken von Exoskeletten

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits auf Trends, welche die Arbeitsgestaltung in der industriellen Produktion betreffen, hingewiesen. So nimmt zwar einerseits aufgrund der Mechanisierung und Automatisierung die manuelle Arbeit in der Werkstatt ab, während mehr Menschen an der Planung, Programmierung und Konstruktion vor der Produktion beteiligt sind. Jedoch steigt, wie bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnt, die Notwendigkeit immer flexibler werdender Arbeitsprozesse in der Produktion, insbesondere in hochautomatisierten Umgebungen. Infolge der Alterung der Erwerbsbevölkerung ist eine technologiebasierte Unterstützung erforderlich, um ältere Arbeitnehmer produktiv zu halten und deren Gesundheit zu wahren. Außerdem sollte man aufgrund des Mangels an Facharbeitern am Arbeitsmarkt die Attraktivität der Fabrikarbeit erhöhen, um junge Facharbeiter anzusprechen. Zuletzt ist auf die Wichtigkeit ergonomischer Verbesserungen im Bereich der Produktion und Logistik hinzuweisen. Aufgrund der Prävalenz von Verletzungen im Bereich des Rückens, der Schultern und der Arme ist eine technologiegestützte Unterstützung erforderlich, um die körperliche Belastung der Arbeitnehmer zu verringern (de Looze et al., 2017, S. 197).

Aus den genannten Trends lassen sich fünf, für die Anwendung von Exoskeletten relevante Notwendigkeiten ableiten (de Looze et al., 2017, S. 197):

- Notwendigkeit, körperliche Belastung und Verletzungsrisiken zu reduzieren
- Notwendigkeit, die Flexibilität der Produktion zu erhöhen
- Notwendigkeit, die Flexibilität der Arbeitnehmer zu erhöhen
- Notwendigkeit, die Produktivität der manuellen Arbeit zu erhöhen
- Notwendigkeit, die Qualität der manuellen Arbeit zu erhöhen

Die größten Stärken von Exoskeletten und gleichzeitig die Hauptanwendungsgründe für deren Einsatz sind die Verbesserung ergonomischer Bedingungen von Mitarbeitern und die Reduktion der auf den Körper des Trägers wirkenden Belastungen beziehungsweise die Unterstützung der Bewegungen des Mitarbeiters. Verglichen mit anderen Hebeunterstützungen wie Gabelstaplern, Lastenkränen, etc. lassen sich Exoskelette schnell und leicht einsetzen und am Arbeitsplatz bei vorhandenen Strukturen integrieren. Die Anwendung von Exoskelettsystemen führt außerdem zu höheren Konzentrationsleistungen und somit zu einer erhöhten Qualität der manuellen Arbeit durch die Reduktion der Fehlerquote (Schroeter et al., 2018, S. 315).

Aufgrund seiner Neuheit gibt es jedoch noch keine Erkenntnisse zu Langzeitfolgen, standardisierte Gefährdungsbeurteilungen und Ergonomiestudien zum allgemeinen Einsatz von Exoskeletten. Es wurden bis dato lediglich spezifische Studien zu einzelnen Exoskelett-Produkten durchgeführt (Dahmen and Hefferle, 2018, S. 1279). Außerdem sind arbeitssicherheitstechnische Anforderungen für den jeweiligen Arbeitsplatz spezifisch und können nicht für Exoskelette pauschal definiert werden. Trotz Exoskelett ist es möglich, dass Mitarbeiter an ihrer Belastungsgrenze arbeiten,

wenn die Lastgewichte erhöht werden. Bei gleichbleibender Lastgewichte besteht die Gefahr von muskulären Dysbalancen. Außerdem könnten Veränderungen im Bewegungsverhalten des Trägers hervorgerufen werden. Bei nicht sachgerechter Anwendung kann es zu Quetschungen und Druckstellen kommen. Zudem sinkt bei schlechtem Tragekomfort die Akzeptanz bei den Trägern von Exoskeletten (Hensel and Steinhilber, 2018, S. 113).

Chancen des Einsatzes von Exoskeletten am Arbeitsplatz sind einerseits die Erhöhung des Arbeitskomforts, die Reduktion von Fehlzeiten, sowie die Steigerung von Produktivität und Qualität. Andererseits bieten sich auch Einsatzmöglichkeiten bei bereits leistungsgewandelten Mitarbeitern und auch bei Mitarbeitern die nach einer Verletzung wieder in den Berufsalltag eingegliedert werden sollen (de Looze et al., 2016; Schick, 2018).

Im Folgenden werden die Stärken, Schwächen, Risiken und Chancen anhand einer SWOT-Analyse dargestellt. Da sich aktive und passive Exoskeletten teils grundlegend unterscheiden und von ihnen unterschiedliche Effekte auf den Anwender ausgehen, werden sie separat behandelt (de Looze et al., 2016). Tabelle 7 zeigt die SWOT Analyse aktiver Exoskelette.

<p><i>Stärken</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der ergonomischen Arbeitsbedingung • Reduktion körperlicher Belastungen • Unterstützung von Bewegungen bei Hebe, Trage, Halte Tätigkeiten, bei Überkopfarbeiten und Arbeiten in Zwangshaltungen • Leistungssteigerung des Mitarbeiters • Erhöhung der Konzentrationsfähigkeit durch Reduktion der körperlichen Belastung • Gut in Tätigkeiten integrierbar 	<p><i>Schwächen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Komplexität aufgrund ihrer Bauweise • Geringere Akzeptanz aufgrund geringerer Benutzerfreundlichkeit und hohen Komplexität • Keine Erkenntnisse zu Langzeitfolgen • Entwicklung stark technologiegetrieben • Arbeitssicherheitstechnische Anforderungen arbeitsplatzspezifisch • Dokumentations- und Unterweisungspflicht • Noch keine standardisierte Risiko- bzw. Gefährdungsbeurteilung • Schlechte Nutzerakzeptanz bei Diskomfort • Gewichtsbelastung der Tragenden
<p><i>Risiken</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Muskuläre Dysbalancen • Keine Beachtung physischer Aspekte in der Nutzung • Verlust der Selbstwirksamkeitserwartung • Arbeit an der Belastungsgrenze, wenn Lastgewichte erhöht werden • Veränderung des Bewegungsverhaltens • Auftreten neuer Beanspruchungen • Druckstellen • Gefahren von Quetschen, Scheren, Schneiden 	<p><i>Chancen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorbeugung von Muskel-Skelett-Erkrankungen • Reduktion von Fehlzeiten • Reduktion der Fehlerquote • Positive Auswirkung auf Mitarbeitermotivation • Erhöhung des Arbeitskomforts • Steigerung von Produktivität und Qualität • Steigerung der Einsatzmöglichkeiten leistungsgewandelter Mitarbeiter • Unterstützung in der beruflichen Wiedereingliederung oder Inklusion

Tabelle 7: SWOT Analyse aktiver Exoskelette

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Stärken, Schwächen, Risiken und Chancen von passiven Exoskeletten.

<i>Stärken</i>	<i>Schwächen</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der ergonomischen Arbeitsbedingung • Reduktion körperlicher Belastungen • Unterstützung von Bewegungen bei Hebe, Trage, Halte Tätigkeiten, bei Überkopfarbeiten und Arbeiten in Zwangshaltungen • Leistungssteigerung des Mitarbeiters • Erhöhung der Konzentrationsfähigkeit durch Reduktion der körperlichen Belastung • Schnell und leicht anwendbar • Hoher Produktreifegrad • Gut in Arbeitstätigkeit integrierbar • Gute Anpassbarkeit • Preiswerter als aktive Exoskelette • Hohe Benutzerfreundlichkeit aufgrund ihrer Praxistauglichkeit, einfachen Bedienbarkeit und geringen Komplexität 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung einzelner Körperregionen • Keine Erkenntnisse zu Langzeitfolgen • Entwicklung stark technologiegetrieben • Arbeitssicherheitstechnische Anforderungen arbeitsplatzspezifisch • Dokumentations- und Unterweisungspflicht • Noch keine standardisierte Risiko- bzw. Gefährdungsbeurteilung • Schlechte Nutzerakzeptanz bei Diskomfort • Lastumverteilung
<i>Risiken</i>	<i>Chancen</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Muskuläre Dysbalancen • Keine Beachtung physischer Aspekte in der Nutzung • Verlust der Selbstwirksamkeitserwartung • Arbeit an der Belastungsgrenze, wenn Lastgewichte erhöht werden • Veränderung des Bewegungsverhaltens • Auftreten neuer menschlicher Beanspruchungen • Druckstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorbeugung von Muskel-Skelett-Erkrankungen • Reduktion von Fehlzeiten • Reduktion der Fehlerquote • Positive Auswirkung auf Mitarbeitermotivation • Erhöhung des Arbeitskomforts • Steigerung von Produktivität und Qualität • Steigerung der Einsatzmöglichkeiten leistungsgewandelter Mitarbeiter • Unterstützung in der beruflichen Wiedereingliederung oder Inklusion

Tabelle 8: SWOT Analyse passiver Exoskelette

2.2.3 Anforderungen zur betrieblichen Anwendung

Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen Exoskelettypen mit verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, die jedoch im Allgemeinen alle darauf abzielen, Unterstützung für den Träger des Assistenzsystems bereit zu stellen. Insbesondere Arbeitsumgebungen, in denen viel gehoben, getragen oder über Kopf gearbeitet wird und technische Hilfsmittel wie Stapler oder Kräne aus technischen Gründen nicht anwendbar sind, stellt der Einsatz von Exoskeletten eine Möglichkeit dar, den Mitarbeiter bei der Arbeit zu entlasten (de Looze et al., 2016).

Die folgende Liste gibt einen Überblick über mögliche Tätigkeiten bei denen Exoskelette hilfreich sind (de Looze et al., 2016, S. 672):

- Arbeiten in Zwangspositionen
- Statisches Halten einer Last
- Dynamisches Heben und Absenken einer Last
- Tragen von Lasten
- Überkopfarbeiten

Aufgrund der Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten unterscheiden sich auch die Anforderungen signifikant. Weidner et al. definieren sechs Dimensionen in denen Anforderungen an das Exoskelett gestellt werden. Diese zentralen Forderungen an Exoskelette werden in Abbildung 8 dargestellt.

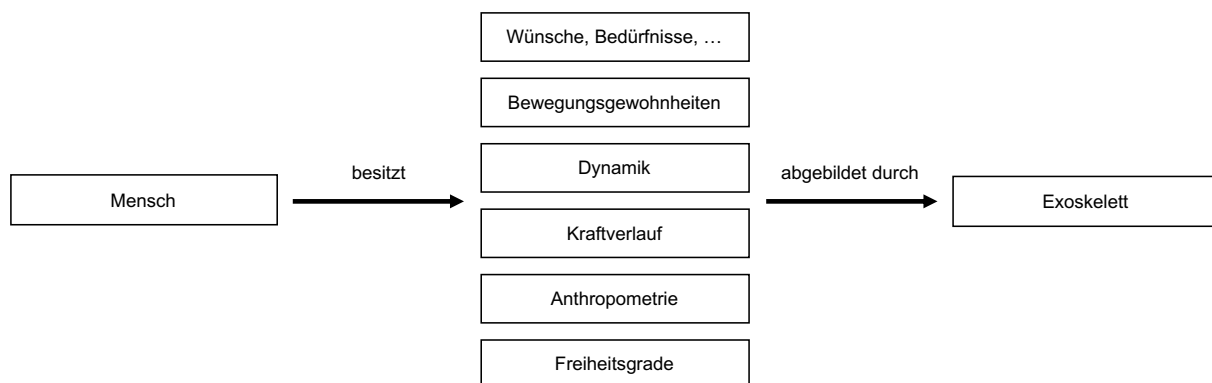


Abbildung 10: Zentrale Anforderungen an Exoskelette (Weidner et al., 2018, S. 598)

Eine von Kim et al. durchgeführte Studie mit 26 Vertretern der Bauindustrie kam zu dem Ergebnis, dass die Produktivitätssteigerung durch die Anwendung von Exoskeletten am Arbeitsplatz die Haupterwartung darstellt. 85% der Befragten erwarteten eine Reduktion von Verletzungen und Erkrankungen des Bewegungsapparats. Darüber hinaus wurde angenommen, dass Exoskelette denjenigen zugutekommen könnten, die körperliche Behinderungen oder Verletzungen haben, so dass sie weiterhin arbeiten könnten. Gemischte Erwartungen gab es hinsichtlich der Frage, ob der Einsatz von Exoskeletten dazu beitragen könnte, die Zahl ihrer Arbeitskräfte zu erhöhen, z.B. durch die Weiterbeschäftigung von Verletzten oder älteren Arbeitnehmern. Die Hälfte der Befragten gab an, dass das

Tragen eines Exoskeletts die Wahrscheinlichkeit erhöht, sich in Ausrüstungsgegenständen oder hervorstehenden Gegenständen zu verfangen (Kim et al., 2019, S. 187). Die nachfolgende Grafik zeigt die Erwartungen und Anforderungen in drei Gruppen gegliedert: erwarteter Nutzen, Akzeptanz der Exoskelett-Technologie und wahrgenommene Barrieren für die Nutzung von Exoskeletten.

Durch die Anwendung von Exoskeletten bei der Ausführung von Arbeitstätigkeiten wird neben der Verbesserung ergonomischer Bedingungen und einer damit einhergehenden Reduktion von Verletzungen des Muskel-Skelett-Systems auch ein Produktionsgewinn erwartet. Dem Einsatz von Exoskeletten gegenüber stehen jedoch die Faktoren Sicherheit und Benutzerfreundlichkeit sowie mit der Exoskelett-Technologie einhergehenden Barrieren wie beispielsweise Haltbarkeit, Effektivität, und Robustheit. Die Akzeptanz für das am Körper getragenen Assistenzsystem erhöht sich unternehmensseitig durch die Chance auf einen wirtschaftlichen Vorteil und bei Mitarbeitern durch eine leichte Anwendbarkeit und regelmäßiges Training (Kim et al., 2019, S. 187).

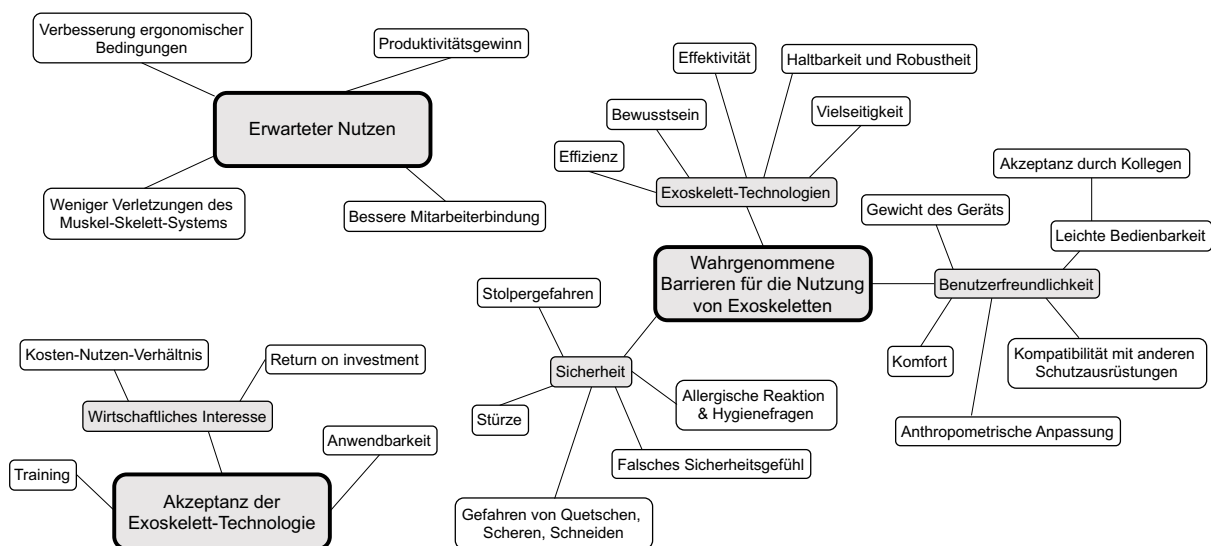


Abbildung 11: Kategorien bzgl. Einführung und Verwendung von Exoskeletten (Kim et al., 2019, S. 187)

Bereits in der Konstruktion und Herstellung der Exoskelette muss darauf geachtet werden, dass durch ihre Verwendung hervorgerufene potenzielle Gefahren, wie beispielsweise eine durch das Exoskelett zusätzliche Belastung auf den Träger, frühzeitig ausgeschlossen werden. Abgesehen davon sollten Exoskelette ergonomisch, leicht, einfach zu bedienen und auf die Körperproportionen des Trägers individuell einstellbar sein. Weitere Voraussetzungen sind müheloses An- und Ablegen, sowie Wetter- und Umgebungstauglichkeit für den Einsatz im Freien. Das bedeutet, dass es reibungslos funktionieren muss und bequem tragbar sein soll, wenn es in feuchter oder in staubiger Umgebung, Hitze oder Kälte benutzt wird. Dies verbessert auch die Akzeptanz der Anwendung des Exoskeletts bei den Trägern (Schick, 2018, S. 268).

Neben den spezifischen Anforderungen, die der Einsatzzweck mit sich bringt, stellen sich auch Fragen bezüglich der sicherheitstechnischen Anforderungen an das Exoskelett (Schick, 2018, S. 267). Normen und Richtlinien, nach welchen Exoskelette derzeit in der Gestaltung und Benutzung Anwendung finden, werden im Folgenden beschrieben.

Obwohl der Fortschritt in der Exoskelett-Technologie, insbesondere der in der Industrie angewandten Technologie, enorm zugenommen hat, existieren derzeit noch kaum spezifische, auf Exoskelette ausgerichtete Normen, Standards und Richtlinien (Gull et al., 2020, S. 24). Einer weiten Verbreitung in der Industrie steht trotz dem hohen Potential, welche Exoskelette als Assistenzsystem haben (de Looze et al., 2016), dieser Mangel an Normen, Standards und Richtlinien gegenüber.

Auf europäischer Ebene wird derzeit eine Zuordnung von Exoskeletten zum Geltungsbereich einer bereits vorhandenen EU-Richtlinie diskutiert. Möglich wäre eine Zuordnung als technisches Hilfsmittel zur RL 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie). Exoskelette könnten jedoch auch als medizinisches Hilfsmittel, z. B. im Rahmen der beruflichen Wiedereingliederung eingesetzt werden. In diesem Fall könnte die europäische Richtlinie 93/42/EWG für Medizinprodukte zur Anwendung kommen (Schick, 2018, S. 267).

Exoskelette finden im Rahmen der von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelten EN ISO 13482 Roboter und Robotikgeräte – Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter eine kurze Erwähnung. Die Norm, die Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit Robotern behandelt und auch auf tragbare Roboter übernommen werden kann, setzt voraus, dass die Konstruktion mittels technischer Schutzmaßnahmen so sicher gestaltet ist, dass die verbleibenden Restrisiken ohne Weiteres akzeptiert werden können. Es obliegt jedoch dem Hersteller, nach der Risikobeurteilung aus einer Reihe von sinngemäß anwendbaren Grundnormen, passende technische Lösungen zu entwickeln und im Konstruktionsprozess anzuwenden (DIN EN ISO 13482:2014-11, 2014). Die Verwendung dieses Normungsverfahrens ist jedoch nicht für Exoskelette gültig, welche für medizinische Anwendungen (beispielsweise die oben genannte berufliche Wiedereingliederung nach einer Verletzung) eingesetzt werden (Gull et al., 2020, S. 24).

Um ein Produkt in Europa verkaufen zu können, müssen Hersteller von Maschinen im industriellen Umfeld, zu denen auch aktive Exoskelette gehören, die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG erfüllen. Diese Richtlinie stellt einen für den Betreiber gefahrenlosen Einsatz sicher. Außerdem muss der Hersteller von aktiven Exoskeletten auch deren CE-Konformität untersuchen und bescheinigen. Passive Exoskelette müssen jedoch nicht zwingend CE-konform entwickelt werden und es müssen auch

nicht zwangsläufig alle sicherheitsrelevanten Informationen über das Assistenzsystem und seine Verwendung zur Verfügung gestellt werden (Hold et al., 2020, S. 20).

Aufgrund der Einsatzmöglichkeiten insbesondere passiver Exoskelette und der von den Herstellern beschriebenen Präventionspotentialen liegt auch eine Einordnung als personenbezogene bzw. personengebundene Maßnahme nahe. Sie können nach der europäischen PSA-Verordnung 2016/425, welche 2019 die Richtlinie 89/686/EWG ersetzt hat, als persönliche Schutzausrüstung (PSA) eingestuft werden, da sie zum Schutz vor Überlastung beim Heben und Transport oder bei der Arbeit in einer Zwangsstellung anwendbar sind. Nach der Hierarchie der Schutzmaßnahmen, dem sog. TOP-Prinzip, müssen vor dem Einsatz des Exoskeletts alle anderen technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Vermeidung von Arbeiten in Zwangspositionen oder Handhabungen schwerer Lasten ausgeschöpft werden. Erst wenn dies nicht möglich ist, wird der Einsatz eines Exoskeletts empfohlen (Schick, 2018, S. 267).

Die folgende Tabelle 9 beinhaltet die derzeit geltenden Normen und Richtlinien zur Anwendung und Entwicklung von Exoskeletten:

<i>Norm</i>	<i>Inhalt</i>
DIN EN ISO 13482:2014: Roboter und Robotikgeräte – Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter	Legt Anforderungen und Richtlinien für die sichere Auslegung, Schutzmaßnahmen und Informationen für persönliche Assistenzroboter fest. Dies ist der einzige veröffentlichte Standard, in dem der Begriff Exoskelett für einen physischen Assistenzroboter verwendet wird.
DIN EN ISO 10218-1:2011: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter	Legt Anforderungen und Richtlinien für die inhärente sichere Auslegung, Schutzmaßnahmen und Informationen für den Einsatz von Industrierobotern fest.
DIN EN ISO 10218-2:2011: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration	Legt Anforderungen an die Integration von Industrierobotern und Industrierobotersystemen gemäß ISO 10218-1 fest.
Verordnung (EU) 2016/425 des europäischen Parlaments und des Rates	Diese Verordnung enthält Anforderungen an die Herstellung von persönlichen Schutzausrüstungen (PSA), die auf dem Markt bereitgestellt werden sollen, um den Schutz der Gesundheit und der Sicherheit der Nutzer zu gewährleisten, sowie Regelungen für den freien Verkehr von PSA in der Union aufzustellen.

Tabelle 9: Standards und Richtlinien von industriellen Exoskeletten (vgl. Van der Vorm et al, 2015, S. 5; Schick, 2018, S. 267)

Neben dem Fehlen von Normen und Richtlinien gibt es keine Standard-Leistungskennzahlen und Testmethoden, anhand derer das Exoskelett bewertet

werden kann. Spezielle Testverfahren müssen unter Berücksichtigung der Mensch-Roboter-Interaktion und -Sicherheit entwickelt werden. Bostelman et al. haben einige Standardmetriken vorgeschlagen, die auch für die Mensch-Roboter-Interaktion, d.h. Handhabung, Wahrnehmung und Aufgabenmanagement übernommen werden können (Bostelman et al., 2019, S. 21–27).

2.3 Methode zur Auswahl von Exoskeletten

In diesem Abschnitt werden mit Hilfe der zuvor beschriebenen theoretischen Grundlagen die Anforderungen an die Auswahl von Exoskeletten abgeleitet. Ergänzend wird ein leitfadengeführtes Experteninterview durchgeführt. Mit Hilfe einer umfassenden Meta- und Desktoprecherche werden bereits bestehende Modelle zur Auswahl von Exoskeletten identifiziert und anschließend bewertet. Danach folgt die Erhebung des Forschungsbedarfs.

2.3.1 Anforderungen an Methoden zur Auswahl von Exoskeletten

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben, führt die Gestaltung eines funktionierenden Arbeitssystems in einem Produktionsunternehmen nur dann zum gewünschten Erfolg, wenn sowohl die menschlichen, als auch die technischen und organisatorischen Aspekte gleichermaßen berücksichtigt werden. Aus den vorangegangenen theoretischen Grundlagen lassen sich Anforderungen an das zu konzipierende Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten schlussfolgern.

Für den erfolgreichen Einsatz eines Exoskeletts am Arbeitsplatz ist es wesentlich, dass der Mitarbeiter das Assistenzsystem willentlich annimmt und mit Überzeugung einsetzt. Steht der Mitarbeiter dem Exoskelett skeptisch gegenüber, mindert dies die Nutzerakzeptanz, welche ein zentrales Element für die Implementierung von Exoskeletten darstellt (Bosch et al., 2016). Aus unternehmerischer Sicht stehen neben der Verbesserung der ergonomischen Bedingungen bei der Arbeitstätigkeit auch wirtschaftliche Faktoren im Vordergrund. Die Auswahl eines geeigneten Exoskeletts kann somit nur unter der Berücksichtigung des MTO-Konzepts insbesondere der Schnittstelle Mensch und Technik und der Schnittstelle Technik und Organisation erfolgen. Zur Erleichterung bei der Auswahl führt dabei die Verwendung von bereits bestehenden und in der Industrie weit verbreiteten Methoden in der Vorgehensweise, wie beispielsweise Methoden zur Analyse von Arbeitsabläufen oder Methoden zur Bewertung von ergonomischen Bedingungen.

Aus den theoretischen Grundlagen lässt sich weiters die Notwendigkeit der Erstellung einer detaillierten Morphologie von Exoskeletten ableiten. Mit Hilfe der, auf dieser Morphologie basierenden, Einteilung bereits bestehender Exoskelett-Produkte erfolgt die akkurate Auswahl eines geeigneten Exoskeletts für einen vorliegenden Anwendungsfall.

Zusätzlich zu der Anforderungserhebung aus den theoretischen Grundlagen kommt zur weiteren Ermittlung der Anforderungen an das Vorgehensmodell das leitfadengeführte Experteninterview, eine bewährte Methode zur Analyse der Anforderungen zum Einsatz (Taentzer, 2014, S. 78).

Im Wesentlichen gliedert sich das Experteninterview in sechs Phasen. In der ersten Phase wird das eigene Interessensfeld abgesteckt. Danach folgt die Suche nach potenziellen Experten zu diesem Thema. In der dritten Phase wird der Leitfaden konstruiert und auf Basis dessen im vierten Schritt das Interview durchgeführt. Die Antworten aus dem Gespräch werden in der fünften Phase ausgewertet (Mieg and Näf, 2005, S. 11).

Anforderungen an ein System stellen die persönliche Meinung der interviewten Personen dar, sind somit subjektiv und müssen aber trotzdem möglichst objektiv kategorisiert werden. Es werden deshalb Personen aus verschiedenen Abteilungen/Aufgabenbereichen, die jedoch mit dem Thema Exoskelette in Verbindung stehen, ausgewählt um unterschiedliche Sichtweisen auf das Projekt aufnehmen zu können. Expertin 1 arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems der Technischen Universität Wien. Experte 2 ist Geschäftsführer eines Unternehmens, welches sich auf den Vertrieb von Produkten für den Industriebedarf spezialisiert hat.

	<i>Branche</i>	<i>Arbeitstätigkeit</i>
<i>Expertin 1</i>	Forschung	Forschungsschwerpunkte sind unter anderem Mensch-Maschine Interaktion, physische und kognitive Assistenzsysteme in der Produktion, multikriterielle Evaluierung von industriellen Assistenzsystemen, Produktionsarbeit der Zukunft (Industrie 4.0) und Lean Management
<i>Experte 2</i>	Handel	Vertrieb von Industriewerkzeug, Industriebedarf, Service und Sonderlösungen, Spezialisierung auf Werkzeuge, Exoskelette, Sondermaschinenbau, Software, Wartung und Service

Tabelle 10: Personenprofil, Experteninterview

Die für die Entwicklung des Vorgehensmodells zur Auswahl von Exoskeletten interessanteste Frage ist die Frage nach den notwendigen Auswahlkriterien. Sie lautet: „Wie können Exoskelette für den Einsatz in Produktion und Logistik ausgewählt werden?“

Der Leitfaden ist ein grob strukturiertes, schriftliches Fragenschema und dient während dem Interview als Gedächtnisstütze. Er enthält sämtliche wichtige Fragen und bietet eine Orientierung, wie die Frageblöcke eingeleitet werden.

Allgemeine Fragen zur Auswahl und zum Einsatz von Assistenzsystemen:

- Wie werden Assistenzsysteme für die Anwendung in der Industrie ausgewählt?
- Welche Aspekte werden bei der Auswahl von Assistenzsystemen beachtet?
- Gibt es klare Vorgehensweisen oder erfolgt die Auswahl intuitiv?

Fragen zur Auswahl von Exoskeletten:

- Kann bei der Auswahl von industriell einsetzbaren Exoskeletten nach dem Auswahlvorgang von Assistenzsystemen vorgegangen werden?

- Besteht der Bedarf einer, speziell auf industriell einsetzbare Exoskelette zugeschnittenen Vorgangsweise?
- Anhand welcher Faktoren könnte man Exoskelette auswählen?
- Welche Produkteigenschaften von Exoskeletten haben aus der Sicht des Anwenders höchste Priorität?
- Welche Produkteigenschaften von Exoskeletten haben aus der Sicht des Unternehmens, welches Exoskelette einsetzen möchte, höchste Priorität?

Die Gespräche wurden stets einzeln mit einem Experten durchgeführt und mit Hilfe eines Handprotokolls protokolliert.

Den Experten ist für die Einführung von Assistenzsystemen an Arbeitsplätzen keine auf den jeweiligen Assistenzsystemtyp zugeschnittene Vorgehensweise bekannt. Viel mehr findet die Implementierung nach einem allgemeinen Einführungsprozess statt, welcher sich ähnlich der Struktur von Projektdurchführungen in mehrere Phasen gliedert. Die erste Phase behandelt die Festlegung des Projektrahmens. In einer weiteren Phase werden die Ziele konkretisiert, bevor eine Grobplanung durchgeführt wird. Erst in Phase vier findet die Feinplanung, welche beispielsweise die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit und das Einholen von Anwenderfeedbacks beinhaltet, statt. Anschließend erfolgt der Einsatz in einem Pilotbereich und abschließend erst der Serieneinsatz. Wobei der Prozesse dabei so einfach wie möglich gehalten wird. Meist haben die Unternehmen bereits grobe Vorstellungen, welches Assistenzsystem von welchem Hersteller an welchem Arbeitsplatz eingesetzt werden soll.

Auch der Einsatz von Exoskeletten erfolgt den Experten zufolge nach keiner, auf Exoskelette ausgelegten, Vorgehensweise. Insbesondere die Auswahl eines, für den spezifischen Anwendungsfall geeigneten Produktes geschieht oftmals intuitiv und ohne qualitative Bewertung. Exoskelette werden insbesondere dann eingesetzt, wenn an einem bestimmten Arbeitsplatz bereits ungewöhnlich hohe Mitarbeiterausfälle durch Krankenstände aufgrund von Muskel-Skelett-Erkrankungen wahrgenommen werden. Der Einsatz passiert somit korrektiv und wird zumeist von einer Fachkraft für Arbeitssicherheit beauftragt. Von Seiten der Unternehmen wird eine rasche und reibungslose Einführung gewünscht, die Höhe des Preises für das Assistenzsystem ist dabei weniger wichtig als der Nutzen, die Aktualität des Produkts und die Dauer des Einschulvorgangs. Für den regelmäßigen und gewissenhaften Einsatz des Assistenzsystems während der Arbeitstätigkeit ist die Akzeptanz des Mitarbeiters gegenüber Exoskeletten ausschlaggebend. Neben Komfort-Einschränkungen können Exoskelette bei unsachgemäßer Verwendung auch den Bewegungsablauf stören. Fühlt sich der Mitarbeiter mit dem Exoskelett in seinem Handeln gestört, lehnt er es auch schneller ab.

Mit Hilfe der theoretischen Grundlagen und der durchgeführten Expertengespräche konnten mehrere Anforderungen an das Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten identifiziert werden. Diese sind in der folgenden Tabelle 11 zusammengefasst dargestellt.

<i>Anforderung</i>	
1	Berücksichtigung des MTO-Konzepts
2	Durchführung einer Arbeitsablaufanalyse
3	Erfassung des ergonomischen Ist-Zustands
4	Niedrige Komplexität
5	Erstellung einer detaillierten Morphologie von Exoskeletten
6	Einteilung bestehender Produkte anhand der Morphologie
7	Verwendung aktueller Exoskelett-Produkte in einer Produktdatenbank
8	Einfache Erweiterung der Datenbank um zukünftige Exoskelett-Produkte
9	Transparente Darstellung der Ergebnisse

Tabelle 11: Anforderungen an das Vorgehensmodell

2.3.2 Modelle und Vorgehensweisen zur Auswahl von Exoskeletten

Um einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu Vorgehensmodellen zur Auswahl von Exoskeletten zu erhalten, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Sie dient zur Suche und Beschaffung von themenrelevanter Literatur in Bezug auf die Auswahl von Exoskeletten. Mit dieser Methode wird relevante Fachliteratur identifiziert, ausgewählt und kritisch bewertet (Brink, 2013, S. 47).

Die Recherche umfasst mehrere klar definierte Phasen, welche darauf ausgerichtet sind, logisch nacheinander zu erfolgen. So baut eine Phase auf die vorhergehende Phase auf und bereitet auf die folgende Phase vor (Smith, 2017, S. 50).

Im Rahmen dieser Arbeit enthält die systematische Literaturrecherche folgende Phasen:

- 1) Definition der Fragestellung
- 2) Entwicklung eines Rechercheprotokolls
- 3) Suche der Literatur
- 4) Auswahl der Literatur

Die Definition der Fragestellung ist der wichtigste Teil jeder systematischen Literaturrecherche. Sie bestimmt die gesamte Methodik (Kitchenham and Charters, 2007, S. 9).

Fragen sollten eindeutig formuliert werden und das Vorhaben klar und verständlich, bestenfalls als offene Frage in einem Satz, erläutern. Die Antwort auf die Frage sollte durch die Art der Fragestellung nicht nahegelegt werden oder durch einfaches Nachschlagen im Lexikon gefunden werden. Vorteilhaft ist eine Unterteilung in zwei bis drei Unterfragen (Dunker et al., 2016, S. 26).

Für die folgende systematische Literaturrecherche wird analog zum leitfadengestützten Experteninterview die Frage: „Wie werden Exoskelette für den Einsatz in Produktion und Logistik ausgewählt?“ herangezogen. Es folgt eine Unterteilung in mehrere Unterfragen, welche in folgender Tabelle zusammengefasst dargestellt sind. Entscheidend für die Entwicklung des Modells ist die Frage nach den benötigten Informationen für eine präzise Auswahl von Exoskeletten. Hier gilt es, die unternehmensspezifischen Anforderungen an Exoskelette zu identifizieren sowie eine akkurate Einteilung von Exoskeletten anhand ihrer Produkteigenschaften vorzunehmen.

<i>Übergeordnete Frage</i>	<i>Wie werden Exoskelette für den Einsatz in Produktion und Logistik ausgewählt?</i>
<i>1. Unterfrage</i>	Welche unternehmensspezifischen Anforderungen sind ausschlaggebend für die Auswahl des für den gewünschten Einsatz passenden Exoskeletts?
<i>2. Unterfrage</i>	Nach welchen Eigenschaften werden Exoskelette für den Einsatz in Produktion und Logistik klassifiziert?
<i>3. Unterfrage</i>	Wie ist die Vorgangsweise bei der Auswahl von Exoskeletten?

Tabelle 12: Forschungsfrage und Unterfragen

Das im zweiten Schritt zu erstellende Rechercheprotokoll dient als Instrument zur Dokumentation und Strukturierung der Rechercharbeit. Es hält Widersprüche und Lücken in den eigenen Informationen genauso fest wie Zwischen- und Schlussergebnisse (Rinsdorf and Wellmann, 2003, S. 118).

Signifikante Schlagwörter für die Suchstrategie wurden sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch identifiziert und nach ihrer Bedeutung in Blöcken eingeteilt. Die Schlagwörter und deren Einteilung werden in Tabelle 13 dargestellt.

<i>Block-Nr.</i>	<i>Name des Blocks</i>	<i>Kombinierte Schlagwörter des Blocks (de)</i>	<i>Kombinierte Schlagwörter des Blocks (en)</i>
1	Exoskelett	(Exoskelett)	(exoskeleton)
2	Vorgehensweise	(Vorgehensweise OR Vorgangsweise OR Konzept OR Methodik OR Methode OR Ansatz)	(approach OR procedure OR concept OR methodology OR methods)
3	Einsatz	(Einsatz OR Anwendung OR Gebrauch OR Benutzung OR Einführung OR Implementierung OR Applikation)	(use OR implementation OR application OR utilization OR)
4	Auswahl	(Auswahl OR Auswahlmodell)	(selection OR (selection AND model))
5	Kriterium	(Kriterium OR kriteriell OR multikriteriell OR Attribut OR Eigenschaft)	(criterion OR criterial OR multicriteria OR feature OR attribute OR characteristic)
6	Industrie	(Industrie OR industriell OR Produktion OR Logistik OR Montage OR Fertigung)	(industry OR industrial OR production OR logistics OR assembly OR manufacture)
7	Portfolio	(Portfolio OR Produktportfolio OR Kompendium OR Matrix)	(portfolio OR product portfolio OR compendium OR matrix)

Tabelle 13: Signifikante Schlagwörter

Für die Recherche werden die in der Tabelle 14 aufgelisteten Suchmaschinen verwendet. Es handelt sich hierbei um akademische Suchmaschinen, wissenschaftliche Online-Datenbanken, Dokumentenserver für Publikationen sowie soziale Netzwerke.

<i>Suchmaschine</i>	<i>Verlag/Betreiber</i>	<i>Art der Suchmaschine</i>
<i>Scopus</i>	Elsevier	Suchmaschine für wissenschaftliche Literatur
<i>GoogleScholar</i>	Google LLC	Suchmaschine für wissenschaftliche Literatur
<i>CatalogPlus</i>	TU Wien	Online-Bibliothek
<i>ResearchGate</i>	ResearchGate	Soziales Netzwerk, Datenbank für Publikationen

Tabelle 14: Suchmaschinen

In Scopus und ScienceDirect erfolgt die Recherche ausschließlich mittels englischer Schlagwörter und in CatalogPlus sowie Google Scholar mittels englischer und deutscher Schlagwörter. Das Soziale Netzwerk ResearchGate wird verwendet, um Dokumente, welche zwar mittels der oben genannten Suchmaschinen gefunden werden, in welche jedoch über die Plattformen nicht eingesehen werden kann, zu beziehen.

Die Ergebnisse der Suche in den genannten Suchmaschinen werden in Bezug auf das Jahr der Erscheinung, der Sprache und den Publikationstyp gefiltert. Die Filterkriterien sind in folgender Tabelle 15 aufgelistet.

	<i>Filterkriterium</i>	<i>Definition</i>
1	Jahr	2015-2020
2	Sprache	Deutsch, Englisch
3	Publikationstyp	Bücher, Konferenzberichte, Fachartikel, Forschungsartikel, Dissertationen, Diplomarbeiten
4	Zugang	Freier Zugang

Tabelle 15: Filterkriterien

Basierend auf die Unterfragen teilt sich die Suche in der Literatur auf drei Schwerpunkte auf. Ziel der Suche ist eine möglichst hohe Anzahl an Primärliteratur zur jeweiligen Frage. Die Sorgfalt des Suchprozesses ist ein Faktor, der systematische Literaturrecherchen von traditionellen Recherchen unterscheidet.

Der erste Suchschwerpunkt bezieht sich auf den Einsatz von Exoskeletten, der zweite auf die Auswahl von Exoskeletten und der dritte Schwerpunkt auf Produktkompendien betreffend Exoskelette für den Einsatz in Produktion und Logistik. Kombinationen aus den, in Tabelle 13 beschriebenen, Blöcken ergeben die Schwerpunkte, wobei die Suchbegriffe mittels der booleschen Operatoren OR und AND verbunden werden. Anschließend werden die Suchmaschinen anhand des in der zweiten Phase erstellten Rechercheprotokolls durchsucht.

Nachfolgende Tabelle 16 zeigt die Kombinationen der Blöcke eingeteilt in die Schwerpunkte und die sich daraus ergebenden Kombinationen der Suchbegriffe sowohl in deutscher als auch in Englischer Sprache.

<i>Schwerpunkt</i>	<i>Kombination der Blöcke</i>	<i>Suchbegriffe Deutsch</i>	<i>Suchbegriffe Englisch</i>
Einsatz von Exoskeletten	Exoskelett AND Industrie AND Vorgehensweise AND Einsatz	(Exoskelett) AND (Industrie OR industriell OR Produktion OR Logistik OR Montage OR Fertigung) AND (Vorgehensweise OR Vorgangsweise OR Konzept OR Methodik OR Methode OR Ansatz) AND (Einsatz OR Anwendung OR Gebrauch OR Benutzung OR Einführung OR Implementierung OR Applikation)	(exoskeleton) AND (industry OR industrial OR production OR logistics OR assembly OR manufacture) AND (approach OR procedure OR concept OR methodology OR methods) AND (use OR implementation OR application OR utilization)
Auswahl von Exoskeletten	Exoskelett AND Industrie AND Vorgehensweise AND Auswahl	(Exoskelett) AND (Industrie OR industriell OR Produktion OR Logistik OR Montage OR Fertigung) AND (Vorgehensweise OR Vorgangsweise OR Konzept OR Methodik OR Methode OR Ansatz) AND (Auswahl OR Auswahlmodell)	(exoskeleton) AND (industry OR industrial OR production OR logistics OR assembly OR manufacture) AND (approach OR procedure OR concept OR methodology OR methods) AND (selection OR (selection AND model))
Exoskelett-Produkt-kompodium	Exoskelett AND Industrie AND Kriterium AND Portfolio	(Exoskelett) AND (Industrie OR industriell OR Produktion OR Logistik OR Montage OR Fertigung) AND (Kriterium OR kriteriell OR multikriteriell OR Attribut OR Eigenschaft) AND (Portfolio OR Produktportfolio OR Kompodium OR Matrix)	(exoskeleton) AND (industry OR industrial OR production OR logistics OR assembly OR manufacture) AND (criterion OR criterial OR multicriteria OR feature OR attribute OR characteristic) AND (portfolio OR product portfolio OR compendium OR matrix)

Tabelle 16: Kombination von Suchbegriffen

In Tabelle 17 sind die Anzahl der Resultate in den jeweiligen Suchmaschinen dargestellt, wobei die Anzahl der deutschen bzw. englischen Treffer, welche die Suche in CatalogPlus und Google Scholar erzielt nicht gesondert aufgelistet sind.

Schwerpunkte

Anzahl der Resultate

	Scopus	CatalogPlus	Google Scholar
Einsatz von Exoskeletten	22	1	~ 17.000
Auswahl von Exoskeletten	1	0	~ 25.000
Exoskelett-Produkt-kompodium	0	0	~ 17.000

Tabelle 17: Anzahl der Ergebnisse

Die anschließende Studienauswahl ist ein mehrstufiger Prozess. Zunächst sollten die Auswahlkriterien so definiert werden, dass, sofern eine Studie nicht eindeutig aufgrund von Titel und Abstract ausgeschlossen werden kann, ein vollständiges Exemplar bezogen werden kann (Kitchenham and Charters, 2007, S. 19). Sobald alle möglichen Studien identifiziert worden sind, sollten sie anhand der Auswahlkriterien auf ihre Relevanz geprüft werden. In dieser Phase ist es sinnvoll, dass die Volltexte jener Studien, welche die Auswahlkriterien erfüllen, abgerufen werden. Nach einer Volltext-Auswahlphase werden die verbleibenden Studien auf ihre methodische Qualität überprüft. Studien von schlechter Qualität werden ausgeschlossen. Von den verbleibenden Studien werden die Ergebnisse zusammengefasst und anschließend wird eine Liste der ausgewählten Studien erstellt (Smith, 2017, S. 51).

Zuletzt erfolgt die systematische Auswahl der Dokumente. Hierzu werden die Suchergebnisse in der Suchmaschine nach ihrer Relevanz gereiht und anschließend anhand ihrer Titel und Kurzfassungen inhaltlich nach der Bedeutung für die Forschungsfrage bewertet. Insgesamt ergab die Suche 60.000 Suchergebnisse. Davon fallen 17.000 Ergebnisse auf die Suche nach der Literatur betreffend den Einsatz von Exoskeletten, 25.000 Ergebnisse auf die Suche nach der Auswahl von Exoskeletten und 17.000 Dokumente beziehen sich auf Produktkompendien.

Bei den genannten Zahlen für die Suchmaschine Google Scholar ist zu erwähnen, dass beim Screening in der Datenbank für jeden Suchschwerpunkt lediglich die ersten 20 (nach Relevanz gewichteten) Seiten berücksichtigt wurden.

Nach dem Screening der Resultate aufgrund derer Titel sowie Kurzfassungen bleiben 39 wissenschaftliche Dokumente übrig, wobei davon bei 22 der Download des Volltextes möglich ist.

Als nächstes folgt das Screening des Volltextes, wobei letztendlich nur die Publikationen berücksichtigt werden, die einen direkten Zusammenhang zur Forschungsfrage aufweisen.

<i>Suchmaschine</i>	<i>Anzahl der Ergebnisse</i>	<i>Anzahl der Ergebnisse nach Screening der Titel und Kurzfassungen</i>	<i>Anzahl der Ergebnisse nach Screening der Volltexte</i>
Scopus	23	2	1
GoogleScholar	~ 60.000	19	8
CatalogPlus	1	1	1

Tabelle 18: Anzahl der Ergebnisse nach Screening Volltexte

Aufgeteilt auf die Unterfragen der Forschungsfrage, ergab die Suche mit dem Schwerpunkt auf den Einsatz von Exoskeletten drei Resultate, die Suche mit dem Schwerpunkt auf die Auswahl ebenfalls drei Resultate und die Suche mit dem

Schwerpunkt auf den sich derzeit auf dem Markt befindenden Exoskeletten vier Treffer.

Im folgenden Abschnitt werden die drei Resultate mit der höchsten Relevanz für die Beantwortung der Forschungsfrage zusammengefasst präsentiert.

Christian Dahmen und Carmen Constantinescu identifizieren in ihrer im Jahr 2020 erschienenen wissenschaftlichen Arbeit namens *Methodology of Employing Exoskeleton Technology in Manufacturing by Considering Time-Related and Ergonomics Influences* drei wesentliche Forschungsfragen für den Einsatz von Exoskeletten in der industriellen Produktion mit Schwerpunkt auf die Automobilindustrie. Die erste Frage lautet: „Wo und welche Technologie?“. Eine als *ExoMatch* bezeichnete Methode nutzt dazu eine Datenbank auf Basis einer tiefgreifenden Analyse der Exoskeletttechnologie und der Arbeitsplatzumgebung, um Matching-Regeln zwischen Technologie und Arbeitsplatz zu formulieren. Die zweite Frage behandelt die Nutzungsarten eines Einsatzes von Exoskeletten, wie z.B.: ergonomische Vorteile oder Einflüsse auf Produktionssysteme. Es wird festgestellt, dass zeitbezogene Einflüsse die wichtigsten relevanten Auswirkungen sind. Die dritte relevante Forschungsfrage: „Wann integrieren?“ bezieht sich auf den Zeitpunkt der Einführung. Dem enormen Potenzial, das tägliche Leben von Arbeitnehmern zu verbessern, werden in der Realität Barrieren gestellt, beispielsweise rechtliche Fragen, Unwohlsein/Akzeptanz, oder finanzielle oder Produktivitätsvorteile (Dahmen and Constantinescu, 2020).

Goehlich et al. präsentieren im Tagungsbericht *Technische Unterstützungssysteme*, die die Menschen wirklich wollen aus dem Jahr 2016 einen Ansatz zur Unterstützung des Managements bei der Vorauswahl von existierenden Exoskeletten für den Einsatz in der industriellen Produktion mit dem Titel: „Exoskeleton Portfolio Matrix“. Ziel der Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Portfoliomatrix. Diese gliedert sich in vier Hauptschritte:

1. Erstellung einer Klassifizierungsliste mit den Systemmerkmalen
2. Erstellung einer Umfrage
3. Clustern der Eigenschaften
4. Visualisierung der Ergebnisse in einer Portfoliomatrix

Die im ersten Schritt identifizierten Merkmale von Exoskeletten werden im dritten Schritt erfahrungsgemäß gruppiert und anschließend gemeinsam mit den Antworten auf die Fragen aus dem zweiten Schritt grafisch dargestellt (Goehlich et al., 2016).

Karvouniari et al. beschreiben in einem Konferenzbericht der 6th CIRP Global Web Conference eine Methode zur Integration von Exoskeletten in Fertigungslinien mit Hilfe von Virtual Reality (VR) mit dem Titel: „An approach for exoskeleton integration in manufacturing lines using Virtual Reality techniques“. Virtual Reality Technologien wirken hierbei unterstützend bei der Auswahl, Validierung und Einführung verschiedener Arten von Exoskeletten in die industrielle Umgebung. Es werden drei Konzepte vorgestellt, die alle zwei Hauptssysteme voraussetzen, nämlich das

Exoskelett und ein VR-System, wobei das Exoskelett von jedem Typ sein kann (Unter- oder Oberkörper, passiv oder aktive, etc.) und das VR-System wiederum aus Hardware- und Softwarekomponenten besteht. Mit Hilfe einer virtuellen Umgebung, die einem Fabrikbereich ähnelt, werden Exoskelett-Prototypen validiert und abgestimmt. Auch dient die virtuelle Umgebung bei der Entscheidungshilfe für die Bewertung der Eignung eines Exoskeletts für eine bestimmte Arbeitsumgebung und bei der effektiven und sicheren Schulung des Bedienpersonals im Umgang mit dem Exoskelett (Karvouniari et al., 2018).

2.3.3 Stärken, Schwächen und Herausforderungen

Nachfolgend wird analysiert, ob die drei vorgestellten Ansätze zur Auswahl von Exoskeletten die gestellten Anforderungen aus Kapitel 2.3.1 erfüllen. Es werden die Stärken und Schwächen beschrieben und Herausforderungen hervorgehoben. Dazu wurde Tabelle 19 erstellt, welche die Anforderungen auflistet und einen Überblick über die Analyse der vorgestellten Methoden gibt.

Die Verbreitung der drei vorgestellten Vorgehensweisen ist derzeit noch sehr gering. Beide Experten gaben im Zuge des Expertengesprächs an, dass ihnen keine Vorgehensweise zur Auswahl von Exoskeletten bekannt ist. Das liegt neben der Neuheit der Vorgehensweisen auch an deren hohen Komplexität und mangelnder Transparenz. Eine Herausforderung in der Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Auswahl von Exoskeletten liegt darin, die Benutzung des Modells so einfach wie möglich zu gestalten. Eine Möglichkeit dazu bietet die Verwendung von bereits in der Industrie gebräuchlichen Methoden.

Methoden zur Analyse des Arbeitsablaufs wie beispielsweise die weit verbreitete Methode MTM (Methods-Time Measurement) werden in keiner der Publikationen angewendet. Ebenso wird die methodische Bewertung des Ist-Zustands der vorliegenden ergonomischen Bedingungen eines Arbeitsplatzes nicht bei allen vorgestellten Ansätzen durchgeführt. Da Exoskelette jedoch laut Experten meist dann Verwendung finden, wenn an einem Arbeitsplatz ungewöhnlich hohe Mitarbeiterausfälle zu verzeichnen sind, ist eine Analyse des Ist-Zustands des Arbeitsplatzes unabdingbar.

Die aus den theoretischen Grundlagen an das Vorgehensmodell abgeleitete Anforderung zur Erstellung einer detaillierten und aussagekräftigen Morphologie von industriell einsetzbaren Exoskeletten kommt ansatzweise in einer Publikation vor. Zwei der drei Auswahlansätze weisen auf die Berücksichtigung marktreifer Exoskelette hin und führen eine Klassifizierung durch. Ob die in den Methoden verwendeten Exoskelette-Datenbanken auch um zukünftig erscheinende Exoskelette ergänzt werden bleibt unklar.

<i>Titel</i>	Methodology of Employing Exoskeleton Technology in Manufacturing by Considering Time-Related and Ergonomics Influences	Exoskeleton Portfolio Matrix	An approach for exoskeleton integration in manufacturing lines using Virtual Reality techniques
<i>Autor</i>	Christian Dahmen und Carmen Constantinescu	Goehlich et al.	Karvouniari et al.
<i>Verbreitung</i>	Gering	Gering	Gering
<i>Komplexität</i>	Mittel	Mittel	Hoch
<i>Verwendung von Methoden zur Arbeitsanalyse</i>	Nein	Nein	Nein
<i>Methodische Bewertung der ergonomischen Bedingungen am Arbeitsplatz</i>	k.A.	Nein	Ja
<i>Erstellung einer detaillierten Exoskelett-Morphologie</i>	Nein	Ja	Nein
<i>Klassifizierung der Exoskelette</i>	Ja	Ja	Nein
<i>Berücksichtigung marktreifer Exoskelette</i>	Ja	Ja	k.A.
<i>Aktuelle und erweiterbare Produktdatenbank</i>	k.A.	k.A.	k.A.
<i>Transparente Darstellung der Ergebnisse</i>	Nein	Ja	Ja

Tabelle 19: Analyse der vorgestellten Methoden

2.4 Zusammenfassung und Fazit

Ungeachtet der langjährigen Tendenz zur Automatisierung in der industriellen Produktion ist nach wie vor ein großer Teil der Arbeitnehmer körperlichen Belastungen durch Materialhandhabung am Arbeitsplatz ausgesetzt (etwa 30% der arbeitenden Bevölkerung in der Europäischen Union). 63% der Arbeitnehmer sind mit repetitiven Bewegungen und 46% mit ungünstigen Körperhaltungen konfrontiert. Die seit den letzten zehn Jahren in etwa stabil gebliebenen Daten zeigen den Umstand auf, dass für eine beträchtliche Anzahl von Arbeitnehmern immer noch ein hohes Risiko für arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) besteht. In der Europäischen Union leiden jährlich mehr als 40% der Arbeitnehmer an Schmerzen im unteren Rückenbereich oder in Nacken und Schulter (Parent-Thirion and Eurofund, 2012). Eine vollständige Automatisierung würde diese Probleme lösen, aber dies ist nicht immer machbar. In dynamischen Produktions- oder Lagerumgebungen beispielsweise erfordern eine hohe Produktvariantenanzahl und relativ kleine Auftragsgrößen ein hohes Maß an Flexibilität, und in solchen Fällen ist eine Vollautomatisierung entweder erst gar nicht möglich oder unerschwinglich teuer. In einem solchen Kontext ständig wechselnder Produkte und Aufgaben ist die menschliche Fähigkeit, innerhalb von Sekundenbruchteilen zu beobachten, zu entscheiden und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, nach wie vor notwendig. So sind die Arbeiter nach wie vor verschiedenen Produktionstätigkeiten wie Montage oder Materialhandhabung ausgesetzt und damit auch den damit verbundenen Risiken für die Entwicklung von Muskel-Skelett-Erkrankungen. In der modernen Industrie gibt es eine wachsende Bewegung hin zur Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, um den Einsatz von Robotern zu verbessern und gleichzeitig die Flexibilität des Menschen zu erhalten (MacDougall, 2014). Generell werden Assistenzsysteme in der Zukunft zunehmend an Bedeutung gewinnen und einen zentralen Gestaltungsgegenstand einnehmen. Neben digitalen, informatorischen Assistenzsystemen finden bereits heute vielfältige technische Assistenzsysteme, wie beispielsweise in Form von kooperativen und kollaborativen Robotersystemen Einzug in Produktionsunternehmen. Die Auswahl eines für den Anwendungsfall geeigneten Assistenzsystems und in weiterer Folge die Akzeptanz der Mitarbeiter in der Anwendung des Systems stellen zwei wesentliche Herausforderungen aus unternehmerischer Sicht dar.

Eine Lösung für oben genannte manuelle Handhabungsaufgaben ist der Einsatz von Exoskeletten. Durch Exoskelette als weitere Form technischer Assistenzsysteme wird die Mensch-Maschinen-Interaktion auf eine neue Stufe gehoben. Das Exoskelett ist ein Assistenzsystem, welches am Körper getragen wird und durch eine (elektro-)mechanische Unterstützung die Belastung auf den Körper oder Teile des Körpers reduziert und somit die Gefahr von Verletzungen verringert. Exoskelette als technische Assistenzsysteme eröffnen dabei die Möglichkeit einer Verbesserung der Arbeitssicherheit, besonders bei Tätigkeiten, bei denen aufgrund der Spezifik der

Arbeitssituation, (z.B. Zugänglichkeit des Arbeitsbereichs, Art des Arbeitsmittels bzw. Arbeitsgegenstands) bisher keine oder nur unzureichende technische Hilfsmittel, z.B. beim Heben schwerer Lasten oder bei Arbeiten in Zwangshaltung, eingesetzt werden können. Exoskelette ermöglichen eine stärkere Entlastung des Muskel-Skelett-Systems bei spezifischen Tätigkeiten. Einschlägige wissenschaftliche Begleitstudien, zum Beispiel in den Bereichen Arbeitsmedizin, Biomechanik/ Arbeitsphysiologie, Sicherheitstechnik, stehen jedoch erst am Anfang. Auch fehlt es bislang an spezifischen, auf Exoskelette ausgerichtete Normen, Standards und Richtlinien, obwohl der Fortschritt in der Exoskelett-Technologie nicht nur in den Bereichen Medizin und Militär, sondern auch in der Industrie enorm zugenommen hat (Gull et al., 2020, S. 24). Doch ähnlich wie bei digitalen und robotergestützten Assistenzsystemen ist die Vielfalt des Marktangebots bereits stark ausgeprägt und stellt Produktionsunternehmen vor die Herausforderung, das richtige System, eine geeignete Aufgabe und den richtigen Mitarbeiter in Bezug auf die richtige Unterstützung zu identifizieren. Dabei gilt es die Frage richtig zu beantworten, was bei der Auswahl von Exoskeletten von zentraler Bedeutung ist und wie dabei vorgegangen werden kann, um humanorientierte und betriebswirtschaftliche Ziele gemeinsam zu erreichen. Das Fehlen von Richtlinien und Vorgehensweisen in der Auswahl stellt für Unternehmen derzeit ein großes Hindernis in der Implementierung und im Einsatz von Exoskeletten dar.

Anhand der theoretischen Grundlagen sowie durchgeführter Experteninterviews werden die Anforderungen an das Vorgehensmodell zur Auswahl abgeleitet. Wesentlich für die korrekte Auswahl von Exoskeletten ist die Berücksichtigung des MTO-Konzepts. Der Einsatz von Exoskeletten muss sowohl für den zukünftigen Träger von Nutzen sein als auch wirtschaftliche Vorteile für das Unternehmen bieten. Eine transparente Erklärung und Darstellung des Modells führen zu einfacher Einsatzbarkeit und somit rascher und weiter Verbreitung. Eine zusätzliche Anforderung ist der Einsatz von standardisierten Methoden zur Beschreibung des Arbeitsablaufs und Analyse der ergonomischen Bedingungen bei der Arbeitstätigkeit im Vorgehensmodell. Wesentlich für eine korrekte Auswahl ist die präzise Einteilung sich aktuell am Markt befindender Exoskelett-Produkte anhand einer zuvor detailliert erstellen Morphologie.

Zur Untersuchung aktueller Methoden zur Auswahl von Exoskeletten dient eine systematische Literaturrecherche. Die Recherche ergab zehn relevante Treffer, wobei sich nur drei Ergebnisse direkt auf die Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion- und Logistikunternehmen beziehen. Die restlichen Resultate liefern lediglich oberflächliche Informationen, die kaum bei der Auslegung des Vorgehensmodells nützlich sind. Die von Karvouniari et al. in ihrem Konferenzbericht vorgestellte Methode stützt sich stark auf den Einsatz von Virtual Reality (VR) Technologien für die Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz. VR wird

aufgrund ihrer hohen Komplexität jedoch keine Anwendung in der in dieser Diplomarbeit vorgestellten Vorgehensweise finden. Sowohl die Methode von *Goehlich et al.* als auch jene von *Dahmen und Constantinescu* beginnen mit der Klassifizierung von bereits am Markt verfügbaren Exoskeletten. Die durch Umfragen identifizierten Anforderungen werden mit den Eigenschaften der Exoskelette verglichen. *Goehlich et al.* verzichten gänzlich auf Methoden zur Bewertung der ergonomischen Bedingungen bei der Durchführung der Arbeitstätigkeit, während *Dahmen und Constantinescu* verschiedene Ergonomie-Bewertungs-Methoden vergleichen.

Die Ergebnisse aus der Recherche werden auf Erfüllung der identifizierten Anforderungen überprüft. Es wird festgestellt, dass keine der vorgestellten Methoden eine weite Verbreitung in der Industrie aufweist. Mögliche Hindernisse stellen mangelnde Transparenz oder hohe Komplexität dar. Zur Ermittlung des geeigneten Exoskeletts wird beispielsweise auf hoch technologische Methoden wie Virtual Reality zugegriffen. Weit verbreitete Methoden zur Arbeitsablaufanalyse oder Ergonomie-Screening Methoden zur Ermittlung des Bedarfs an Exoskeletten werden in diesen publizierten Ansätzen nicht oder nur teilweise eingesetzt.

3 Forschungsbedarf, Ziel und Abgrenzung

Durch die Analyse des in Kapitel 2.3 beschriebenen Stands der Forschung im Bereich der Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion und Logistik werden Lücken in der aktuellen Forschung ersichtlich. Daraus lässt sich sowohl das Ziel der Arbeit ableiten als auch abschließend eine Abgrenzung durchführen.

3.1 Forschungsbedarf

Die in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Methoden verwenden unterschiedliche Ansätze, erfüllen die im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen jedoch nicht.

Die Durchführung einer Arbeitsablaufanalyse wie beispielsweise die Methode MTM wird in keiner der genannten Methoden eingesetzt. Sie bietet jedoch aufgrund ihrer präzisen Beschreibung der Arbeitstätigkeit eine geeignete Basis für ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten. Ebenso dient der Einsatz von Ergonomie-Screening Methoden zur Erfassung des ergonomischen Ist-Zustands als Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten Exoskeletts für einen vorliegenden Anwendungsfall. Jedoch findet nur in einer der vorgestellten Methoden eine Analyse der bestehenden ergonomischen Bedingungen am Arbeitsplatz statt.

Wie bereits erwähnt ist den befragten Experten außerdem aktuell kein strukturiertes Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten bekannt. Aus diesem Grund, und da die oben genannten Modelle die in Kapitel 2.3 definierten Anforderungen nicht erfüllen, besteht der Bedarf eines Vorgehensmodells, welches einerseits die wichtigsten Eigenschaften des Arbeitsplatzes und der Exoskelette miteinbezieht sowie transparent gestaltet ist und andererseits das MTO-Konzept berücksichtigt. Die Komplexität des Vorgehensmodells soll dabei geringgehalten werden, um eine einfache Anwendbarkeit zu garantieren und eine weite Verbreitung zu erreichen.

3.2 Ziel der Arbeit

Das aus dem oben genannten Forschungsbedarf abgeleitete Ziel der Diplomarbeit ist die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Unterstützung von österreichischen Unternehmen bei der Auswahl eines, zu ihrem Anwendungsfall passenden Exoskeletts unter Berücksichtigung der bereits definierten Anforderungen. Die Vorgehensweise in der Entwicklung richtet sich dabei nach dem in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten DSRM-Prozess (Peffer et al., 2007, S. 12–14). Als Basis dient die Arbeitsablaufanalyse MTM-UAS, welche um mehrere Parameter erweitert wird. Eine auf einer MTM-Analyse basierende Methode zur Auswahl von Exoskeletten existiert wie bereits erwähnt zum aktuellen Zeitpunkt nicht bzw. konnte im Zuge der durchgeführten explorativen Meta- und Desktoprecherche keine entsprechende Methode gefunden werden.

Gegenstand der Entwicklung des Vorgehensmodells ist die Durchführung einer umfassenden Meta- und Desktoprecherche über den aktuellen Entwicklungsstand von Exoskeletten. Über eine systematische Technologie- und Marktrecherche wird ein umfangreiches Hersteller- und Produktkompendium entwickelt. Eine datenbankspezifische Verdichtung der gewonnenen Erkenntnisse dienen dem, im Anschluss zu entwickelnden Vorgehensmodell als notwendige Datengrundlage. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird zunächst eine detaillierte Morphologie industriell einsetzbarer Exoskelette erstellt. Merkmale und Eigenschaften dieser Morphologie werden anschließend ausformuliert und im Hinblick auf Informationen zur Bestimmung analysiert. Mittels der Beschreibung ausgewählter Tätigkeiten auf MTM-UAS-Grundlage erfolgt eine initialisierende Analyse vorhandener Bestimmungsinformationen. Informationen, welche nicht mittels MTM-UAS Analysen erlebbar sind, werden analysiert und in einer erweiterten MTM-UAS Analyse berücksichtigt. Ein zu konzipierendes Regelwerk dient der Zuordnung der beschriebenen Tätigkeiten sowie der erweiterten Bestimmungsinformation zu den technischen Merkmalen in der Morphologie. Nach erfolgter Zuordnung wird das Exoskelett mit der höchsten Übereinstimmung zwischen der Beschreibung der Tätigkeit und seiner Morphologie ausgegeben. Erreichen mehrere Exoskelette eine ähnlich hohe Übereinstimmung, so werden alle aufgelistet und anhand eines definierten Faktors gereiht.

Zur Validierung des Modells dienen eine breit angelegte Anwenderbefragung sowie ein Studienansatz von ausgewählten Systemen in einer praxisorientierten Laborumgebung, der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. Die Anwenderbefragung erfolgt mittels einer quantitativen Usability Analyse. Als Test- und Versuchsprobanden wird auf Studierende der TU Wien aus dem Ingenieursbereich zugegriffen. Bei der Auswahl der Probanden wird auf eine repräsentative Aufteilung geachtet. In der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 werden hierzu spezifische Use-Cases in den Bereichen Montage und Logistik konzeptioniert.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Verwendeten Methoden, welche in den verschiedenen Phasen des Design-Science-Research-Methodology Prozesses angewendet werden.

<i>Phase</i>	<i>Verwendete Methoden</i>
<i>Entwerfen und Entwickeln</i>	Technologie- und Marktrecherche Klassifizierung der Exoskelette Arbeitsablaufanalyse Ergonomie-Bewertungs-Methode
<i>Demonstration</i>	Funktionsorientierte Durchführung in Laborumgebung
<i>Validierung</i>	Anwenderbefragung

Tabelle 20: Methodische Vorgehensweise der Diplomarbeit

3.3 Abgrenzung der Arbeit

Das zu entwickelnde Vorgehensmodell ist insbesondere für die Anwendung in der produzierenden Industrie, vorwiegend in den Bereichen Produktion, Montage und Logistik bestimmt. Da die Basis des Modells, die Methode zur Arbeitsablaufanalyse MTM-UAS üblicherweise in der Serienfertigung eingesetzt wird, beschränkt sich auch das Vorgehensmodell auf Unternehmen deren Fokus auf der Produktion mehrerer gleichartiger Produkte liegt. Der Einsatz des Modells bei Einzelfertigungen ist, wie auch bei Mengenfertigungen, prinzipiell möglich, MTM-UAS ist für diese beiden Produktionstypen jedoch nicht geeignet. Die Anwendung der Methode MTM setzt eine mehrwöchige Ausbildung voraus.

Der Schwerpunkt beim Einsatz von weiteren standardisierten Methoden und Werkzeugen, die für die Vorgehensweise zur Auswahl von Exoskeletten in Produktion und Logistik benötigt werden liegt in der einfachen Handhabung und weiten Verbreitung. Die Methoden sollen klare Ergebnisse liefern und ohne Absolvierung von zusätzlichen Ausbildungen angewendet werden können. Vor der Auswahl der Methoden für das Vorgehensmodell werden diese auf ihre Tauglichkeit überprüft.

Das Vorgehensmodell greift auf eine umfassende Datenbank von sich derzeit am Markt befindenden Exoskelette zu. Diese Datenbank beinhaltet sowohl aktive als auch passive Exoskelett-Produkte von Herstellern weltweit. Nicht aufgelistet werden jedoch Exoskelette, die sich noch am Anfang ihrer Entwicklung befinden und erst in der Zukunft erhältlich sein werden. Um künftig erscheinende Exoskelette lässt sich die Datenbank ohne großen Aufwand erweitern.

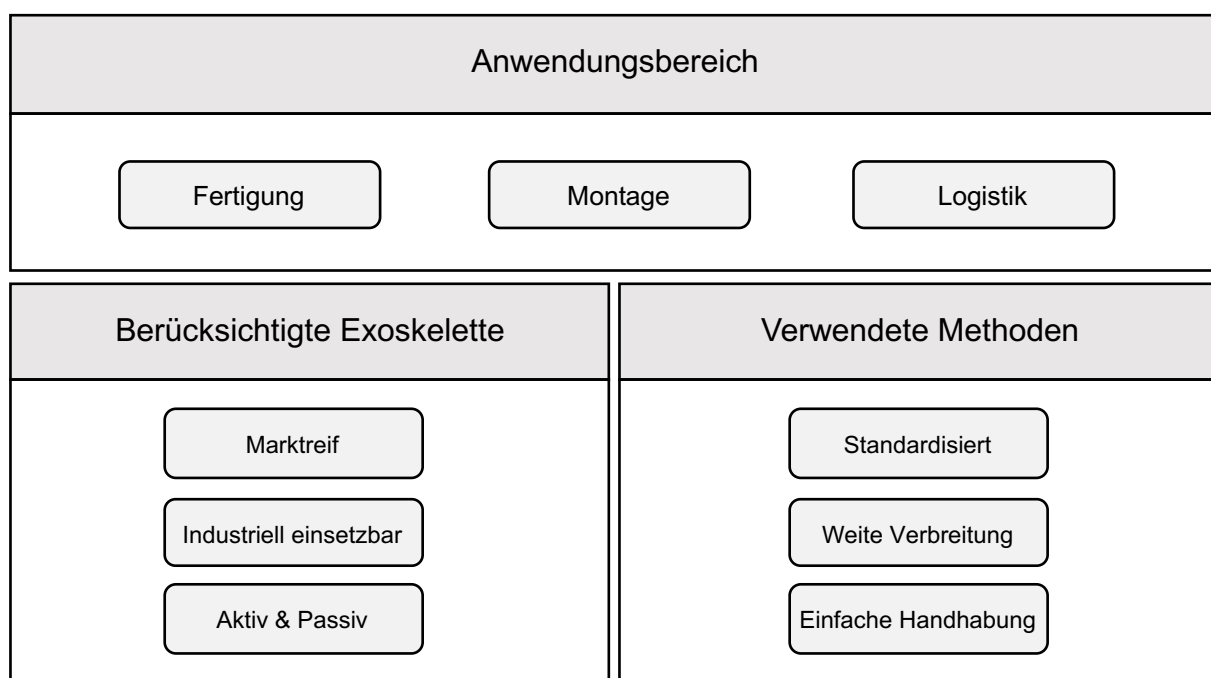


Abbildung 12: Abgrenzung

4 Konzeption und Entwicklung

Das folgende Kapitel behandelt die dritte Phase – Entwerfen und Entwickeln des DSRM-Prozesses. In der Konzeptionierung des Vorgehensmodells werden die Erkenntnisse aus der in Kapitel 2.3.1 durchgeführten Anforderungsanalyse zu einem groben Konzept zusammengefasst. Das Konzept des Vorgehensmodells besteht wiederum aus mehreren Komponenten, welche nachfolgend einzeln beschrieben werden. Das vierte Unterkapitel beschäftigt sich mit der Ausarbeitung bzw. Entwicklung des Modells auf Basis der zuvor erklärten Komponenten.

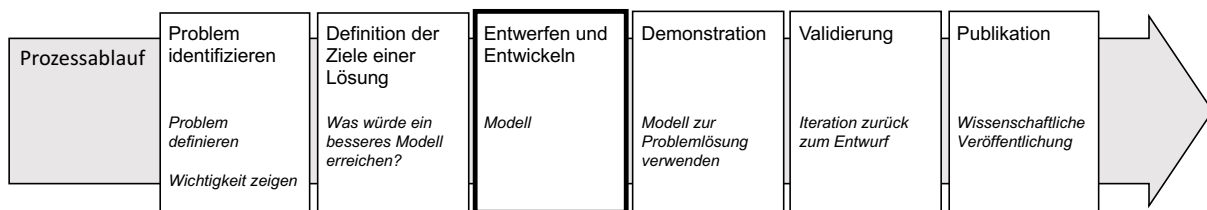


Abbildung 13: DSRM - Konzeption des Vorgehensmodells (vgl. Peffers et al., 2007, S. 12–14)

4.1 Konzeption des Vorgehensmodells

Aufgrund der Resultate aus der Anforderungsanalyse wird im Folgenden die grundlegende Vorgehensweise im Vorgehensmodell erläutert.

Wie bereits beschrieben, stellt die Akzeptanz der Mitarbeiter gegenüber dem neuartigen Assistenzsystem eines der zentralen Kriterien bei der Auswahl und in weiterer Folge auch bei der Implementierung und Nutzung dar. Die Basis des Vorgehensmodells ist somit die ganzheitliche Betrachtung der Produktion, Montage und Logistik als sozioökonomische Systeme mit Hilfe des in Kapitel 2.1 dargestellten MTO-Prinzips. Ausgehend von der Arbeitsaufgabe werden die Zusammenhänge zwischen Mensch, Technik und Organisation analysiert, um Kriterien abzuleiten und die Auswahl von Exoskeletten effektiver und effizienter zu gestalten. Gleichzeitig führt die menschenzentrierte Analyse zu einer höheren Technikakzeptanz zukünftiger Nutzer.

Für die Implementierung von Exoskeletten als Assistenzsystem am Arbeitsplatz wurde eine, dem Auswahlverfahren übergeordnete, Vorgangsweise (siehe Abbildung 14) entwickelt, welches die Schritte des MTO-Prinzips berücksichtigt.

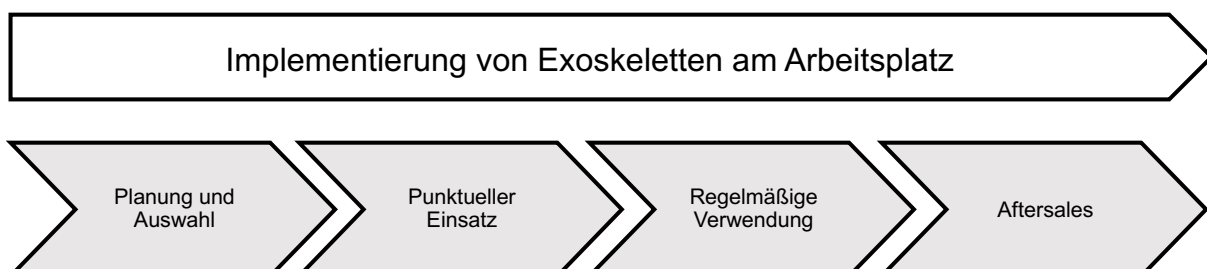


Abbildung 14: Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz (vgl. Noonee, 2020)

Die erste Phase beschäftigt sich mit dem Erfassen des Ist-Zustands mittels einer Arbeitsablaufanalyse, der Durchführung von Mitarbeitergesprächen und Anforderungsanalysen, der Auswahl des geeigneten Exoskeletts sowie der Projektpräsentation. Als Unterstützung in der Auswahlphase dient das in dieser Diplomarbeit konzipierte Vorgehensmodell. Auf dieser Phase liegt demnach das Hauptaugenmerk.

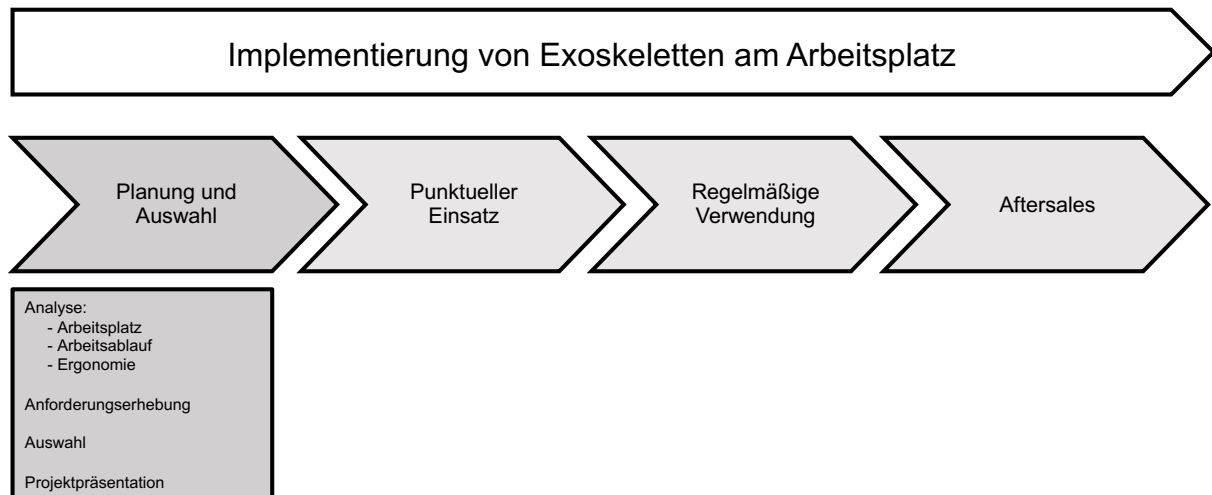


Abbildung 15: Phase 1 - Planung und Auswahl (vgl. Noonee, 2020)

Folgende vier Methoden bilden die wesentlichen Elemente der Vorgehensweise bei der Auswahl ab:

- Arbeitsablaufanalyse
- Ergonomieanalyse
- Morphologischer Kasten
- Produktkompedium

Nach einer erfolgten Arbeitsablaufanalyse wird mittels eines Werkzeugs zur Ermittlung der tatsächlichen vorhandenen physischen Arbeitsbelastung eine Gefährdungsbeurteilung erstellt. Auf Basis dieser Beurteilung kann die Entscheidung ob der Notwendigkeit des Einsatzes eines Exoskeletts getroffen werden. Mit Hilfe von Mitarbeitergesprächen und eines Fragebogen-gestützten Quick-Checks werden außerdem Erwartungen und Anforderungen der Mitarbeiter an potentiell einsetzbare Exoskelette erhoben. Die somit gewonnenen Erkenntnisse aus der Arbeitsablaufanalyse sowie der Anforderungserhebung dienen als notwendige Voraussetzungen für die Auswahl eines für den Arbeitsplatz passenden Exoskeletts. Mit Hilfe der Daten aus der Arbeitsablaufanalyse können die Anforderungen an das Exoskelett identifiziert und in einen Morphologischen Kasten eingetragen werden. Der Morphologische Kasten wird im Anschluss mit der Produktdatenbank - dem Ergebnis einer umfassenden Marktrecherche - abgeglichen und somit wird das Exoskelett, bei dem die Produkteigenschaften die höchste Übereinstimmung mit den Anforderungen

haben, ermittelt. Nach gelungener Auswahl werden die erzielten Ergebnisse schlussendlich in einer Projektpräsentation erklärt.

Abbildung 16 zeigt den Ablauf im Auswahlverfahren, die genannten vier Elemente sind in Orange dargestellt. In den folgenden Kapiteln wird auf die vier Elemente noch im Detail eingegangen.



Abbildung 16: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

Im zweiten Schritt werden Mitarbeiter für einen punktuellen Einsatz ausgewählt und auf das Exoskelett eingeschult. Unter Aufsicht des Exoskelette-Herstellers wendet der Mitarbeiter das Assistenzsystem für mehrere Wochen an. Parallel zum Testeinsatz wird ein Implementierungsplan erstellt. Dieser enthält Informationen zum Ablauf der Einführung von Exoskeletten im Unternehmen. Messgrößen zur Analyse der durch das Assistenzsystem erlangten Verbesserungen, beispielsweise Produktivitätssteigerung, Erhöhung der Qualität, Senkung der Fehlerquote, etc. werden festgelegt. Am Ende dieser Phasen finden bereits Erhebungen bezüglich Benutzerfreundlichkeit und Benutzererfahrungen mit dem Exoskelett statt.

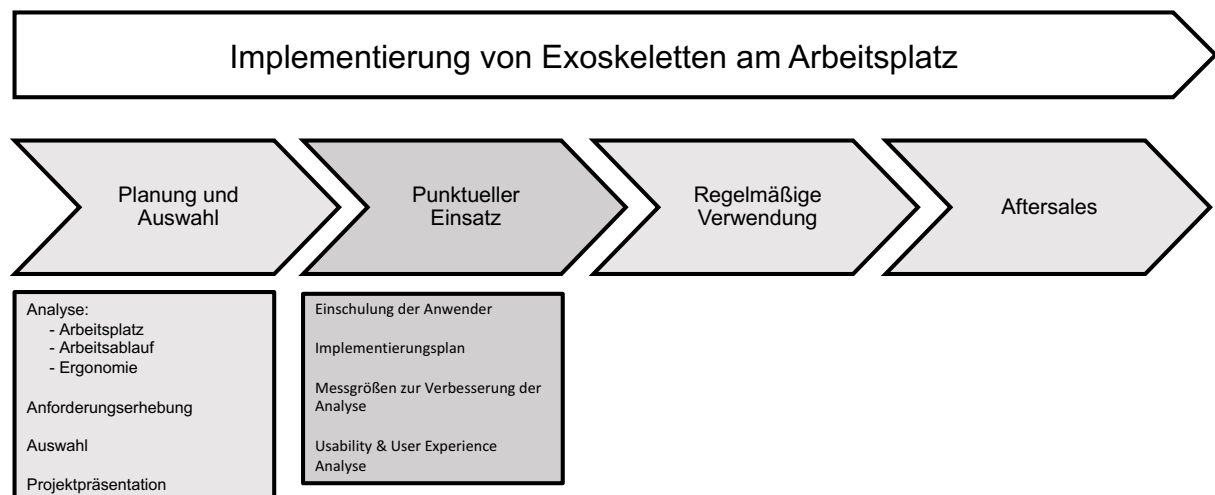


Abbildung 17: Phase 2 - Punktuelle Einsatz (vgl. Noonee, 2020)

In Phase drei findet bereits regelmäßiger Einsatz des Exoskeletts am Arbeitsplatz statt. Die in Phase 2 bestimmten Messgrößen werden analysiert und Feedback der Mitarbeiter eingeholt. Erfüllt die Nutzung des Assistenzsystems die in Phase 1

erhobenen Erwartungen, werden im letzten Schritt Wartungspläne erstellt und wenn möglich, Individualisierungen an den Exoskeletten vorgenommen.

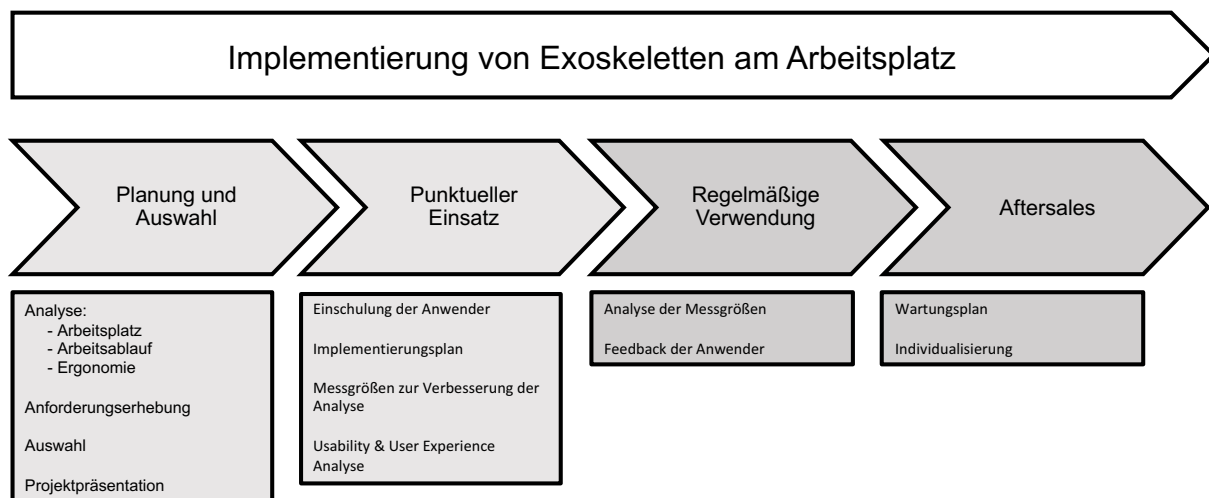


Abbildung 18: Phasen 3 und 4 - Regelmäßige Verwendung und Aftersales (vgl. Noonee, 2020)

4.2 Entwicklung des Vorgehensmodells

Das folgende Kapitel widmet sich der Entwicklung des Vorgehensmodells. Hierfür werden zunächst die Methoden Morphologie, Produktkompendium, Arbeitsablaufanalyse und Ergonomieanalyse, welche die vier Bestandteile des Vorgehensmodells darstellen, separat beschrieben. Kapitel 4.2.3 beschreibt das Regelwerk anhand dessen die verschiedenen Methoden im Vorgehensmodell wirken.

4.2.1 Morphologie, Technologie und Marktübersicht

Basierend auf der in Kapitel 2 beschriebenen Klassifizierung von Exoskeletten wird in diesem Kapitel die Morphologie von Exoskeletten erstellt. Diese stellt die Grundlage des morphologischen Kastens, einer Methode zur Suche von Lösungsmöglichkeiten, dar.

Diese Methode dient der Erarbeitung von Lösungsvarianten auf Basis vorhandener Informationen, wobei alle Lösungselemente, deren Ausprägungen sowie logisch denkbare Kombinationen als Möglichkeiten zur Lösung des Problems systematisch zusammengetragen werden (Schawel and Billing, 2018, S. 219). Das Problem ist im Kontext dieser Diplomarbeit die Auswahl eines für einen vorliegenden Einsatzfall passenden Exoskeletts anhand der, mit den bereits beschriebenen Methoden MTM und LMM identifizierten Anforderungen.

Der morphologische Kasten beruht auf einer schematischen, übersichtlichen Darstellung in Matrizenform und schafft somit Orientierung über eine Vielzahl von Informationen und Eigenschaften des behandelnden Problems (Nöllke, 2004, S. 105).

Die Vorgehensweise beim morphologischen Kasten gliedert sich in fünf Schritte, welche im Folgenden aufgelistet werden (Nöllke, 2004, S. 106):

1. Kategorien definieren
2. Eigenschaften auflisten
3. Matrix erstellen
4. Kombinationen festlegen
5. Lösung auswählen

Die folgende Tabelle 21 zeigt ein Beispiel für einen morphologischen Kasten. Die Kombination der fett geschriebenen Ausprägungen bildet einen Lösungsvorschlag.

<i>Dimension</i>	<i>Ausprägungen</i>			
<i>Länge</i>	5cm	10cm	15cm	usw.
<i>Farbe</i>	Braun	Blau	Grün/Gelb	usw.
<i>Kabelquerschnitt</i>	0,5mm²	0,75mm²	1,0mm²	usw.
<i>Isolierstoff</i>	Kautschuk	Silikonharz	PVC	usw.
<i>usw.</i>	usw.	usw.	usw.	usw.

Tabelle 21: Morphologischer Kasten (Schawel and Billing, 2018, S. 220)

Abbildung 19 zeigt die Matrix der Morphologie von industriell einsetzbaren Exoskeletten. Diese wird zu den in Kapitel 2 beschriebenen Klassifizierungsmöglichkeiten noch um weitere Dimensionen ergänzt. Bereits erwähnt wurden die grundlegenden Unterscheidungen hinsichtlich des Aufbaus von Exoskeletten, im folgenden Typ genannt, und der Funktionsweise genauso wie die Einteilung nach der unterstützten Körperregion, der Energieversorgung/-umleitung und dem Grad der Anthropometrie und der damit einhergehenden Anzahl an Freiheitsgrade.

Exoskelette für den industriellen Einsatz lassen sich jedoch auch hinsichtlich der Art der Unterstützung zwischen Kraft, Ausdauer und Geschwindigkeit unterscheiden. Beispielsweise bietet Chairless Chair des Herstellers Noonee die Möglichkeit, mühelos zwischen Sitz-, Steh- und Gehpositionen zu wechseln und erhöht dadurch die Ausdauer des Trägers, insbesondere bei Tätigkeiten, die in leicht hockender Position ausgeführt werden müssen. Das Exoskelett Cray X von German Bionic wiederum ahmt Hebetätigkeiten aktiv nach und unterstützt den Mitarbeiter bei der Ausübung. Somit wird die Rückenmuskulatur nicht nur entlastet, sondern auch verstärkt.

Entscheidend für die Auswahl eines passenden Exoskeletts ist die Höhe der gebotenen Unterstützungskraft bzw. des Unterstützungsmoments. Die Einteilung erfolgt in den drei Kategorien Niedrig, Mittel und Hoch, wobei die Kategorie Niedrig alle Exoskelette umfasst die eine unterstützende Kraft von unter 50N, bzw. ein

unterstützendes Moment von unter 50Nm aufbringen. Die Kategorie Mittel reicht von 50N bis 150N bzw. 50Nm bis 150Nm und die Kategorie Hoch umfasst alle Exoskelette, die mit mehr als 150N bzw. 150Nm unterstützen.

Die Hersteller von Exoskeletten geben in den Produktbeschreibungen oftmals sowohl die Einsatzbereiche als auch die Tätigkeiten, für welche das Exoskelett entwickelt wurde, an. Der Einsatzbereich lässt sich zwischen Lagereingang, Kommissionierung, Fertigung, Lackiererei, Montage und Verpackung/Versand und die Tätigkeit zwischen Handwerk, Hebetätigkeit, Überkopfarbeit und Haltungskorrektur unterscheiden. In manchen Einsatzbereichen spielt auch die Wasser- und Staubfestigkeit eine entscheidende Rolle.

Ob weitere persönliche Schutzausrüstungen getragen werden können, entscheidet sich dadurch, ob ein Exoskelett eng am Körper des Trägers anliegt oder ob einzelne Komponenten des Assistenzsystems vom Körper abstehen. Beispielsweise werden bei Lackierarbeiten Overalls getragen, wofür nur schlanke Exoskelette ohne vorstehende Komponenten geeignet sind.

Das Gewicht des Assistenzsystems sowie der Tragekomfort sind ausschlaggebend für die Dauer der Tragezeit sowie der Akzeptanz des Exosketts beim Mitarbeiter. Weiche und textile Komponenten, sowie ein niedriges Gesamtgewicht erhöhen den Komfort, während harte und starre Bauteile das Wohlbefinden beim Tragen senken. Schwere Exoskelette erhöhen außerdem das Verletzungsrisiko, beispielsweise bei Stürzen und sollten bei rutschigen oder unebenen Bodengegebenheiten keine Verwendung finden. Die verschiedenen Produkte sind jeweils für eine bestimmte Körpergröße des Anwenders konzipiert. Es muss bei der Auswahl demnach darauf geachtet werden, dass die vorgegebene Größe mit der Körpergröße übereinstimmt.

Aktive Exoskelette lassen sich außerdem noch hinsichtlich ihrer Laufzeit unterscheiden. Insbesondere die Laufzeit Akku-betriebener Typen reicht von wenigen Stunden (< 4h) bis über die Dauer eines Arbeitstages (> 8h). Manche aktiven Exoskelette können jedoch auch direkt über das Stromnetz betrieben werden.

Dimension	Ausprägung					
Typ	Aktiv			Passiv		
Funktionsweise	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch	Mechanisch		
Energieversorgung/ -umleitung	Akku	Stromnetz	Druckluft	Feder	Seilzug	
Unterstützte Körperregion	Nacken	Schultern	Arme	Hände	Wirbelsäule	Beine
Unterstützungsart	Kraft		Ausdauer		Geschwindigkeit	
Unterstützende Kraft/Entlastung	Niedrig < 50N, < 50Nm		Mittel 50N - 150N, 50Nm - 150Nm		Hoch > 150N, > 150Nm	
Einsatzbereich	Lagereingang	Kommissionierung	Fertigung	Lackiererei	Montage	Verpackung/Versand
Tätigkeit	Handwerk	Hebetätigkeit	Überkopfarbeit	Haltungskorrektur		
Passform	Enganliegend			Abstehend		
Grad der Anthropometrie	Anthropomorph		Quasi-Anthropomorph		Non-Anthropomorph	
Größe	< 160cm		160cm - 185cm		> 185 cm	
Anzahl der Freiheitsgrade	< 3		3 - 5		> 5	
Komfort	Weich, textil			Hart, starr		
Gewicht	Leicht (< 5kg)		Mittel (5kg - 10kg)		Schwer (> 10kg)	
Laufzeit	Kurz (< 4h)	Mittel (4h - 8h)	Lang (> 8h)	Keine Beschränkung		
Wasser-/ Staubfestigkeit	Kein Schutz		Mittlerer Schutz (bis IP44)		Staub- und wasserfest (ab IP55)	

Abbildung 19: Morphologie industriell einsetzbarer Exoskelette

Eine weitere Komponente des Vorgehensmodells zur Auswahl von Exoskeletten ist das Ergebnis einer Marktanalyse, eine Datenbank bestehend aus Produktinformationen von derzeit am Markt verfügbaren Exoskeletten zum Einsatz in der industriellen Produktion. Um die notwendigen Informationen zu erhalten, werden in der ersten Phase die Entwickler, Produzenten und Anbieter von Exoskeletten ermittelt. Ein guter Überblick über die Hersteller kann erzielt werden, wenn sich die Suche vorerst auf Hersteller aller Arten von Exoskeletten bezieht und eine Unterscheidung in medizinische Exoskelette, militärische Exoskelette, sowie Exoskelette für den industriellen Einsatz erst in einem nächsten Schritt stattfindet. Die Informationsbeschaffung besteht ausschließlich aus einer Internetrecherche, in der sowohl deutsche als auch englische Begriffe verwendet werden. Nach der Identifikation der Hersteller folgt eine Einteilung in die Bereiche Medizin, Militär und Industrie sowie eine Auflistung deren Exoskelett-Produkte. Die Eigenschaften dieser Produkte werden im letzten Schritt zu einer Datenbank verdichtet.

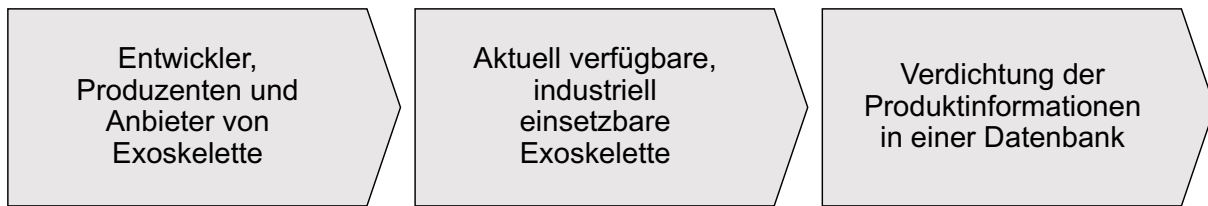


Abbildung 20: Vorgehensweise in der Marktanalyse

Vorläufige Ergebnisse dieser Marktanalyse wurden in Form einer Herstellerliste in einem im September 2020 erschienenen Whitepaper mit dem Titel Exoskelette in Produktion und Logistik – Grundlagen, Morphologie und Vorgehensweise zur Implementierung präsentiert (Hold et al., 2020, S. 14). Für die Verwendung als Grundlage im Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten wird diese Liste noch um weitere Produzenten ergänzt.

Insgesamt konnten aufgrund der Marktanalyse 22 Hersteller von marktreifen und für den Einsatz in Produktion und Logistik relevanten Exoskeletten gefunden werden. Folgende Grafik (Abbildung 21) zeigt Hersteller von Exoskeletten, eingeteilt in die drei Bereiche: Medizin, Militär und Industrie.

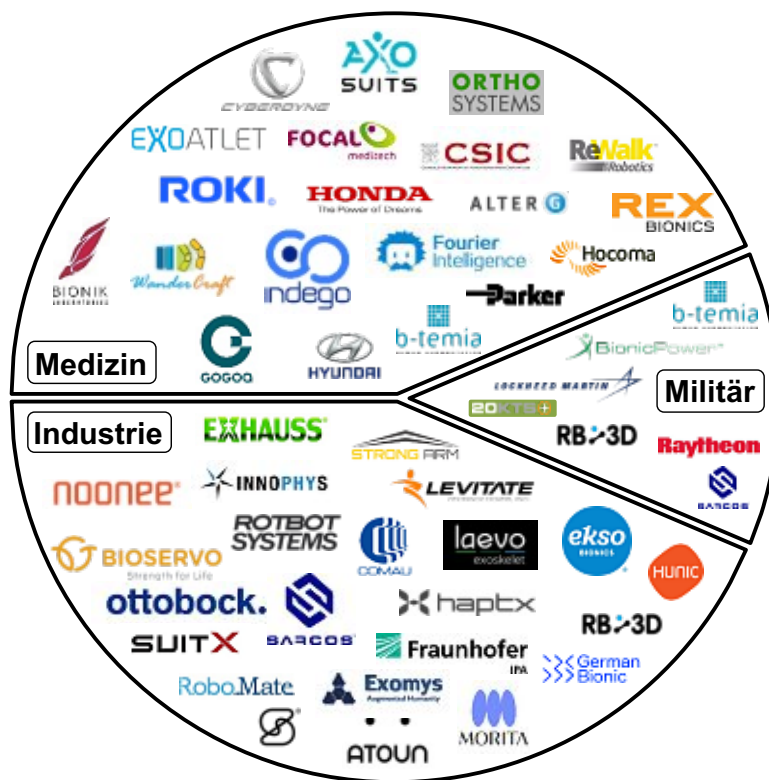


Abbildung 21: Hersteller von Exoskeletten

In der zweiten Phase werden die Produkte der in Phase 1 identifizierten Hersteller aufgelistet und beschrieben. Insgesamt verfügen die 22 Hersteller über 35 Exoskelette, die in der Industrie eingesetzt werden können. Die folgende Tabelle beinhaltet die 22 Hersteller inklusive deren Exoskelett-Produkte. Weiterführende

Informationen zu den jeweiligen Herstellern sowie deren Produkte werden im Kapitel 7 dieser Diplomarbeit angeführt.

<i>Unternehmen</i>	<i>Produkt</i>	<i>Typ</i>	<i>Unternehmenssitz</i>
Atoun	Model Y	Aktiv	Japan
Bioservo	Ironhand	Aktiv	Schweden
Comau	Mate	Passiv	Italien
Cyberdyne	Hal Lumbar Type for labor support	Aktiv	Japan
eksoBionics	Ekso Vest	Passiv	USA
Exhauss	System	Passiv	Frankreich
Exhauss	Picker	Passiv	Frankreich
Exomys	Atlas	Passiv	Österreich
Exomys	Daedalus	Passiv	Österreich
Fraunhofer IPA	Stuttgart Exo-Jacket	Aktiv, Passiv	Deutschland
German Bionic	Cray X	Aktiv	Deutschland
Hunic	SoftExo	Passiv	Deutschland
Innophys	Muscle Suit	Passiv	Japan
Innophys	Muscle Suit Edge	Passiv	Japan
Innophys	Muscle Suit Every	Passiv	Japan
Innophys	Muscle Suit Power	Aktiv	Japan
Innophys	Muscle Upper	Aktiv	Japan
Laevo	Laevo V2	Passiv	Niederlande
Levitate	Airframe	Passiv	USA
Morita	Rakunie	Passiv	Japan
Noonee	Chairless Chair	Passiv	Deutschland
Ottobock	Paexo Shoulder	Passiv	Deutschland
Ottobock	Paexo Back	Passiv	Deutschland
RB3D	Hercule V3	Aktiv	Frankreich
RB3D	Exoback	Aktiv	Frankreich
Robo.Mate	Active Arms	Aktiv	Deutschland
Robo.Mate	Passive Arms	Passiv	Deutschland
Robo.Mate	Active Trunk	Aktiv	Deutschland
Sarcos	Guardian XO	Aktiv	USA
SkelEx	360-XFR	Passiv	Frankreich
Strongarm Tech	V22 ErgoSkeleton	Passiv	USA
Strongarm Tech	FLx ErgoSkeleton	Passiv	USA
US Bionics	SuitX BackX AC	Passiv	USA
US Bionics	SuitX LegX	Passiv	USA
US Bionics	SuitX ShoulderX	Passiv	USA

Tabelle 22: Hersteller von industriell einsetzbaren Exoskeletten

4.2.2 Arbeitsablaufanalyse und Leitmerkmalermethode

Die Grundlage des Vorgehensmodells zur Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion und Logistik bildet eine Arbeitsablaufanalyse mit Hilfe der Methode MTM.

Method Time Measurement (MTM) ist ein Verfahren zur Analyse von Arbeitsabläufen und Ermittlung von Planzeiten. Es zerlegt jede manuelle Bedienung oder Tätigkeit in die Grundbewegungen, die zu ihrer Ausführung erforderlich ist und weist jeder Bewegung eine vorgegebene, standardisierte Zeit zu. Diese Zeit ist abhängig von der Art der Bewegung und den Bedingungen, unter denen sie ausgeführt werden (Antis et al., 1973). Diese Zeitwerte sind in einer vereinfachten Tabelle gruppiert, die es erlaubt, jede von einem Bediener ausgeführte Operation zu entwerfen, zu untersuchen, zu analysieren und zu quantifizieren. Neben der Schnelligkeit der Durchführung ermöglicht das MTM eine Vereinheitlichung der Arbeitsabläufe und bietet die Möglichkeit, Arbeitsabläufe festzulegen, noch bevor das Produkt hergestellt wird. Durch die Optimierung der Arbeitsabläufe werden die Kosten des herzustellenden Produkts reduziert (Tajini and Elhaq, 2014, S. 482).

MTM ist das am häufigsten eingesetzte System vorbestimmter Zeiten, wodurch ein weltweit einheitlicher Planungs- und Leistungsstandard für globale agierende Unternehmen geschaffen wird (Kuhlang et al., 2011).

Vorgehensweise in der Zeitermittlung mittels MTM (REFA, 2015, S. 242–245):

1. Auswahl des für das Einsatzgebiet anzuwendenden Analyse-Systems entsprechend der von MTM empfohlenen Aggregationsebenen. Abbildung 22 gibt einen Überblick über die Auswahl des geeigneten MTM-Systems
2. Beschreibung der Arbeitsbedingungen
3. Beobachten (Ausführungsanalyse) oder Vorausdenken (Planungsanalyse) des Arbeitsablaufes
4. Gliederung des Arbeitsablaufes: Auf der Ebene von Teilvorgängen wird der Arbeitsablauf in sinnvolle Ablaufabschnitte gegliedert.
5. Kodierung der beobachteten bzw. geplanten Ablaufabschnitte nach dem MTM-Datensystem entsprechend den Einflussgrößen des gewählten Analyse-Systems
6. Zeitbestimmung

Folgende Abbildung 22 zeigt einen Überblick über die verschiedenen MTM Verfahren. MTM-1 wird insbesondere bei Mengenfertigung, bei der die Bewegungsfolgen permanent zyklisch wiederholt werden und eine definierte Produktvariante produziert wird eingesetzt. MTM-UAS dient als Methode zur Arbeitsablaufanalyse von Arbeitsbewegungen mit begrenzt längerzyklischen Wiederholungen. Das Einsatzgebiet dieser Methode liegt in der Serienfertigung, bei der der Arbeitsplatz für ein definiertes Produktspektrum definiert ist. Für die Analyse von Arbeitsabläufen in der Einzelfertigung kommt die MTM Methode MEK zur Anwendung. Der Arbeitsplatz

bei der Einzelfertigung ist auf nahezu beliebige Produktvarianten und Prozesse ausgelegt und zyklische Wiederholungen der Arbeitsbewegungen finden nicht statt (REFA, 2015, S. 242–245).

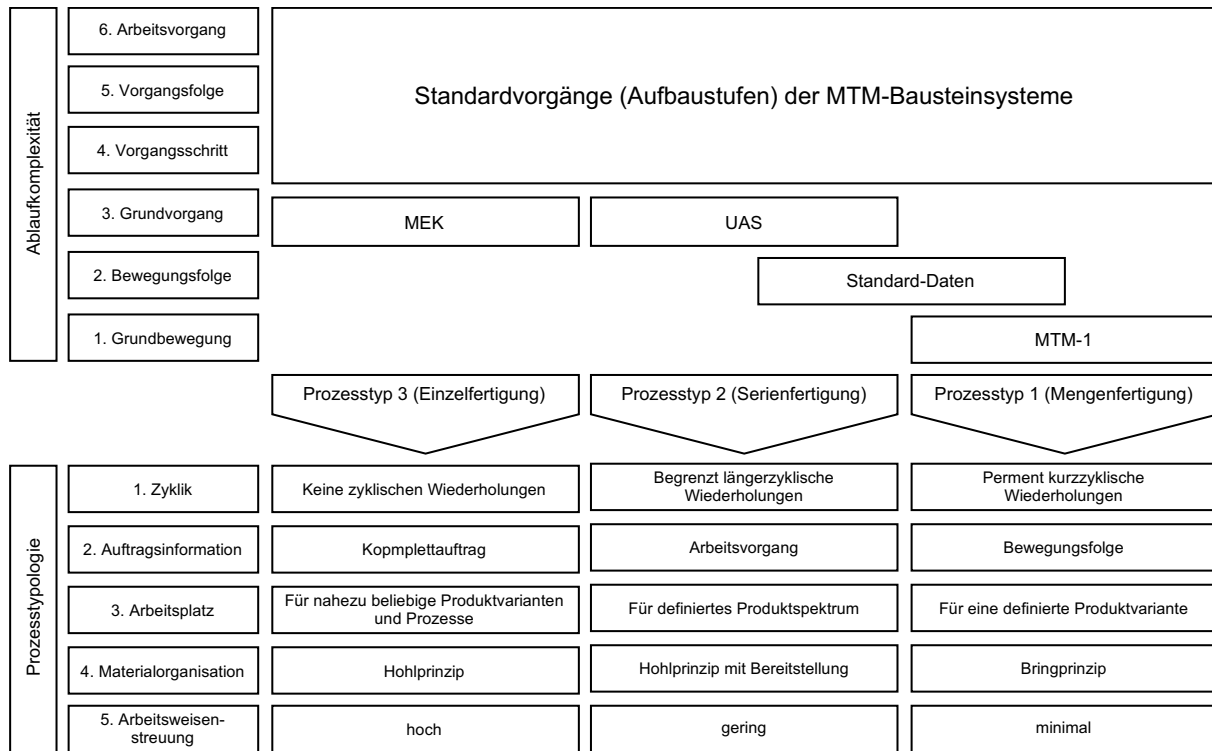


Abbildung 22: Auswahl eines MTM-Verfahrens (REFA, 2015, S. 242–245)

In der Vorgehensweise zur Auswahl von Exoskeletten kommt MTM-UAS zum Einsatz. Diese Methode kombiniert einzelne Bewegungen zu Grundvorgängen, welche die Abbildung beliebiger Arbeitstätigkeiten ermöglicht. Der Detaillierungsgrad ist bei MTM-1 höher als bei UAS, die Beschreibung des Arbeitsablaufs in all seine einzelnen Bewegungen wird für die Auswahl jedoch nicht vorausgesetzt. MTM-UAS bietet somit eine geeignete Grundlage zur Auswahl von Exoskeletten. Um auf Basis der MTM-Analyse eine präzise Entscheidung treffen zu können, wird die Analyse um die drei Faktoren Armposition, Körperteil und Gewicht zu einer erweiterten MTM-Analyse ergänzt.

Tabelle 23 zeigt ein Beispiel einer erweiterten MTM-Analyse eines Arbeitsablaufes.

Nr.	Beschreibung	Kode	TMU	AxH	Σ	Armposition	Körperteil	Gewicht
1	Klemme nehmen	AF3	80	4	320	Brusthöhe	Arme	< 10kg
2	Werkzeug platzieren	HC1	80	1	80	Überkopfhöhe	Arme	< 10kg
3	1. Drehung	ZA1	5	1	5	Überkopfhöhe	Schultern	< 10kg
4	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70	Überkopfhöhe	Schultern	< 10kg

Tabelle 23: Beispiel einer erweiterten MTM-UAS Analyse

Die Abkürzung TMU steht hierbei für time measure unit und die Abkürzung AxH für Häufigkeit. Diese beiden Informationen beschreiben die für die Arbeitstätigkeit benötigte Zeit und die Anzahl der Bewegungen und sind für die Durchführung der Ergonomiebewertung entscheidend. Mit Hilfe des Faktors Armposition sowie den in der dritten Spalte angeführten Codes kann auf die Art der Arbeitstätigkeit geschlossen werden. Es wird zwischen den Kategorien Handwerk, Hebetätigkeit und Überkopfarbeit unterschieden. Auch diese Einteilung hat einen Einfluss auf die Ergonomiebewertung. Die vorletzte Spalte Körperteil bezieht sich auf die, bei der Arbeitstätigkeit beanspruchte Körperregion. Zur Auswahl stehen: Nacken, Schultern, Arme, Hände, Wirbelsäule und Beine. Die letzte Spalte beschreibt das Gewicht des zu manipulierenden Gegenstandes oder Werkzeugs.

Ganzheitliche Bewertungsmethoden zur Erhebung der Einflüsse, welche von Exoskeletten in einer industriellen Umgebung auf den menschlichen Körper wirken, gibt es derzeit keine. Dahmen und Hefferle (2018) konnten jedoch aus 36 verschiedenen wissenschaftlichen Methoden zur Arbeitsplatzbewertung fünf Methoden identifizieren, welche sie als geeignet für die Bewertung von Arbeitsplätzen, an denen Exoskelette eingesetzt werden, empfinden. Bei den fünf ausgewählten Methoden handelt es sich um gebräuchliche industrielle Instrumente zur Beurteilung der ergonomischen Arbeitsplatzsituation. Außerdem berücksichtigen sie Faktoren, die für die wichtigsten Vorteile und Auswirkungen von Exoskeletten relevant sind (Dahmen and Hefferle, 2018, S. 19).

Methode	Berücksichtigt Einflüsse von Exoskeletten				Anwendung setzt Ausbildung voraus
	Positive Einflüsse		Negative Einflüsse		
	<i>Belastungsreduktion oberer Gliedmaßen</i>	<i>Armstütze</i>	<i>Zusätzliches Gewicht am Körper</i>	<i>Andere Faktoren</i>	
EAWS	X	X		X	Ja
LMM	X			X	Nein
REBA		X			Nein
RULA	X	X	X		Nein

Tabelle 24: Ausgewählte Bewertungsmethoden (Dahmen and Hefferle, 2018)

Im Rahmen des zu konzipierenden Vorgehensmodells zur Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion und Logistik wird als Entscheidungshilfe, ob die Notwendigkeit einer Anwendung von Exoskeletten besteht, die im deutschsprachigen Raum weit verbreitete Leitmerkmalmethode eingesetzt.

Die Leitmerkmalmethode ist eine von der deutschen Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) entwickelte Screening-Methode zur Erkennung von Defiziten bei der Arbeitsgestaltung. Sie gibt Hinweise auf mögliche Maßnahmen zur Reduktion von negativen gesundheitlichen Effekten auf die Mitarbeiter.

Mit Hilfe der Leitmerkmalmethode wird versucht, die wichtigsten Merkmale und komplexen Zusammenhänge der unterschiedlichen Arten der physischen Belastung für Anwender nachvollziehbar zu veranschaulichen. Sie dient als methodische Grundversorgung für die Gefährdungsabschätzung von Risiken am Arbeitsplatz. Die LMM beschreibt Belastungsfaktoren, genannt Leitmerkmale, mit Hilfe von Ordinalskalen und ermittelt den Grad der Wahrscheinlichkeit von physischen Überbeanspruchungen. Eine genaue Vorhersage von Art und Ausmaß der Überbeanspruchung ist jedoch nur bedingt möglich. Dafür sind weitere Analysen erforderlich (Steinberg, 2012).

Die Leitmerkmalmethode unterscheidet zwischen folgende sechs Belastungsarten, wofür jeweils eigene Formblätter zur Verfügung stehen (BAuA, 2019):

Manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten

- Heben, Halten und Tragen von Lasten über 3kg werden berücksichtigt
- Lasten können Gegenstände, Personen oder Tiere sein. Verwandte Formen des Hebens sind eingeschlossen

Manuelles Ziehen und Schieben von Lasten

- Fortbewegen einer Last $\geq 3\text{kg}$ durch menschliche Kraft (z.B.: Bewegen von Flurförderzeuge, Hängebahnen, etc.)

Manuelle Arbeitsprozesse

- Gleichförmige, sich wiederholende Bewegungsabläufe und Kraftaufwendungen der oberen Extremitäten

Ganzkörperkräfte

- Aufbringen erheblicher Kräfte beim Bearbeiten großer Werkstücke, bei der Maschinenbedienung, etc.
- Krafteinleitung über Hände, Fortleitung über Schultern, Rücken, Beine, Füße
- Tätigkeit kann üblicherweise nicht im Sitzen ausgeübt werden

Körperzwangshaltung

- Anstrengende Körperhaltungen, die durch den Arbeitsprozess vorgegeben sind und ununterbrochen eingenommen werden

Körperfortbewegung

- Berücksichtigt Bewegung des Körpers zu einem Arbeitsort oder an einem Arbeitsbereich, unabhängig vom Aufbringen erhöhter Aktionskräfte

Das in Kapitel 4.2.1 mit Tabelle 23: Beispiel einer erweiterten MTM-UAS Analyse beschriebene Beispiel bedarf einer Bewertung mit Hilfe des Formblattes Manuelle Arbeitsprozesse Die Ergonomiebewertung dieser genannten Tätigkeit wird in der folgenden Tabelle mit der Annahme der Gesamtdauer der Tätigkeit von sechs Stunden pro Schicht dargestellt.

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Hand-Bereich		4
+	Kraftübertragung/Greifbedingungen	2
+	Hand-/Armstellung und -bewegung	3
+	Arbeitsorganisation	2
+	Ausführungsbedingungen	1
+	Körperhaltung	5
=		Summe 18 x 3,5 Zeitwichtung = 63

Tabelle 25: Ergonomiebewertung mit Hilfe der Leitmerkmalmethode, Teil 1

Der erhaltene Wert kann anhand einer Skala bewertet werden. Tätigkeiten mit Bewertungsergebnissen unter zehn gefährden die körperliche Gesundheit kaum während Tätigkeiten mit Ergebnissen über 50 eine hohe Belastung auf den Körper aufweisen. Hohe Belastungen resultieren häufig in einer Überbeanspruchung der betroffenen Körperregionen und sollen durch Gestaltungsmaßnahmen vermieden werden.

Risikobereich	Punktwert	Beschreibung
1	< 10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich
2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll
3	25 bis < 50	Wesentlich erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt
4	≥ 50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich

Tabelle 26: Ergonomiebewertung mit Hilfe der Leitmerkmalmethode, Teil 2 (BAuA, 2019)

4.2.3 Regelwerk zur Identifikation und Auswahl

Wie bereits beschrieben, besteht das Vorgehensmodell aus den vier Komponenten Arbeitsablaufanalyse, Ergonomieanalyse, Morphologischer Kasten und Produktkompodium. In diesem Kapitel wird das Regelwerk gezeigt, anhand welchem die Komponenten zusammenwirken. Einen Überblick über die Zusammenhänge der vier Komponenten im Vorgehensmodell gibt folgende Abbildung 23.

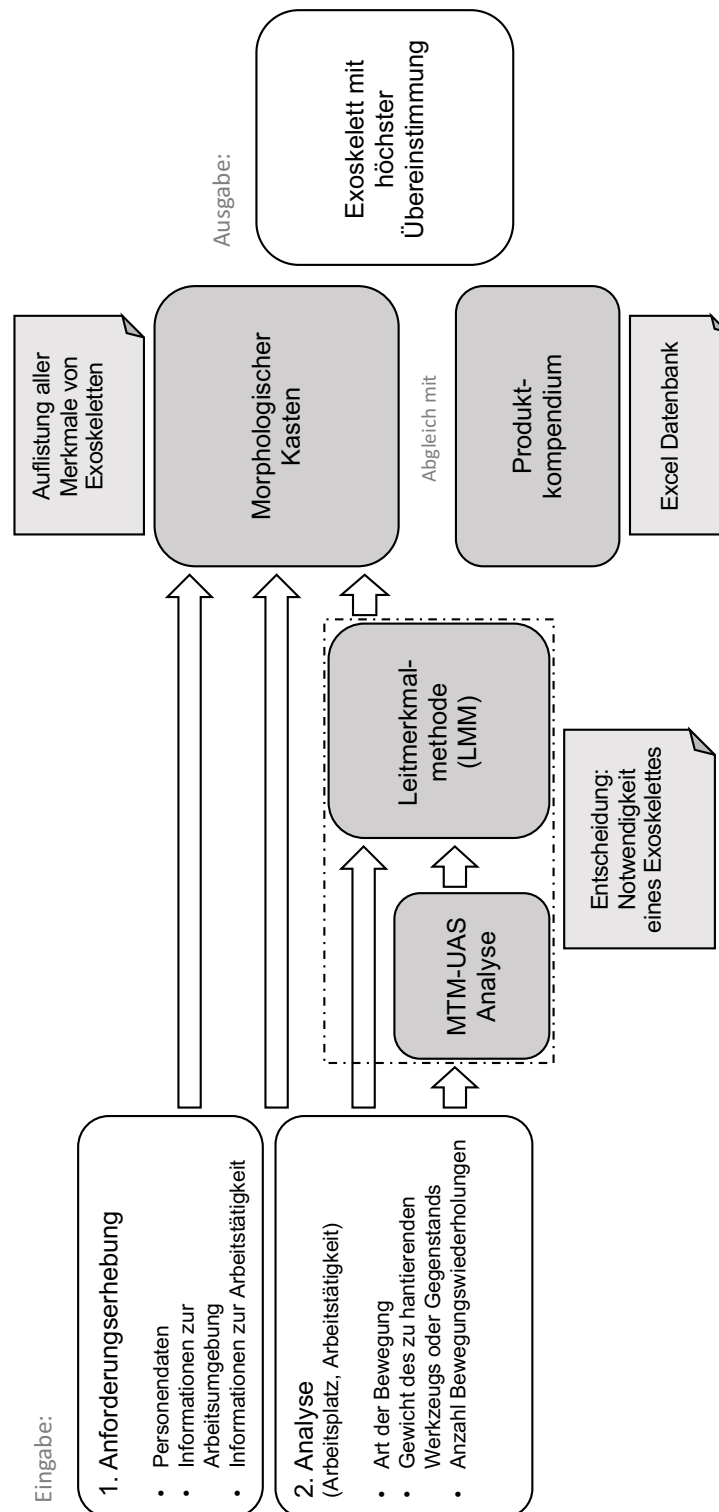


Abbildung 23: Vorgehensweise zur Auswahl

Für die Durchführung der Arbeitsablaufanalyse sind Informationen zum Arbeitsplatz und Informationen bezüglich der Arbeitstätigkeit notwendig. Allen voran sind die Entfernungsbereiche (Bewegungslängen), die Art der Bewegung, die zu hantierenden Gewichte sowie die Anzahl der Bewegungen für die MTM-Analyse entscheidend. Aus diesen Faktoren ergeben sich die in Tabelle 23 beispielhaft angegebenen Codes und die daraus resultierenden Bewegungszeiten.

Die Tätigkeiten, welche aus einzelnen Bewegungsfolgen resultieren, werden im Excel-Tool eingetragen. Neben einer kurzen Beschreibung der Bewegung, stehen der dazugehörige MTM-UAS Kode, die benötigte Zeit für eine Bewegungsfolge und die Anzahl. Aus der Zeit und der Anzahl ergibt sich die Gesamtzeit für diese Bewegungsfolge. Das Template für die MTM-UAS Analyse wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

Nr.	Beschreibung	Kode	TMU	AxH	Gesamt TMU	Armposition	Körperregion 1	Körperregion 2	Gewicht
1	Tätigkeit	-	-	-	=SUM(J4:J6)				
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H4*I4	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H5*I5	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H6*I6	-	-	-	-
2	Tätigkeit	-	-	-	=SUM(J8:J10)				
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H8*I8	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H9*I9	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H10*I10	-	-	-	-
3	Tätigkeit	-	-	-	=SUM(J12:J14)				
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H12*I12	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H13*I13	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H14*I14	-	-	-	-
4	Tätigkeit	-	-	-	=SUM(J16:J18)				
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H16*I16	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H17*I17	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H18*I18	-	-	-	-
5	Tätigkeit	-	-	-	=SUM(J19:J21)				
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H20*I20	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H21*I21	-	-	-	-
	Beschreibung Bewegung	Kode	TMU	AxH	=H22*I22	-	-	-	-
	-	-	-	-	=SUM(J3;J7;J11;J15;J19)				

Abbildung 24: Template für die erweiterte MTM-UAS Analyse

Als nächster Schritt erfolgt die Erhebung von Informationen, welche nicht durch die MTM-UAS Analyse erfasst werden. Dazu zählen:

- Dauer der Arbeitstätigkeit pro Arbeitstag
- Körpergröße des Anwenders
- Bewegungsfreiheit Körper:

Darunter ist gemeint, wie gut sich der Anwender am Arbeitsplatz bewegen kann, oder ob dieser stark beengt ist.

- Bewegungsfreiheit Hände:

Darunter ist gemeint, ob die Hände bei auszuführenden Tätigkeiten stark beengt sind oder ob genug Bewegungsraum vorhanden ist.

- Bodenbeschaffenheit:

Hier ist entscheidend, ob der Boden, auf dem der Mitarbeiter bei der Ausführung der Arbeitstätigkeit steht, eben und fest beschaffen ist, oder ob es sich um einen rutschigen und instabilen Untergrund handelt.

- Umgebungsbedingungen:

Die Kategorie Umgebungsbedingungen zielt auf die Wasser- und Staubbelastung am Arbeitsplatz ab. Es wird unterschieden zwischen trocken, keine Staubbelastung, Spritzwasser, erhöhte Staubbelastung und Nässe, hohe Staubbelastung.

- Schutzkleidung über Exoskelett erforderlich

Diese sieben Parameter werden in der Informationserhebung im jeweiligen freien weißen Feld eingetragen.

Informationserhebung - Erweiterte MTM Analyse	
Frage	Antwort
Dauer der Arbeitstätigkeit pro Arbeitstag	
Körpergröße (in cm)	
Bewegungsfreiheit Körper	
Bewegungsfreiheit Hände	
Bodenbeschaffenheit	
Umgebungsbedingungen	
Schutzkleidung über Exoskelett erforderlich	
Daten aus MTM-Analyse	
Dauer eines Arbeitsvorgangs (in min)	=J23*0,036/60
Längste Armposition während der Arbeitstätigkeit	
Max. Gewicht d. zu hantierenden Werkzeuges/Gegenstandes	
Welcher Tätigkeitstyp beschreibt die Arbeitsätigkeit am besten?	
Am Häufigsten beanspruchte Körperregion 1	
Am Häufigsten beanspruchte Körperregion 2	
Anzahl an Umsetzvorgänge pro Arbeitstag ODER Mittlere Bewegungshäufigkeit der kraftintensivsten Tätigkeit in Anzahl pro Minute	

Abbildung 25: Informationserhebung

Die weiteren sieben Parameter folgen aus der erweiterten MTM-UAS Analyse.

- Dauer eines Arbeitsvorgangs (in min):
Die in der MTM Analyse summierte Gesamtzeit wird von der Einheit TMU in Minuten umgerechnet und ausgegeben.
- Längste Armposition während der Arbeitstätigkeit:
Während der Arbeitstätigkeit können sich die Arme in den drei Positionen Überkopfhöhe, Brusthöhe und Arme unter der Brust befinden. Dieses Feld gibt die Armposition aus, welche die Arme während der Arbeitstätigkeit am längsten einnehmen.
- Max. Gewicht des zu hantierenden Werkzeugs oder Gegenstandes
- Tätigkeitstyp:
Hier kann zwischen den Tätigkeitstypen Handwerk, Hebetätigkeit, Überkopfarbeit und Haltungskorrektur unterschieden werden.
- Hebetätigkeit: Der Code KB bezeichnet in MTM-UAS die Körperbewegungen Beugen, Bücken oder Knien inklusive das danach folgende Aufrichten des Körpers. Erscheint dieser Code häufig in der Arbeitsablaufanalyse, impliziert dies eine Arbeitstätigkeit, bei der gehoben werden muss.
- Überkopfarbeit: Wird in der erweiterten MTM-UAS Analyse am häufigsten die Armposition ausgewiesen, deutet dies auf eine Überkopfarbeit hin.
- Handwerk: Befindet sich die Armposition häufig in Brusthöhe und wird der Code KB kaum oder nie verwendet, lässt dies auf handwerkliche Tätigkeiten schließen.
- Am Häufigsten beanspruchte Körperregion 1
- Am Häufigsten beanspruchte Körperregion 2
- Anzahl an Umsetzvorgänge pro Arbeitstag:
Dieser Wert wird ausgegeben sollte es sich beim Tätigkeitstyp um eine Hebetätigkeit handeln. Findet jedoch Überkopfarbeit oder Handwerk statt, so wird in diesem Feld die Mittlere Bewegungshäufigkeit der kraftintensivsten Tätigkeit in Anzahl pro Minute ausgegeben.

Je nach Tätigkeitstyp folgt im Anschluss die Leitmerkmalmethode für manuelle Arbeitsprozesse oder die Leitmerkmalmethode für manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten (siehe Kapitel 4.2.2). Erreicht die Ergonomiebewertung mit Hilfe der Leitmerkmalmethode einen Wert von über 25 (Wesentlich erhöhte Belastung) oder über 50 (Hohe Belastung), wird der Einsatz eines Exoskeletts empfohlen und in weiterer Folge ein für die Arbeitstätigkeit geeignetes Produkt ausgewählt.

Die in der Marktrecherche gefundenen Exoskelette werden anhand der in Kapitel 4.2.1 erstellten Morphologie in einer Excel Datenbank beschrieben und aufgelistet.

Folgende Abbildung 26 zeigt einen Auszug aus der Produktdatenbank. Weitere Informationen werden im Anhang der Diplomarbeit angeführt.

Unternehmen	Produkt	Typ		Funktionsweise			Energieversorgung/-umleitung						
		Aktiv	Passiv	Elektrisch	Mechanisch	Pneumatisch	Akku	Feder	Sonstige	Nacken	Schul		
1	Atoun	Model Y	Aktiv		Elektrisch				Akku				
2	Bioservo	Ironhand	Aktiv		Elektrisch				Akku				
3	Comau	Mate		Passiv		Mechanisch				Feder			Schul
4	Cyberdyne	Hal Lumbar Type for labor support	Aktiv		Elektrisch				Akku				
5	eksoBionics	Ekso Vest		Passiv		Mechanisch				Feder			Schul
6	Exhauss	System		Passiv		Mechanisch				Feder	Druckluft	Nacken	Schul
7	Exhauss	Picker		Passiv		Mechanisch				Feder			Schul
8	Exomys	Atlas		Passiv		Mechanisch					Seilzug	Nacken	Schul
9	Exomys	Daedalos		Passiv		Mechanisch							
10	Fraunhofer IPA	Stuttgart Exo-Jacket	Aktiv		Elektrisch				Akku			Nacken	Schul
11	German Bionic	Cray X	Aktiv		Elektrisch				Akku				
12	Hunic	SoftExo		Passiv		Mechanisch				Feder			
13	Innophys	Muscle Suit		Passiv				Pneumatisch			Druckluft		
14	Innophys	Muscle Suit Edge		Passiv				Pneumatisch			Druckluft		
15	Innophys	Muscle Suit Every		Passiv				Pneumatisch			Druckluft		
16	Innophys	Muscle Suit Power	Aktiv					Pneumatisch			Druckluft		
17	Innophys	Muscle Upper	Aktiv					Pneumatisch			Druckluft		
18	Laevo	Laevo V2		Passiv		Mechanisch				Feder			
19	Levitare	Airframe		Passiv		Mechanisch				Feder			Schul
20	Morita	Rakunie		Passiv		Mechanisch				Feder			
21	Noonee	Chairless Chair		Passiv		Mechanisch							
22	Ottobock	Paexo Shoulder		Passiv		Mechanisch					Seilzug		Schul
23	Ottobock	Paexo Back		Passiv		Mechanisch				Feder			
24	RB3D	Hercule V3	Aktiv		Elektrisch				Akku				
25	RB3D	Exoback	Aktiv		Elektrisch				Akku				
26	Robo.Mate	Active Arms	Aktiv		Elektrisch						Stromnetz		
27	Robo.Mate	Passive Arms		Passiv		Mechanisch				Feder			
28	Robo.Mate	Active Trunk	Aktiv		Elektrisch						Stromnetz		
29	Sarcos	Guardian XO	Aktiv		Elektrisch				Akku				
30	SkelEx	360-XFR		Passiv		Mechanisch				Feder			Schul

Abbildung 26: Auszug aus der Produktdatenbank

In einer Korrelationsmatrix werden die Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen an das Exoskelett, welche sich aus der Informationserhebung sowie der erweiterten MTM-UAS Analyse ergeben, mit den Produkteigenschaften der Exoskelette dargestellt.

- Zwischen den beanspruchten Körperregionen und den mit Hilfe der Exoskelette unterstützten Körperregionen besteht eine positive Korrelation.
- Umso höher das Gewicht des zu hantierenden Werkzeugs oder Gegenstandes ist, umso höher muss auch die durch das Exoskelett resultierende Unterstützungskraft bzw. Entlastung sein.
- Die Umgebungsbedingungen (Nässe und Staubbelastung) korrelieren mit dem Schutz des Assistenzsystems gegen Feuchtigkeit und Staub.
- Sind die Bewegungsfreiheiten der Hände und des Körpers eingeschränkt, so wird ein enganliegendes Exoskelett empfohlen.
- Die nötige Dauer der Laufzeit des Exosketts ergibt sich aus der Dauer der Arbeitstätigkeit. Zu erwähnen ist, dass passive Exoskelette keine Beschränkung in der Laufzeit aufweisen.
- Von der Dauer der Arbeitstätigkeit abhängig ist das zulässige Höchstgewicht des Exosketts. Umso länger das Exoskelett bei der Ausführung der Arbeitstätigkeit getragen werden muss, umso niedriger soll dessen Gewicht sein.
- Die Bodenbeschaffenheit korreliert ebenfalls mit dem Gewicht des Exosketts. Bei rutschigem und instabilem Boden sollen leichte Exoskelette eingesetzt werden, da mit dem Gewicht des Exosketts auch die Verletzungsgefahr bei Unfällen steigt.

- Die durchgeführte Tätigkeit hat eine positive Wechselwirkung mit den vom Hersteller des Exoskeletts empfohlenen Tätigkeiten.
- Die Körpergröße des Trägers entspricht der für das Exoskelett geeigneten Körpergröße.
- Muss aufgrund der bei der Ausführung der Arbeitstätigkeit vorherrschenden Bedingungen eine Schutzausrüstung über dem Exoskelett getragen werden (z.B.: bei Lackierarbeiten), wird die Nutzung eines enganliegenden Exoskeletts empfohlen.

Abbildung 27 zeigt die oben genannte Korrelationsmatrix mit den exakten Korrelationen zwischen den Anforderungen und den Produkteigenschaften.

Kundenanforderungen		Produkteigenschaften																																			
		Unterstützte Körperregion					Unterstützte Kräfte/Entlastung			Wasser-/Staubfestigkeit			Laufzeit		Passform		Komfort		Gewicht		Tätigkeit		Größe														
		Nacken	Schultern	Arme	Hände	Wrist/Gelenke	Beine	Niedrig (<50N, <50Nm)	Mittel (50N-150N, 50Nm-150Nm)	Hoch (>150N, >150Nm)	Kein Schutz	Mittlerer Schutz (bis 1h4h)	Staub- und wasserfest (ab 1h00)	Kurz (<4h)	Mittel (4h-8h)	Lang (>8h)	Ergonomisch	Abschirmend	Wisch, tauff	Heiß, staub	Leicht (<4kg)	Mittel (4kg-8kg)	Schwer (>8kg)	Handwerk	Hebelstätigkeit	Überkopparbeit	Haltungskorrektur	<160cm	160cm-180cm	>180cm							
Beanspruchte Körperregion	Nacken	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	Schultern	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	Arme	0	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Hände	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Gewicht des zu handhabenden Werkzeuges oder Gegenstandes	Wrist/Gelenke	0	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Beine	0	0	0	0	0	++	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Leicht (<5kg)	0	0	0	0	0	++	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Mittel (5kg-10kg)	0	0	0	0	0	+	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Umgebungsbedingungen	Schwer (>10kg)	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Trocken, keine Staubbelastung	0	0	0	0	0	0	0	0	++	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Spritzwasser, erhöhte Staubbelastung	0	0	0	0	0	0	0	0	-	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Nässe, hohe Staubbelastung	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bewegungsfreiheit Hände	Völlig eingeschränkt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Etwas eingeschränkt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Leicht eingeschränkt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Keine Einschränkung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bewegungsfreiheit Körper	Sehr beengter Raum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Etwas beengter Raum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ausreichend Platz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Keine Einschränkung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Dauer der Arbeitstätigkeit	<4h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4h-8h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	++	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	>8h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Keine Einschränkung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bodenbeschaffenheit	rutschig, instabil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	-	++	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	uneben, versch. Höhen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	eben, fest	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Keine Einschränkung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tätigkeit	Handwerk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Hebelstätigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Überkopparbeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Haltungskorrektur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Körpergröße	<160cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	160cm-169cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	170cm-179cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	180cm-189cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	190cm-199cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Arbeitsbereich während der Arbeitstätigkeit	>200cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Überkopfhöhe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Brusthöhe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Arme unten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Schutzkleidung über Exoskelett erforderlich	Ja	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Nein	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Abbildung 27: Korrelationsmatrix

Das Auswahlverfahren erfolgt anhand der Informationen aus der erweiterten MTM-UAS Analyse in einer vordefinierten Reihenfolge.

2. Körpergröße:
Der zweite Filterparameter ist die zulässige Körpergröße. Befindet sich die Körpergröße des Anwenders nicht im Bereich der zulässigen Körpergröße des Exoskeletts, werden diese Produkte ausgeblendet.
3. Beanspruchte Körperregion:
Nur Exoskelette, welche für die beanspruchte Körperregion Unterstützung bieten, bleiben übrig.
4. Tätigkeit:
Die Exoskelette wurden im Vorfeld nach ihrem möglichen Tätigkeitsfeld kategorisiert. Stimmt die Arbeitstätigkeit mit der Tätigkeit, für welche das Exoskelett entwickelt wurde, überein, bleiben diese Exoskelette in der Auswahl.
5. Passform:
Besteht am Arbeitsplatz Platzmangel, werden Exoskelette mit abstehenden Komponenten gefiltert.
6. Die übrig gebliebenen Produkte werden nach ihrem Gewicht gereiht. Für die Auswahl ist das Verhältnis aus der unterstützenden Kraft/Entlastung zum Gewicht entscheidend.

Zusätzlich kann noch nach den Parametern Komfort, Wasser-/Staubfestigkeit und Herstellerland gefiltert werden.

4.3 Kritische Reflexion des Vorgehensmodells

Die Vorgehensweise zur Auswahl von Exoskeletten für den Einsatz in Produktion und Logistik basiert auf der Verwendung mehrerer, in der Industrie weit verbreiteter Methoden. Die Basis des Vorgehensmodells stellt die Methode MTM-UAS dar. Mit Hilfe dieser Arbeitsablaufanalyse werden Informationen zu den durchgeführten Bewegungen sowie deren Dauer der vorliegenden Arbeitstätigkeit erfasst. Die Erweiterung der klassischen MTM-UAS Analyse um die Faktoren Armposition während der Tätigkeit, beanspruchte Körperregion und Gewicht des zu hantierenden Gegenstandes oder Werkzeugs erhöhte die Auswahlgenauigkeit des Modells. Die Informationen aus der Analyse ermöglichen eine Bewertung der im Auswahlverfahren betrachteten Arbeitstätigkeit durch die Ergonomie-Screening Methode LMM. Das Ergebnis der Ergonomiebewertung liefert die notwendige Entscheidungsgrundlage für den Einsatz von Exoskeletten. Mit Hilfe der Informationen aus der erweiterten MTM-UAS Analyse wird über eine definierte Korrelationsmatrix auf eine umfassende Datenbank, bestehend aus sich aktuell am Markt befindenden Exoskelette zugegriffen. Die sich in der Datenbank befindenden Exoskelette wurden im Vorfeld anhand der entwickelten Morphologie klassifiziert.

Insbesondere der Einsatz der weit verbreiteten Methoden MTM und LMM ermöglicht eine flächendeckende Anwendung in Produktions- und Logistikunternehmen. Das Vorgehensmodell erleichtert nicht nur die Auswahl von Exoskeletten, sondern bietet zusätzlich eine Roadmap zur Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz. Die Methode MTM-UAS wird vorwiegend bei Serienfertigung angewendet, der Einsatz von MTM-1 oder MTM-MEK ist jedoch ohne großem Abänderungsaufwand möglich. Eine zertifizierte Schulung für die Durchführung von MTM wird vorausgesetzt.

Mit Hilfe des Vorgehensmodells erhalten Anwender einen IST-Zustand der vorliegenden ergonomischen Bedingungen am Arbeitsplatz. Das Modell trifft jedoch keine qualitative Aussage über die Ergonomieverbesserung durch den Einsatz von Exoskeletten. Der Einsatz von Exoskeletten wird durch aktuelle Ergonomie-Screening Methoden noch nicht erfasst.

Die im Modell verwendete, in Microsoft Excel erstellte Datenbank ist um zukünftige Exoskelette erweiterbar.

5 Validierung

Dieses Kapitel beschreibt die beiden Phasen Demonstration und Validierung – die vierte und die fünfte Phase des DSRM-Prozesses. Das entwickelte Vorgehensmodell wird an zwei Use-Cases angewendet und mit Hilfe eines Feldexperiments in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 auf die Erfüllung der Anforderungen überprüft.

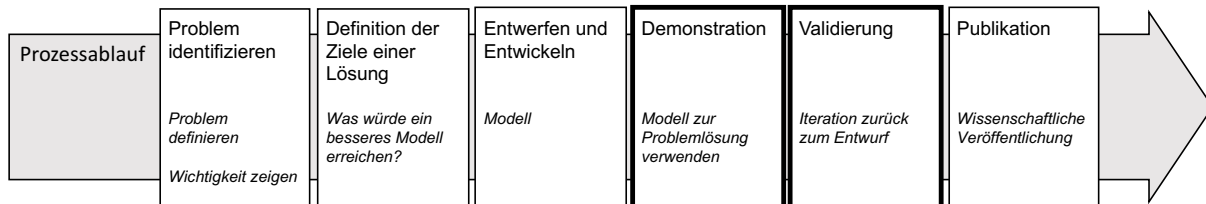


Abbildung 28: DSRM - Überprüfung des Vorgehensmodells (vgl. Peffers et al., 2007, S. 12–14)

Dafür werden zwei Use-Cases, welche sich für den Einsatz von Exoskeletten eignen, aufgebaut und verwendet. Die beiden Use-Cases bilden unterschiedliche, in Produktions- und Logistikunternehmen typische Tätigkeiten ab. Beim ersten Use-Case handelt es sich um einen Montagevorgang, bei dem ein Elektroschaltkasten mit Bauteilen bestückt werden soll. Der zweite Use-Case beschreibt einen typischen Kommissionier-Vorgang. Mit Hilfe des Vorgehensmodells wird für jeden Use-Case ein passendes Exoskelett identifiziert. Im Anschluss werden die Use-Cases von 15 Probanden sowohl ohne Exoskelett als auch mit der Unterstützung eines für den jeweiligen Use-Case passenden Exoskeletts durchgeführt. Nach der Durchführung findet eine Befragung der Probanden nach mehreren verschiedenen Kriterien mittels eines System Usability Scale (SUS) Fragebogens statt.

Abgesehen von den in Kapitel 2 identifizierten Anforderungen an ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten dient als entscheidende Kennzahl für die Funktionalität des Vorgehensmodells seine Auswahlgenauigkeit. Ob das Vorgehensmodell das richtige Exoskelett für den jeweiligen Use-Case ausgewählt hat, kann mit Hilfe des Ergebnisses des SUS Fragebogens ermittelt werden. Außerdem findet weiters eine Überprüfung statt, ob die ausgewählten Exoskelette aufgrund ihrer technischen Eigenschaften die Anforderungen, welche sich aus dem jeweiligen Use-Case ergeben, erfüllen. Am Ende der Use-Cases werden die Ergebnisse zusammengefasst und kritisch reflektiert.

5.1 Anwendung in der Montage

5.1.1 Beschreibung des Use-Cases

Im Zuge einer Elektromontage in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 wird ein Kompakt-Schaltkasten von Mitarbeitern mit elektronischen Bauteilen bestückt. Mit

Hilfe eines digitalen Werkerassistenzsystems bringen die Mitarbeiter Reihenklammen an vorgegebenen Hutschienen an und verbinden diese anschließend mit unterschiedlich farbigen Kabeln. Die Bauteile befinden sich hierbei auf einem Arbeitstisch links im Arbeitsbereich und der Schaltkasten hängt 1,8m über dem Boden in Überkopfhöhe. Die Schichtdauer beträgt acht Stunden wobei davon sechs Stunden lang am Schaltkasten gearbeitet wird.

Der erste Arbeitsschritt enthält das Anbringen von vier orange-farbigen Reihenklammen. Dabei werden die Klammen an die Hutschienen gedrückt bis der Befestigungsmechanismus einrastet. Nach dem Anbringen der Klammen werden diese im zweiten Arbeitsschritt mit zwei orange-farbigen Drähten verbunden. Das Befestigen des Drahtes an einer Klemme benötigt acht Drehungen mit Hilfe eines isolierten Schraubendrehers.

Im dritten und siebten Arbeitsschritt wird die Montage von roten und gelben Klammen durchgeführt. Die Klammen werden so angebracht, dass sich in einer Reihe jeweils sechs Reihenklammen nebeneinander befinden. Im vierten und fünften Arbeitsschritt folgt die Verkabelung von roten Drähten und im achten und neunten Arbeitsschritt die Verkabelung von gelben Drähten

Weiters folgt die Befestigung von fünf Endanschlügen. Jeweils rechts und links der beiden bereits montierten Klampaketten und in einer dritten, neuen Reihe der rechte Endanschlag. Links daneben werden sechs graue Reihenklammen angebracht und mittels schwarzer Drähte mit sechs der farbigen Reihenklammen verbunden. Dieses Reihenklammenpaket wird ebenfalls von links mittels eines Endanschlag gegen Verrutschen geschützt.

5.1.2 Anwendung des Vorgehensmodells

Die erweiterte MTM-UAS Analyse liefert folgendes Ergebnis:

<i>Nr</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Kode</i>	<i>TMU</i>	<i>AxH</i>	Σ	<i>Armposition</i>	<i>Körperteil</i>	<i>Gewicht</i>
1	Klammen A anbringen				320	Brusthöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Aufnehmen & Platzieren Klemme	AF3	80	4	320			
2	Verdrahten 1. Draht				400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Aufnehmen & Platzieren Draht	AF3	80	1	80			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	1	50			
	1. Drehung	ZA1	5	1	5			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70			

	Festziehen	ZD	20	1	20			
	Draht Platzieren	PC1	30	1	30			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	1	50			
	1. Drehung	ZA1	5	1	5			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70			
	Festziehen	ZD	20	1	20			
3	Verdrahten 2. Draht				400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Aufnehmen & Platzieren Draht	AF3	80	1	80			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	1	50			
	1. Drehung	ZA1	5	1	5			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70			
	Festziehen	ZD	20	1	20			
	Draht Platzieren	PC1	30	1	30			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	1	50			
	1. Drehung	ZA1	5	1	5			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70			
	Festziehen	ZD	20	1	20			
4	Klemmen B anbringen				320	Brusthöhe	Arme/ Schultern	< 10
5	Verdrahten 3. Draht				400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
6	Verdrahten 4. Draht				400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
7	Klemmen C anbringen				320	Brusthöhe	Arme/ Schultern	< 10
8	Verdrahten 5. Draht				400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
9	Verdrahten 6. Draht				400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
10	Montage Endanschlag				900	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Endanschlag anbringen	AF3	80	4	320			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	4	200			
	1. Drehung	ZA1	5	4	20			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	28	280			
	Festziehen	ZD	20	4	80			

11	Montage Endanschlag Rechts				225	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Endanschlag anbringen	AF3	80	1	80			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	1	50			
	1. Drehung	ZA1	5	1	5			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70			
	Festziehen	ZD	20	1	20			
12	Klemme D anbringen				480	Brusthöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Aufnehmen & Platzieren Klemme	AF3	80	6	480			
13	Montage Endanschlag Links				225	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Endanschlag anbringen	AF3	80	1	80			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	1	50			
	1. Drehung	ZA1	5	1	5			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	7	70			
	Festziehen	ZD	20	1	20			
14	Verdrahten 7.-12. Draht				2400	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10
	Aufnehmen & Platzieren Draht	AF3	80	6	480			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	6	300			
	1. Drehung	ZA1	5	6	30			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	42	420			
	Festziehen	ZD	20	6	120			
	Draht Platzieren	PC1	30	6	180			
	Schraubendreher an Schraube	HC1	50	6	300			
	1. Drehung	ZA1	5	6	30			
	2.-8. Drehung	ZB1	10	42	420			
	Festziehen	ZD	20	6	120			
	Summe:				7590	Überkopfhöhe	Arme/ Schultern	< 10

Tabelle 27: Erweiterte MTM-UAS Analyse des Montage Use-Case

Für das Anbringen der Reihenklempen findet eine Bewegung von Hüfthöhe auf Überkopfhöhe statt. Durchschnittlich befinden sich die Arme somit in Brusthöhe. Am

meisten werden die Arme und Schultern belastet. Das Verbinden der Klemmen mit den Drähten wird in Überkopfhöhe ausgeführt. Insbesondere aufgrund der lang andauernden Verkabelungstätigkeit der Reihenklemmen resultieren hohe Belastungen, vor allem im Bereich des Schulter-Nackensbereichs auf die Mitarbeiter. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, welche durch Anwendung einer Ergonomie-Analyse verdeutlicht wird (hier Leitmerkmalmethode Manuelle Arbeit). Tabelle 28 und Tabelle 29 zeigen das Ergebnis.

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Hand-Bereich		4
+	Kraftübertragung/Greifbedingungen	2
+	Hand-/Armstellung und -bewegung	3
+	Arbeitsorganisation	2
+	Ausführungsbedingungen	1
+	Körperhaltung	5
=	Summe	18
		$\times 3,5 \text{ Zeitwichtung} = 63$

Tabelle 28: Ergonomiebewertung des Montage Use-Case, Teil 1

Die Durchführung der Arbeitsablaufanalyse mit Hilfe der erweiterten MTM-UAS-Analyse sowie der Leitmerkmalmethode zeigt, dass die Arbeitstätigkeit vor allem im Überkopfbereich stattfindet. Es ist mit Belastungen sowohl in den Armen als auch im Schulter- und Rückenbereich der Mitarbeiter zu rechnen und deshalb sind diese spezifischen Körperregionen mittels des Einsatzes eines Exoskeletts zu unterstützen.

Risikobereich	Punktwert	Beschreibung
1	< 10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich
2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll
3	25 bis < 50	Wesentlich erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt
4	≥ 50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich

Tabelle 29: Ergonomiebewertung des Montage Use-Case, Teil 2

Nach der Anwendung des Vorgehensmodells konnten fünf geeignete Exoskelette identifiziert werden, welche bei dieser Arbeitstätigkeit die passende Unterstützung bieten.

<i>Hersteller</i>	<i>Produkt</i>	<i>Typ</i>	<i>Gewicht</i>	<i>Unterstützung</i>
Levitare	Airframe	Passiv	k.A.	80%
Ottobock	Paexo Shoulder	Passiv	1,9kg	11kg
SkelEx	360-XFR	Passiv	2,7kg	7kg
US Bionics	SuitX ShoulderX	Passiv	3,2kg	81%
Comau	Mate	Passiv	5kg	30%

Tabelle 30: Geeignete Exoskelette Montage Use-Case

Aufgrund seines geringen Gewichts von lediglich 1,9kg und einer für passive Exoskelette hohe Unterstützung wurde das System Paexo Shoulder von Ottobock als das am besten geeignete Exoskelett identifiziert. Paexo ist ein passives Exoskelett, das keine Energiezufuhr benötigt. Es wird relativ eng am Körper getragen und ermöglicht in der Regel volle Bewegungsfreiheit. Das Exoskelett leitet die im vorliegenden Fall durch die Arbeitstätigkeit resultierenden Belastung vom Schulter-Rückenbereich über eine Mechanik direkt in den Hüftbereich der Mitarbeiter ab. Arme, Schultern und Rücken werden somit entlastet und die ergonomische Belastungsgrenze des Hüftbereiches liegt höher als die des Schulter-Rückenbereichs.

Folgende Abbildung zeigt einen Mitarbeiter bei der Ausführung der Montagetätigkeit mit angezogenem Exoskelett.



Abbildung 29: Ottobock Paexo Shoulder, Montage Use-Case

5.1.3 Ergebnisse und Fazit

Im Anschluss an die Durchführung des Use-Cases durch 15 Probanden beantworten die Teilnehmer einen standardisierten Fragebogen zur Gebrauchstauglichkeit des Exoskeletts. Zur Messung wird der System Usability Scale (SUS) Fragebogen angewendet.

Der System Usability Scale ist ein von John Brooke im Jahr 1996 entwickelter Fragebogen. Die etablierte, einfach anwendbare und technologieunabhängige Methode zielt darauf ab, die Gebrauchstauglichkeit eines Systems zu bewerten. Der Fragebogen umfasst zehn Fragen, welche nach der Likert-Skala mit fünf Auswahlmöglichkeiten beantwortet werden können. Die Antwortmöglichkeiten reichen

von der Note 0 (Stimme nicht zu), Note 1 (Stimme eher nicht zu), Note 2 (Neutral), Note 3 (Stimme eher zu) bis zur Note 4 (Stimme zu) (Brooke, 1996).

Der von Brooke vorgeschlagene Fragenkatalog enthält folgende zehn Fragen:

- Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.
- Ich empfinde das System als unnötig komplex.
- Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.
- Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.
- Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.
- Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.
- Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.
- Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.
- Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.
- Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.

Der System Usability Scale ist so gestaltet, dass ein System von den Testpersonen direkt im Anschluss an der Durchführung eines Usability-Tests (im vorliegenden Fall Montage Use-Case und Logistik Use-Case) bewertet werden kann. Durch den geringen Umfang der Fragen ist die Bewertung vergleichsweise schnell möglich.

Das Ergebnis der System Usability Scale ist die subjektiv wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit des zu bewertenden Systems in Punkten, dem sogenannten SUS-Score. Dieser reicht von 0 (schlechteste vorstellbare Anwendung) bis hin zu 100 (beste vorstellbare Anwendung). Bei der Auswertung des Fragebogens werden die beantworteten Noten addiert – die Addition ergibt eine Summe zwischen 0 und 40 und anschließend mit dem Wert 2,5 multipliziert. Der durchschnittliche SUS-Score aus allen Fragebögen einer Testreihe kann als Prozentwert interpretiert werden, wobei das Ergebnis in folgende Abschnitte zugeteilt werden kann (siehe Abbildung 30) (Rauer, 2011).

- 100 entspricht einem perfekten System ohne Usability-Probleme.
- Werte über 80 deuten auf eine gute bis exzellente Usability hin.
- Werte zwischen 60 und 80 sind als grenzwertig bis gut zu interpretieren.
- Werte unter 60 sind Hinweise auf erhebliche Usability-Probleme.

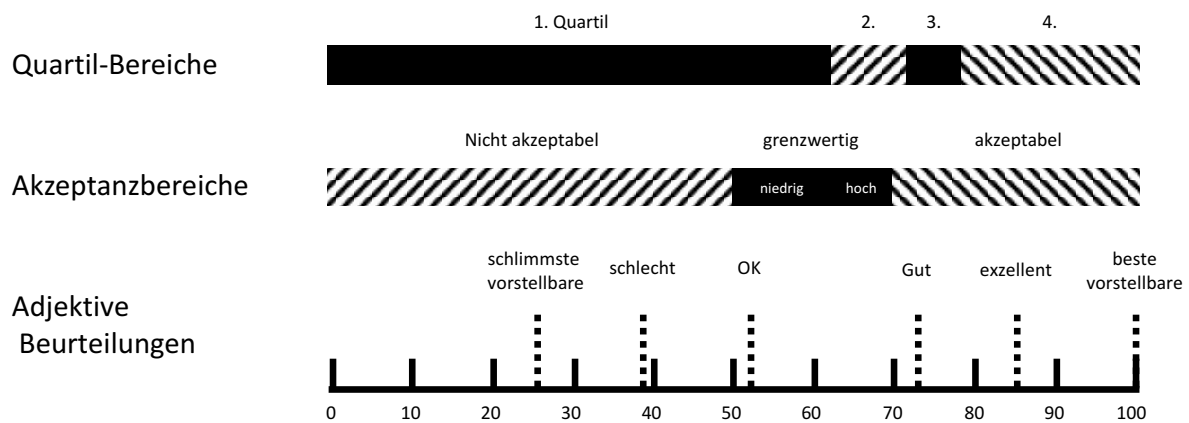


Abbildung 30: Einteilung des SUS-Scores

Der SUS-Score gibt jedoch nur an, ob Usability-Probleme vorliegen, nicht jedoch, welche Probleme genau vorliegen.

Für die Anwendung im Use-Case werden die Fragen der System Usability Scale auf Exoskelette angepasst. Somit ergeben sich folgende zehn Fragen.

- Ich kann mir sehr gut vorstellen, das Exoskelett regelmäßig zu nutzen.
- Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das Exoskelett zu nutzen.
- Das Exoskelett ist für den Einsatz bei der durchgeführten Arbeitstätigkeit gut geeignet.
- Das Exoskelett bietet keine Unterstützung bei der Arbeitsausführung.
- Ich empfinde das Exoskelett als einfach zu nutzen.
- Die benötigte Zeit zur Arbeitsausführung hat sich durch das Exoskelett stark erhöht.
- Mit Hilfe des Exoskeletts fiel mir die Ausführung der Arbeitstätigkeit leichter.
- Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.
- Ich habe mich bei der Nutzung des Exoskeletts sehr sicher gefühlt.
- Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem Exoskelett arbeiten konnte.

Die SUS-Analyse nach Ausführung des Use-Case 1 ergibt einen SUS-Score für das Exoskelett Paexo Shoulder von Ottobock von 96,7 und zeigt außerdem, dass das Tragen des Exoskeletts mit einem hohen Sicherheitsgefühl der Mitarbeiter verbunden ist. Darüber hinaus ist das korrekte Anwenden des Exoskeletts schnell zu erlernen und die richtige Nutzung einfach. Weitere Angaben ergeben, dass die Vorstellung, das Exoskelett regelmäßig zu nutzen, sehr hoch ist. Einen technischen Support braucht keiner der Befragten.

Laut Anwenderbefragung eignet sich das Exoskelett gut für die bei Use-Case 1 durchgeführte Arbeit. Allen Befragten fiel die Ausführung der Arbeitstätigkeit mit der Unterstützung des Exoskeletts leichter als ohne Assistenzsystem. Die benötigte Zeit zur Arbeitsausführung hat sich durch das Exoskelett nicht erhöht.

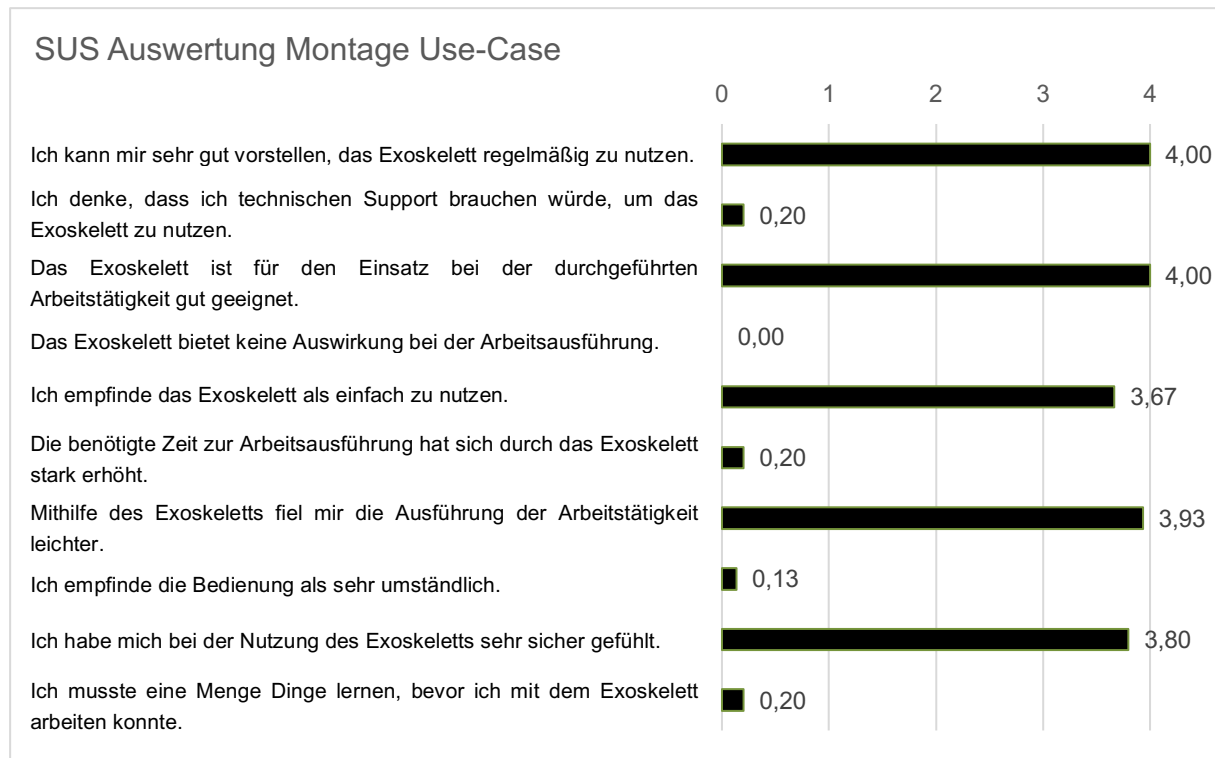


Abbildung 31: SUS Auswertung Montage Use-Case

5.2 Anwendung in der Logistik

5.2.1 Beschreibung des Use-Cases

Im Bereich eines manuell geführten Kleinteilelagers in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 kommissionieren Mitarbeiter täglich mehrere hundert Teile. Geführt durch eine digitale Werkerführung entnehmen die Mitarbeiter hierzu entsprechende Kleinladungsträger (KLT) mit einem variierenden Gewicht von 10 kg – 15 kg aus dem Lagerregal, stellen diesen KLT auf einem Tisch ab und kommissionieren die festgelegte Anzahl an Teilen in einen, für die Montage spezifischen KLT und stellen diesen abschließend auf einem fahrerlosen Transportsystem (FTS) ab. Zur Aufnahme der KLTs aus dem Lagerregal und Abstellung der KLTs zurück in das Regal arbeiten die Mitarbeiter teilweise in gebückter Position. Die Entnahme der Kleinteile erfolgt in Tischhöhe und das Abstellen des KLTs mit den kommissionierten Teilen auf den FTS erfolgt in leicht gebückter Position.

Im ersten Arbeitsschritt entnimmt der Mitarbeiter einen leeren Kleinladungsträger von einem rechts des Arbeitsplatzes stehenden fahrerlosen Transportsystem und stellt ihn am Kommissioniertisch ab. Dazu muss sich der Mitarbeiter sowohl 90° drehen als auch bücken. In weiteren zwei Arbeitsschritten werden vier Kleinladungsträger aus dem unteren Bereich des sich links vom Kommissioniertisch befindenden Lagerregal entnommen und ebenfalls abgestellt. Es folgt die Entnahme von verschiedenen Bauteilen, mit welchen der leere Kleinladungsträger befüllt wird. Im Anschluss stellt

der Mitarbeiter die vier Träger zurück ins Regal und der mittlerweile befüllte Kleinladungsträger wird wieder am fahrerlosen Transportsystem platziert.

5.2.2 Anwendung des Vorgehensmodells

Die erweiterte MTM-UAS Analyse liefert folgendes Ergebnis:

<i>Nr</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Kode</i>	<i>TMU</i>	<i>AxH</i>	Σ	<i>Armposition</i>	<i>Körperteil</i>	<i>Gewicht</i>
1	Entnahme KLT 1				160	Arme unten	Arme/ Rücken	< 10
	Drehung zum FTS und zurück	KA	25	2	50			
	Bücken	KB	60	1	60			
	Aufnehmen & Platzieren KLT 1	AA4	50	1	50			
2	Entnahme KLT 2 und 3				165	Arme unten	Arme/ Rücken	< 10
	Drehung zum Regal und zurück	KA	25	2	50			
	Bücken	KB	60	1	60			
	Aufnehmen & Platzieren von zwei gestapelten Schütten	AH3	55	1	55			
4	Entnahme KLT 4 und 5				165	Arme unten	Arme/ Rücken	< 10
	Drehung zum Regal und zurück	KA	25	2	50			
	Bücken	KB	60	1	60			
	Aufnehmen & Platzieren von zwei gestapelten Schütten	AH3	55	1	55			
5	Entnahme Bauteile 1				200	Brusthöhe	Arme	< 10
	Schütten nebeneinander Anordnen	AH2	45	1	45			
	Befüllen KLT 1	AE2	55	2	110			
	Schütten Stapeln	AH2	45	1	45			
6	Entnahme Bauteile 2				200	Brusthöhe	Arme	< 10
	Schütten nebeneinander Anordnen	AH2	45	1	45			
	Befüllen KLT 1	AE2	55	2	110			
	Schütten Stapeln	AH2	45	1	45			
7	Abstellen KLT 2 und 3				165	Arme unten	Arme/ Rücken	< 10

	Drehung zum Regal und zurück	KA	25	2	50			
	Bücken	KB	60	1	60			
	Schütten ins Regal einordnen	AH3	55	1	55			
8	Abstellen KLT 4 und 5				165	Arme unten	Arme/Rücken	< 10
	Drehung zum Regal und zurück	KA	25	2	50			
	Bücken	KB	60	1	60			
	Schütten ins Regal einordnen	AH3	55	1	55			
9	KLT auf FTS platzieren				160	Arme unten	Arme/Rücken	< 10
	Drehung zum FTS und zurück	KA	25	2	50			
	Bücken	KB	60	1	60			
	Aufnehmen & Platzieren KLT 1	AA4	50	1	50			
	Summe:				1380	Arme unten	Arme/Rücken	< 10

Tabelle 31: Erweiterte MTM-UAS Analyse des Logistik Use-Case

Während der Entnahme der Kleinladungsträger befindet sich der Mitarbeiter in einer bückenden und um 90° gedrehten Position. Seine Arme sind dabei unten. Die Kommissionierung der Bauteile findet in aufrechter Position mit Armen auf Brusthöhe statt. Die auszuführenden Tätigkeiten führen vor allem zu Belastungen im Bereich der Arme und der Lendenwirbelsäule der Mitarbeiter. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, welche durch Anwendung einer Ergonomie-Analyse verdeutlicht wird (hier Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen). Tabelle 32 und Tabelle 33 zeigen das Ergebnis.

	Lastwichtung	2		
+	Haltungswichtung	4		
+	Ausführungsbedingungen	3		
=		Summe 9	x 8 Zeitwichtung	= 72

Tabelle 32: Ergonomiebewertung des Logistik Use-Case, Teil 2

Die Durchführung der Arbeitsablaufanalyse mit Hilfe der erweiterten MTM-UAS-Analyse sowie der Leitmerkmalmethode zeigt, dass sich der Mitarbeiter während der Arbeitstätigkeit häufig bücken und er anschließend Gegenstände heben muss. Es ist somit mit hohen Belastungen im Bereich der Lendenwirbelsäule zu rechnen. Nach langem Ausführen der Arbeitstätigkeit kann das Auftreten von Rückenbeschwerden

nicht ausgeschlossen werden und deshalb soll diese spezifische Körperregion mittels Einsatzes eines geeigneten Exoskeletts unterstützt werden.

Risikobereich	Punktwert	Beschreibung
1	< 10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich
2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll
3	25 bis < 50	Wesentlich erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt
4	≥ 50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich

Tabelle 33: Ergonomiebewertung des Logistik Use-Case, Teil 2

Nach der Anwendung des Vorgehensmodells konnten insgesamt 14 geeignete Exoskelette identifiziert werden, welche bei dieser Arbeitstätigkeit die passende Unterstützung bieten. Es werden nachfolgend jedoch lediglich die in Europa verfügbaren Exoskelette aufgelistet.

Hersteller	Produkt	Typ	Gewicht	Unterstützung
Morita	Rakunie	Passiv	0,25kg	65%
Hunic	SoftExo	Passiv	1,3kg	21%
Laevo	Laevo V2	Passiv	2,8kg	40Nm
Ottobock	Paexo Back	Passiv	4kg	25kg
German Bionic	Cray X	Aktiv	7,9kg	25kg

Tabelle 34: Geeignete Exoskelette für den Logistik Use-Case

Aufgrund der sehr guten Unterstützung/Gewicht Verhältnisse wurden für den vorliegenden Use-Case die beiden Exoskelette Laevo V2 des Herstellers Laevo sowie das Paexo Back von Ottobock ausgewählt. Beide Exoskelette funktionieren passiv und ermöglichen in der Regel volle Bewegungsfreiheit. Beim Heben, Halten und Tragen wird der untere Rücken im Bereich der Lendenwirbelsäule entlastet, indem die Belastung von der Brust über mechanische (Feder-)Elemente auf die Oberschenkel geleitet wird. Die ergonomische Belastungsgrenze der Beine liegt höher als die des unteren Rückenbereichs.

Bei der Durchführung des Use-Cases durch die Probanden kommt das Exoskelett Laevo V2 des Herstellers Laevo zur Anwendung.

Folgende Abbildung zeigt einen Mitarbeiter bei der Ausführung der Kommissioniertätigkeit mit angezogenem Exoskelett.

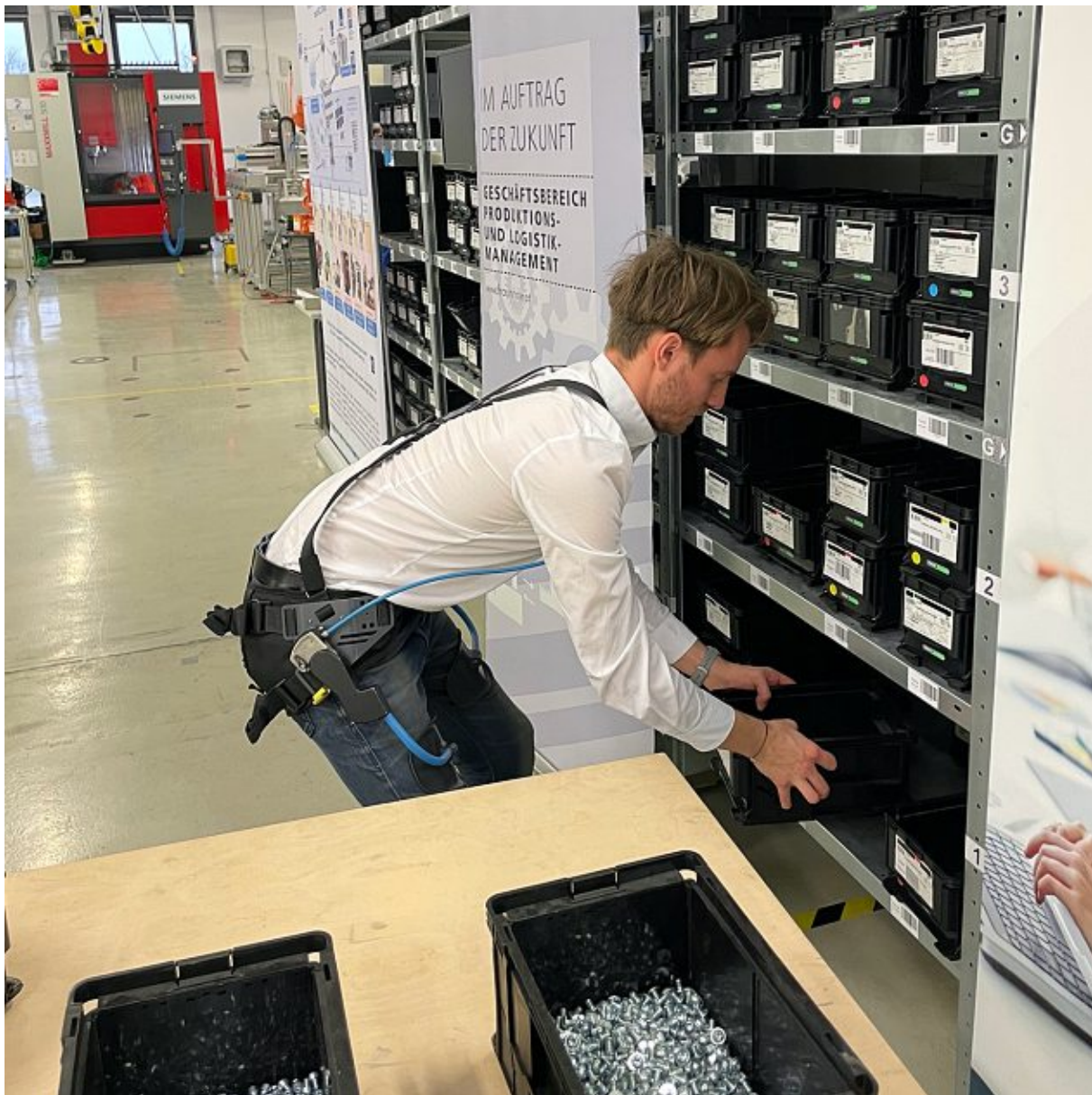


Abbildung 32: Laevo V2, Logistik Use-Case

5.2.3 Ergebnisse und Fazit

Die Befragung der Probanden findet analog zu Kapitel 5.1.3 mit Hilfe des System Usability Scale (SUS) Fragebogens statt (Brooke, 1996).

Die SUS-Analyse nach Ausführung des Logistik Use-Cases ergibt einen SUS-Score für das Exoskelett Laevo V2 des Herstellers Laveo von 93,7 und zeigt, dass das Tragen des Exoskeletts mit einem hohen Sicherheitsgefühl der Probanden verbunden und das Anwenden des Exoskeletts einfach und schnell zu erlernen ist. Laut Anwenderbefragung eignet sich das Exoskelett gut für die beim Logistik Use-Case durchgeführte Arbeit. Alle Befragten können sich vorstellen, das Exoskelett bei der Arbeitstätigkeit regelmäßig zu nutzen. Technischen Support muss keiner der Mitarbeiter in Anspruch nehmen und die benötigte Zeit zur Arbeitsausführung hat sich

durch das Exoskelett nicht erhöht. Den Probanden fiel die Durchführung des Use-Cases mit Exoskelett leichter als ohne Nutzung des Assistenzsystems.

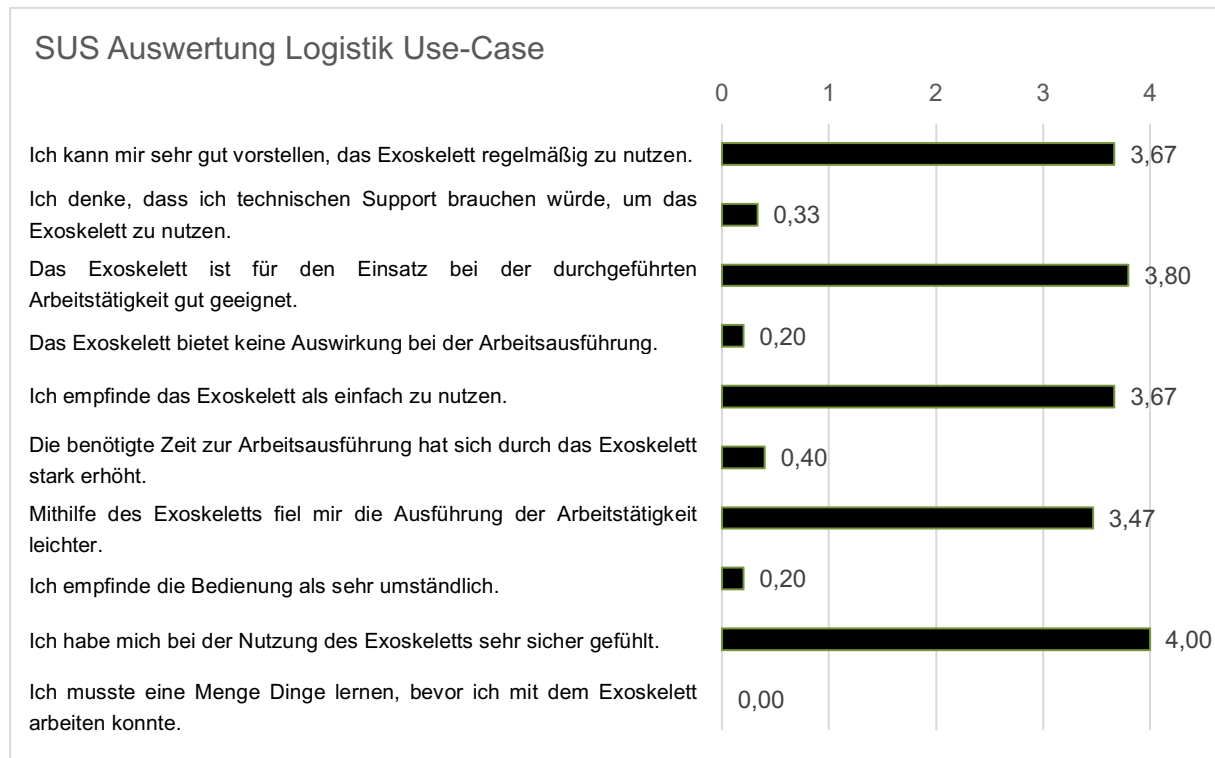


Abbildung 33: SUS Auswertung Logistik Use-Case

5.3 Reflexion der Ergebnisse

Durch Anwendung des Vorgehensmodells an zwei Use-Cases in der TU Wien Pilotfabrik wurden jeweils fünf Exoskelette vorgeschlagen. Die Produkte mit dem besten Unterstützung/Gewicht Verhältnis wurden für den jeweiligen Use-Case ausgewählt, von 15 Probanden für die Durchführung der Uses-Cases eingesetzt und mit Hilfe des System Usability Scale Fragebogens bewertet. Für den Use-Case 1 kommt ein auf Überkopfarbeiten spezialisiertes Exoskelett des deutschen Prothetik Herstellers Ottobock zum Einsatz. In Use-Case zwei findet ein Exoskelett für Hebe-, Halte- und Tragetätigkeiten des niederländischen Herstellers Laevo Verwendung.

Mit einem SUS-Score von 96,7 liegt das Exoskelett Paexo Shoulder von Ottobock nahe dem Höchstwert von 100, welcher einem perfekten System ohne Usability Probleme entsprechen würde. Auch der Score von 93,7 für das Laevo V2 deutet auf ein Produkt mit exzellenter Usability hin. Die beiden Assistenzsysteme sind für ihren Anwendungsfall optimal geeignet.

Aufgrund der Kategorisierung der sich am Markt befindenden Produkte mit Hilfe der entwickelten Morphologie können die Exoskelette den Use-Cases eindeutig zugeteilt werden. Mit Hilfe der Anwenderbefragung konnte das Modell insbesondere auf die Treffsicherheit der Auswahlkriterien überprüft werden.

1. Dauer des Arbeitsvorgangs: Die Auswahltreffer des Vorgehensmodells haben eine längere Laufzeit als die Dauer des Arbeitsvorgangs.
2. Körpergröße: Die Körpergröße des Anwenders befindet sich bei allen ausgewählten Exoskeletten im Bereich der zulässigen Körpergröße der Exoskelette.
3. Beanspruchte Körperregion: Nur Exoskelette, welche für die beanspruchte Körperregion Unterstützung bieten, werden durch das Exoskelett ausgewählt.
4. Tätigkeit: Die im Vorfeld durchgeführte Kategorisierung der Exoskelette stimmt mit der Tauglichkeit für die Tätigkeit, für welche das jeweilige Exoskelett eingesetzt wurde, überein.
5. Passform: Aufgrund der angegebenen Bewegungsfreiheiten der Hände und des Körpers wurden die erforderlichen Exoskelett-Produkte bestimmt.
6. Die Reihung des Verhältnisses zwischen unterstützender Kraft/Entlastung zum Gewicht ergab das für den Anwendungsfall am besten geeignete Exoskelett.

Die Ergebnisse stimmen mit den Regeln, welche dem Vorgehensmodell hinterlegt sind überein und somit findet das Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten die passenden Systeme für eine vorliegende Arbeitstätigkeit.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel findet die Diskussion der durch diese Diplomarbeit erlangten Forschungsergebnisse statt. Außerdem wird die Konsequenz der Arbeit ebenso wie interessante Beobachtung und Ergebnisse, die das Thema der Problemstellung nicht betreffen, beschrieben. Zuletzt folgt ein Ausblick über künftige Forschungsfelder im Bereich des physischen Assistenzsystems Exoskelett.

6.1 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die österreichische Industrie aufgrund des demografischen Wandels mit einem stetig höher werdenden Durchschnittsalter ihrer Mitarbeiter konfrontiert ist. Den in das Berufsleben einsteigenden Erwerbspersonen steht eine immer größer werdende ältere Belegschaft gegenüber. Dadurch wird es für Unternehmen einerseits zunehmend schwerer geeignete Fachkräfte zu finden und langfristig zu binden und andererseits sinkt mit Zunahme des Alters die Produktivität der Mitarbeiter und es steigt das Risiko eines gesundheitsbedingten, frühzeitigen Ausscheidens aus dem Erwerbsleben. Ein großer Teil der Arbeitnehmer ist nach wie vor einer hohen körperlichen Belastung durch Materialhandhabung am Arbeitsplatz ausgesetzt. Dies hat zur Folge, dass für eine beträchtliche Anzahl von Arbeitnehmern immer noch ein hohes Risiko für arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) besteht. Eine vollständige Automatisierung würde diese Probleme lösen, aber dies ist nicht immer machbar. In dynamischen Produktions- oder Lagerumgebungen erfordern eine hohe Produktvariantenanzahl und relativ kleine Auftragsgrößen ein hohes Maß an Flexibilität, und in solchen Fällen ist eine Vollautomatisierung entweder gar nicht möglich oder unerschwinglich teuer.

Eine Lösung für manuelle Handhabungsaufgaben ist der Einsatz von Exoskeletten. Das Exoskelett ist ein Assistenzsystem, welches am Körper getragen wird und durch eine (elektro-)mechanische Unterstützung die Belastung auf den Körper oder Teile des Körpers reduziert und somit die Gefahr von Verletzungen verringert. Exoskelette als technische Assistenzsysteme eröffnen dabei die Möglichkeit einer Verbesserung der Arbeitssicherheit, besonders bei Tätigkeiten, bei denen aufgrund der Spezifik der Arbeitssituation bisher keine oder nur unzureichende technische Hilfsmittel eingesetzt werden können.

In dieser Diplomarbeit wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, um österreichische Unternehmen bei der Auswahl und Einführung von Exoskeletten an ausgewählten Arbeitsplätzen zu unterstützen. Basis des Vorgehensmodells ist das Zusammenwirken einer Arbeitsablaufanalyse, der Bewertung der ergonomischen Bedingungen bei der Arbeitsausführung, einer umfassenden Produktdatenbank, bestehend aus 35

Exoskeletten, sowie deren Morphologie. Durch die Kombination weit verbreiteter Methoden lässt sich das Vorgehensmodell branchenunabhängig in vielen Unternehmen anwenden. Mit nur wenigen Informationen zu Arbeitsplatz und Arbeitstätigkeit wird ein passendes Exoskelett identifiziert.

Die Validierung des Vorgehens fand in der TU Wien Pilotfabrik anhand von zwei für die Anwendung von Exoskeletten konzipierter Use-Cases statt. Die beiden Use-Cases bilden unterschiedliche, in Produktions- und Logistikunternehmen typische Tätigkeiten ab und werden von 15 Probanden sowohl ohne Exoskelett als auch mit der Unterstützung eines für den jeweiligen Use-Case passenden Exoskeletts durchgeführt. Nach der Durchführung folgt eine Befragung der Probanden nach mehreren verschiedenen Kriterien mittels eines System Usability Scale (SUS) Fragebogens.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Das entwickelte Vorgehensmodell verwendet bekannte und standardisierte Methoden aus dem Bereich der Arbeitsablaufanalysen und Ergonomiebewertung in Kombination mit einer umfangreichen Exoskelett-Produktdatenbank.

Um die Arbeitstätigkeit abzubilden, kommt die MTM-UAS zum Einsatz. Damit lassen sich Bewegungsabläufe in der Serienfertigung effizient und zielführend mit Hilfe von Codes beschreiben. Für die Identifikation eines zur Arbeitstätigkeit passenden Exoskeletts ist der Code KB entscheidend. Dieser Code bezeichnet in MTM-UAS die Körperbewegungen Beugen, Bücken oder Knien inklusive dem danach folgenden Aufrichten. Aufgrund von diesem Code lässt sich auf Tätigkeiten schließen, bei denen gehoben werden muss. Weitere Tätigkeitstypen erkennt man an der Armposition während der Arbeitsausführung. Befinden sich die Arme in Überkopfhöhe, handelt es sich um eine Überkopfarbeit. Befinden sie sich vor dem Oberkörper, deutet dies auf eine handwerkliche Tätigkeit. Da die klassische MTM-UAS Analyse die Position der Arme während der Arbeitstätigkeit unzureichend erfasst, wird sie um eine Spalte für den Parameter Armposition erweitert. Eine weitere Ergänzung stellen Informationen zu den beanspruchten Körperregionen. Das Gewicht des zu hebenden Gegenstandes oder Werkzeugs wirkt sich erheblich auf die Belastung des Mitarbeiters aus und wird in manchen Codes berücksichtigt. Um die Auswahl zu vereinfachen, wird auch das Gewicht in der erweiterten MTM-UAS Analyse in einer eigenen Spalte angeführt. Bei Tätigkeiten, die den Code KB in der Beschreibung beinhalten, wählt das Vorgehensmodell Exoskelette zur Unterstützung der Lendenwirbelsäule aus. Wird hingegen angegeben, dass sich die Armposition in Überkopfhöhe bzw. Brusthöhe befindet, entscheidet sich das Modell für Exoskelette zur Unterstützung bei Überkopfarbeiten bzw. handwerklichen Tätigkeiten. Keine eindeutige Auswahl kann getroffen werden, wenn sich in der Analyse sowohl Hinweise auf eine Hebetätigkeit

als auch auf eine Überkopfarbeit oder handwerkliche Tätigkeit befinden. In diesem Fall muss das Exoskelett nach der Dauer bzw. Häufigkeit der Bewegung oder der Höhe der Belastung ausgewählt werden. Um mehrere Körperregionen zu unterstützen können alternativ verschiedene, gleichzeitig tragbare Exoskelette, eingesetzt werden. Die Hersteller Ottobock, Robo.Mate oder US Bionics bieten kombinierbare Exoskelette an.

Die Bewertung der Ergonomie am Arbeitsplatz ermittelt man mit Hilfe der Leitmerkalmethode. Auf Basis der Informationen aus der MTM Analyse zeigt die Leitmerkalmethode in wenigen Schritten die Höhe der Belastung auf den Mitarbeiter während der Arbeitsausführung. Je nach Tätigkeitstyp kommen verschiedene Bewertungsformulare zur Anwendung. Auch für den Einsatz der Leitmerkalmethode muss ein klarer Tätigkeitstyp vorliegen. Nur bei Arbeitstätigkeiten, die anhand dieser Methode ein Gesundheitsrisiko für den Mitarbeiter darstellen, folgt die Auswahl eines passenden Exoskeletts durch das Vorgehensmodell. Die Quantifizierbarkeit der Ergonomieverbesserung durch die Verwendung von Exoskeletten ist aktuell noch nicht möglich.

Der Erstellung der Produktdatenbank geht eine umfassende Marktrecherche voraus. Auf Basis der Morphologie von Exoskeletten werden deren Eigenschaften kategorisiert und in der Datenbank gelistet. Jedoch konnten nicht alle Produktdaten und Informationen durch die Marktrecherche und danach folgende E-Mail-Anfragen an die jeweiligen Hersteller eingeholt werden.

6.3 Ausblick

Exoskelette im industriellen Kontext befinden sich nach wie vor erst am Beginn eines großflächigen Einsatzes. Einer weiteren Verbreitung steht derzeit noch das Fehlen von Normen, Standards und Richtlinien betreffend Exoskelette im Weg. Die Zuordnung der Exoskelette zum Geltungsbereich einer bereits vorhandenen EU-Richtlinie könnte jedoch eine Wende einleiten.

Das Vorgehensmodell zur Auswahl von Exoskeletten für die Anwendung in Produktion und Logistik bietet bereits eine strukturierte Vorgehensweise zur Identifikation eines passenden Exoskeletts für viele Arbeitstätigkeiten und deren Implementierung am Arbeitsplatz. Mit Hilfe der erweiterten MTM-UAS Analyse kann bereits auf eindeutige Tätigkeitstypen geschlossen werden. Die verwendete Leitmerkalmethode zur Bewertung der ergonomischen Bedingungen bei der Arbeitstätigkeit gibt einen guten Überblick über die Belastungen, welche bei der Tätigkeitsausführung auf den Mitarbeiter wirken. Ähnliche Ergebnisse werden auch mit der Methode REBA (Rapid Entire Body Assessment) erzielt. Eine Bewertung der Verbesserung durch den Einsatz eines Exoskeletts lässt sich jedoch weder mit LMM noch mit REBA durchführen. Die Entwicklung einer wissenschaftlichen Methode zur Analyse der Ergonomie von

Arbeitsplätzen, an denen Exoskelette eingesetzt werden, oder einer Erweiterung von bereits bestehenden Methoden um diese Funktion, stellt eine Forschungslücke im Zusammenhang mit Exoskeletten dar.

7 Anhang



<p>Atoun Inc.</p> <p>Atoun Inc. ist ein zur Panasonic Corporation gehörendes, 2003 gegründetes Unternehmen mit Sitz Nara, Japan. Der unternehmerische Schwerpunkt liegt in der Entwicklung und Produktion von tragbaren Robotern. ATOUN strebt eine Gesellschaft ohne Kraft-Barrieren an, in der Menschen unabhängig von Alter und Geschlecht arbeiten können. Derzeit verfügt ATOUN über ein relevantes, marktreifes Exoskelett namens Model Y.</p>	
<p>Produkte: Model Y</p>	
<p>Model Y</p>	
<p>Atoun Model Y ist ein 4,5kg schweres, aktives Exoskelett zu Unterstützung der Lendenwirbelsäule bei Hebetätigkeiten. Die Akkulaufzeit beträgt bei normaler Benutzung ungefähr 4 Stunden und die maximal unterstützende Kraft beträgt beim 10kg. Model Y ist nach IP55 staub- und wasserdicht und kann von Anwendern mit einer Körpergröße zwischen 150 und 190 cm benützt werden.</p>	

Tabelle 35: Atoun, Model Y (Quelle: atoun.co.jp)

<p>Bioservo Technologies AB</p> <p>Bioservo Technologies AB ist ein in Schweden ansässiges, 2006 gegründetes Unternehmen, welches sich auf die Produktion und den Verkauf von tragbaren Muskelstärkungsgeräte spezialisiert hat. Ihre Geräte basieren auf der patentierten SEM-Technologie (Soft Extra Muscle), welche die Handlungen des Benutzers auf intuitive Weise folgt und die Kraft nur dann verstärkt, wenn der Träger einen Griff einleitet.</p>	
<p>Produkte: Ironhand</p>	
<p>Ironhand</p>	
<p>Das Ironhand-System, ist das weltweit erste aktive, weiche Exoskelett für die Hand, das entwickelt wurde, um die Gesundheit von Arbeitern zu verbessern, die griffintensive, sich wiederholende und statische Arbeitsaufgaben ausführen. Es wiegt 2,5kg und weist eine Akkulaufzeit von 8 Stunden auf. Mittels einer IoT Schnittstelle kann das Exoskelett konfiguriert sowie ferngesteuert werden.</p>	

Tabelle 36: Bioservo, Ironhand (Quelle: bioservo.com)



Comau	
Comau ist ein zum Fiat Chrysler Automobiles gehörendes, weltweit führendes Unternehmen auf dem Gebiet der industriellen Automatisierung mit Sitz in Grugliasco, Italien. Comau entwickelt Industrie 4.0-fähige Systeme, Produkte und Dienstleistungen. In Zusammenarbeit mit dem isländischen Unternehmen ÖSSUR und dem italienischen IUVO wird das Exoskelett MATE produziert.	
Produkte: Mate	
Mate	
MATE ist ein passives Exoskelett, welches die Schultern bei Überkopfarbeiten unterstützt. Bei einem geringen Eigengewicht von 4kg wird mittels Federmechanismus eine Verringerung der Muskelermüdung von 30% erzielt. Das Exoskelett liegt eng am Körper an und kann von Personen mit einer Körpergröße zwischen 150 und 190cm getragen werden.	

Tabelle 37: Comau, Mate (Quelle: comau.com)



Cyberdyne Inc.	
Cyberdyne Inc. Ist ein 2004 gegründetes, japanisches Robotik- und Technologieunternehmen, das vor allem für die Vermarktung und den Vertrieb ihres HAL-Roboter-Exoskeletts bekannt ist.	
Produkte: Hal Lumbar Type for labor support	
Hal Lumbar Type for labor support	
HAL Lumbar Type for Labor Support reduziert die auf den Rücken des Trägers wirkende Belastung beim Heben schwerer Gegenstände und mindert somit das Risiko von Rückenverletzungen. Das aktive Exoskelett wiegt 3kg, ist wasser- und staubdicht und weist eine Akkulaufzeit von etwa 4,5h auf.	

Tabelle 38: Cyberdyne, Hal Lumbar (Quelle: cyberdyne.jp)

Ekso Bionics Holdings Inc.	
Ekso Bionics ist ein 2005 gegründetes, US-amerikanisches Unternehmen mit Sitz in Richmond, Kalifornien. Ursprünglich entwickelte Ekso Bionics Exoskelette für den militärischen Einsatz, wie z.B.: das mittlerweile von Lockheed Martin produzierte HULC.	
Produkte: Ekso Vest	


EksoVest	
Die EksoVest ist ein am Oberkörper getragenes Exoskelett zur Unterstützung von Arbeiten im Überkopf-Bereich. Es wiegt 4,2 kg, funktioniert passiv mittels Federmechanismus und bietet dem Träger eine maximale Entlastung von 13,6kg.	

Tabelle 39: Ekso Bionics, EksoVest (Quelle: eksobionics.com)




Exhauss	
Exhauss ist ein französischer Hersteller von Exoskeletten, welche er nach einem Baukasten System anbietet. Bekannt wurde das 2013 gegründete Unternehmen mit Kamera Gimbals für den professionellen Einsatz. Im Repertoire befinden sich die beiden Produktlinien Exhauss System und Exhauss Picker.	
Produkte: Exhauss System, Exhauss Picker	
System	
Das 2015 eingeführte Exhauss System ist ein am Oberkörper getragenes, passives Exoskelett. Das Exoskelett unterstützt den Träger sowohl bei Überkopfarbeiten als auch bei Hebetätigkeiten. Die Unterstützungskraft wird mechanisch über Federmechanismen sowie pneumatisch mit Hilfe von Stickstoffzylindern erzielt.	
Picker	
Das auf Hebe-, Halte- und Tragetätigkeiten ausgelegte Exhauss Picker wiegt 3,5kg und wird am Oberkörper getragen. Unterstützend wirkt es insbesondere an den Unterarmen, Oberarmen sowie Händen. Im Gegensatz zum Exhauss System muss das Picker akribisch an den Körper des Trägers angepasst werden.	

Tabelle 40: Exhauss, System, Picker (Quelle: exhauss.com)




Exomys	
<p>Exomys ist ein 2018 gegründetes, österreichisches Start-Up mit Sitz in Wien. Der Fokus des Unternehmens liegt auf der Entwicklung von passiven Exoskeletten für den industriellen Gebrauch.</p>	
Produkte: Atlas, Daedalos	
<p style="text-align: center;">Atlas</p>	
<p>Das passive Exoskelett Atlas von Exomys unterstützt den Träger bei Hebe-, Halte- und Tragetätigkeiten. Ein zwischen Finger und Schultern angebrachter Seilzug entlastet die Arme während der Tätigkeit.</p>	
<p style="text-align: center;">Daedalos</p>	
<p>Das passive Exoskelett Daedalos kann als unsichtbarer Stuhl verwendet werden, so dass sich der Träger überall ausruhen können, indem es die Last von den Beinen auf die mechanische Struktur überträgt. Es ist in Leichtbauweise aus Metall gefertigt und wird unter der Arbeitskleidung getragen.</p>	

Tabelle 41: Exomys, Atlas, Daedalos (Quelle: exomys.com)


Fraunhofer IPA	
<p>Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung ist eine Forschungseinrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Stuttgart. Schwerpunktmäßig befasst sich das Fraunhofer IPA mit den Arbeitsgebieten Produktionsorganisation, Oberflächentechnologie, Automatisierung und Prozesstechnologie.</p>	
Produkte: Stuttgart Exo-Jacket	
<p style="text-align: center;">Stuttgart Exo-Jacket</p>	
<p>Das Stuttgart Exo-Jacket ist ein aktives Exoskelett für den Einsatz in Logistik- und Montage. Die Arme können bei Überkopfarbeiten entweder stabilisiert, oder bei Hebe-, Halte-, Tragetätigkeiten unterstützt werden. Eigebaute Antriebsmodule unterstützen dabei aktiv die Streckung und Beugung der Ellenbogen- und Schultergelenke während die oberen Gliedmaßen nahezu ohne Einschränkungen durch das Exoskelett bewegt werden können.</p>	

Tabelle 42: Fraunhofer IPA, Stuttgart Exo-Jacket (Quelle: ipa.fraunhofer.de)




German Bionic	
<p>German Bionic ist ein 2017 gegründetes, deutsches Unternehmen mit Standorten in Augsburg, Berlin und Tokio. Nach eigenen Angaben ist es der erste europäische Hersteller von Exoskeletten für den Einsatz in der industriellen Produktion.</p>	
Produkte: Cray X	
Cray X	
<p>Das German Bionic Cray X wurde speziell für die manuelle Handhabung von schweren Gütern und Werkzeugen konzipiert, indem es den Kompressionsdruck im unteren Rückenbereich verringert. Die Bewegungen werden aktiv-assistiv nachgeahmt und verstärkt. Die Akkulaufzeit beträgt 8 Stunden bei einer maximalen Lastunterstützung von 25kg. Das Exoskelett ist zudem mit IoT-Technologien ausgestattet.</p>	

Tabelle 43: German Bionic, Cray X (Quelle: germanbionic.com)

Hunic	
<p>Hunic wurde im Jahr 2017 gegründet und hat seinen Sitz Baiersbrunn, Deutschland. Mit dem passiven Exoskelett SoftExo bietet Hunic eines der leichtesten Exoskelette für dein Einsatz bei Hebetätigkeiten an.</p>	
Produkte: SoftExo	
SoftExo	
<p>Das Hunic SoftExo ist eine leichte, körpergetragene Hebehilfe. Das passive Exoskelett unterstützt den Träger bei Hebetätigkeiten aus der Hocke und beim Überbeugen um bis zu 21%. Das Rückensystem führt dabei die Wirbelsäule in eine gerade Position. Es findet eine dezente Sensibilisierung zu einer aufrechten und möglichst geraden Wirbelsäulenhaltung statt.</p>	

Tabelle 44: Hunic, SoftExo (Quelle: hunic.com)

Innophys	
<p>Innophys Co., Ltd. Ist ein japanischer Hersteller von Exoskeletten für die Unterstützung der Rückenmuskulatur. Es wurde 2013 gegründet und hat seinen Firmensitz in Tokyo. In ihrem Produktportfolio befinden sich 4 industriell einsetzbare Exoskelette.</p>	
Produkte: Muscle Suit (Edge, Every, Power), Muscle Upper	

<p style="text-align: center;">Muscle Suit</p>	
<p>Der Muscle Suit ist das Standardmodell der Exoskeltreihe von Innophys. Das passive Modell ist wasserresistent und bietet Unterstützung von bis zu 100Nm. Die Passform ist zwischen Tight fit und Soft fit wählbar und das Exoskelett lässt sich laut Unternehmensangaben innerhalb 10 Sekunden an- bzw. ablegen.</p>	
<p style="text-align: center;">Muscle Suit Edge</p>	
<p>Der Muscle Suit Edge ist mit 4,3kg das leichteste und auch günstigste Exoskelett für den Arbeitseinsatz von Innophys. Auch dieses passive Modell bietet Unterstützung von bis zu 100Nm, lässt sich innerhalb von 10 Sekunden an- bzw. ablegen, ist aber standardmäßig nicht wasserresistent. Sowohl das Standardmodell als auch das Edge funktionieren mittels Luftkompression und helfen beim Heben-, Halten- und Tragen von schweren Gegenständen.</p>	
<p style="text-align: center;">Muscle Suit Power</p>	
<p>Beim Muscle Suit Power wird die Unterstützung mittels einem externen Kompressor erreicht. Das 6,6kg schwere, aktive Exoskelett bietet bis zu 140Nm Hilfskraft. Eine wasserdichte Hülle ist im Lieferumfang nicht inkludiert.</p>	
<p style="text-align: center;">Muscle Suit Every</p>	
<p>Das Muscle Suit Every ist ein leichtes, passives Exoskelett für den alltäglichen Einsatz. Bei einem Gewicht von 3,8kg bietet das Exoskelett eine Unterstützung von bis zu 100Nm. Außerdem verfügt das Assistenzsystem über eine IP56 Wasserdichtheitszertifizierung.</p>	
<p style="text-align: center;">Muscle Upper</p>	
<p>Muscle Upper bietet eine Unterstützung der Arme sowie des Rückens von bis zu 140Nm und verwendet wie der Muscle Suit Power einen externen Kompressor als Energieversorgung. Beim 8,1kg schweren Exoskelett ist im Lieferumfang keine wasserdichte Schutzhülle inkludiert.</p>	


Tabelle 45: Innophys, Muscle Suit, Muscle Upper (Quelle: innophys.jp)

Laevo	
Laevo entstand aus einem Projekt der Firma InteSpring gemeinsam mit der TU Delft und weitere Partner im Jahr 2013. Das Unternehmen hat seinen Firmensitz in Rijswijk in den Niederlanden.	
Produkte: Laevo V2	
Laevo V2	
Laevo V2 ist eine tragbare Brust- und Rückenstütze, die sich jeder Körperhaltung anpasst. Laevo überträgt die Kraft von der Auflage auf die Oberschenkel. Aufgrund der Hebelwirkung ist die Kraft auf die Brust 10-mal geringer als die Kraft, die die Wirbelsäule und die Rückenmuskulatur aufbringen müssten. Um die Unterstützung zu erreichen nutzt das passive Exoskelett einen Federmechanismus.	

Tabelle 46: Laevo, Laevo V2 (Quelle: laevo.nl)

Levitate Technologies Inc.	
Levitate ist ein US-Amerikanischer Hersteller von Exoskeletten für den industriellen Einsatz. Der Firmensitz der 2013 gegründeten Firma befindet sich in San Diego.	
Produkte: Airframe	
Airframe	
Das passive Exoskelette Airframe nutzt leichte Materialien zur Unterstützung der oberen Extremitäten bei wiederholten Armbewegungen und/oder statischen Überkopfarbeiten. Das Belastungsniveau wird um bis zu 80% gesenkt. Das Gewicht der Arme wird auf die Außenseite der Hüfte übertragen und gleichmäßig verteilt.	

Tabelle 47: Levitate Technologies, Inc., Airframe (Quelle: levitatetech.com)

Morita	
Die Morita-Gruppe ist mit 2400 Mitarbeitern einer der größten Hersteller von medizintechnischen Produkten weltweit. Das 1916 gegründete Unternehmen mit Sitz in Osaka in Japan vertreibt seine Produkte in über 70 Länder.	
Produkte: Rakunie	

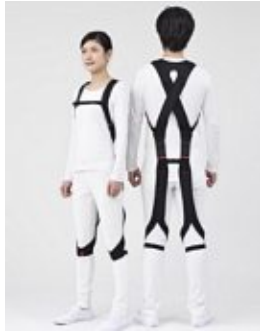
Rakunie	
Rakunie verringert die Rückenbelastung um 17%, indem es die Spannung nutzt, die durch das elastische Material entsteht, wenn sich der Benutzer bückt. Wenn der Träger aufrecht steht, oder sich verdreht, wird keine Stützkraft ausgeübt und somit einer Abnahme der Muskelkraft entgegengewirkt. Aufgrund seiner einfachen Bauweise wiegt das passive Exoskelett lediglich 250g.	

Tabelle 48: Morita, Rakunie (Quelle: morita119.com)



Noonee	
Noonee ist ein Exoskettehersteller mit Sitz in Baden-Württemberg. Das 2016 gegründete Unternehmen produziert und vertreibt das erfolgreiche Exoskelett Chairless Chair.	
Produkte: Chairless Chair	
Chairless Chair	
Der Chairless Chair bietet die Möglichkeiten mühelos zwischen einer aktiven Sitz-, Steh- und Gehposition zu wechseln. Er wird um die Hüfte und Beine geschnallt und bietet bequemen Platz zum Sitzen, sobald die Beine gebeugt und die passive Stützstruktur mit dem Körpergewicht belastet wird.	

Tabelle 49: Noonee, Chairless Chair (Quelle: noonee.com)

Ottobock	
Ottobock ist ein 1919 gegründetes, deutsches Unternehmen mit Sitz in Duderstadt und 7500 Mitarbeiter weltweit. Es war für mehrere Innovationen in der Prothetik verantwortlich (u.a. C-Leg, Michelangelo-Hand). Seit 2012 forscht Ottobock an innovativen Lösungen, mit denen sich Arbeitsplätze in Industrie, Logistik und Handwerk ergonomischer gestalten lassen.	
Produkte: Paexo Shoulder, Paexo Back	

<p style="text-align: center;">Paexo Shoulder</p>	
<p>Das passive Exoskelett Paexo Shoulder unterstützt den Träger bei anstrengenden Tätigkeiten, besonders bei der Überkopfarbeit. Mit einer mechanischen Seilzugtechnik wird das Gewicht der erhobenen Arme auf die Hüfte abgeleitet. Das schont die Muskeln und Gelenke im Schulterbereich spürbar und Tätigkeiten über Kopf lassen sich deutlich komfortabler ausführen. Es wird eng am Körper getragen, ähnlich wie ein Rucksack, und ermöglicht volle Bewegungsfreiheit.</p>	
<p style="text-align: center;">Paexo Back</p>	
<p>Die Funktionsweise des passiven Exoskeletts Paexo Back richtet sich nach einem biomechanischen Prinzip. Die Last wird wie bei einem Rucksack an der Schulter abgenommen und mit Hilfe der Stützstruktur des Exoskeletts in die Oberschenkel umgeleitet. Der Energiespeicher nimmt beim Beugen Kraft auf und gibt sie beim Heben wieder ab.</p>	


Tabelle 50: Ottobock, Paexo Shoulder, Paexo Back (Quelle: ottobock.com)

<p>RB3D</p>	
<p>RB3D ist ein französisches Unternehmen mit Sitz in Monetau. Es wurde 2001 gegründet und forscht seit 2008 an Hilfsmittel zur Reduzierung von Muskel-Skelett-Erkrankungen. Das erste Exoskelett von RB3D, Hercule, wurde 2011 für den militärischen Einsatz vorgestellt.</p>	
<p>Produkte: Hercule V3</p>	
<p style="text-align: center;">Hercule V3</p>	
<p>Das Hercule V3 ist ein aktives Exoskelett, welches zur Unterstützung des Unterkörpers insbesondere beim Arbeiten mit schweren Lasten dient. Bei einem Gewicht von 30kg und einer Akku-Laufzeit von 4 Stunden bietet das Exoskelett eine unterstützende Kraft von bis zu 30kg. Das Gewicht wird hierbei von der Hüfte direkt in den Boden geleitet.</p>	
<p style="text-align: center;">Exoback</p>	
<p>Das Exoback ist ein aktives Exoskelett zur Unterstützung der Lendenwirbelsäule bei Hebe-, Trage- und Haltetätigkeiten. Die Bewegungsfreiheit wird aufgrund eines Doppelgelenks nicht eingeschränkt. Das Exoskelett bietet eine Laufzeit von 9 Stunden bei einer Ladezeit des Akkus von 3 Stunden.</p>	

Tabelle 51: RB3D, Hercule V3, Exoback (Quelle: rb3d.com)

Robo.Mate	
<p>Robo-Mate begann als europäisches Forschungsprojekt, das von September 2013 bis November 2016 lief und von der EU mitfinanziert wurde. Nach erfolgreichen Tests im Labor und bei Industriepartnern bereiteten die wichtigsten Partner Folgeprojekte und die Kommerzialisierung ausgewählter Module vor.</p>	
Produkte: Active Arms, Passive Arms, Active Trunk	
<p style="text-align: center;">Active Arms</p>	
<p>Das aktive Exoskelett ist mit hochmodernen Drahtzugfunktionen ausgestattet, so dass der Anwender von einer Unterstützung bei Pick and Place-Aufgaben profitieren kann. Bei einem Gewicht von 2,3kg pro Arm bietet Active Arms eine Unterstützung von bis zu 7,5kg pro Arm.</p>	
<p style="text-align: center;">Passiv Arms</p>	
<p>Das Arm-Modul nutzt Federelemente, die eine konstante Abstützung der Arme und somit eine Reduktion der Armbeanspruchung des Benutzers ermöglichen. Das passive Exoskelett bietet somit eine sichere Handhabung von mittleren bis schweren Lasten.</p>	
<p style="text-align: center;">Active Trunk</p>	
<p>Das aktive Modul reduziert die Belastung der unteren Rückenmuskulatur, indem es ein Stützmoment auf die Hüfte ausübt. Das Modul ermöglicht dem Träger natürliche, aber unterstützte Bewegungen bei der Durchführung von Hebeaktivitäten. Bei einem Gewicht von 11kg bietet das Exoskelett eine Unterstützung von 15kg.</p>	

Tabelle 52: Robo.Mate, Active Arms, Passiv Arms, Active Trunk (Quelle: robo-mate.eu)

Sarcos	
<p>Sarcos ist ein amerikanischer Entwickler von Robotik-Systemen. Das Unternehmen wurde Anfang der 1980er Jahre nach der Ausgliederung aus der University of Utah gegründet und hat sich auf die Entwicklung von Robotern für militärische und öffentliche Sicherheitsanwendungen spezialisiert.</p>	
Produkte: Guardian XO	



Guardian XO	
Das Ganzkörper-Exoskelett Guardian XO ist der weltweit erste batteriebetriebene Industrieroboter, der menschliche Intelligenz, Instinkt und Urteilsvermögen mit der Kraft, Ausdauer und Präzision von Maschinen kombiniert. Das Exoskelett ist darauf ausgerichtet, die Kraft des Bedieners zu erhöhen, ohne die Bewegungsfreiheit einzuschränken.	

Tabelle 53: Sarcos, Guardian XO (Quelle: sarcos.com)

SkelEx	
SkelEx entwirft, produziert und vermarktet kundenspezifische, nicht angetriebene Exoskelettlösungen für den Oberkörper für große Produktionsunternehmen. Das Unternehmen wurde 2013 gegründet und hat seinen Unternehmenssitz in Rotterdam.	
Produkte: 360-XFR	
360-XFR	
Skeles 360-XFR ist ein passives Exoskelett für den Einsatz bei Überkopfarbeiten. Durch die verwendeten Materialien in der Außenhülle ist es feuerhemmend, öl- und wasserabweisend sowie statisch abweisend. Das 2,5kg schwere Exoskelett bietet eine Unterstützung von bis zu 5kg.	

Tabelle 54: SkelEx, 360-XFR (Quelle: skelex.com)

Strongarm Tech	
StrongArm Tech ist ein 2014 gegründetes, US-amerikanisches Unternehmen, mit Sitz in New York und Spezialisierung auf der Entwicklung von Sicherheitslösungen für Industriearbeiter. Zum Produktportfolio gehören neben einem Risikoüberwachungsgerät, einer Risikomanagement-Plattform auch die beiden Exoskeletttypen V22 und FLX.	
Produkte: V22 ErgoSkeleton, FLX ErgoSkeleton	






<p style="text-align: center;">V22 ErgoSkeleton</p>	
<p>Das V22 ErgoSkeleton ist ein passives Exoskelett für den Einsatz bei schweren Hebe- und Tragetätigkeiten. Bei unsachgemäßem Heben oder Überdrehungen übt das V22 Druck auf den Rücken aus, um den Träger in seiner Haltung zu korrigieren. Ein Teil des Gewichts des zu tragenden Gegenstands wird mittels Seile von den Armen auf den unteren Rücken abgeleitet.</p>	
<p style="text-align: center;">FLx ErgoSkeleton</p>	
<p>Das FLx Ergoskeleton ist eine funktionelle Arbeitsweste für den industriellen Einsatz. Durch Druckausübung auf den Rücken bei ergonomisch schlechten Bewegungen erinnert sie den Anwender an die richtige Körperhaltung und ergonomische Hebetechniken. Der Anwender wird nicht physisch unterstützt.</p>	

Tabelle 55: Strongarm Tech, V22 Ergoskeleton, FLx ErgoSkeleton (Quelle: strongarmtech.com)

<p>US Bionics</p>	
<p>Das Unternehmen SuitX, auch unter dem Namen US Bionics bekannt, ist ein Roboterunternehmen, das sowohl medizinische als auch industrielle Exoskelette entwirft und herstellt. US Bionics wurde 2011 vom Berkeley's Human Engineering Lab der University of California gegründet.</p>	
<p>Produkte: SuitX (backX, legX, 102houlder)</p>	
<p style="text-align: center;">SuitX backX</p>	
<p>Das Exoskelett BackX reduziert die Kräfte und Momente auf den unteren Rückenbereich des Trägers beim Bücken, Heben von Gegenständen, Beugen oder Greifen um durchschnittlich 60%. Zusätzlich zur Erhöhung der Belastbarkeit des Trägers soll der backX das Risiko von Rückenverletzungen stark minimieren. Der Träger wird beim Gehen, Treppensteigen, Sitzen, etc. nicht eingeschränkt.</p>	
<p style="text-align: center;">SuitX legX</p>	
<p>Das Exoskelett LegX ermöglicht es dem Benutzer, wiederholt oder über längere Zeiträume in die Hocke zu gehen, indem die Kräfte des Kniegelenks und des Quadrizeps-Muskels reduziert werden. Die Höhe der Unterstützung kann an die Bedürfnisse und das Gewicht des Benutzers angepasst werden. Die Unterstützung kann gegebenenfalls auch deaktiviert</p>	

werden. Für die Verwendung als Stuhl verfügt das legX einen Verriegelungsmodus.	
SuitX shoulderX	
<p>Das Exoskelett shoulderX ist ein industrielles Arm-Exoskelett zur Reduktion von schwerkraftinduzierten Kräften an der Schulter. Aufgaben in Überkopfhöhe können länger und mit weniger Kraftaufwand durchgeführt werden. ShoulderX gleicht das kombinierte Gewicht des Arms und der Werkzeuge, die der Träger hält, über den gesamten Bewegungsbereich des Körpers aus und kann schnell auf verschiedene Unterstützungsniveaus eingestellt werden. Ein anthropometrisches Profil und eine einstellbare Grösse ermöglichen eine natürliche Bewegung und eine intuitive Wahrnehmung der Position des Trägers auf engem Raum.</p>	

Tabelle 56: US Bionics, SuitX (Quelle: suitx.com)

8 Literaturverzeichnis

Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 2017. Internet of Production für agile Unternehmen: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai, 1. Auflage. ed. Presented at the Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, Apprimus Verlag, Aachen.

Antis, W., Honeycut, J.M., Koch, E.N., 1973. The Basic Motions of MTM, 4th ed. Maynard Foundation, Michigan.

AUVA, 2019. Arbeitsbedingte Muskel- und Skeletterkrankungen – eine zeitlose Herausforderung ohne Lösung?. URL https://wien.arbeiterkammer.at/service/veranstaltungen/rueckblicke/Julia_Lebersorg-Likar_29.1.2019.pdf (aufgerufen am 10.11.19).

BAuA, - Bundesanstalt Für Arbeitsschutz Und Arbeitsmedizin, 2019. Gefährdungsbeurteilung bei physischer Belastung - die neuen Leitmerkmalmethoden (LMM): Kurzfassung. <https://doi.org/10.21934/BAUA:BERICHT20191203>

Bengler, K., Lock, C., Teubner, S., Reinhart, G., 2017. Mensch in der Produktion von Morgen. Grundlegende Konzepte und Modelle, in: Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, S. 51–88.

Bevan, S., 2012. The Impact of Back Pain on Sickness Absence in Europe. The Work Foundation.

Bischoff, J., Hegmanns, T., Braun, S., 2015. Erschließen der Potenziale der Anwendung von "Industrie 4.0" im Mittelstand: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). agiplan GmbH.

BMAS, 2018. Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb (No. Forschungsbericht 502).

BMSGPK, 2019. Demographischer Wandel – geänderte Rahmenbedingungen für den Sozialstaat?. sozialministerium.at. URL <https://www.sozialministerium.at/Services/Studien.html> (aufgerufen am 6.15.20).

Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., de Looze, M., 2016. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. Appl. Ergon. 54, S. 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>

- Bostelman, R., Li-Baboud, Y.-S., Virts, A., Yoon, S., Shah, M., 2019. Towards Standard Exoskeleton Test Methods for Load Handling, in: 2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon). Presented at the 2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon), IEEE, Scottsdale, AZ, USA, S. 21–27. <https://doi.org/10.1109/WEARRACON.2019.8719403>
- Bräunig, D., Kohstall, T., 2013. Berechnung des internationalen “Return on Prevention” für Unternehmen: Kosten und Nutzen von Investitionen in den betrieblichen Arbeits- und Gesundheitsschutz: Abschlussbericht ; ein Forschungsprojekt der Internationalen Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS), der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), der Berufsgenossen Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) = Calculation the international return on prevention for companies: costs and benefits of investments in occupational safety and health, 2. Fassung, Feb. 2013. ed, DGUV-Report. DGUV, Berlin.
- Brink, A., 2013. Anfertigung wissenschaftlicher Arbeiten. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02511-3>
- Brooke, J., 1996. SUS: a “quick and dirty” usability scale, in: Usability Evaluation in Industry. Taylor & Francis, London, S. 252.
- Bungard, S., Hertle, D., Kliner, K., Lüken, F., Tewes, C., Trümmer, A., 2013. Gesundheit in Bewegung - Gesundheit in Bewegung: Schwerpunkt Muskel- und Skeletterkrankungen, BKK Geshundheitsreport. BKK, Berlin.
- Chryssolouris, G., 2006. Manufacturing systems: theory and practice, 2nd ed. ed, Mechanical engineering series. Springer, New York.
- Constantinescu, C., Popescu, D., Muresan, P.-C., Stana, S.-I., 2016. Exoskeleton-centered Process Optimization in Advanced Factory Environments. Procedia CIRP 41, S. 740–745. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.051>
- Dahmen, C., Constantinescu, C., 2020. Methodology of Employing Exoskeleton Technology in Manufacturing by Considering Time-Related and Ergonomics Influences. Appl. Sci. 10, S. 1591. <https://doi.org/10.3390/app10051591>
- Dahmen, C., Hefferle, M., 2018. Application of Ergonomic Assessment Methods on an Exoskeleton Centered Workplace, in: The XXXth Annual Occupational Ergonomics and Safety Conference. Pittsburgh.
- Dahmen, C., Wöllecke, F., Constantinescu, C., 2018. Challenges and Possible Solutions for Enhancing the Workplaces of the Future by Integrating Smart and Adaptive Exoskeletons. Procedia CIRP 67, S. 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.211>

- de Looze, M.P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K.S., O'Sullivan, L.W., 2016. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59, S. 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- de Looze, M.P., Krause, F., O'Sullivan, L.W., 2017. The Potential and Acceptance of Exoskeletons in Industry, in: González-Vargas, J., Ibáñez, J., Contreras-Vidal, J.L., van der Kooij, H., Pons, J.L. (Eds.), *Wearable Robotics: Challenges and Trends, Biosystems & Biorobotics*. Springer International Publishing, Cham, S. 195–199. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46532-6_32
- DGUV, 2019. Muskel-Skelett-Erkrankungen. dguv.de. URL <https://www.dguv.de/de/versicherung/berufskrankheiten/muskelskelett/index.jsp> (aufgerufen am 10.11.19).
- DGUV, 2018. Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. dguv.de. URL <https://www.dguv.de/medien/fbhandelundlogistik/pdf-dokumente/exoskelette.pdf> (aufgerufen am 10.21.19).
- DIN EN ISO 13482:2014-11, 2014. Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots.
- Dunker, N., Joyce-Finnern, N.-K., Koppel, Ilka (Hrsg.), 2016. *Wege durch den Forschungsdschungel*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12095-5>
- DZA, 2009. *Gesundheit und Krankheit im Alter*. gbe.bund.de. URL http://www.gbe-bund.de/pdf/Gesundh_Krankh_Alter.pdf (aufgerufen am 6.15.20).
- EIMaraghy, H.A., EIMaraghy, W.H., 2014. Variety, Complexity and Value Creation, in: Zaeh, M.F. (Ed.), *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Springer International Publishing, Cham, S. 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02054-9_1
- Eurostat, 2018. Durchschnittlich geleistete Stunden pro Woche. europa.eu. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180125-1> (aufgerufen am 10.17.19).
- Fasth-Berglund, Å., Stahre, J., 2013. Cognitive automation strategy for reconfigurable and sustainable assembly systems. *Assem. Autom.* 33, S. 294–303. <https://doi.org/10.1108/AA-12-2013-036>

- Goehlich, R.A., Krohne, I., Weidner, R., Gimenez, C., Mehler, S., Isenberg, R., 2016. Exoskeleton Portfolio Matrix, in: Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Presented at the Zweite Transdisziplinäre Konferenz, Laboratorium Fertigungstechnik, smartASSIST, Helmut Schmidt Universität, Hamburg, S. 622.
- Gopura, R.A.R.C., Kiguchi, K., 2009. Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties, in: 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Presented at the the Community (ICORR), IEEE, Kyoto, Japan, S. 178–187. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209630>
- Groshaw, P., 1969. Hardiman: Arm Test, Hardiman: Prototype, General Electric Rep (Technical Report). General Electric Co., New York.
- Gull, M.A., Bai, S., Bak, T., 2020. A Review on Design of Upper Limb Exoskeletons. Robotics 9, S. 16. <https://doi.org/10.3390/robotics9010016>
- Hellerstein, J., Neumark, D., 2004. Production Function and Wage Equation Estimation with Heterogeneous Labor: Evidence from a New Matched Employer-Employee Data Set (No. w10325). National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA. <https://doi.org/10.3386/w10325>
- Hensel, R., Steinhilber, B., 2018. Bewertung von Exoskeletten für industrielle Arbeitsplätze: Mehrwert durch eine kombinierte Evaluation mittels Laboruntersuchung und Felderprobung, in: Technische Unterstützungssysteme, Die Die Menschen Wirklich Wollen. Presented at the Dritte Transdisziplinäre Konferenz, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
- Hevner, March, Park, Ram, 2004. Design Science in Information Systems Research. MIS Q. 28, 75. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Ho, N.S.K., Tong, K.Y., Hu, X.L., Fung, K.L., Wei, X.J., Rong, W., Susanto, E.A., 2011. An EMG-driven exoskeleton hand robotic training device on chronic stroke subjects: Task training system for stroke rehabilitation, in: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Presented at the 2011 IEEE 12th International Conference on Rehabilitation Robotics: Reaching Users & the Community (ICORR 2011), IEEE, Zurich, S. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975340>
- Hold, P., Ranz, F., Holly, F., Cato, M., Markis, A., Oberweger, A., Baumann, W., 2020. Exoskelette in Produktion und Logistik: Grundlagen, Morphologie und Vorgehensweise zur Implementierung. Fraunhofer Austria, Wien.

- Hold, P., Selim, E., Reisinger, G., Sihm, W., 2017. Planung and Evaluation of Digital Assistance Systems. Presented at the Procedia Manufacturing 9, S. 143–150.
- Hu, S.J., 2013. Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization. *Procedia CIRP* 7, S. 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002>
- Hu, S.J., Ko, J., Weyand, L., ElMaraghy, H.A., Lien, T.K., Koren, Y., Bley, H., Chryssolouris, G., Nasr, N., Shpitalni, M., 2011. Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Ann.* 60, S. 715–733. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.004>
- IFR, 2017. World Robotics 2017 Service Robots. International Federation of Robotics.
- Karvouniari, A., Michalos, G., Dimitropoulos, N., Makris, S., 2018. An approach for exoskeleton integration in manufacturing lines using Virtual Reality techniques. *Procedia CIRP* 78, S. 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.315>
- Kauffeld, S. (Hrsg.), 2019. Arbeits-, Organisations- und Personalpsychologie für Bachelor: mit 42 Tabellen, 3. Auflage. ed, Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Germany.
- Kim, S., Moore, A., Srinivasan, D., Akanmu, A., Barr, A., Harris-Adamson, C., Rempel, D.M., Nussbaum, M.A., 2019. Potential of Exoskeleton Technologies to Enhance Safety, Health, and Performance in Construction: Industry Perspectives and Future Research Directions. *IIEE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors* 7, S. 185–191. <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1561557>
- Kitchenham, B., Charters, S., 2007. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Keele University/University of Durham.
- Kubitscheck, S., Kirchner, Johannes-Henrich, Kirchner, Johannes-H., 2013. Kleines Handbuch der praktischen Arbeitsgestaltung: Grundsätzliches, Gestaltungshinweise, Gesetze, Vorschriften und Regelwerke, Weiterführende Literatur, 2. Aufl. ed. Hanser, München.
- Kuhlang, P., Edtmayr, T., Sihm, W., 2011. Methodical approach to increase productivity and reduce lead time in assembly and production-logistic processes. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 4, S. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.02.001>
- Lee, H., Kim, W., Han, J., Han, C., 2012. The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 13, S. 1491–1497. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0197-x>

- Liersch, A., 2014. Arbeitsunfälle und arbeits- bedingte Gesundheitsprobleme: Ergebnisse einer Zusatzerhebung im Rahmen des Mikrozensus 2013. Statistisches Bundesamt.
- MacDougall, W., 2014. Industrie 4.0 Smart Manufacturing for the Future. Berlin, Germany.
- Marcheschi, S., Salsedo, F., Fontana, M., Bergamasco, M., 2011. Body Extender: Whole body exoskeleton for human power augmentation. Presented at the IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Shanghai.
- Mieg, H.A., Näf, M., 2005. Experteninterviews, 2. Aufl., Institut für Mensch-Umwelt-Systeme (HES), ETH Zürich.
- Nerdinger, F.W., Blickle, G., Schaper, N., 2014. Arbeits- und Organisationspsychologie, Springer Lehrbuch. Springer, Heidelberg.
- Nöllke, M., 2004. Kreativitätstechniken, 4. Aufl., TaschenGuide. Haufe, Planegg.
- Noonee, 2020. Der Implementierungsprozess des Chairless Chair. noonee. URL <https://www.noonee.com/implementierungsprozess/#> (aufgerufen am 4.9.20).
- Parent-Thirion, A., Eurofund (Hrsg.), 2012. 5th European working conditions survey: overview report, 5th European working conditions survey. Europ. Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions [u.a.], Dublin.
- Parent-Thirion, A., Vermeylen, G., van Houten, G., Lyly-Yrjänäi-nen, M., Biletta, J., Cabrita J., 2012. Fifth European Working Conditions Survey-Overview Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M.A., Chatterjee, S., 2007. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. J. Manag. Inf. Syst. 24, S. 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Ranz, F., Komenda, T., Reisinger, G., Hold, P., Hummel, V., Sihn, W., 2018. A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly. Presented at the Procedia CIRP 72, S. 99–104.
- Rauer, M., 2011. Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS). Seibert-Media Weblog. URL <https://blog.seibert-media.net/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/> (aufgerufen am 11.3.20).

- REFA, - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (Hrsg.), 2015. Industrial Engineering: Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung, 2. Aufl. ed, REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung. Hanser, München.
- Rinsdorf, L., Wellmann, F., 2003. Das Recherche-Protokoll — mehr als eine lästige Pflicht, in: Recherche, N. (Ed.), Trainingshandbuch Recherche. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S. 118–127. https://doi.org/10.1007/978-3-322-95648-4_12
- Rohmert, W., 1983. Formen menschlicher Arbeit, in: Praktische Arbeitsphysiologie. Rutenfranz J., Stuttgart, New York.
- Schawel, C., Billing, F., 2018. Top 100 Management Tools: das wichtigste Buch eines Managers: von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung, 6. Auflage. ed. Springer Gabler, Wiesbaden.
- Schick, R., 2018. Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. Zentralblatt Für Arbeitsmedizin Arbeitsschutz Ergon. 68, S. 266–269. <https://doi.org/10.1007/s40664-018-0299-0>
- Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H., Abendroth, B., Bier, L., Biermann, H., 2018. Arbeitswissenschaft, 4. Auflage. ed. Springer, Berlin.
- Schlund, S., 2019. Assistenzsysteme in der Produktion 1.
- Schmalz, Bornmann, Schirrmeister, Schändlinger, Schuler, 2019. Prinzipstudie zur Wirkung eines industriellen Exoskelts bei Überkopfarbeit. Orthop. Tech. 06/19.
- Schroeter, F., Weidner, R., Dehmel, P., Wulfsberg, J.P., Jacobsen, T., 2018. Der beflügelte Mensch: Gesteigerte Konzentration durch Unterstützungssysteme in der Produktion, in: Technische Unterstützungssysteme, Die Die Menschen Wirklich Wollen. Presented at the Dritte Transdisziplinäre Konferenz, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
- Smith, M.F., 2017. Research methods in sport. Learning Matters, London.
- Statistik Austria, 2019a. Bevölkerungsprognosen. Statistik.at. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demographische_prognosen/bevoelkerungsprognosen/index.html (aufgerufen am 12.17.19).
- Statistik Austria, 2019b. Erwerbsprognosen. Statistik.at. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demographische_prognosen/bevoelkerungsprognosen/index.html (aufgerufen am 12.11.19).

- Statistik Austria, 2014. Arbeitsunfälle und arbeitsbezogene Gesundheitsprobleme: Modul der Arbeitskräfteerhebung 2013. Statistik Austria, Wien.
- Statistik Austria, 2012. Bevölkerungsprognosen. Statistik.at. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demographische_prognosen/067546.html (aufgerufen am 6.15.20).
- Steinberg, U., 2012. Entwicklung der Leitmerkmalermethode manuelle Arbeitsprozesse. Sich. Ist Sich. 3. <https://doi.org/10.37307/j.2199-7349.2012.01.03>
- Sudonull, 2020. GE Hardiman - the world's first exoskeleton from the 60s of the last century. Sudonull.com. URL <https://sudonull.com/post/23789-GE-Hardiman-the-worlds-first-exoskeleton-from-the-60s-of-the-last-century> (aufgerufen am 7.20.20).
- Taentzer, G., 2014. Grundlagen der Anforderungsanalyse: Vorlesung Einführung in die Softwaretechnik. Universität Marbug.
- Tajini, R., Elhaq, S.L., 2014. Methodology for work measurement of the human factor in industry. Int. J. Ind. Syst. Eng. 16, S. 472. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2014.060655>
- Ulich, E., 2011. Arbeitspsychologie, 7., neu überarbeitete und erweiterte Auflage. ed. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.
- Weidner, R., Otten, B., Schroeter, F., Dehmel, P., Wulfsberg, J.P., Jacobsen, T., 2018. Effekte bei der Anwendung von Exoskeletten: Physische und kognitive Effekte beim Einsatz am Beispiel von Tätigkeiten in und über Kopfhöhe. Wt Werkstattstech. Online 108.
- Weidner, R., Redlich, T., Wulfsberg, J.P. (Hrsg.), 2015. Technische Unterstützungssysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48383-1>
- Wiendahl, H.-P., ElMaraghy, H.A., Nyhuis, P., Zäh, M.F., Wiendahl, H.-H., Duffie, N., Brieke, M., 2007. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Ann. 56, 783–809. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.003>
- WIFO, 2018. Fehlzeitenreport 2018: Krankheits- und unfallbedingte Fehlzeiten in Österreich – Präsentismus und Absentismus. hauptverband.at. URL <http://www.hauptverband.at/cdscontent/load?contentid=10008.665179&version=1543824555> (aufgerufen am 10.14.19).
- Wischmann, S., Hartmann, E.A. (Hrsg.), 2018. Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49266-6>

- Yao, Z., Weidner, W., Weidner, R., Wulfsberg, J., 2015. Human Hybrid Robot, Next-generation Support Technology for Manual Tasks: Challenges, Perspectives and Economic Implications. Presented at the SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition, S. 2015-01-2601. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2601>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Design Science Research Methode (DSRM) Prozessmodell.....	3
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 3: Bevölkerungspyramide 2018, 2030, 2060	6
Abbildung 4: Erwerbsprognose Österreich 2018	7
Abbildung 5: Erkrankte/Unfallverletzte nach Alter und Geschlecht 2005	8
Abbildung 6: Arbeitsbedingte Gesundheitsprobleme.....	9
Abbildung 7: Mensch, Technik, Organisation	15
Abbildung 8: Unterstützungssysteme in Produktion und Logistik	17
Abbildung 9: Entwicklungspfad von Assistenzsystemen in der Produktion	19
Abbildung 10: Zentrale Anforderungen an Exoskelette	26
Abbildung 11: Kategorien bzgl. Einführung und Verwendung von Exoskeletten	27
Abbildung 13: Abgrenzung	48
Abbildung 14: DSRM - Konzeption des Vorgehensmodells	49
Abbildung 15: Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz.....	49
Abbildung 16: Phase 1 - Planung und Auswahl.....	50
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Vorgehensweise	51
Abbildung 18: Phase 2 - Punktueller Einsatz.....	51
Abbildung 19: Phasen 3 und 4 - Regelmäßige Verwendung und Aftersales.....	52
Abbildung 20: Morphologie industriell einsetzbarer Exoskelette	55
Abbildung 21: Vorgehensweise in der Marktanalyse.....	56
Abbildung 22: Hersteller von Exoskeletten	56
Abbildung 23: Auswahl eines MTM-Verfahrens.....	59
Abbildung 24: Vorgehensweise zur Auswahl.....	63
Abbildung 25: Template für die erweiterte MTM-UAS Analyse	64
Abbildung 26: Informationserhebung.....	65
Abbildung 27: Auszug aus der Produktdatenbank.....	67
Abbildung 28: Korrelationsmatrix.....	68
Abbildung 29: DSRM - Überprüfung des Vorgehensmodells	71
Abbildung 30: Ottobock Paexo Shoulder, Montage Use-Case.....	77
Abbildung 31: Einteilung des SUS-Scores	79
Abbildung 32: SUS Auswertung Montage Use-Case	80
Abbildung 33: Laevo V2, Logistik Use-Case	84
Abbildung 34: SUS Auswertung Logistik Use-Case	85

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bevölkerungsentwicklung Österreichs	6
Tabelle 2: Arbeitsbedingte Gesundheitsprobleme in Deutschland 2013	8
Tabelle 3: Verschiedene Arbeitsformen	11
Tabelle 4: Humankriterien der Arbeitsgestaltung	13
Tabelle 5: Arten der Arbeitsgestaltung	14
Tabelle 6: Klassifizierung von Exoskeletten	22
Tabelle 7: SWOT Analyse aktiver Exoskelette	24
Tabelle 8: SWOT Analyse passiver Exoskelette	25
Tabelle 9: Standards und Richtlinien von industriellen Exoskeletten	29
Tabelle 10: Personenprofil, Experteninterview	32
Tabelle 11: Anforderungen an das Vorgehensmodell	34
Tabelle 12: Forschungsfrage und Unterfragen	35
Tabelle 13: Signifikante Schlagwörter	36
Tabelle 14: Suchmaschinen	36
Tabelle 15: Filterkriterien	37
Tabelle 16: Kombination von Suchbegriffen	38
Tabelle 17: Anzahl der Ergebnisse	38
Tabelle 18: Anzahl der Ergebnisse nach Screening Volltexte	39
Tabelle 19: Analyse der vorgestellten Methoden	42
Tabelle 21: Methodische Vorgehensweise der Diplomarbeit	47
Tabelle 22: Morphologischer Kasten	53
Tabelle 23: Hersteller von industriell einsetzbaren Exoskeletten	57
Tabelle 24: Beispiel einer erweiterten MTM-UAS Analyse	59
Tabelle 25: Ausgewählte Bewertungsmethoden	60
Tabelle 26: Ergonomiebewertung mit Hilfe der Leitmerkalmethode, Teil 1	62
Tabelle 27: Ergonomiebewertung mit Hilfe der Leitmerkalmethode, Teil 2	62
Tabelle 28: Erweiterte MTM-UAS Analyse des Montage Use-Case	74
Tabelle 29: Ergonomiebewertung des Montage Use-Case, Teil 1	75
Tabelle 30: Ergonomiebewertung des Montage Use-Case, Teil 2	75
Tabelle 31: Geeignete Exoskelette Montage Use-Case	76
Tabelle 32: Erweiterte MTM-UAS Analyse des Logistik Use-Case	82
Tabelle 33: Ergonomiebewertung des Logistik Use-Case, Teil 2	82
Tabelle 34: Ergonomiebewertung des Logistik Use-Case, Teil 2	83
Tabelle 35: Geeignete Exoskelette für den Logistik Use-Case	83
Tabelle 36: Atoun, Model Y	91
Tabelle 37: Bioservo, Ironhand	91
Tabelle 38: Comau, Mate	92
Tabelle 39: Cyberdyne, Hal Lumbar	92
Tabelle 40: Ekso Bionics, EksoVest	93

Tabelle 41: Exhaus, System, Picker	93
Tabelle 42: Exomys, Atlas, Daedalos	94
Tabelle 43: Fraunhofer IPA, Stuttgart Exo-Jacket	94
Tabelle 44: German Bionic, Cray X	95
Tabelle 45: Hunic, SoftExo	95
Tabelle 46: Innophys, Muscle Suit, Muscle Upper.....	96
Tabelle 47: Laevo, Laevo V2	97
Tabelle 48: Levitate Technologies, Inc., Airframe.....	97
Tabelle 49: Morita, Rakunie	98
Tabelle 50: Noonee, Chairless Chair	98
Tabelle 51: Ottobock, Paexo Shoulder, Paexo Back.....	99
Tabelle 52: RB3D, Hercule V3, Exoback.....	99
Tabelle 53: Robo.Mate, Active Arms, Passiv Arms, Active Trunk	100
Tabelle 54: Sarcos, Guardian XO	101
Tabelle 55: SkelEx, 360-XFR	101
Tabelle 56: Strongarm Tech, V22 Ergoskeleton, FLx ErgoSkeleton	102
Tabelle 57: US Bionics, SuitX.....	103
Tabelle 58: Abkürzungsverzeichnis	116

11 Abkürzungsverzeichnis

Σ	Summe
€	Euro
AxH	Häufigkeit
bzgl.	bezüglich
bzw.	Beziehungsweise
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
DS	Design Science
DSRM	Design Science Research Methodology
etc.	et cetera
h	Stunde
ISO	International Organization for Standardization
k.A.	Keine Angabe
kg	Kilogramm
LMM	Leitmerkmalmethode
m	Meter
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankungen
MTM	Methods-Time Measurement
MTO	Mensch-Technik-Organisation
N	Newton
Nm	Newtonmeter
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
SUS	System Usability Scale
TMU	time measure unit
VR	Virtual Reality
z.B.	zum Beispiel

Tabelle 57: Abkürzungsverzeichnis