



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Anwendungsbasierte Evaluation von Assistenzsystemen in der Produktion

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

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

(E330 Institut für Managementwissenschaften,
Bereich: Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

Dipl.-Ing. Tanja Zigart

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich:
Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Nowak Maximilian

01126351



Wien, im August 2021

Maximilian Nowak



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 weiters 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, im August 2021

Maximilian Nowak

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meiner Betreuerin Frau Dipl.-Ing. Tanja Zigart bedanken, die mich während der gesamten Arbeitszeit fachlich und wissenschaftlich betreut hat. Die konstruktive Kritik während der Entstehung der Arbeit hat mir dabei geholfen, meine Arbeit stetig zu verbessern. Des Weiteren kam ihr Feedback stets in kürzester Zeit bei mir an, wodurch ich meinen angestrebten Termin zur Einreichung der vorliegenden Arbeit einhalten konnte.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Sebastian Schlund bedanke ich mich für die Möglichkeit am Institut für Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems meine Diplomarbeit schreiben zu dürfen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Peter Schneider bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, bei AT&S (Austria Technologie & Systemtechnik Aktiengesellschaft) einen Teil der praktischen Abhandlung meiner Diplomarbeit durchführen zu können. Für die fachliche Betreuung von Seiten der AT&S bedanke ich mich insbesondere bei Herrn Christoph Groß und Rene Triller, die mir alle Informationen und Fragen beantworten konnten.

Bei Herrn Andreas Schütz bedanke ich mich für die Unterstützung in der Pilotfabrik der TU Wien und der Möglichkeit, mich vor Ort wissenschaftlich verwirklichen zu können.

Im Allgemeinen möchte ich mich beim gesamten Lehrpersonal der TU Wien bedanken, das mir in den letzten Jahren sehr viel beigebracht hat und mich bestens auf meine berufliche Laufbahn vorbereitet hat.

Weiters möchte ich mich bei meiner Mutter bedanken, die mir bei der Korrektur der Arbeit hinsichtlich Sprache und Grammatik zur Seite stand. Meinem Vater und meiner Schwester möchte ich für den Rückhalt in den letzten Monaten ebenfalls danken.

Mein herzlichster Dank geht auch an Herrn Benjamin Gnad M.Sc., der mir durch seine umfassende Beratung stets tatkräftig zur Seite stand.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Freundin Sophia Liebich bedanken, die auch in stressigen Zeiten während meines Studiums an meiner Seite gestanden ist.

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

Eine immer älter werdende Gesellschaft, erhöhte Flexibilität, hohe Variantenvielfalt, sowie Kostendruck aus Billiglohnländern stellt Industrienationen aus den wohlhabenden Ländern langfristig auf die Probe. Hier können assistierende Systeme in Fertigungs- und Produktionslinien aushelfen, um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben.

Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe eines Evaluationsmodelles und der Recherche im literarischen Bereich für zukünftige Implementierungen von Assistenzsystemen in der Produktion Ansätze abzuleiten. Die Betrachtung verschiedener Dimensionen, bezogen auf die Evaluation, ist für die Einführung eines Assistenzsystems immens wichtig. Eine beispielsweise rein finanzielle Betrachtung ist für eine schlagkräftige Argumentation nicht ausreichend. Aus diesem Grund muss eine multikriterielle Evaluation durchgeführt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Use-Cases evaluiert. Zum einen ein unter Laborbedingungen mit einem passiven Exoskelett in der Pilotfabrik der Technischen Universität Wien. Der zweite Anwendungsfall ist in Kooperation mit dem Unternehmen AT&S in Leoben. Hier wird der Einsatz eines fahrerlosen Transportfahrzeuges evaluiert.

Mit den Ergebnissen der beiden Use-Cases hinsichtlich verschiedener Dimensionen können so Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgearbeitet werden und für zukünftige Projekte verwendet werden. Das Modell, auf Basis dessen die beiden Use-Cases evaluiert werden, stützt sich auf die Betrachtung der folgenden fünf Dimensionen: Finanzen, Prozess, Erlernen & Entwickeln, Anwender und Technologie. Beispielhafte Messmethoden für jene Dimensionen werden definiert, wie beispielsweise Life-Cycle-Costing Rechnung, User Acceptance Umfragen oder auch Interviews mit Experten.

Basierend auf den Ergebnissen der Evaluation werden Maßnahmen eruiert, die für zukünftige Evaluation abgeleitet werden können, so dass diese effizienter durchgeführt werden können. Die unterschiedlichen Resultate auf Basis des Versuchshintergrundes ermöglichen Prognosen für die Versuchsdurchführung einer Evaluation zu tätigen.

Abstract

An aging society, increased flexibility, a wide range of variants, and cost pressure from low-wage countries are putting industrialized nations from wealthy countries on trial in the long term. Here, assisting systems in manufacturing- and production lines can help to remain competitive.

The goal of the thesis is to derive approaches for future implementations of assistance systems in production with the help of an evaluation model and research in the field of literature. The consideration of different dimensions, related to the evaluation, is truly important for the introduction of an assistance system. A purely financial consideration, for example, is not sufficient enough for a powerful argumentation. For this reason, a multicriteria evaluation must be carried out.

In the context of this work, two use cases are evaluated. One is under laboratory conditions with a passive exoskeleton in the pilot factory of the Vienna University of Technology. The second use case is in cooperation with the company AT&S in Leoben. Here, the use of a driverless transport vehicle is evaluated.

With the results of the two use cases with regard to various dimensions, similarities and differences can thus be worked out and used for future projects. The model on the basis of which the two use cases are evaluated is based on consideration of the following five dimensions: Finance, Process, Learn & Develop, User, and Technology. Exemplary measurement methods for these dimensions are defined, such as life-cycle costing, user acceptance surveys or interviews with experts.

Based on the results of the evaluation, measures are determined that can be derived for future evaluations so that they can be conducted more efficiently. The different results based on the testing background enable predictions to be made for the testing of an evaluation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld.....	12
1.2	Problemstellung und Forschungsfragen	15
1.3	Lösungsansatz und erwartetes Ergebnis.....	16
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit	18
2	Theoretische Grundlagen.....	20
2.1	Planungsprozess eines Assistenzsystems	20
2.2	Grundlagen der Evaluation	22
2.3	Definition und Überblick von Assistenzsystemen in der Produktion	23
2.3.1	Physische Unterstützung	26
2.3.2	Kognitive Unterstützung	32
2.4	MTM Methode	37
2.5	Betrachtung der Ergonomie.....	38
2.6	Pilotfabrik der TU Wien.....	39
2.7	Darstellung des unternehmerischen Umfeldes	40
3	State-of-the-Art und Literaturrecherche.....	41
3.1	Existierende Lösungsansätze für die Evaluierung von Assistenzsystemen..	41
3.1.1	Multikriterieller Ansatz für die Evaluation von Assistenzsystemen	41
3.1.2	Handbuch Mensch Roboter Kollaboration	43
3.1.3	Menschenzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme.....	50
3.1.4	Effekte und Nutzen altersgerechter Assistenzsysteme (ENAS).....	51
3.1.5	Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotentialen der Mensch-Roboter Kollaboration	55
3.1.6	Planung und Evaluierung von Digitalen Assistenzsystemen.....	56
3.1.7	Nutzenbewertung von digitalen Assistenzsystemen für Montagearbeitsplätze.....	58
3.1.8	Modell für ein arbeitsplatznahes Beschreibungsmodell	62
3.1.9	Modell zur Evaluierung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF)	66
4	Verwendete Methoden	68
4.1	Definition der ausgewählten Evaluation.....	68
4.2	Methodenbeschreibung der Messmethoden	70

4.2.1	Life-Cycle-Costing (LCC)	70
4.2.2	Zeitmessung	72
4.2.3	MTM.....	72
4.2.4	Qualitative Analyse	73
4.2.5	Kompetenzatlas	74
4.2.6	Ergonomic Assembly Worksheet (EAWS)	76
4.2.7	National Aeronautics and Space Administration - Raw Task Load Index (NASA-RTLX)	77
4.2.8	Technologie Akzeptanz und Komptabilität	78
4.2.9	System Usability Scale (SUS).....	79
4.2.10	Technology Readiness Level (TRL).....	81
5	Darstellung der praktischen Anwendungsfälle	82
5.1	Evaluation eines Exoskelett Use-Cases in der Pilotfabrik der TU Wien	82
5.1.1	Analyse der Ausgangslage – IST Zustand	83
5.1.2	User-Gruppe	87
5.2	Evaluation eines FTF-Use Cases bei AT&S	88
5.2.1	Ausgangslage – IST Zustand.....	88
6	Auswertung und Evaluation der praktischen Anwendungsfälle	91
6.1	Resultate Use-Case Exoskelett in der Pilotfabrik	91
6.1.1	Auswertung Evaluation	91
6.1.2	Auswertung Fragebögen.....	105
6.1.3	Fazit Evaluation	108
6.2	Resultate FTF in Kooperation mit AT&S.....	109
6.2.1	Auswertung Evaluation	110
6.2.2	Fazit Evaluation	125
7	Diskussion und Ausblick	127
7.1	Diskussion der Ergebnisse	127
7.2	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	129
7.3	Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung	129
8	Literaturverzeichnis	132
9	Abbildungsverzeichnis	140
10	Formelverzeichnis.....	143

11	Tabellenverzeichnis	144
12	Abkürzungsverzeichnis	145
13	Anhang	146
13.1	Transkription des semi-strukturieren Interviews	146
13.2	EAWS-Formblatt	154
13.3	NASA Task Load Index (NASA-TLX) Arbeitsblatt	159
13.4	Fragebögen Use-Case Pilotfabrik	159
13.5	Anleitung über das digitale Informationsdisplay	160
13.6	Paexo Shoulder – Servicepreise	166
13.7	Diverse Statistiken	167
13.7.1	Krankenstandfälle, -dauer und -tage 2019 nach Geschlecht, Alter und Wirtschaftsabschnitt	167
13.7.2	Absatz Exoskelette von 2015 bis 2025	167
13.7.3	Nettomonatseinkommen in Österreich 2019	168
14	Unveröffentlichter Anhang	170
14.1	E-Mail-Verkehr mit AT&S	170

1 Einleitung

Der demografische Wandel unserer Gesellschaft wird Unternehmen dazu zwingen, der älteren Belegschaft einen altersgerechten Arbeitsplatz anzubieten. Im Jahr 2030 werden 57,5% der in Österreich lebenden Personen zwischen 20 und 64 Jahren alt sein und der Anteil der über 65-Jährigen wird bei 23,2% liegen. Im Jahr 2000 lag der Anteil bei 61,5% beziehungsweise bei 15,4% für die ältere Gruppe, mit einer steigenden Tendenz.¹

Auf Basis eines Differenzmodelles wird es von Nöten sein, das biologische vom kalendarischen Alter zu trennen und jeder Person individuelle Unterstützung zur Seite zu stellen. Hier können verschiedenen Assistenzsysteme, wie fahrerlose Transportfahrzeuge, kollaborative Roboter, Exoskelette oder Virtual-/Augmented Reality Technologien eingesetzt werden. Um den Einsatz solcher Systeme gewährleisten zu können, ist eine Planung vorab notwendig. Im Zuge dessen, wird eine Evaluation eines passenden Systems stattfinden, um für jeden individuellen Use-Case das passende System auszuwählen. Faktoren wie Ergonomie, User-Acceptance oder Kosten müssen dabei berücksichtigt werden.^{2 3}

Assistenzsysteme in der Produktion finden immer mehr Einkehr in den Fertigungs- und Produktionslinien der Industrie, wie auch einen Platz unter Labor Bedingungen in der Forschung. Aufgrund der steigenden Variantenvielfalt in der Produktentwicklung in den vergangenen Jahrzehnten, steigt der Grad der Individualisierbarkeit der einzelnen Produkte stetig an. Globalisierung, Individualisierung, Technologiekonvergenz oder neue Konsummuster sind die Treiber dieser Entwicklung und gelten als sogenannte Megatrends, die langfristig einen Einfluss auf die Gesellschaft haben werden. Das Ziel ist es, die Variantenvielfalt der einzelnen Produktparten über modularisierte Baugruppen zu vereinen, um die Komplexität der Arbeitsprozesse minimalst halten zu können.⁴

Des Weiteren hat der Mensch, wenn es sich um die Wettbewerbsfähigkeit handelt, eine zentrale Rolle inne. Wird der Wirtschaftsstandort Österreich betrachtet, ist die Rolle des Menschen in Bezug auf die Wettbewerbsfähigkeit sehr wichtig. Experten und Expertinnen geben den österreichischen Fachkräften fast zur Gänze gute und sehr gute Bewertungen in Bezug auf das Qualifikationsniveau. Dies lässt hervorblicken, dass die menschliche Arbeit zukünftig eine zentrale Rolle in der Produktion spielen wird. Rund 94% der befragten Expertinnen und Experten geben in einer Umfrage des

¹ vgl. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/index.html (Gelesen am 05.06.2021)

² vgl. Lotter & Wiendahl, 2012, S.419

³ vgl. Zigart & Schlund, 2020, S.4

⁴ vgl. Krause & Gebhardt, 2018, S.1ff

Institutes für Mensch-Maschine-Interaktion der TU Wien an, dass die menschliche Arbeit eine große bzw. sehr große Bedeutung in der Produktion hat.⁵

Auf Basis dieser beiden Konzepte, die der menschlichen Expertise in der Produktion und der immensen Zunahme an Flexibilität sowie Variantenvielfalt, lässt sich das Themengebiet der Assistenzsysteme in der Produktion ideal einbinden. Um in Zukunft weiterhin die Qualität des Wirtschaftsstandortes zu sichern und kosteneffizient eine große Varianz an hochwertigen Industriegütern erzeugen zu können, wird die Kooperation zwischen Menschen und Maschinen eine zentrale Rolle spielen.⁶

Dies gibt den Anstoß für die vorliegende Arbeit, in der es vor allem um die Evaluation von Assistenzsystemen in der Produktion geht. Besonders die Evaluation jener Systeme ist wichtig, um alle beteiligten Stakeholder zu berücksichtigen. Kommt es bei einer traditionellen Betrachtung von Entscheidungsprozessen meist auf wenige Faktoren an, wird im Zuge der Implementierung von Assistenzsystemen eine breitere Betrachtungsweise relevant sein. Das Modell, das im Zuge dieser Arbeit untersucht wird, betrachtet die Dimensionen: Finanzen, Prozess, Erlernen & Entwickeln, Anwender und Technologie. Dieses Konzept wird auf Basis eines Industrieprojektes und eines forschungsnahen Umfeldes getestet, um für zukünftige Implementierungsprozesse Methoden abzuleiten.

Die folgende Grafik soll einen Denkanstoß für eine Kollaboration von Menschen und Maschine liefern. Das MTO-Konzept dient als grundlegendes Modell, um Assistenzsysteme gestalten zu können. Abbildung 1 zeigt eine grafische Abbildung dieses Konzepts:

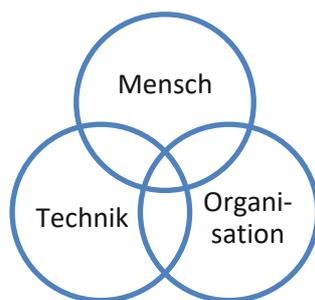


Abbildung 1: MTO-Konzept⁷

Zukünftige Arbeitssysteme werden den Mittelweg zwischen den drei Dimensionen Technik, Mensch und Organisation finden müssen. Gerade in Systemen, die Mensch und Technik Interaktion miteinander verbinden, gilt es die jeweiligen Stärken hervorzuheben und für die jeweilige Tätigkeit passend einzusetzen. Hier ist vor allem der Stand der Technik entscheidend. Mit den auf dem Markt befindlichen

⁵ vgl. Mayrhofer et al., 2020, S.4ff

⁶ vgl. Franke, 2019, S.1ff

⁷ vgl. Reinhart, 2017, S.55

Leichtbaurobotern, deren Verhältnis von Eigengewicht zu Traglast bis zu 2:1 sein kann, bieten sich hier mehr Möglichkeiten, als noch im letzten Jahrhundert. Der Einsatz von AR-Brillen oder Displays am Montageort sind weitere Beispiele für den Grad des technischen Fortschrittes. Viele dieser Neuerungen ermöglichen neue Möglichkeiten in der Montagegestaltung, bringen jedoch auch Risiken mit sich. MitarbeiterInnen können durch die wachsende Anzahl an Hilfsystemen überfordert werden, was in fehlerhaften Arbeitsschritten resultieren kann. ^{8 9}

Technik und Organisation bieten im Bereich von Cyberphysischen Systemen viel Optimierungspotential und geben neue Möglichkeiten hinsichtlich von Organisationskonzepten. ¹⁰

Die Dimension Mensch und Organisation, wobei letztere die Grundlage sein muss, damit ein Mitarbeiter die geforderte Arbeit leisten kann, liefert in Bezug auf den Einsatz des Personals wichtige Aspekte. Diese sind der Einsatz von Mitarbeitern für komplexere Aufgaben und weniger für einfache Montagetätigkeiten oder standardisierte Wartungsaufgaben. Dies bedeutet, dass der zukünftige Mitarbeiter in einer Fertigungslinie erweiterte Fertigkeiten aufweisen muss, wie beispielsweise Verantwortung hinsichtlich Produktionsmanagement oder Störungsbewältigung übernehmen wird. ¹¹

1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Grundlegender Aspekt der Arbeit gilt dem Grad der Automatisierung. Sheridan und Verplank haben bereits im Jahr 1978 die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Computer in Bezug auf die Automatisierung definiert. Dies wurde in 10 Stufen eingeteilt:

1. Der Mensch erledigt die Arbeit, keine Unterstützung durch den Computer.
2. Der Computer hilft bei der Entscheidung der möglichen Optionen.
3. Der Computer hilft bei der Entscheidung der möglichen Optionen und schlägt eine vor, die der Mensch nicht annehmen muss.
4. Der Computer schlägt eine Handlung vor, die vom Menschen angenommen werden kann, oder auch nicht.
5. Der Computer schlägt eine Handlung vor, und implementiert diese, wenn der Mensch es zulässt
6. Der Computer führt eine Handlung aus, der Mensch wird früh genug informiert, sodass er noch eingreifen kann.

⁸ vgl. Reinhart, 2017, S.55

⁹ vgl. Franke, 2019, S.2ff

¹⁰ vgl. Reinhart, 2017, S.55

¹¹ vgl. ebenda, S.55ff

7. Der Computer erledigt die Aufgabe und teilt es dem Menschen mit und gibt die nötigen Informationen über die Handlungen an den Menschen weiter.
8. Der Computer erledigt die Aufgabe und teilt es dem Menschen nur mit, wenn dieser explizit danach fragt.
9. Computer erledigt die Aufgabe und gibt dem Menschen Bescheid was erledigt wurde. Der Computer entscheidet jedoch, ob der Mensch informiert wird.
10. Computer erledigt die Aufgabe, wenn er entscheidet, dass sie zu erledigen ist. Der Mensch wird ignoriert und es wird über ihn hinweg entschieden.¹²

Da es bei dem Themengebiet der Assistenzsysteme in dieser Arbeit nicht um die volle Automatisierung eines Prozesses geht, werden die Unterpunkte, die sich im Mittelfeld bewegen als relevant definiert. Hierbei sind die Punkte 1, 9 und 10 als Randbedingungen auszuschließen. Punkt 1 schließt die Unterstützung durch einen Computer aus. Das Exoskelett benötigt keine Unterstützung durch einen Computer und sticht hier aus der Reihe heraus. Der Punkt 9 beschreibt eine vollständige Automatisierung eines Prozesses mit Hilfe einer künstlichen Intelligenz, die selbst darüber entscheidet, ob der Mensch von einer Entscheidung informiert wird. Punkt zehn beschreibt eine vollkommen, vom Menschen unabhängige Prozesslogik, die in der Fertigung in einer Kooperation stattfindet, welche für diese Arbeit nicht relevant ist. Die vollständige Automatisierung eines Prozesses ist ein klares Nicht-Ziel dieses Forschungsprojektes.

Um den Prozess der Interaktion besser auffassen zu können, gilt es die Arbeitsteilung zu betrachten. Hierbei können folgende drei Szenarien betrachtet werden:

1. Serielle Arbeitsteilung

Hierbei werden die einzelnen Prozessschritte nacheinander vom Menschen und der Maschine durchgeführt.¹³



Abbildung 2: Serielle Arbeitsteilung¹⁴

2. Parallele Arbeitsteilung

Hierbei werden die einzelnen Prozessschritte parallel vom Menschen und der Maschine durchgeführt.¹⁵

¹² vgl. Sheridan & Verplank, 1978, S.1ff

¹³ Kraiss, 1998, S.462

¹⁴ ebenda

¹⁵ ebenda

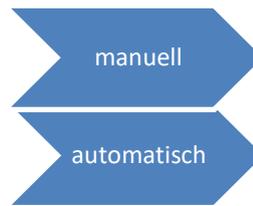


Abbildung 3: Parallele Arbeitsteilung ¹⁶

3. Parallelredundante Arbeitsteilung

Hier übernimmt die Maschine oder der Menschen eine überwachende Funktion mit der Option, in das Geschehen einzugreifen. ¹⁷

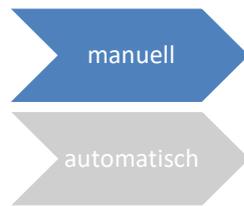


Abbildung 4: Parallelredundant mit menschlicher Überwachung ¹⁸

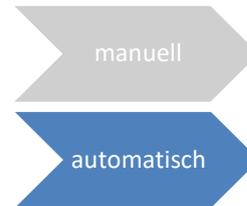


Abbildung 5: Parallelredundant mit maschineller Überwachung ¹⁹

Hierbei lassen sich folgende Eingriffsarten durch das Assistenzsystem definieren:

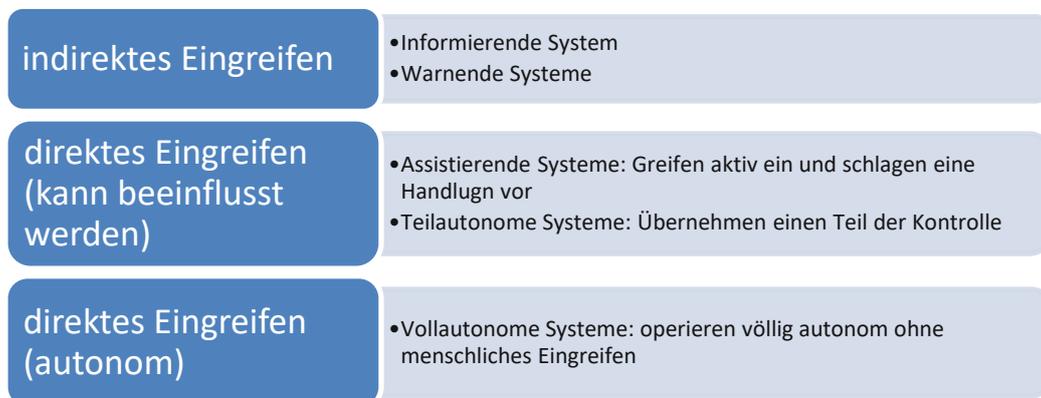


Abbildung 6: Klassifikation der Eingriffsarten²⁰

Den richtigen Grad an Automatisierung in der MRK zu finden, wird eines der zentralen Aufgaben der Transformation von Montageprozessen sein.

Ein wichtiger Teil dieser Transformation ist die Betonung der Menschenzentrierung der Produktionsstätten der Zukunft, die einen Paradigmenwechsel von unabhängigen automatisierten und menschlichen Aktivitäten, hin zu einer Mensch-Automatisierungs-Symbiose (oder "human cyber-physical systems") ermöglicht. Diese ist durch

¹⁶ Kraiss, 1998, S.462

¹⁷ ebenda

¹⁸ ebenda

¹⁹ ebenda

²⁰ vgl. Kuschefski et al., 2010, S.5

Kooperation von Maschinen mit Menschen in Arbeitssystemen ausgelegt. Dabei gilt es zu beachten, dass die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen nicht ersetzt werden sollen, sondern vielmehr sollen Mensch und Maschine koexistieren und er soll dabei unterstützt werden, effizienter und effektiver zu arbeiten.²¹ Zusätzlich bietet skalierbare Automatisierung einen Ansatz, um in kurzzyklischen und gezielten Anpassungen Montagesysteme stets den richtigen Grad an automatischen Prozessen und menschlicher Arbeit zu finden. Ein modulares System, welches rasche Anpassung der Arbeitsbedingungen bieten kann, dient hier als Grundlage. So lässt sich das System schnell erweitern bzw. menschliche Unterstützung gut in den Prozess flexibel integrieren. Dies ist eine der Entscheidungen, die ein Stakeholder für seine Produktionsstrategie in Betracht ziehen muss. Kommt es zum Entschluss einer MRK, werden weitere Schritte notwendig, die im Kapitel 2.1 erläutert werden²²

1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

Im Zuge der vierten Industriellen Revolution wird der Begriff der Digitalisierung von Produktionsprozessen sehr häufig verwendet. Hier versteht man Cyberphysische Systeme, die die teilweise weltweiten miteinander vernetzten Wertschöpfungsketten, optimal miteinander kommunizieren lassen sollen.²³

Um diese Herausforderungen bewältigen zu können, wird es notwendig sein, die Kooperation von Menschen und Robotern zu intensivieren und die jeweiligen Stärken beider Akteure hervorzuheben. Dies wird in Zukunft, unter anderem, die gemeinsame Zusammenarbeit eines intelligenten Systems und eines Menschen sein. Eine Evaluierung vieler verschiedener Assistenzsysteme für einen Arbeitsschritt kann es ermöglichen, dass in Zukunft solche Implementierungen schneller von statten gehen können. Betrachtet man eine einzige Evaluierung für einen spezifischen Prozess, erscheint dieser Ansatz fremd. Betrachtet man jedoch eine Mehrzahl an Evaluierungen verschiedenster Systeme, kann auf Basis der Resultate eventuell eine effizientere Implementierung von Systemen stattfinden. Dies macht es in weiterer Folge für Unternehmen interessanter, da diese Implementierungen und Evaluierungen schneller geschehen können, standardisierter sind und in weiterer Folge auch günstiger werden. Gerade in der Industrie gibt es viele Mitarbeiter mit langjähriger praktischer Erfahrung, die ein Grundgerüst vieler erfolgreicher Unternehmen sind. Hier gilt es jene nicht mit neuartigen Technologien zu überfordern und mögliche Skepsis zu vermeiden. Viel wichtiger wird es sein, die neuen Assistenzsysteme offen vorzustellen und gemeinsam

²¹ vgl. Romero et al., 2016, S.1

²² vgl. Reinhart, 2017, S.609

²³ vgl. ebenda, S.XXXIV ff.

mit den Angestellten eine mögliche Einführung und Umsetzung einer Zusammenarbeit zu bewerkstelligen.^{24 25}

Somit stellt sich folgende wissenschaftliche Frage, die in dieser Arbeit beantwortet wird:

„Wie lassen sich verschiedene Assistenzsysteme hinsichtlich multikriteriellen Evaluierungsmethoden evaluieren und welche jener lassen sich für zukünftige Implementierungen ableiten?“

Am Ende der Arbeit soll dem Leser klar vermittelt werden, ob das betrachtete Assistenzsystem im untersuchten Szenario nach klar nachvollziehbarer Evaluation, sinnvoll eingesetzt werden kann. Ein weiterer wichtiger und zentraler Bestandteil ist die Ableitung von Gestaltungsansätzen, die für eine Implementierung in Zukunft relevant sein könnten. Die Erläuterung der Evaluation erfolgt in den weiteren Kapiteln. Ein Nicht-Ziel ist es, Prozesse vollständig zu automatisieren, da es in dieser Forschungsarbeit um die hybride Kooperation zwischen Mensch und Maschine geht.

1.3 Lösungsansatz und erwartetes Ergebnis

Für das Einsetzen von Assistenzsystemen in der Produktion, um die Arbeit der werkenden Person effizienter und abwechslungsreicher zu gestalten, sprechen einige Argumente. Hierbei gilt die Unterscheidung zwischen den Begriffen der Rationalisierung und der Intensivierung der Arbeit. Ersterer beschreibt die Erhöhung der Arbeitsproduktivität durch externe Faktoren, technische oder organisatorische Hilfsmittel. Das heißt, dass der Output der Arbeit mit einer gleichbleibenden körperlichen und geistigen Anstrengung, zunimmt. Bei der Intensivierung geht es um die Steigerung des Outputs aufgrund einer höheren Anstrengung des Menschen. In der Realität sind beide Prozesse eng miteinander verknüpft, jedoch sollte die Priorisierung auf der Rationalisierung liegen, um den Output zu erhöhen, ohne den arbeitenden Menschen körperlich auszubeuten.²⁶

Genau deshalb bieten in dieser Sicht Assistenzsysteme eine ideale Ergänzung, um hier menschliches Handeln gezielt zu unterstützen. Hierbei kann die Art der Unterstützung für die Werkenden in folgende Bereiche gegliedert werden:²⁷



²⁴ vgl. Pistorius, 2020, S.1 ff

²⁵ vgl. Reinhart, 2017, S.51ff

²⁶ vgl. Schlick et al., 2018, S.4 ff

²⁷ vgl. Schlund et al., 2018, S.279 ff

Grundsätzlich gilt für ein Assistenzsystem, dass es die Arbeiter bei der Arbeit unterstützt, damit sie sich auf ihre Kernfähigkeiten konzentrieren können. Dafür sollen die benötigten Informationen „zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Form dem Mitarbeiter, assoziiert zur aktuellen Tätigkeit zur Verfügung gestellt werden, um eine Tätigkeit effizient und qualitativ hochwertig auszuführen.“²⁸

Des Weiteren muss der Automatisierungsgrad und die Automatisierungslücken definiert werden. Gerade der Grad der Automatisierung wird mit einer kleiner werdenden Losgröße immer wirtschaftlicher. Durch den Anstieg der Variantenvielfalt steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass gewisse Teilfunktionen weiterhin von Menschen erledigt werden müssen, was als Automatisierungslücke definiert wird.²⁹

Das gewünschte Resultat der wissenschaftlichen Aufarbeitung der Problemstellung soll zeigen, dass eines der gewählten Assistenzsysteme sowohl dem Mitarbeiter, als auch dem Unternehmen maßgebliche Vorteile liefert. Für das Unternehmen sollen klar nachvollziehbare Resultate für die Implementierung eines Assistenzsystems herausgearbeitet werden. Faktoren wie Produktivität, Durchlaufzeit, Technologiereifegrad, aber auch die wirtschaftlichen Aspekte müssen hier berücksichtigt werden. Den Angestellten des Unternehmens sollen beispielsweise die Vorteile in Bezug auf ihre Gesundheit und die Reduktion stark monotoner Tätigkeiten aufgezeigt werden. Mit einer nachvollziehbaren und klar strukturierten Evaluation sollen zukünftige Systeme schneller und effizienter implementiert werden können, oder als nicht geeignet definiert werden.

Der Use-Case in der Pilotfabrik der TU Wien sieht die Evaluation eines Überkopfmontageprozesses vor, der mit Hilfe eines Exoskeletts unterstützt werden soll. Grundlage hierfür ist ein Montageprozess einer Heckklappe im Automobilbereich. Um diesen Prozess divers betrachten zu können, gilt es diesen aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten. Bei den anfallenden hohen Investitionskosten (rund 4.900€ pro Stück³⁰) für ein Exoskelett, erscheint die Implementierung des Assistenzsystems aus der Sicht der Finanzen als unwirtschaftlich. Betrachtet man jedoch die Reduktion der körperlichen Anstrengungen oder den positiven Einfluss auf den Arbeitsalltag eines Benutzers, kann eine rein finanzielle Betrachtung nicht zum gewünschten Ziel führen. Genau deshalb wird das Assistenzsystem aus verschiedenen Sichtweisen bewertet, um abschließend eine Aussage über die Sinnhaftigkeit einer Unterstützung zu diskutieren.

Ähnliches gilt für den zweiten Teil des praktischen Teils der Arbeit, nämlich die Evaluation eines fahrerlosen Transportsystems in Kooperation mit dem Unternehmen AT&S in Leoben. Hier werden wiederum die verschiedenen Dimensionen eines

²⁸ Reinhart, 2017, S.67

²⁹ vgl. Schlick et al., 2018, S.5

³⁰ vgl. <https://www.malerblatt.de/betrieb-markt/exoskelette/> (Gelesen am 25.07.2021)

Assistenzsystem betrachtet. Der Schwerpunkt beider Evaluationen wird nicht derselbe sein, da aus Unternehmenssicht andere Vorstellungen herrschen, als aus Sicht eines Forschungsprojektes im universitären Umfeld.

Die Resultate der beiden Evaluationen werden sich in Bezug auf die unterschiedlichen Dimensionen nicht gleichen, jedoch sollen genau diese Erkenntnisse für zukünftige Evaluationen berücksichtigt werden können, um diese zukünftig schneller und effizienter durchführen zu können.

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Beginnend mit einer theoretischen Aufarbeitung der wichtigsten Begriffe und Definitionen, werden alle notwendigen Werkzeuge erläutert, um Evaluationen für Assistenzsysteme klar verständlich darzulegen. Um einen Überblick über eine Evaluation bekommen zu können, muss man jene bei der Implementierung zeitlich betrachten. Dafür wird ein klassischer Planungsprozess für die Einführung eines Assistenzsystems erläutert. Anschließend folgt eine Einleitung zum Thema der Evaluation. Die Aufarbeitung und Erläuterung der wichtigsten Assistenzsysteme folgen im Anschluss. Um einen Überblick über die verschiedenen Systeme zu bekommen, werden jene in vier Kategorien eingeteilt, nämlich in die Art der Unterstützung. Diese kann physisch, kognitiv, organisatorisch und kommunikativ geschehen.^{31 32 33} Wichtige Grundlegende Werkzeuge, wie MTM, sowie die Vorstellung der beiden Praxisumfelder befinden sich ebenfalls in der Einleitung der Arbeit.

Das Thema der Evaluation von Assistenzsystemen ist noch ein junges Forschungsgebiet. Eine umfassende Literaturrecherche zu diesem Thema folgt im Anschluss. Die Grundlage für die Evaluation des Praxisteils basiert auf den literarischen Quellen, die im Kapitel 3.1 herausgearbeitet werden. Diese werden am Ende der jeweiligen Erläuterung, so weit wie möglich, hinsichtlich der fünf Dimensionen: Finanzen, Prozess, Erlernen & Entwickeln, Anwender und Technologie zusammengefasst. Die so gefundene Evaluation wird auf beide Problemstellungen des Praxisteiles angewendet und dient somit als Evaluationsmodell.

Kapitel 4 beschreibt die verwendete Evaluationsmethode für den Praxisteil detaillierter. Hier werden vor allem die einzelnen Methoden, die notwendig sind, um die Dimensionen bestimmen zu können, genau erläutert.

Mit den gewonnenen Informationen beginnt die Erläuterung des Status Quo der Forschungsfrage. Es wird der IST-Zustand der derzeitigen Fertigungsschritte im Unternehmen, sowie der Pilotfabrik klar aufgezeigt und alle wichtigen

³¹ vgl. Hinrichsen, 2016, S.8

³² vgl. Weidner, 2016, S.359 ff.

³³ vgl. Reinhart, 2017, S.67ff.

Datengrundlagen dargelegt. Mit Hilfe einer BPMN-Darstellung wird der IST-Prozess vereinfacht dargestellt. Hierbei geht es um die genaue Darstellung und die Abgrenzung des Versuchsumfeldes. Zusätzlich werden, im Falle einer Umfrage, die Teilnehmer der Umfrage hinsichtlich Alter, Geschlecht und Bildungsgrad grafisch präsentiert.

Auf Basis des IST Zustandes wird die Evaluationen durchgeführt, um den definierten Prozess in der Pilotfabrik und bei AT&S zu untersuchen. Basis für die Laborbedingungen in der Polifabrik ist eine Überkopfmontage der Firma Volkswagen, die in der Slowakei stattfindet. Gemeinsam mit dem Unternehmen AT&S wird die Evaluation eines autonom fahrenden Fahrzeuges betrachtet, das sich zwischen zwei Puffersystemen bewegt.

Die Resultate der Evaluation werden im Anschluss dargestellt. Hierbei werden für den Use Case in der Pilotfabrik die Ergebnisse und zusätzlich die Auswertung der Fragebögen, sowie der ergonomischen Betrachtung dargestellt. Mit einem abschließenden Fazit wird das Projekt abgerundet. Der Fokus liegt hier auf dem Anwender. Für das Projekt mit AT&S erfolgt die Abhandlung ähnlich, jedoch wird sich hier der Fokus stärker auf die Bereiche Kosten und Prozess konzentrieren.

Auf Basis der genannten Fokusse werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Vorschein kommen, die in zukünftigen Implementierungen und Evaluationen berücksichtigt werden können. Diese und weitere Ausblicke für zukünftige Vorhaben runden diese Arbeit ab und schließen das Thema der vorliegenden Diplomarbeit.

2 Theoretische Grundlagen

Die notwendigen theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit erforderlich sind, werden in den folgenden Unterkapiteln dargelegt. Angefangen mit dem Projektmanagement für das Implementieren eines Assistenzsystems wird der zeitliche Punkt einer Evaluation definiert. Gefolgt von den Grundlagen einer Evaluation im Bereich der Assistenzsysteme wird die Basis für das Grundverständnis der Arbeit gelegt. Eine Auflistung aller in Erwägung gezogenen Systeme erläutert ihre jeweils wichtigsten Funktionen und Besonderheiten. Die Grundlagen für die verwendeten Methoden werden ebenfalls dargelegt.

2.1 Planungsprozess eines Assistenzsystems

Um einen groben Überblick über die Phasen eines Implementierungsprozesses eines Assistenzsystems zu bekommen, wird folgender Projektablauf definiert:



Abbildung 7: Projektphasen eines Implementierungsprojektes ³⁴

Der Projektstart beinhaltet die wichtigsten Aufgaben, die bereits vor der Konzeption geklärt werden müssen. Hierbei handelt es sich um Themen, wie die Stakeholder zu analysieren, Projekt-Management-Plans zu realisieren und die Rahmenbedingungen zu definieren.

Sobald diese Phase abgeschlossen ist, beginnt die Konzeption. Gemeinsam mit der Umsetzung und der Evaluation bilden sie das Grundgerüst für die Realisierung des Systems. Diese drei Phasen können entweder sequentiell, also nacheinander ablaufen, oder iterativ-rekursiv stattfinden.

Gefolgt von einer Testphase, der so genannten Pilotphase, in der das System getestet wird, schließt der Prozess mit dem Laufenden Betrieb ab. Dieser ist jedoch nicht mehr Teil des Implementierungsprozesses.

Um das nächste Kapitel, Grundlagen der Evaluation, in der zeitlichen Reihenfolge des Planungsprozesses besser verständlich zu machen, gilt es den Abschnitt Konzeption genauer zu betrachten. In diesem Prozessschritt fallen folgende wichtigen Arbeitsschritte ^{35 36}:

³⁴ vgl. Festo-APPSist Leitfaden, 2016, S.19

³⁵ vgl. Bornewasser & Hinrichsen, 2020, S.143ff

³⁶ vgl. Festo-APPSist Leitfaden, 2016, S.20ff

1. „IST-Prozessanalyse
2. Erstellung des SOLL-Prozesses
3. Anforderungsanalyse
4. Bestandsaufnahme der IT-Infrastruktur
5. Alternativenbewertung und -auswahl
6. Klärung Arbeitssicherheit
7. Datenschutzkonzept
8. Interaktionskonzept
9. Hardware Auswahl“³⁷

Die IST-Prozessanalyse liefert einen genauen Überblick über den momentan stattfindenden Prozess, um mögliche Schwachstellen aufzeigen zu können, an denen eine Optimierung möglich sein könnte. Sie ist die Basis für die Bewertung nach erfolgter Implementierung eines Assistenzsystems. Der SOLL-Prozess zeigt den gewünschten Endprozess auf. Die Anforderungsanalyse soll einen klaren Weg aufzeigen, damit die notwendigen Anforderungen zur Problemlösung nachvollziehbar sind. Dies wird meist mit einem Lasten- und einem Pflichtenheft realisiert. Die Bestandsaufnahme aus IT-Sicht liefert einen Überblick über den technischen Standard. Mit einer Alternativbewertung wird ein möglicher Einsatz von anderen Assistenzsystemen für den vorliegenden Prozess evaluiert. Die Arbeitssicherheit und der Datenschutz stellen bei jenen Systemen ebenfalls einen wichtigen Punkt dar.³⁸

Im nächsten Schritt folgt der Prozess der Umsetzung. Hier gilt es, die Inhalte des Assistenzsystems festzulegen, sowie die Implementation in bereits existierende Infrastruktur zu meistern. Folgende 5 Schritte sind als Anhaltspunkte definiert:³⁹

1. Festlegung der Inhalte
2. Validierung und Optimierung
3. Umsetzungsprozess
4. Umsetzung der Inhalte
5. Systemintegration

Im ersten Schritt geht es vor allem darum, das bereits existierende System so gut wie möglich nachzubilden, um alle Schnittstellen und Kontaktpunkte aufzunehmen. In der Validierungs- und Optimierungsphase gilt es die Prozessstruktur und den -inhalt endgültig zu bestimmen. Gefolgt wird jener Abschnitt von der Umsetzung, in der der Prozess sowie die Inhalte umgesetzt werden. Die Systemintegration beinhaltet die Implementation des Prozesses sowie dessen Inhalt in das vorhandene System. Mit dem Abschluss des fünften Punktes, beginnt der nächste und im Rahmen dieser Arbeit

³⁷ vgl. Festo-APPsits Leitfaden, 2016, S.28ff

³⁸ vgl. ebenda

³⁹ vgl. ebenda, S.65

wichtigster Schritt – die Evaluation. Dieser Abschnitt wird genauer im Kapitel 2.2 erläutert.

Die letzten beiden Abschnitte, der Pilotbetrieb und der darauffolgende laufende Betrieb werden zur Vollständigkeit genannt und im Laufe der Arbeit an Beispielen aus der Praxis dargelegt. In der Pilotphase wird das Assistenzsystem in Betrieb genommen und die betroffenen Personen müssen vorab eingeschult werden. Hier wird gezeigt, wie erfolgreich die vorherigen Schritte durchgeführt wurden, da nach Abschluss der Pilotphase, im laufenden Betrieb, meist nur noch Support Teams auf Abruf zur Verfügung stehen werden.⁴⁰

2.2 Grundlagen der Evaluation

Die Grundbasis für das Implementieren eines Assistenzsystems ist eine genaue Evaluation aller Randbedingungen im Vorfeld. Um sich mit der Thematik der Arbeit besser befassen zu können, gilt es das Wort Evaluation genauer zu betrachten und zu definieren. Der Begriff „valor“ an sich stammt aus dem lateinischen ab und bedeutet mit der Vorsilbe „e/ex“ übersetzt „einen Wert aus etwas ziehen.“ Demnach geht es bei der Evaluation um die Bewertung von Werten von Produkten, Prozessen, Projekten oder Programmen. Im Rahmen der Wissenschaft erfordert diese stets einen systematischen Ansatz, der durch datengestützte Modelle belegbar ist. Evaluationen dienen zur Darstellung der betrachteten Sachverhalte, auf Basis derer Bewertungen für die weitere Entscheidungsgrundlage bestimmt werden. Die Kriterien, die für diese Bewertung herangezogen werden, können unterschiedlichster Natur sein, wie der *„Nutzen eines Gegenstands, einer Handlung oder eines Entwicklungsprozesses für bestimmte Personen.“*⁴¹ Die Festlegung der gewünschten Parameter, anhand derer die Evaluation stattfindet, basiert auf den Wünschen einer Zielgruppe, teilnehmenden Stakeholdern oder durch jene Person, die die Evaluation durchführt.⁴²

Um komplexe Sachverhalte und Beziehungen zu berücksichtigen sticht der Term multikriterielle Optimierung hervor, der *„zur Bestimmung von Kompromisslösungen für Entscheidungsprobleme, in denen mehrere und zum Teil gegenläufige Ziele angestrebt werden, (...)“* verwendet wird.⁴³ Zudem werden bei einer Evaluation hinsichtlich verschiedener Kriterien, sowohl objektive als auch subjektive Faktoren

⁴⁰ vgl. Festo-APPSist Leitdaten, 2016, S.65

⁴¹ Stockmann, 2004, S.2

⁴² vgl. ebenda, S.2

⁴³ Geldermann, Multikriterielle Optimierung (29.09.2020)

<https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/technologien-methoden/Operations-Research/Mathematische-Optimierung/Multikriterielle-Optimierung/index.html> (gelesen, am 28.04.2021)

miteinbezogen. Deshalb ist eine Strukturierung, um eine Entscheidung hinsichtlich einer Evaluation treffen zu können, umso wichtiger.⁴⁴

Die Basis für die Beurteilung von Assistenzsystemen in der Produktion liefert eine strukturierte Evaluation jener Systeme. Im Kapitel 3 werden verschiedenen Ansätze von Evaluation dargelegt und erklärt. Auf Basis der Aufarbeitung werden für die nachfolgenden praktischen Evaluationen jene Erkenntnisse herangezogen.

2.3 Definition und Überblick von Assistenzsystemen in der Produktion

Die einzelnen Systeme, die zur Evaluierung in Betracht gezogen werden, reichen von Unterstützungen im Transportbereich bis hin zu kollaborativen Robotern. In den folgenden Kapiteln werden diese Systeme präsentiert und die wichtigsten Vertreter kurz vorgestellt. *„Unter dem Thema Assistenzsystem werden alle Technologien zusammengefasst, die die Beschäftigten bei der Ausführung ihrer Arbeit unterstützen und ihnen ermöglichen, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren.“*⁴⁵

Abbildung 8 zeigt die Morphologie für Assistenzsysteme, die es ermöglicht, die Systeme in verschiedene Kategorien einzuteilen.

⁴⁴ vgl. Geldermann & Lerche, 2014, S.4

⁴⁵ Bischoff et al., 2015, S.90

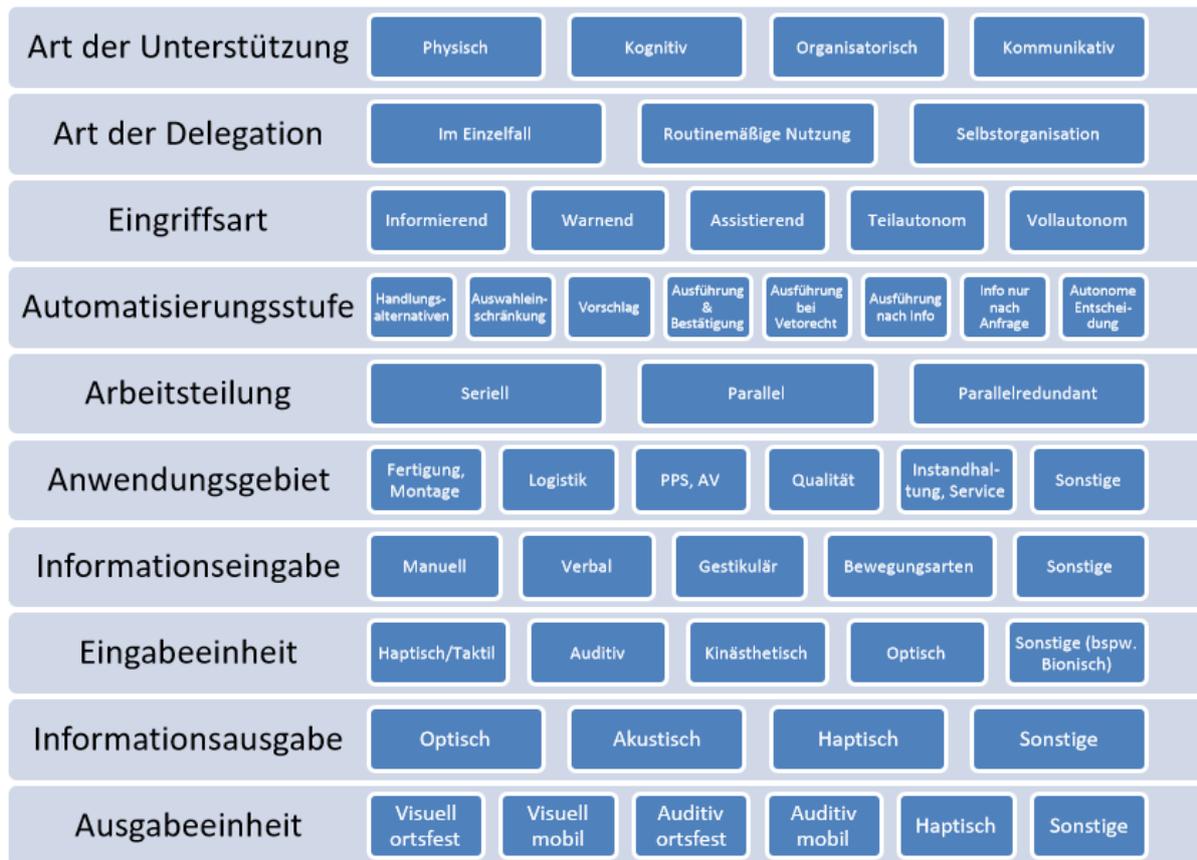


Abbildung 8: Morphologie für Assistenzsysteme, angepasst nach Prof. Schlund auf Basis von Weidner, Hinrichsen, Kuschefski, Kraiss und Romero (siehe Fußnote) ^{46 47 48 49 50}

Auf Basis dieser Einteilung werden die in Betracht gezogenen Assistenzsysteme kategorisiert und eingeteilt. Im Rahmen dieser Arbeit werden vor allem diese betrachtet, die auf die Mitarbeiter physisch und kognitiv unterstützend wirken. Aus diesem Grund bietet sich die grobe Einteilung hinsichtlich der Art der Unterstützung an, da diese Bereiche mit den evaluierten Assistenzsystemen zum großen Teil abgedeckt werden. Dies gibt den Ausschlag für die verwendete Unterteilung der folgenden Kapitel. Zusätzlich zu den beiden evaluierten Assistenzsystemen des praktischen Teiles, werden weitere wichtige Systeme dargestellt und erläutert, um den Rahmen abzurunden.

Bevor die Vorstellung der einzelnen Assistenzsysteme stattfindet, werden die einzelnen Kategorien der Morphologie (Abbildung 8) erläutert. Auf Basis der einzelnen Kategorien werden jedem Assistenzsystem, soweit möglich, die einzelnen Kategorien zugewiesen.

⁴⁶ vgl. Weidner, 2016, S.359 ff.

⁴⁷ vgl. Hinrichsen et al., 2016, S.8ff

⁴⁸ vgl. Kuschefski et al., 2010, S.5

⁴⁹ vgl. Kraiss, 1998, S.462

⁵⁰ vgl. Romero et al., 2016, S.2

Im Zuge der vierten industriellen Revolution werden Arbeiter in Montageprozessen nicht mehr durch kooperative Roboter unterstützt, sondern sie sollen kollaborativ agieren. Hierbei teilen sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsraum und führen die Tätigkeiten synchron oder zeitlich versetzt durch, die zur Erfüllung der Gesamtaufgabe notwendig sind.⁵¹ Hierbei soll der Arbeiter der Zukunft, einen intelligenten und qualifizierten Bediener darstellen, der bei Bedarf maschinenunterstützte Arbeit verrichtet. Die Unterstützung durch ein Assistenzsystem soll auf vier unterschiedliche Arten geschehen, nämlich physisch, kognitiv, organisatorisch und kommunikativ.⁵²

Den Zeitpunkt, bei dem ein Assistenzsystem dem Bediener zur Seite steht, gilt es ebenso zu beachten. Im Einzelfall kommt die Unterstützung dann, wenn der User einen konkreten Task an das zuständige Programm weiterleitet, damit dieses die Aufgabe vollenden kann. Routinemäßig bedeutet, dass das Assistenzsystem diese Entscheidung übernimmt, sodass sich der Arbeiter nicht darum kümmern muss. Die Selbstorganisation hebt die zweite Stufe, die routinemäßige Delegation, auf ein höheres Level. Dabei bestimmt das System über Ressourceneinsätze, erkennt wann Unterstützungen gebraucht wird oder kann im Falle von neuen Arbeitsbedingungen den Prozess selbstständig beeinflussen.⁵³

Die Eingriffsart durch das System kann informierend, warnend, assistierend, teil- oder vollautonom von statten gehen.⁵⁴

Die Art und Weise, wie ein Assistenzsystem dem Nutzer im Falle der Zusammenarbeit assistiert, ist die Grundlage der gemeinsamen Strategie der assistierenden Systeme in der Produktion. Dies kann wie folgt geschehen:⁵⁵

- informierend
- warnend
- assistierend
- teilautonom
- vollautonom

Wie bereits im Kapitel 1.1 erwähnt, kann die Arbeitsteilung seriell, parallel oder parallelredundant verlaufen. Auch hier können die verschiedenen Teilungen, je nach Prozess wechseln.⁵⁶

⁵¹ vgl. Buxbaum, 2020, S.99

⁵² vgl. Romero et al., 2016, S.2

⁵³ vgl. Roßnagel et al., 2009, S.1ff

⁵⁴ vgl. Hinrichsen et al., 2016, S.8

⁵⁵ vgl. Kuschefski et al., 2010, S.5

⁵⁶ vgl. Kraiss, 1998, S.462

Die Gebiete in denen Assistenzsysteme zum Einsatz kommen sind vielfältig. Im Bereich eines Fertigungsbetriebes können diese von Applikationen in der Logistik, Qualitätsmanagement, Instandhaltung & Service bis hin zu den eigentlich Montage- & Fertigungsschritten reichen.⁵⁷

Die Informationsausgabe erfolgt meist visuell, auditiv oder haptisch. Die Informationseingabe erfolgt durch die menschlichen Sinne und kognitiven Prozesse. Die zugehörigen Informationen werden entweder:⁵⁸

- manuell oder per Fuß über Aktoren eingegeben,
- verbal durch Spracheingabe,
- über Gestenerkennung
- Tracking-Systeme oder
- durch menschliche Bewegungserkennung.

2.3.1 Physische Unterstützung

Die folgenden Assistenzsysteme, die der physischen Unterstützung zugeordnet werden können, werden in den Unterkapiteln vorgestellt. Physische Assistenzsysteme sind so konzipiert, dass sie die Durchführbarkeit der Aufgabe gewährleisten und die körperliche Belastung der Mitarbeiter reduzieren.⁵⁹

2.3.1.1 Exoskelett

Trotz des anhaltenden Trends zur Automatisierung in der Industrie sind viele Arbeitnehmer immer noch körperlichen Arbeitsbelastungen durch Materialhandhabung (über 30 % der Beschäftigten in der EU), sich wiederholende Bewegungen (rund 60%) und ungünstige Körperhaltungen ausgesetzt (rund 40 %). Genau hier kann ein Exoskelett behilflich sein und dem Nutzer während seiner Tätigkeit als Assistenzsystem fungieren.⁶⁰

Bei Exoskeletten handelt es sich um ein Assistenzsystem, das den Nutzer bei physischer Arbeit mechanisch unterstützt, unabhängig ob es sich um ein aktives oder passives Skelett handelt, aus Unterstützungssicht. Den Ursprung haben diese Systeme in der Medizin und Rehabilitationstechnik. Sie unterstützen körperlich schwache, verletzte und behinderte Menschen. In der Industrie sind sie vor allem dort im Einsatz, wo massive Transportsysteme wie Gabelstapler oder Kräne zu groß sind und schwere Lasten nicht bedienen können. Des Weiteren ist dies auch bei flexiblen

⁵⁷ vgl. Franke, 2019, S.361 ff

⁵⁸ vgl. Hinrichsen et al., 2016, S.5

⁵⁹ vgl. ebenda, S. 7

⁶⁰ vgl. Eurofound, 2017, S.45

Arbeitsplätzen der Fall, bei denen der Arbeiter nicht stationär an einer Stelle verharrt.⁶¹
62

Grundsätzlich wird zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden, welche auch hybrid genutzt werden können. Dies bedeutet, dass die Steuerimpulse durch Elektromyographie bzw. Gehirnströme an das Exoskelett weitergeleitet werden. Einen Überblick über die Einteilung liefert Tabelle 1⁶³:

Tabelle 1: Einteilung von Exoskeletten⁶⁴

Bauart	Passive Exoskelette	Aktive Exoskelette	
Eigenschaften	<i>passive (Teil-) Unterstützung der Körpersegmente bei bestimmten Haltungen und Bewegungen</i>	<i>aktive (Teil-) Unterstützung der Körpersegmente bei bestimmten Haltungen und Lastenhandhabungen</i>	<i>aktive (Voll-) Unterstützung der Körpersegmente bei Haltung und Bewegung inkl. Lastenhandhabungen</i>
Unterstützte Körperregionen	<i>Beine / Rumpf / Arme / Kombinationen / Ganzkörper</i>	<i>Beine / Rumpf / Arme / Kombinationen</i>	<i>Beine / Rumpf / Arme / Kombinationen / Ganzkörper</i>
Funktionsweise	<i>Mech. Feder/ Gasdruckfeder / ggfs. max. Beugewinkelbegrenzung (Stützfunktion), ggfs. Funktion schaltbar (An / Aus)</i>	<i>elektrischer / pneumatischer Antrieb mit einfacher Regelungsfunktion, Stärke der Unterstützung einstellbar</i>	<i>elektrischer / pneumatischer Antrieb mit komplexer Regelungs-/ Steuerungsfunktion (Bewegungsprogramme, neurophysiologische Sensorik)</i>
Energiezufuhr	<i>keine – Speicherung von Energie beim Beugen (mit Hilfe der Schwerkraft)</i>	<i>Akku / Druckluft / Stromnetz</i>	<i>Akku / Druckluft / Stromnetz</i>

⁶¹ vgl. de Looze et al., 2017, S.195

⁶² vgl. Romero et al., 2016, S.4 f

⁶³ vgl. DGUV Fachbereich Handel und Logistik, 2019, S.2 ff.

⁶⁴ ebenda, S.3

Für den Use-Case in der anwendungsbasierten Evaluation im Rahmen dieser Arbeit, in der Pilotfabrik der TU Wien, wird ein passives Exoskelett evaluiert. Hierbei handelt es sich um das Gerät Paexo der Firma Ottobock. Mit 1,9 Kilogramm ist es eines der leichtesten Exoskelette, das speziell für Überkopfmontagen entwickelt wurde. Mit einem System, das dem eines Rucksackes ähnelt, lässt sich das Assistenzsystem sehr leicht einstellen und für den jeweiligen Nutzer leicht adaptieren. Die spezielle Bauweise ermöglicht volle Bewegungsfreiheit und es kann mehr als acht Stunden täglich getragen werden.⁶⁵

2.3.1.2 Fahrerlose Transportsysteme

Die Definition wurde im Jahr 2020 durch die VDI-Richtlinie 2510 klar definiert, da es in den Jahren zuvor mehrere unterschiedliche Auffassungen hinsichtlich der Begrifflichkeit gab.

„Fahrerlose Transportsysteme (FTS) sind flurgebundene Systeme, die innerbetrieblich innerhalb und/oder außerhalb von Gebäuden eingesetzt werden. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem oder mehreren automatisch gesteuerten, berührungslos geführten Fahrzeugen mit eigenem Fahrtrieb und bei Bedarf aus

- *einer Leitsteuerung,*
- *Einrichtungen zu Standortbestimmung und Lageerfassung,*
- *Einrichtungen zur Datenübertragung sowie*
- *Infrastruktur und peripheren Einrichtungen.“*⁶⁶

Die wichtigste Voraussetzung ist hierbei, dass der Materialtransport vollkommen autonom geschieht. Damit erschließt sich der direkte Einsatz bei einem Montageprozess nicht direkt. Ein FTS kann sich in einem Prozessschritt in Bezug auf die Materialzufuhr durchaus von Vorteil erweisen. So kann sich ein Mitarbeiter/in in der Montage unnötige Wege ersparen.⁶⁷

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind flurgebundene Maschinen zum Fördern von Fördergütern. Sie haben einen eigenen Fahrtrieb, werden automatisch gesteuert und berührungslos geleitet. Mittels aktiven bzw. passiven Lastaufnahmemitteln kann Fördergut mittels Ziehens und/oder Tragen transportiert werden.⁶⁸

Es gibt eine breite Palette an verschiedenen FTF-Kategorien:

⁶⁵ vgl. Ottobock, 2018, S.1f

⁶⁶ Ullrich & Albrecht, 2019, S.30

⁶⁷ vgl. ebenda, S.30 ff.

⁶⁸ vgl. ebenda, S.29

Tabelle 2: Kategorien FTF ⁶⁹

<i>Kat.</i>	<i>Benennung</i>	<i>Typische Last</i>
1	<i>Gabelhub-FTF, eigens konstruiert</i>	<i>Palette</i>
2	<i>Gabelhub-FTF als automatisiertes Seriengerät</i>	<i>Palette</i>
3	<i>Huckepack-FTF</i>	<i>Palette</i>
4	<i>Schlepper</i>	<i>Anhänger</i>
5	<i>Unterfahr-FTF</i>	<i>Rollcontainer, Trolley</i>
6	<i>Montage-FTF</i>	<i>Montageobjekt</i>
7	<i>Schwerlast-FTF</i>	<i>Rollen, Coils</i>
8	<i>Mini-FTF</i>	<i>Kleinladungsträger, unterschiedliche Behältnisse für Kleinteile</i>
9	<i>Outdoor-FTF</i>	<i>Diverse</i>
10	<i>Sonder-FTF</i>	<i>Diverse</i>

Besonders hervorzuheben, im Rahmen dieser Arbeit, ist das Huckepack-FTF. Ähnlich zu Kategorie eins und zwei werden Paletten, Kassetten oder Behälter transportiert. Der Unterschied besteht darin, dass bei Kategorie drei das Ladehilfsmittel nicht direkt vom Boden aufgenommen werden kann, sondern eine minimale Höhe von 60 cm aufweisen muss. Die definierte Höhe ist dann als Standard-Übergabehöhe für das gesamte Produktionsumfeld einzuhalten. Der riesige Vorteil dieser FTFs ist die Lastenhandhabung. Diese kann seitlich geschehen, sodass die Behälter direkt aufgenommen werden können, ohne dass sich das FTF ausrichten muss, wie es bei den Gabelhub-FTF der Fall ist. Die Förderer verschieben, mittels Rollen oder Ketten, anschließend die Behälter mit der Ladung auf das FTF. ⁷⁰

Bei AIV (automated intelligent vehicles) handelt es sich um FTF, die autonom arbeiten und auf Hindernisse reagieren, im Gegensatz zu traditionellen FTF, die den festen vorprogrammierten Pfaden folgen müssen und Hindernisse nicht umfahren können. Des Weiteren kommunizieren Sie untereinander und können so dynamisch ihre Routen anpassen. Somit muss kein Nachrüsten des Arbeitsplatzes stattfinden. ⁷¹

Die Navigation der Systeme basiert auf bewährten Technologien und bietet für jedes Einsatzszenario seine Vor- und Nachteile. Grundsätzlich unterscheidet man die folgenden Typen der Navigation voneinander:

- **Physische Leitlinie**
Diese Systeme benutzen verschiedenste Hilfsmittel, die im Boden, auf dem sie sich bewegen, verbaut sind. Hier handelt es sich beispielsweise um induktive Leitelemente, die im Boden verlegt werden oder magnetische Leitstreifen. ⁷²

⁶⁹ Ullrich & Albrecht, 2019, S.73

⁷⁰ vgl. ebenda, S. 77

⁷¹ vgl. Hellmann et al., 2019, S.815f

⁷² vgl. Ullrich & Albrecht, S.35 ff.

- **Navigation mit Stützpunkten**
Erlauben die Umstände keine Platzierung von physischen Leitlinien, kann auch mit Hilfe von Markierungen, die in regelmäßigen Abständen angebracht werden, eine Navigation realisiert werden. Das Fahrzeug bewegt sich frei zwischen den angebrachten Markierungen.⁷³
- **Lasernavigation**
Mittels eines Laserscanners, der auf dem Fahrzeug montiert ist, werden Markierungen erfasst, die Laserstrahlen reflektieren, die vom Fahrzeug aus ausgesendet werden. Auf Basis von mehreren Reflektionen kann so jederzeit die Position des Fahrzeuges in einem definierten Bereich festgestellt werden. Dies bietet einen hohen Grad an Flexibilität, setzt jedoch eine freie Sichtbahn, zwischen den Markierungen und dem fahrenden Objekt voraus.⁷⁴
- **Umgebungsnavigation**
Bei dieser Form der Navigation, werden markante und unbewegliche Objekte als Referenz verwendet, wie Bäume oder Wände. Durch permanentes Scannen der Umgebung gelingt es dem System seine momentane Lage stets zu definieren.⁷⁵
- **Funkortung**
Diese Art der Positionsbestimmung findet vor allem im Outdoorbereich seine Anwendung. Mit Hilfe von GPS wird dies bewerkstelligt.⁷⁶

Um das FTF richtig einsetzen zu können, benötigt es eine Steuerung. Hierbei kommt die FTS-Leitsteuerung zum Einsatz. Diese integriert das FTS in die Systemumgebung und koordiniert die Fahrzeuge, die im gegebenen Umfeld zum Einsatz kommen. Nach VDI 4451-7 ist es folgendermaßen definiert:

„Eine FTS-Leitsteuerung besteht aus Hard- und Software. Kern ist ein Computerprogramm, das auf einem oder mehreren Rechnern abläuft. Sie dient der Koordination mehrerer Fahrerloser Transportfahrzeuge und/oder übernimmt die Integration des FTS in die innerbetrieblichen Abläufe.“⁷⁷

Zusammenfassend hat die Leitsteuerung die folgenden Aufgaben:

⁷³ vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S.38 ff.

⁷⁴ vgl. ebenda, S.40 ff.

⁷⁵ vgl. ebenda, S.42 ff.

⁷⁶ vgl. ebenda, S.46 ff.

⁷⁷ VDI-Fachbereich Technische Logistik - VDI 4451-7, 2005, S.3

- Die Integration des FTS in die Umgebung.
- Koordiniert die Transportaufträge.
- Bietet eine breite Palette an Service-Möglichkeiten für die Benutzer an.
- Je nach Aufgabe werden Funktionsblöcke freigegeben und für die Anforderung verfügbar gemacht.⁷⁸

2.3.1.3 Kollaborationsfähige Roboter - Cobots

Kollaborationsfähige Roboter "Cobots" sind für eine direkte Interaktion mit einer menschlichen Fachkraft, die eine gemeinsame Arbeitslast haben, angedacht. Anders als zu Industrierobotern, die hinter Schutzzäunen agieren, arbeiten sie im gemeinsamen Arbeitsbereich mit einem Menschen. Um die unterschiedlichen Formen der Zusammenarbeit bildlich darzustellen, dient Abbildung 9.⁷⁹

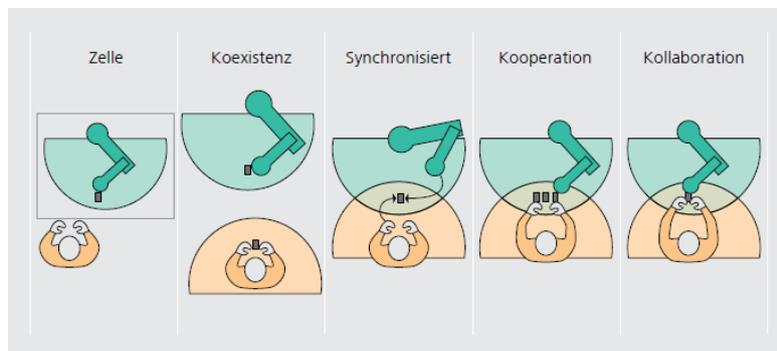


Abbildung 9: Definition der Zusammenarbeitsgrade von Menschen und Roboter⁸⁰

Die Unterscheidung, ob die Arbeitsprozesse seriell oder parallel stattfinden, ist im Falle des Cobots vom Anwendungsfall abhängig und nicht immer eindeutig zu definieren. Abbildung 9 zeigt den möglichen Interaktionsraum zwischen Menschen und Maschine. Kernessenz ist, dass beide Parteien denselben Arbeitsraum teilen, der mit AG gekennzeichnet ist.

Der Cobot bietet der bedienenden Person eine virtuelle Oberfläche, durch die die Führung des Armes vorgegeben ist und in der diese Bewegung frei programmiert werden kann. Wird Abbildung 10 betrachtet, bedeutet es, dass der Mensch in Arbeitsraum des Werkers bei einer anstehenden Kollision im Bereich AG nicht vom Roboterarm erfasst wird. Die Ergonomie- und Produktivitätsvorteile ergeben sich aus

⁷⁸ vgl. Ullrich & Albrecht, S.60 ff.

⁷⁹ vgl. Peshkin & Colgate, 1999, S.335 ff

⁸⁰ Bauer et al., 2016, S.9

der Kombination der Kraft und der Computerschnittstelle des Roboters mit dem Feingefühl und der Geschicklichkeit des menschlichen Arbeiters.⁸¹

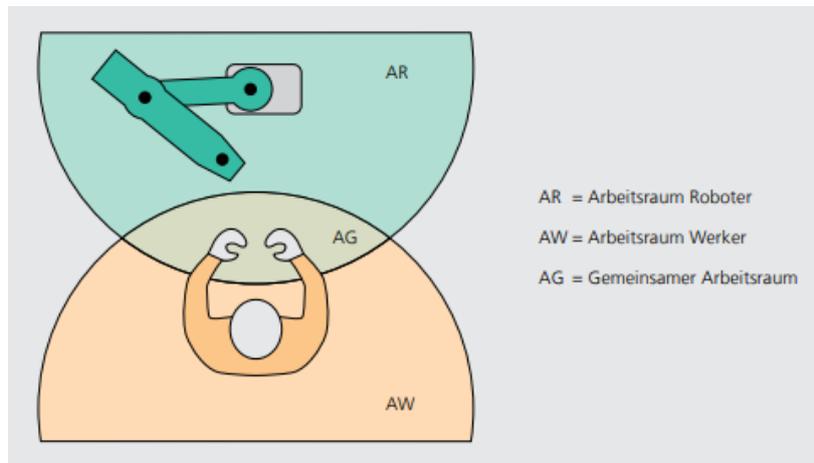


Abbildung 10: Interaktionsraum Mensch – Roboter⁸²

2.3.2 Kognitive Unterstützung

Bei der kognitiven Unterstützung werden Virtual- und Augmented Reality (AR-/VR) Applikationen, die dynamische Projektion, sowie das Thema Big Data betrachtet. Zusätzlich helfen diese Art von Assistenzsystemen Unsicherheiten und psychische Belastungen bei den Mitarbeitern zu vermeiden.^{83 84}

2.3.2.1 Augmented- und Virtual Reality

Die vereinfachte Darstellung des real-virtuellen Spektrums, beginnend bei der tatsächlichen Umgebung und einem komplett virtuellen Umfeld, lässt sich in Abbildung 11 veranschaulichen:

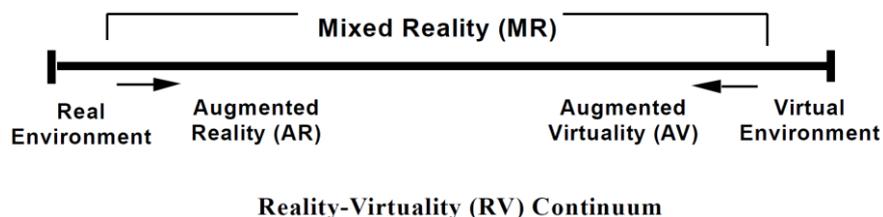


Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung des RV Kontinuums⁸⁵

Bei der virtuellen Realität taucht der Nutzer in eine komplette digitale Welt ein, die zumeist mit VR-Brillen realisiert wird. Die Merkmale aus der Realität werden virtuell nachgebildet, können jedoch auch überschritten werden. Physikalische Gesetze, wie

⁸¹ vgl. Peshkin & Colgate, 1999, S. 335

⁸² Bauer et al., 2016, S.8

⁸³ vgl. Romero et al., 2016, S.4f

⁸⁴ vgl. Hinrichsen et al., 2016, S.7

⁸⁵ Milgram et al., 1994, S.283

jene der Schwerkraft oder Zeit können abgeschafft werden, sodass sie in der virtuellen Welt nicht mehr gelten. Dies können beispielsweise Computersimulationen sein, die entweder monitorbasiert oder virtuell auftreten. Auf der anderen Seite spiegeln die physikalischen Grundgesetze in der realen Umgebung eine unausweichliche Rolle. Hierbei kann es sich um die tatsächliche Realität aus dem Blickwinkel der Person handeln, oder eine Darstellung jener über einem Display oder dergleichen. Anstatt beide Extrema einzeln zu betrachten, sollten diese als an verschiedenen Enden eines Kontinuums liegende Punkte betrachtet werden. In der Mitte jener befindet sich die Mixed Reality, die alle Zwischenstufen abbildet. Hier fließen Werte aus beiden Randbedingungen unterschiedlich stark, je nach Definition, ein.⁸⁶

Der Begriff Immersion steht für das, was die Technologie aus objektiver Sicht liefert. Dies bedeutet, dass je mehr ein System Darstellungen und Tracking liefern kann, bezogen auf die fünf Sinne des Menschen in der Realität, desto höher ist das Level der Immersion. Der Begriff soll das Eintauchen in eine Welt, die nicht der Realität entspricht, erläutern.⁸⁷ „Immersion ist somit ein graduelles Merkmal, das von verschiedenen Displays in unterschiedlichem Maße umgesetzt wird.“⁸⁸

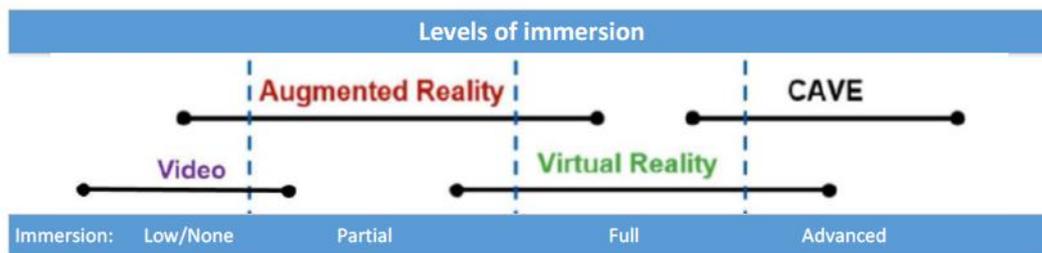


Abbildung 12: Stufen der Immersion^{89 90}

Abbildung 12 gibt einen Überblick, in welchem Bereich der Immersion sich die AR und die VR befinden. Die Begriffe Video und CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) sind zur Vervollständigung in der Abbildung enthalten. Das Video hat ein niedriges bzw. kein Immersionslevel. CAVE ist eine Stufe über der virtuellen Realität und wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Für die AR gilt, dass der User nicht völlig in einer virtuellen Welt eingetaucht ist. AR ermöglicht es dem Benutzer, die reale Welt zu sehen, wobei virtuelle Objekte mit der realen Welt überlagert oder zusammengesetzt werden. Im Idealfall erscheint es dem Benutzer so, dass die virtuellen und realen Objekte zur selben Zeit, im gleichen Raum und dreidimensional koexistieren. Die Darstellung von AR kann über diverse Technologien stattfinden, wie ein Surround-Screen Display, ein Head-Mounted Display

⁸⁶ vgl. Milgram et al., 1994, S.282ff

⁸⁷ vgl. Slater et al., 2009, S.195ff

⁸⁸ Dörner et al., 2013, S.14

⁸⁹ vgl. Bowman & McMahan, 2007, S.36 ff

⁹⁰ vgl. Ragan et al., 2010, S.527 ff

(HMD) oder ein auf dem Arm montiertes Display (arm mounted display). Herausforderungen für diese Technologie sind technologischer Natur (z.B.: Batterielaufzeit oder Konnektivitätsfaktoren), Umwelteinflüsse (Lichtverhältnisse und Nässe), Systemintegration, Ergonomie (langfristiger Einfluss auf Augen ungeklärt), Datenschutzproblematik (Kamera, Datenspeicherung in der Cloud), Verletzungsgefahr und die noch hohen Kosten. ^{91 92 93}

Bei der virtuellen Realität ist das Level der Immersion weit höher, sodass der Nutzer in die neue Umgebung komplett eintauchen kann. Somit wird von der Realität nichts mehr wahrgenommen. Hierfür werden einige Objekte benötigt, um diese Erfahrung zu ermöglichen. Zusätzlich zu den Display Geräten werden Vorrichtungen für Geräusche, Vibrationen bis hin zu Geruchssimulation benötigt, um den Grad der Immersion auf das gewünschte Level zu bringen. Eingabe Geräte, wie Datenhandschuhe oder Eye-Tracking Vorrichtungen sind ebenfalls ein Teil des VR Erlebnisses. Abbildung 13 gibt einen visuellen Überblick über die verschiedenen Teilsysteme eines VR-Systems. ⁹⁴

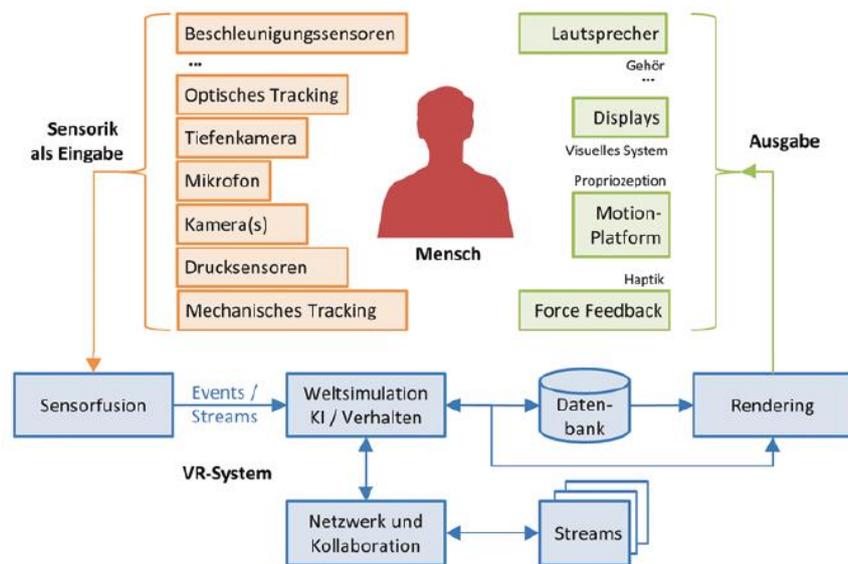


Abbildung 13: Teilsysteme eines VR-Systems ⁹⁵

Zusammenfassend lässt sich Abbildung 14 heranziehen, um die unterschiedlichen Technologien gegenüberzustellen. Der grundlegendste Unterschied besteht darin, dass der Nutzer bei AR mit der virtuellen und realen Umgebung gleichzeitig agiert. Des Weiteren können mit den Objekten der realen Umwelt Interaktionen stattfinden, was bei VR nicht der Fall ist. ⁹⁶

⁹¹ vgl. Azuma, 1997, S.356ff

⁹² vgl. Mohamad Said & Ismail, 2007, S.1145

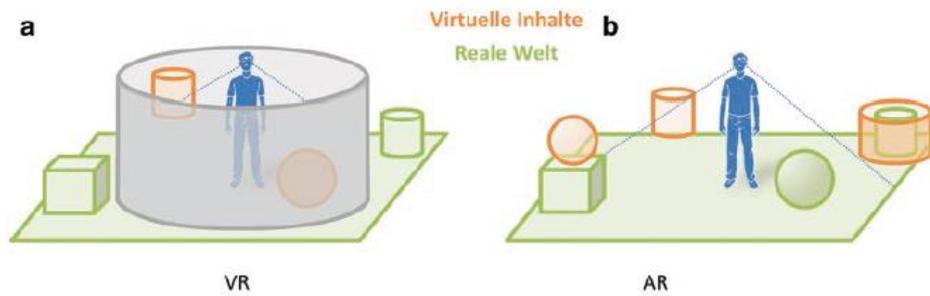
⁹³ vgl. Dubrova, D.: Augmented Reality issues-what you need to know (Gelesen am: 31.05.2021)

<https://theappsolutions.com/blog/development/augmented-reality-challenges/>

⁹⁴ vgl. Dörner et al., 2013, S.19ff

⁹⁵ ebenda, S.32

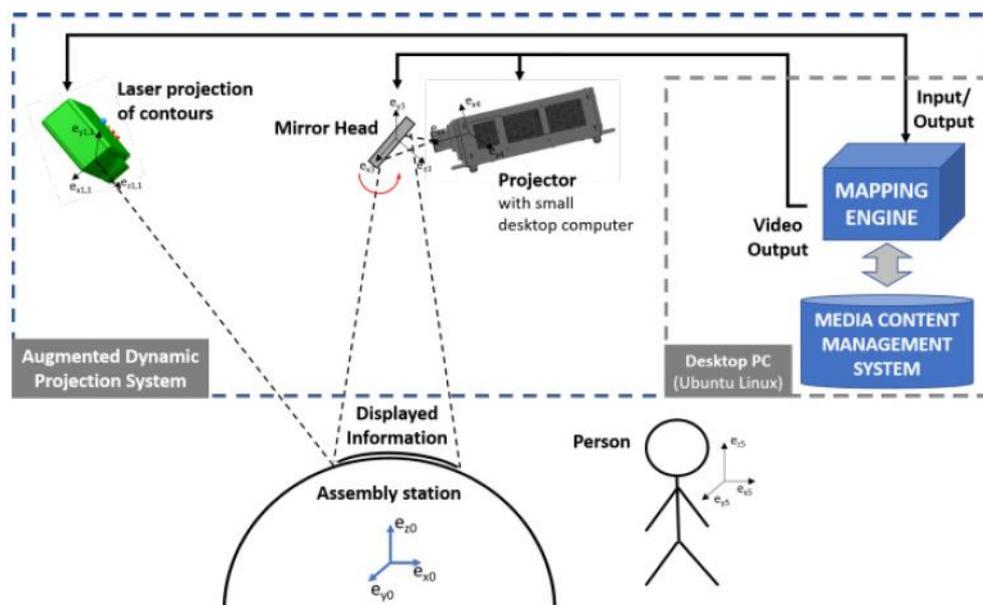
⁹⁶ vgl. ebenda, S.24

Abbildung 14: VR versus AR ⁹⁷

2.3.2.2 Dynamische Projektion

Bei der dynamischen Projektion handelt es sich um das Darstellen von Informationen auf einer Oberfläche, mit Hilfe eines Projektors. Dies kann sowohl parallel als auch parallelredundant stattfinden und kommt auf den jeweiligen Use-Case an. In einem Szenario, in dem die Dynamische Projektion als Trainingsgerät verwendet wird und nur bei falscher Aktion des Bedieners eingreifen soll, handelt es sich um eine parallelredundante Anwendung.

Schematischer Überblick eines Dynamischen Projektionssystems Abbildung 15 gibt einen Überblick, wie ein Projektionssystem aufgebaut ist und wie es funktioniert.

Abbildung 15: Schematischer Überblick eines Dynamischen Projektionssystems ⁹⁸

Aufbereitete Arbeitsinformationen und Augmented Medien, wie Bilder, Lernvideos und CAD-Daten können über einen Desktop-PC (Ubuntu Linux) mit einem Media Content Management System bereitgestellt werden. Das Kartierungsmodul (mapping engine) übersetzt die Informationen und kombiniert sie mit der Position, an der sie angezeigt

⁹⁷ Dörner et al., 2013, S.24

⁹⁸ Rupprecht et al., 2020, S.1184

werden soll. Die Informationen können auf das Bauteil, den Boden oder die Wand dreidimensional projiziert werden. Dies ermöglicht die Darstellung auf unebenen Flächen. Die intuitive Interaktion und die individuell erweiterten Informationen wie Videos und 3D-Elemente können an benutzerzentrierten Arbeitsplätzen für die Montage eingesetzt werden und bringen mehr Vorteile mit im Vergleich zu einem statischen System.⁹⁹

2.3.2.3 Big Data Analytics

Unter Big Data versteht man den Vorgang des Sammelns, Organisierens und Analysierens einer großen Menge an Daten (=Big Data), um wertvolle Informationen zu entdecken und diese sinnvoll für zukünftige Vorhersagen einzusetzen. Die Anwendung auf die Smarte Fabrik hat die Echtzeit-Analytik in der Fertigung gebracht, die auch als "Smart Manufacturing" bezeichnet wird.¹⁰⁰

Diese Analysen können für Produktionsleiter vielseitig hilfreich sein:¹⁰¹

- Sie können bessere Prognosen erstellen.
- Die Leistung der intelligenten Fabrik verständlich machen. (Shop-Floor-Kontrolle).
- Kontinuierliche Verbesserungen vorantreiben (Six Sigma).
- Eine bessere Sichtbarkeit von KPIs (Datenvisualisierung und interaktives Dashboard).
- Echtzeitwarnungen auf der Grundlage von Predictive Analytics (Fehlererkennung und Qualitätsverbesserung).

Mit diesen Echtzeitinformationen können die richtigen Entscheidungen getroffen werden, um Fehler schon im Vorhinein zu vermeiden, Probleme frühzeitig zu erkennen und die Effizienz zu steigern.¹⁰²

Datenanalyse und maschinelles Lernen haben schon jetzt einige Anwendungen in der Fertigung und kommen bereits relativ häufig zum Einsatz. Die Zunahme der verfügbaren Daten durch immer billigere Sensoren und das Industrial IoT (vernetzte Geräte), sowie schnelle Fortschritte bei unüberwachten Methoden wie Deep Learning, werden in naher Zukunft noch leistungsfähigere und anwendbarere Lösungen hervorbringen.¹⁰³

⁹⁹ vgl. Rupprecht et al., 2020, S.1183ff.

¹⁰⁰ vgl. Romero et al., 2016, S.8

¹⁰¹ vgl. ebenda

¹⁰² vgl. ebenda

¹⁰³ vgl. ebenda

2.4 MTM Methode

Die Abkürzung MTM steht für Methods-Time Measurement und dient der Beschreibung und Bewertung menschlicher Arbeit. Diese wird mit einer Systematik und Methodik präzise genau beschrieben, um menschliche Arbeit mit Zahlenwerten beschreiben zu können. Der grundlegende Vorteil dieser Methode gegenüber traditionellen Prozessbeschreibungen ist, dass eine sehr hohe Prozessauflösung erzielt werden kann.

Um dies zu bewerkstelligen, wird eine klar strukturierte Prozesssprache benötigt, wie es MTM ist. Hierfür werden alle Tätigkeiten, die in einem Prozess vorkommen, mit Hilfe von Bausteinen beschrieben. Die Aneinanderreihung von mehreren Bausteinen beschreibt den gewünschten Prozess. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass die Prozessbausteine für die Massen-, Serien- und Einzelfertigungen sich voneinander unterscheiden. Zusätzlich handelt es sich um einen weltweiten anerkannten Standard.

Die Kombination von MTM und dem Lean Konzept vom Beginn des Prozesses an führt zu einer Reduktion der Verschwendung entlang einer Wertschöpfungskette. Hierbei unterstützt das Lean-Konzept vor allem das Optimum über den betrachtenden Prozess hinaus, wo hingegen MTM auf den einzelnen Prozess gesehen, das Optimum erzielen möchte.^{104 105}

Einzelne Prozessbausteine des MTM werden in sogenannte TMU's (Time Measurement Unit) eingeteilt. Hierbei gilt:

$$1 \text{ TMU} = \frac{1}{100.000} \text{ Stunde} = 0,036 \text{ Sekunden}$$

Formel 1: Berechnung TMU¹⁰⁶

Im Rahmen der Entwicklung des MTM wurde festgestellt, dass 80 bis 85% aller Bewegungen sich aus den folgenden 5 Grundbewegungen zusammensetzen:

Tabelle 3: MTM Grundbewegungen¹⁰⁷

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

¹⁰⁴ vgl. MTM-1, 2019, S.5 ff.

¹⁰⁵ vgl. Britzke, 2010, S.1 ff.

¹⁰⁶ MTM-1, 2019, S.36

¹⁰⁷ ebenda, S.32

Die 5 Grundbewegungen lassen sich in einem Grundzyklus vereinen, wobei grundsätzlich zwischen Aufnehmen und Platzieren unterschieden wird. Die Abbildung 16 veranschaulicht den Grundzyklus und die darin enthaltenen Bewegungen:



Abbildung 16: MTM-Grundzyklus ¹⁰⁸

2.5 Betrachtung der Ergonomie

Als Grundlage zur Analyse menschlicher Arbeit gilt es, diese zu definieren. Das Strukturschema menschlicher Arbeit lässt sich anhand der Abbildung 17 darstellen:

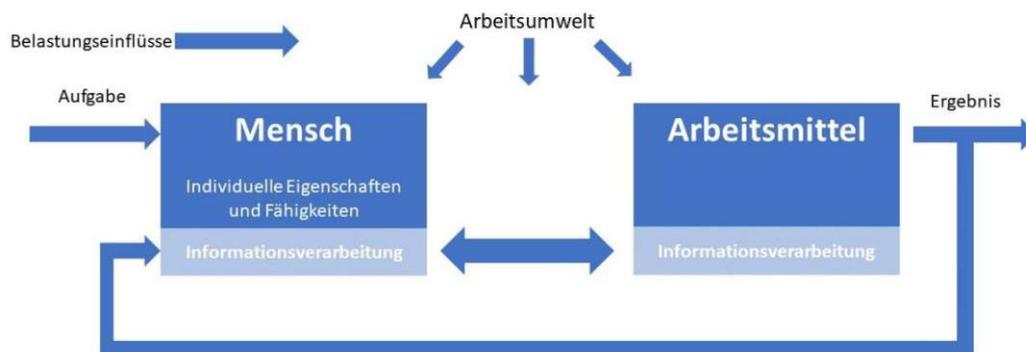


Abbildung 17: Strukturschema menschlicher Arbeit ¹⁰⁹

Um die Faktoren, die auf den Menschen wirken, beurteilen zu können, gilt es vorab drei Begriffe zu erläutern:

1. **Belastung:** ergibt sich aus der Arbeitsaufgabe, der Arbeitsumgebung und den persönlichen Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten des betrachteten Individuums. ¹¹⁰
2. „*Unter Beanspruchung versteht man die durch individuelle Eigenschaften des Menschen geprägte Reaktionen des Körpers auf von außen einwirkende Belastungen.*“

¹⁰⁸ MTM-1, S.32

¹⁰⁹ vgl. Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014, S.55

¹¹⁰ vgl. Schlick et al., 2018, S.24f

3. *Die Leistungsvoraussetzung (...) ist der Faktor, der die Belastung und die Beanspruchung miteinander verknüpft.*¹¹¹

Das gemeinsame Ziel aller 3 Punkte muss eine Vermeidung von Unterforderung, wie auch Überforderung sein. Wichtige Kernfaktoren hierfür, sind die Systemtransparenz, Erlernbarkeit und Mode Awareness, sodass die Motivation für die tätige Person gesteigert werden kann.¹¹² Dem Thema Gesundheit wird in der heutigen Zeit mehr Bedeutung geschenkt, als es noch vor 30 Jahren der Fall war. Deshalb gilt es im Bereich der Ergonomie bereits im Vorfeld Optimierungen zu treffen. Hierfür gilt es sowohl Arbeitssysteme, als auch Verhaltensprävention und Ressourcenstärkung in Betracht zu ziehen. Tabelle 4 liefert einen detaillierten Einblick.¹¹³

Tabelle 4: Anwendung von Erkenntnissen der Ergonomie¹¹⁴

Ansatzpunkte	Verhältnisprävention	Verhaltensprävention
Belastungsorientiert: vermeiden bzw. optimieren von gesundheitsgefährdenden Belastungen	<i>Optimierung der Arbeitsbelastungen, Gestaltung von:</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Arbeitsaufgaben</i> • <i>Arbeitsorganisation</i> • <i>Arbeitsplatz</i> • <i>Arbeitsmittel, (...)</i> 	<i>Schutz der persönlichen Ressourcen:</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Entspannungstechniken</i> • <i>Abbau von Risikofaktoren</i> • <i>Gesundheitsgerechte Arbeitsweisen</i>
ressourcenorientiert: schaffen von Ressourcen („Kraftquellen“)	<i>Aufbau von organisationalen Ressourcen:</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Vergrößerung von Handlungsspielräumen (...)</i> 	<i>Aufbau von personalen Ressourcen:</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Qualifizierung</i> • <i>Trainings</i> • <i>Mentoring, u.ä.</i>

2.6 Pilotfabrik der TU Wien

Die Pilotfabrik der Technischen Universität Wien ist ein Forschungszentrum, mit dem Ziel intelligente Produktion zu explorieren. Cyberphysische Systeme werden die zukünftige Produktion bestimmen. Sie stellen in modernen Montage-/Fertigungssystemen die Koppelung von der physischen mit der digitalen Welt dar. Die ständig steigenden individuellen Anforderungen der Kundinnen und Kunden führen zu immer komplexeren Prozessen in der Fertigung, um jenen Forderungen gerecht werden zu können. Dies führt die Industrie oft an deren Grenzen. Hierbei werden

¹¹¹ Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014, S.180ff

¹¹²vgl. Reinhart, 2017, S.54

¹¹³ vgl. Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014, S.31ff

¹¹⁴ ebenda, S.32

Objekte mit Hilfe von Sensorik erfasst und über Aktuatoren mit den physikalischen Prozessen interagiert. Jene Systeme sind über Netzwerke miteinander verbunden, was zu einem Austausch von Daten und Informationen weit über die Grenzen eines Fabrikgeländes hinaus stattfinden kann. Diese Technologie kann zu neuen Formen von Montage-/Fertigungsprozessen führen. Die TU Wien ermöglicht es, in der Pilotfabrik, diesen Bereich genauer zu untersuchen, um auf den Industrielltag der Zukunft vorbereitet zu sein. Des Weiteren dient der Standort als Testumfeld, um reale Produktionsabläufe unter realistischen Umgebungsbedingungen zu eruieren. Hinzu kommt die Tatsache, dass Studierende sowie Fachkräfte angeregt werden neue Technologien kennenzulernen und diese in ihrem beruflichen Umfeld umsetzen können. ^{115 116} Somit lassen sich folgende drei Kernpunkte, die in der Pilotfabrik im Mittelpunkt stehen, definieren: Forschung, Ausbildung und Wissenstransfer. ¹¹⁷

2.7 Darstellung des unternehmerischen Umfeldes

Das Unternehmen AT&S zählt zu den weltweit führenden Herstellern im Bereich von hochwertigen Leiterplatten und integrierten Schaltkreisen (IC-Substrate). Mit Produktionsstandorten in Europa und Asien werden für Kunden auf der ganzen Welt Hightech-Lösungen in unterschiedlichen Bereichen angeboten. Zu jenen zählen:

- *„mobile Endgeräte: Smartphones, Wearables (Datenbrille, Kopfhörer, Smartphones), Laptops und Unterhaltungselektronik (Actionkameras, Drohnen)*
- *IC-Substrate: Hochleistungsrechner, Server, Client PCs, Cloud und Edge Computing, 5G Basisstationen, Netzwerke und Gaming*
- *Automotive: Fahrerassistenzsysteme, Autonomes Fahren (Radar, Kamera, Fahrzeug-zu-X-Kommunikation), Energieversorgung für Antriebssysteme*
- *Industrie: Intelligente Anwendungen für Gebäude, Stromnetze, Beleuchtung, Fertigung, Einzelhandel und Transport, Telekommunikationsinfrastruktur*
- *Medizintechnik: Diagnostik- und bildgebende Systeme (Röntgen, MRI, Ultraschall), Therapie (Herzschrittmacher, Neurostimulation, Hörgeräte, Prothesen, Medikamentenverabreichung), Patientenüberwachung (Fitnessarmband, Glukosemonitore)“ ¹¹⁸*

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Verbindungen zwischen einzelnen Fertigungsschritten in der Produktionsstätte in Leoben betrachtet. Der Transport einzelner Produktionsaufträge innerhalb der Fabrik wird in den Fokus genommen und einer Evaluation unterzogen. ¹¹⁹

¹¹⁵ vgl. Hold et al., 2017, S.1ff

¹¹⁶ vgl. https://www.pilotfabrik.at/?page_id=820 (Gelesen am: 04.06.2021)

¹¹⁷ vgl. https://www.pilotfabrik.at/?page_id=820 (Gelesen am: 04.06.2021)

¹¹⁸ AT&S, 2020/21, S.5

¹¹⁹ vgl. AT&S, 2020/21, S. 4ff

3 State-of-the-Art und Literaturrecherche

3.1 Existierende Lösungsansätze für die Evaluierung von Assistenzsystemen

Ein Überblick über bereits existierende Evaluationsansätze dient der Aufarbeitung der schon bekannten Lösungsansätze. Auf Basis dessen, lassen sich wichtige Erkenntnisse für die gefundene These ableiten und dienen so der Optimierung der Evaluation der Forschungsfrage.

Mit der Klärung des Zieles der gefundenen Ansätze, der Einteilung hinsichtlich physischer und kognitiver Unterstützung in Anlehnung an Kapitel 2.3, werden die folgenden Evaluationen eingeteilt. Die Vorgehensweisen werden, wenn möglich, grafisch vorgestellt, um einen einheitlichen Vergleich der Evaluationen gewährleisten zu können. Die Relevanz für die Arbeit und die praktischen Evaluationen wird ebenfalls erläutert.

3.1.1 Multikriterieller Ansatz für die Evaluation von Assistenzsystemen

Im Paper von Zigart (2020) wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, die diverse Evaluation hinsichtlich ihrer Anzahl an Evaluationskriterien klassifiziert. Dabei wurden 42 Veröffentlichungen berücksichtigt, bei denen im Median zwei Kriterien evaluiert wurden. Die häufigsten Kriterien, die dabei evaluiert wurden, waren: ¹²⁰

- Effizienz, Effektivität, Leistung
- Qualität
- Usability, Ease of Use, User Experience
- Nutzerakzeptanz, Nutzerzufriedenheit
- Schulung, Training, Learning Outcomes
- Ergonomie, mentale/kognitive Belastung
- Kosten
- Situational Awareness

Auf Basis der Recherche und den gefundenen Kriterien wurden die folgenden fünf Dimensionen herausgearbeitet, angelehnt an das Modell der Balanced Score Card mit einer zusätzlichen Dimension – Technologie: ¹²¹

¹²⁰ vgl. Zigart & Schlund, 2020, S.2ff

¹²¹ vgl. ebenda, S.4

1. Kosten
2. Prozess
3. Lernen & Entwickeln
4. Anwender_innen
5. Technologie

Jene Dimensionen werden hinsichtlich weiterer Kriterien ergänzt, die mit den beispielhaften Messmethoden in der letzten Spalte der Abbildung 18 empirisch belegt werden können. Auf diese wird in Kapitel 4.2 genauer eingegangen.¹²² Anhand der beispielhaften Messmethoden kann systematisch jede einzelne Dimension betrachtet und auf Basis der subjektiven und objektiven Methoden bewertet werden.

3.1.1.1 Fazit und grafische Darstellung des Prozesses

Die vorgestellte Methode dient als fundamentale Grundlage für den praktischen Teil dieser Arbeit. Die beiden Use-Cases orientieren sich sehr stark an den Dimensionen und die Messmethoden werden Großteils für die Evaluation herangezogen. Somit lässt sich jene Evaluation, bezogen auf die untersuchten praktischen Anwendungsfälle, für physische Assistenzsysteme zuordnen. Im Zuge des Papers (Zigart & Schlund, 2020) wurde die Methode erstmals für VR-/AR-Anwendungen getestet. Somit kann in dieser eine mögliche Anwendung des Konzepts für physische Assistenzsysteme aufgezeigt werden.

¹²² vgl. Zigart & Schlund, 2020, S.4

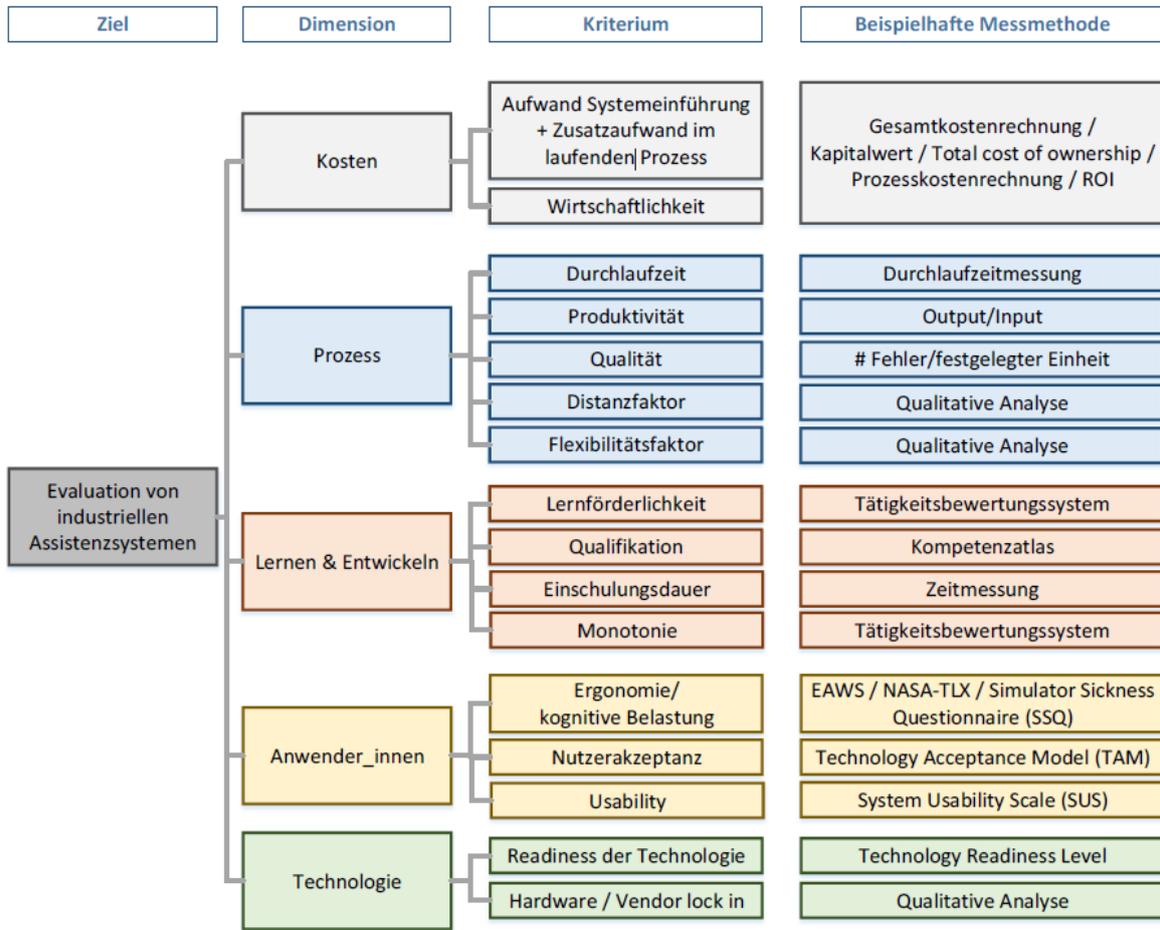


Abbildung 18: Konzept zur Evaluation von industriellen Assistenzsystemen ¹²³

3.1.2 Handbuch Mensch Roboter Kollaboration

Im Zuge einer Mensch-Roboter Kollaboration müssen einige Punkte beachtet werden. In Abbildung 19 werden die vier Grundpfeiler der Einführung nach Franke dargestellt:

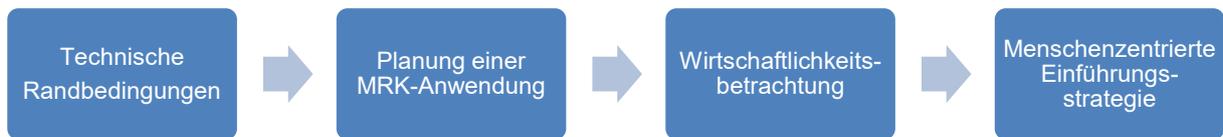


Abbildung 19: Einführung MRK nach Franke¹²⁴

Im ersten Schritt werden die technischen Rahmenbedingungen abgeklärt. Hierbei werden die notwendigen Kriterien mit Hilfe der CE Zertifizierung geprüft, das Risiko beurteilt, die Sicherheitsfunktionen für die Kollaboration betrachtet und eine Kraftmessung durchgeführt.

¹²³ Zigart & Schlund, 2020, S. 4

¹²⁴ vgl. Franke, 2019, S.311 ff

Bei kollaborativen Systemen handelt es sich nicht nur um einen Roboterarm, sondern um ein Robotersystem, das die zusätzliche CE-Zertifizierung erfordert.

Die Risikobeurteilung unterscheidet sich kaum von jener der Maschinenbeurteilung. Diese ist nach ISO 13849 definiert. Dabei werden Risikostufen von a (geringes Risiko) bis e (hohes Risiko) bestimmt. Für kooperierende Robotersysteme wird normalerweise das Level d herangezogen.

Bei den Sicherheitsfunktionen regelt die ISO/TS 15066 die unterschiedlichen Arten für den Betrieb von Mensch und Roboter.

Die Messung der Kraft schließt den ersten Prozessbaustein ab. Dabei gilt es, einen definierten Kraft- bzw. Druckwert zu messen, der im Betrieb als Maximum definiert wurde. Bei Erreichen jenes Grenzwertes, muss das System reagieren, um die kollaborierende Person vor möglichen Unfällen zu schützen.^{125 126}

Nach Abschluss der technischen Randbedingungen kann mit der Planung der MRK-Anwendung begonnen werden. Auf Basis einer IST-Analyse werden die Anforderungen aufgenommen und in weiter Folge zyklisch in die Schritte „Spezifikation, Lösungsdesign, Komponenteneinführung und Test“¹²⁷ gegliedert.

Mit Hilfe der Brownfield- (bereits bestehender Prozess) bzw. Greenfield- (komplett neuartige Konzeption eines Prozesses) Planung werden auf Basis der getroffenen Anforderungen weitere Planungsschritte getroffen. „Pauschal ist der Mensch in einem „Brownfield-Prozess“ schneller als der Cobot, da die bestehenden Strukturen auf einen Menschen zugeschnitten sind.“¹²⁸

Die Komponente Mensch ist in der Implementierung einer MRK-Applikation ein wichtiger Faktor, da die Kombination aus seinen Stärken und die des Roboters als gewünschter Output dienen. Ziel jener Kollaborationen ist den Menschen und den Roboter als Team zusammenzubringen, sodass die Arbeit komplementär ausgeführt werden kann.

Nach Brownfield wird mittels Nutzwertanalyse ein definierter SOLL-Zustand mit dem IST-Zustand abgeglichen, um die Ziele einer Optimierung zu bewerten. Zielkriterien sind an das Kosten-, Qualität- und Zeit-Dreieck angelehnt. Weitere Faktoren in Bezug auf die Entscheidung sind die Themen „Ergonomie, fähigkeitsbasierte Aufgabenverteilung sowie Zeit und Raum.“¹²⁹ Die geforderten Lösungskonzepte müssen in K.o.-Kriterien und SOLL-Kriterien gegliedert werden, um sofort zeigen zu können, welche Lösungen das Ziel nicht erreichen und somit ausgeschlossen werden

¹²⁵ vgl. Franke, 2019, S.311 ff

¹²⁶ vgl. DIN EN ISO/TS 15066, 2017, S.13ff.

¹²⁷ ebenda, S.323

¹²⁸ ebenda, S.324

¹²⁹ ebenda, S.330

können. Im Falle einer MRK sind die Sicherheit, sowie die Akzeptanz des Werkers ein solches K.o.-Kriterium. Hinzu kommen Wunschziele, die die möglichen Lösungen in einer Reihenfolge bringen sollen. Zwei sehr wichtige Faktoren in Bezug auf die Bewertung sind Technik und Wirtschaftlichkeit. Letzterer ist in der Industrie maßgeblich, da das Hauptziel der meisten Unternehmen die Gewinnmaximierung ist. In Bezug auf die Technik werden meist Qualität und Produktivität betrachtet.

Die Spezifikation liefert die Grundlage für das Pflichtenheft. Im Abschnitt Lösungsdesign wird zwischen Grob- und Feinentwurf unterschieden. Mit der anschließenden Implementierung wird die tatsächliche Umsetzung im Betrieb betrachtet. Zu beachten ist, dass sämtliche Abschnitte eine Rückkoppelung zur vorherigen Phase aufweisen, sodass die optimale Lösung gefunden werden kann.

Die wirtschaftliche Betrachtung eines MRK lässt sich nicht leicht quantifizieren. Zum einen stehen die Kosten für die Implementierung der Assistenzsysteme zu Buche, auf der anderen Seite distalmonetäre Aspekte, wie beispielsweise ergonomische Verbesserungen, die nur sehr schwer quantifizierbar sind. Die hinzugewonnene Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Fertigungsstätten sind weitere Größen, die nur schwer messbar sind und erst langfristig betrachtet in die Bewertung aufgenommen werden können. Genau jene kurzfristige Betrachtung gilt es zu überwinden. Momentane Automatisierungssysteme haben nicht die notwendige Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, um diese langfristigen, über den gesamten Lebenszyklus hinweg, Betrachtungshorizonte zu erfüllen. *„Hierbei besteht Bedarf zur Entwicklung neuer Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsrechnung sowohl auf der Ebene der Bewertungsmethoden als auch auf der Ebene der organisatorischen Verankerung von Investitionsentscheidungen im Unternehmen.“*¹³⁰

Die Transparenz der Kosten, sowie die Möglichkeit Anlagen auf neue Produkte rasch zu konfigurieren, sind Ansätze, die zukünftig mehr in die Bewertung einbezogen werden müssen. Die Problematik liegt in der Akquisition von Daten, da viele Akteure, wie Komponentenhersteller, Systemintegratoren und Endnutzer an der Realisierung des Prozesses beteiligt sind. Die Daten somit verstreut verteilt. Mit Hilfe von PLM-Systemen wird ein Ansatz angewendet, der die Prozesskostenrechnung (ABC), die Lebenszykluskostenrechnung (LCC) und die üblicherweise verwendete Produkt-, Prozess- und Ressourcen-Struktur in der Anlagenplanung kombiniert.^{131 132}

Der letzte Punkt, die menschenzentrierte Einführungsstrategie, stellt einen weiteren wichtigen Punkt in der Implantierung jener Systeme. Es gilt die Bedürfnisse der Menschen und mögliche oppositionellen Kräfte gegenüber MRK vorab zu beseitigen. Der Mensch steht neuen Technologien grundsätzlich skeptisch gegenüber. Ryan und

¹³⁰ Franke, 2019, S.345

¹³¹ vgl. Dietz et al., 2015, S.1205

¹³² vgl. Franke, 2019, S.311ff

Deci attestieren in ihrer Self-Determination Theorie, dass Menschen drei grundlegende Bedürfnisse haben, die befriedigt werden müssen – Kompetenz (Einfluss auf das Resultat zu haben), Verbundenheit (Die Möglichkeit zu handeln) und Autonomie (Entscheidungen eigenständig zu treffen). Zusätzlich kommt in Kombination mit der Arbeitssituation die Dimension Arbeitsreichtum (breite Palette an Tätigkeiten) hinzu.

Des Weiteren sollten Mitarbeiter in Bezug auf Kommunikation, Qualifikation, Motivation und Führung in den Prozess der Einführung von MRK einbezogen werden. In Bezug auf die Kommunikation müssen Mitarbeiter rechtzeitig von der Geschäftsführung gezielt informiert werden, in den Prozess eingebunden werden und ihnen muss eine Stimme gegeben werden. Der Grad des Mitarbeitermitspracherechtes wirkt sich direkt auf die Akzeptanz dieser aus. Nach Lewin gibt es ein 3 Phasen Modell mit Hilfe dessen die Kommunikation verlaufen kann:

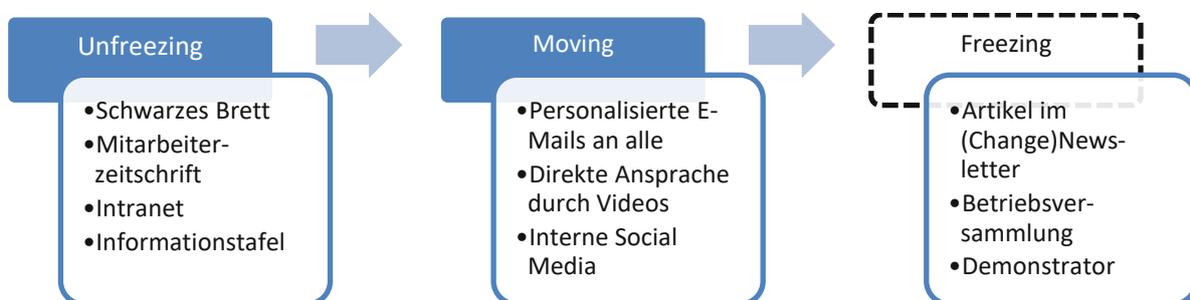


Abbildung 20: 3-Phasen-Modell nach Lewin und mögliche Medien zur Interaktion ¹³³

Die Führungsebene wird angehalten, alle Beteiligten zu informieren. Vor allem MitarbeiterInnen aus dem operativen Bereich können bei der Kommunikation der anstehenden Änderungen bei den angestellten Personen eine Vorbildrolle einnehmen, was zu einer erhöhten Akzeptanz führt. Ebenso der Betriebsrat und die Gewerkschaft gelten als Hebel für eine positive Kommunikation und in weiterer Folge Akzeptanz durch die Belegschaft.

Je größer die Veränderungen, desto größer sind die Sorgen der Mitarbeiter, dass ihre Fähigkeiten für die neue Applikation nicht mehr ausreichend sind. Es werden die Möglichkeiten unterschätzt, dass durch Veränderungen neue Kompetenzen hinzugewonnen werden und die Belegschaft so besser aufgestellt ist. Frühzeitige Schulungen des Personals vermitteln die gesamthafte Prozessstruktur, was zu einem besseren Verständnis für die Einführung solcher Systeme bei den betroffenen Personen führt. Neue Qualifikationsniveaus führen zu neuen Aufgaben, die durch die MitarbeiterInnen durchgeführt werden können, was wiederum zu neuen Anforderungsprofilen und Rollenbeschreibungen im Unternehmen führt, was in Bezug auf die Abwechslung im neu geschaffenen Umfeld als positiv zu bewerten ist. ¹³⁴

¹³³ Deutinger, 2017, S.55

¹³⁴ vgl. Franke, 2019, S.347 ff

Die Frage nach den Faktoren, die zu einer Erhöhung der Akzeptanz führen, sind nach Bengler folgende acht Faktoren:

1. „Informationsaustausch mit dem Roboter
2. Größe des Roboters
3. Anmutung des Roboters
4. Annäherungswinkel
5. Bewegungsbahnen
6. Arbeitshöhe des TCP (Tool Center Point)
7. Abstand zwischen Mensch und Roboter
8. Geschwindigkeit des Roboters“¹³⁵

Masahiro (2012) hat in einem Paper das sogenannte Uncanny Valley veröffentlicht. Dieses besagt, dass je menschenähnlicher das Erscheinungsbild eines Robotersystem wird, desto vertrauenswürdiger wird es für den Menschen. Mit einer Ausnahme, dem sogenannten Uncanny Valley, in dem das System derart einem Menschen ähnelt, dass es dieser nicht direkt als ein künstliches bzw. menschliches erkennt.¹³⁶

Des Weiteren ist das Thema der Datensicherheit zu berücksichtigen. Die Frage, wem die Informationen die Systeme mittels Sensoren durch eine künstliche Intelligenz erheben, ist auch rechtlich noch nicht ausgelegt. Daten über das Personal sollten nicht an die Eigentümer der Systeme übergeben werden, da diese sonst als Spitzel deklariert werden können, was sich wiederum in geringer Akzeptanz widerspiegeln würde.¹³⁷

3.1.2.1 Fazit und grafische Darstellung des Prozesses

Nach Franke muss die Ressource Mensch mit einem starken Fokus betrachtet werden und sich an einem traditionellem Prozess in der Produktionssystemgestaltung orientieren. Abbildung 21 fasst das Kapitel 3.1.2 in bildlichem Kontext zusammen und wird aliquot mit der Morphologie aus Kapitel 2.2 eingeteilt, um sie vergleichbar zu machen.¹³⁸ Somit werden dem Ziel, der Einführung von MRK-Anwendungen, vier Dimensionen zugesprochen. Diese werden nach den vorgestellten Kriterien in der dritten Spalte evaluiert. Die beispielhaften Messmethoden liefern die möglichen Vorgehensweisen, um die Dimensionen schlussendlich subjektiv und objektiv zu beurteilen.

Ausgehend von den vier Grundpfeilern, die Franke für seine MRK-Anwendungen definiert, werden diese den Dimensionen nach Zigart (2020) gleichgesetzt. Dies

¹³⁵ Franke, 2019, S.353

¹³⁶ vgl. Mori et al., 2012, S.98 ff

¹³⁷ vgl. Franke, 2019, S.352 ff

¹³⁸ vgl. ebenda, S.355 ff

ermöglicht einen Vergleich der beiden Ansätze. Die technischen Rahmenbedingungen setzen sich weniger mit dem Reifegrad einer Anwendung auseinander, sondern betrachten vielmehr den Schritt vor der Implementierung des Produktes. Demnach ist es für eine anwendungsbasierte Evaluation nicht primär interessant.

Der Abschnitt Planung einer MRK-Anwendung ist stark Prozessbezogen und überschneidet sich in einigen Punkten (EAWS, Nutzwertanalyse) mit dem bereits vorgestellten Model aus Kapitel 3.1.1.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, insbesondere der LCC-Ansatz, gehen über den Ansatz einer ROI Betrachtung hinaus und werden insbesondere für Assistenzsysteme in der Produktion interessant. Ebenso die Einberechnung der Mitarbeiter bezogen auf Reduktion der Krankentage wird in den Praxisbeispielen berücksichtigt.

Die Menschzentrierung wird auch in dieser Evaluation stark berücksichtigt und wird dementsprechend in der praktischen Betrachtung stark in den Prozess der Bewertung beider Systeme miteingebunden.

Somit kann der Einführung von MRK nach Franke eine „wechselseitige Betrachtung von Mensch, Technik und Organisation“¹³⁹ von der ersten Idee bis hin zur Entsorgung der Applikation zugesprochen werden. Dabei werden grundsätzlich Cobot Anwendungen in den Fokus der Betrachtung gerückt, weshalb diese Methode ebenfalls den physischen Assistenzsystemen zugesprochen werden kann.

¹³⁹ Franke, 2019, S. 311

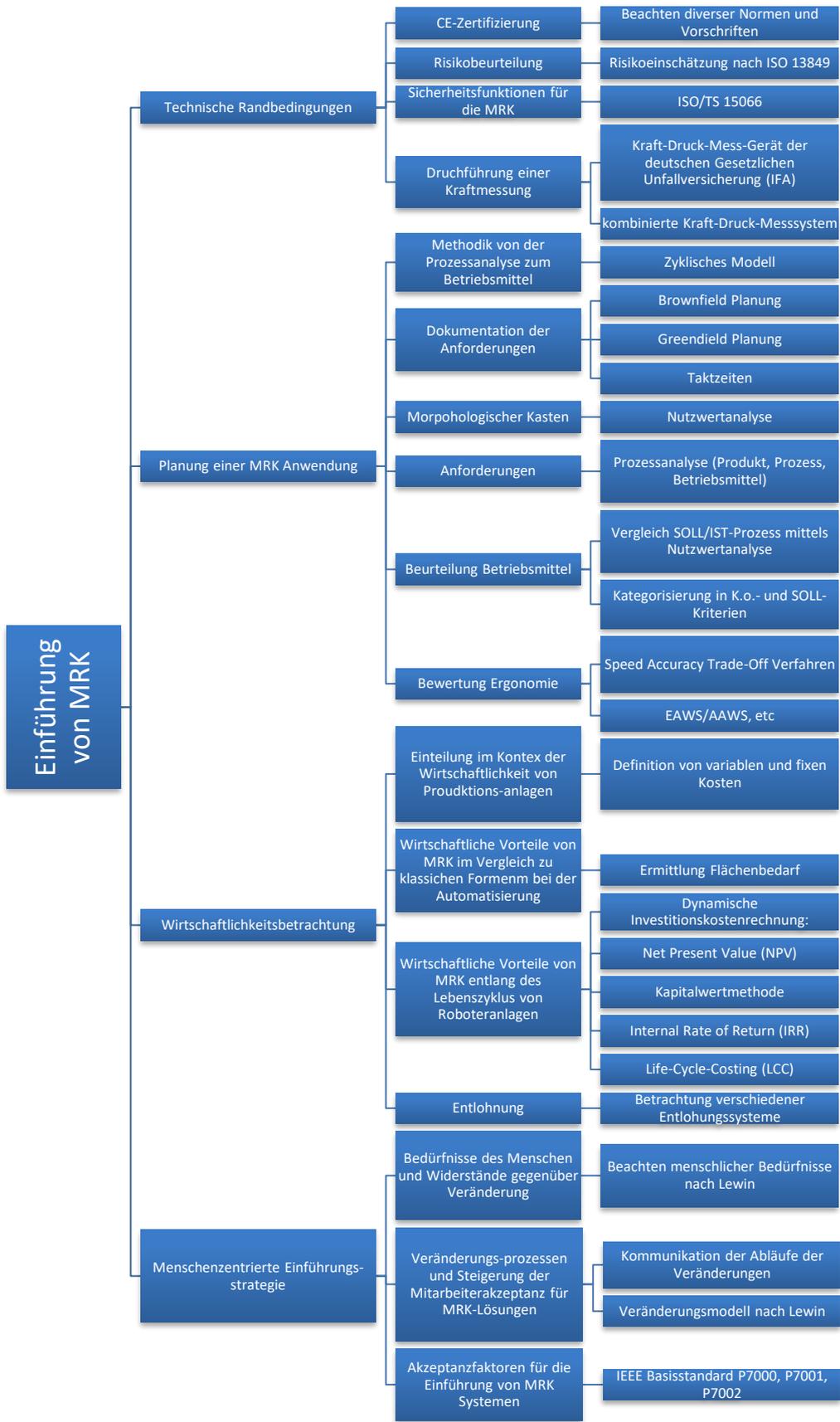


Abbildung 21: Evaluation von MRK basierend auf Franke ¹⁴⁰

¹⁴⁰ vgl. Franke, 2019, S.311 ff

3.1.3 Menschenzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme

Die Grundlage für den Titel des Kapitels liefert DIN EN ISO 9241-210. In dieser Norm wird die Ergonomie der Mensch-System-Interaktion betrachtet, genauer gesagt die Menschenzentrierte Gestaltung (HCD) interaktiver Systeme. In dem Dokument werden Prozesse für folgende Anwendungsfälle abgedeckt:

- *„menschzentrierte Gestaltung als Teil eines Systementwicklungs- oder Beschaffungsprozesses und/ oder eines Unterstützungslebenszyklus zu implementieren.*
- *die bestehende Fähigkeit eines Unternehmens zur Durchführung menschenzentrierter Prozesse zu bewerten;*
- *die Anwendung von menschenzentrierter Gestaltung als Teil eines bestehenden System-entwicklungsprozesses zu verbessern;*
- *Kompetenzen hinsichtlich menschenzentrierter Gestaltung zu entwickeln.“*¹⁴¹

Auf Basis von der DIN EN ISO 9241-210:2020 werden die vier genannten Punkte betrachtet. Jene Norm zeigt auf, *„das Menschenzentrierte Gestaltung (...) ein Ansatz zur Entwicklung interaktiver Systeme“* ist, *„der darauf abzielt, Systeme gebrauchstauglich und zweckdienlich zu machen, indem er sich auf die Benutzer, deren Erfordernisse und Anforderungen konzentriert und menschliche Faktoren/ Ergonomie sowie Kenntnisse und Techniken zur Gebrauchstauglichkeit anwendet.“*¹⁴² Dies führt im zu einem verbesserten Wohlbefinden bei den Arbeitern, erhöht die Benutzerzufriedenheit und wirkt präventiv gegen menschliche Gesundheitsschäden und positiv auf die Sicherheit mit den jeweiligen Systemen. Zusätzlich kann der Ansatz aus dem Dokument in objektorientierter, Wasserfall- und agiler Entwicklung von Anwendungen eingesetzt werden.¹⁴³

Die Ansätze aus der agilen Entwicklung sind für Evaluation eines Assistenzsystems durchaus zu verwenden. Diese besagen, dass ein Prozess einfach, zweckmäßig und kundennah sein soll. Vor allem das schnelle und iterative Testen von Ergebnissen wird in der weiteren Evaluation genauer untersucht.^{144 145 146}

3.1.3.1 Fazit

Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, der vor allem die menschliche Komponente stark betrachtet. Somit kann diese nicht direkt einem Assistenzsystem hinsichtlich physischer oder kognitiver Unterstützung zugerechnet werden, jedoch liefern die

¹⁴¹ DIN e.V. (Hrsg.) - DIN EN ISO 9241-220, 2019 S.7f

¹⁴² DIN e.V. (Hrsg.) - DIN EN ISO 9241-210, 2019, S.6

¹⁴³ vgl. ebenda

¹⁴⁴ vgl. ebenda, S.7ff

¹⁴⁵ vgl. <https://agilemanifesto.org/> (Gelesen am: 04.07.2021)

¹⁴⁶ vgl. https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/37363#Bestandteile_Agiler_Softwareentwicklung (Gelesen am: 04.07.2021)

zyklischen Kontrollmechanismen einen guten Ansatz für jegliche Implementierungen. Die Ansätze der Menschenzentrierung und der agilen Methoden fließen in die Evaluation der praktischen Use-Cases mit ein.

3.1.4 Effekte und Nutzen altersgerechter Assistenzsysteme (ENAS)

Im Zuge des Projektes Effekte und Nutzen altersgerechter Assistenzsysteme (ENAS), wurde ein Leitfaden für eine Evaluation von Assistenzsystemen erstellt. Es werden Assistenzsysteme im Bereich des Gesundheitswesens genauer betrachtet. Einzelne Teile der Evaluation können jedoch genauso für Assistenzsysteme in der Fertigung herangezogen werden, da sie branchenunabhängig einsetzbar sind. Die Grundsatzfrage einer Evaluation in diesem Paper wird folgendermaßen definiert: „*Was (Gegenstand) wird wozu (zu welchem Zweck) und anhand welcher Kriterien, von wem und wie (Methode) evaluiert?*“¹⁴⁷ Um jene Evaluation durchführen zu können, müssen die drei Phasen aus Abbildung 22 durchgeführt werden:

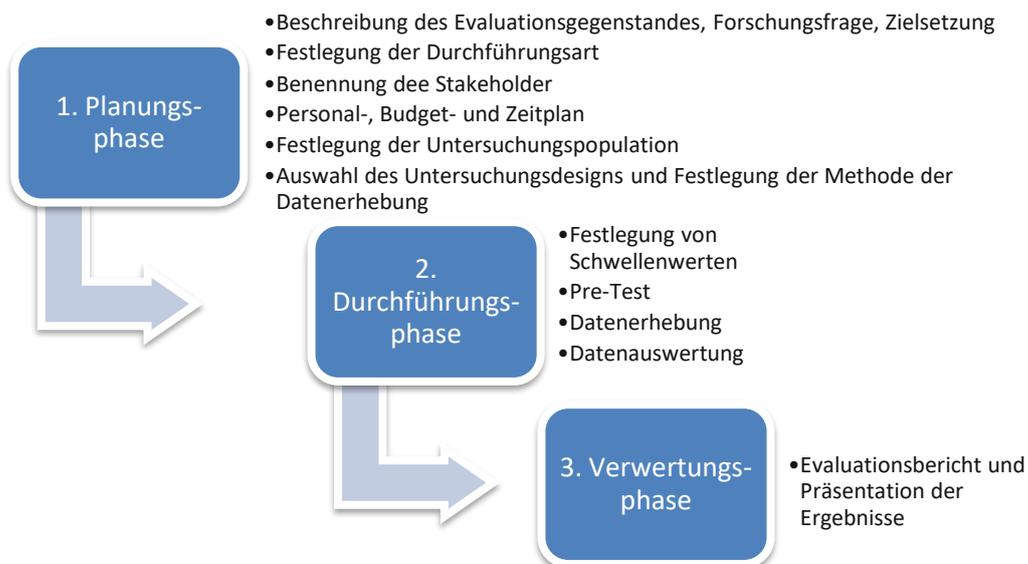


Abbildung 22: Modifizierter Idealtypischer Evaluationsprozess¹⁴⁸

Die Planungsphase umfasst eine genaue Darstellung und detaillierte Beschreibung der vorliegenden Frage- bzw. Problemstellung. Des Weiteren stellt sich die Frage nach der Evaluation durch interne oder externe Akteure. Interne kennen die Problematik besser, jedoch sind externe objektiver und wahren eine gewisse Distanz. Mit der genauen Beschreibung aller teilhabenden Stakeholder werden die terminlichen, sowie zeitlichen Verfügbarkeiten der Personen eruiert. Hinzu kommen budgetäre Bedingungen, die in Betracht gezogen werden. Hier werden Kosten veranschlagt, die sich aus Personal, Durchführung von Befragungen, Kommunikation, Material, etc.

¹⁴⁷ Lindwedel-Reime et al., 2016, S.14

¹⁴⁸ vgl. ebenda, 2016, S.21

zusammensetzen. Die Zusammensetzung der Untersuchungspopulation muss sich aus einer diversen Gruppe an Personen zusammensetzen. Hierbei wird beachtet, dass beide Geschlechter, diverse Altersgruppen, Ethnien und die soziale Schichtzugehörigkeit beachtet werden. Je nach Anwendungsfall werden sich Gruppen aus den genannten Faktoren spezifisch zusammensetzen. Die Planung des Untersuchungsdesigns gibt das methodische Vorgehen des Designs wieder. *„So ist grundsätzlich zu klären, ob sich ein qualitatives (zur Generierung von Forschungshypothesen) oder quantitatives (zur Testung von Forschungshypothesen) Studiendesign oder auch eine Kombination beider Designs anbietet (Mixed-Methods).“*¹⁴⁹ Die Daten werden dementsprechend aus den genannten drei Möglichkeiten erhoben.¹⁵⁰

Die zweite Phase, die Durchführungsphase, beinhaltet weitere Vorkehrungen, die für das Konzept der Evaluation wichtig sind. Zusätzlich sollten die gewählten Untersuchungsmethoden Pre-Tests unterzogen werden. Diese sind dazu da, im kleineren Rahmen die gewählten Methoden auf ihre Funktion zu testen. Hierfür werden Schwellenwerte festgelegt, ab wann ein gewisses Ergebnis als positiv bzw. negativ bewertet angenommen werden kann. Beispielsweise kann eine Akzeptanz auf einer Skala von 0 bis 10 definiert werden, auf der ab 8 mit einer positiven Akzeptanz gewertet werden kann. 8 ist ein plausibler Wert, da niemals eine gesamte Untersuchungsgruppe mit einem Ergebnis übereinstimmt. Dieser Schwellenwert wird auch als „cutting point“ bezeichnet.¹⁵¹

In der Verwertungsphase werden die Ergebnisse, die in den vorherigen Phasen erzielt wurden, dargeboten. Um ein möglichst gutes Ergebnis liefern zu können, wird der Evaluationsbericht verwendet. *„Der Evaluationsbericht besteht zumeist aus einer Zusammenfassung, die kurz die wichtigsten Ergebnisse und Empfehlungen darstellt. Daran schließt sich der Hauptteil an, in dem der Ablauf der Evaluation, die Ergebnisse und deren Bewertung dargestellt werden (bzgl. des Aufbaus des Hauptteils kann das Evaluationskonzept in seiner Reihenfolge als Orientierung dienen). Der Bericht schließt mit konkreten Handlungsempfehlungen ab.“*¹⁵² Zusätzlich sollte der Bericht an die beteiligten Stakeholder verteilt werden und im Anschluss eine mündliche Präsentation stattfinden, um die betroffenen Personen optimal zu informieren. Die Zustimmung aller Stakeholder wird nicht immer möglich sein, da eine Evaluation auch Defizite und nicht optimale Entwicklungen aufzeigen kann. Es existieren fünf Kritikmuster, die von Stakeholdern vorgehalten werden können:

¹⁴⁹ Lindwedel-Reime et al., 2016, S.28

¹⁵⁰ vgl. ebenda, S.22ff

¹⁵¹ vgl. ebenda, S.33ff

¹⁵² ebenda, S.35

1. Das Resultat der Evaluation war bereits vorab bekannt
2. Methodische Mängel, die meist auf zeitlichen und finanziellen Restriktionen beruhen
3. Die Abwicklung der Evaluation war mangelhaft
4. Ergebnisse, die den Stakeholder unglaublich erscheinen
5. Die Diskussion fokussiert sich auf sehr spezielle Themen, anstatt das Gesamtpaket zu betrachten.¹⁵³

3.1.4.1 Fazit und grafische Darstellung des Ansatzes nach ENAS

Um die Vergleichbarkeit der Evaluationsprozesse gewährleisten zu können, wird Abbildung 23 eingeführt. Die Dimensionen dieser Matrix weichen vom Aufbau her, von den vorherigen Methoden, ab. In der ersten Dimension wird zwischen den zeitlichen Phasen des Projektes unterschieden. Aus diesem Grund wird die Grafik so adaptiert, dass sie nicht der von Abbildung 18 gleicht, sondern den Abbildungen vorab gleicht, in Bezug auf die Dimensionen. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit und dient beim Finden einer optimalen Gesamtlösung als Baustein.

Die Betrachtung der Evaluation basiert auf den drei Dimensionen: wirtschaftliche Betrachtung, prozessorientierte Betrachtung und technische Betrachtung. Die wirtschaftliche Komponente sieht eine Begutachtung des Personals, des Budgets, der zeitlichen Komponente und der des Planungsgremiums vor. Die Prozessbetrachtung umfasst die Auswahl der Erhebungsinstrumente, die für die Aufnahme erforderlich sind. Die finale Komponente, die der technischen Betrachtung, umfasst die Analyse des technischen Umfeldes und kontrolliert die Voraussetzungen.

¹⁵³ vgl. Lindwedel-Reime et al., 2016, S.35

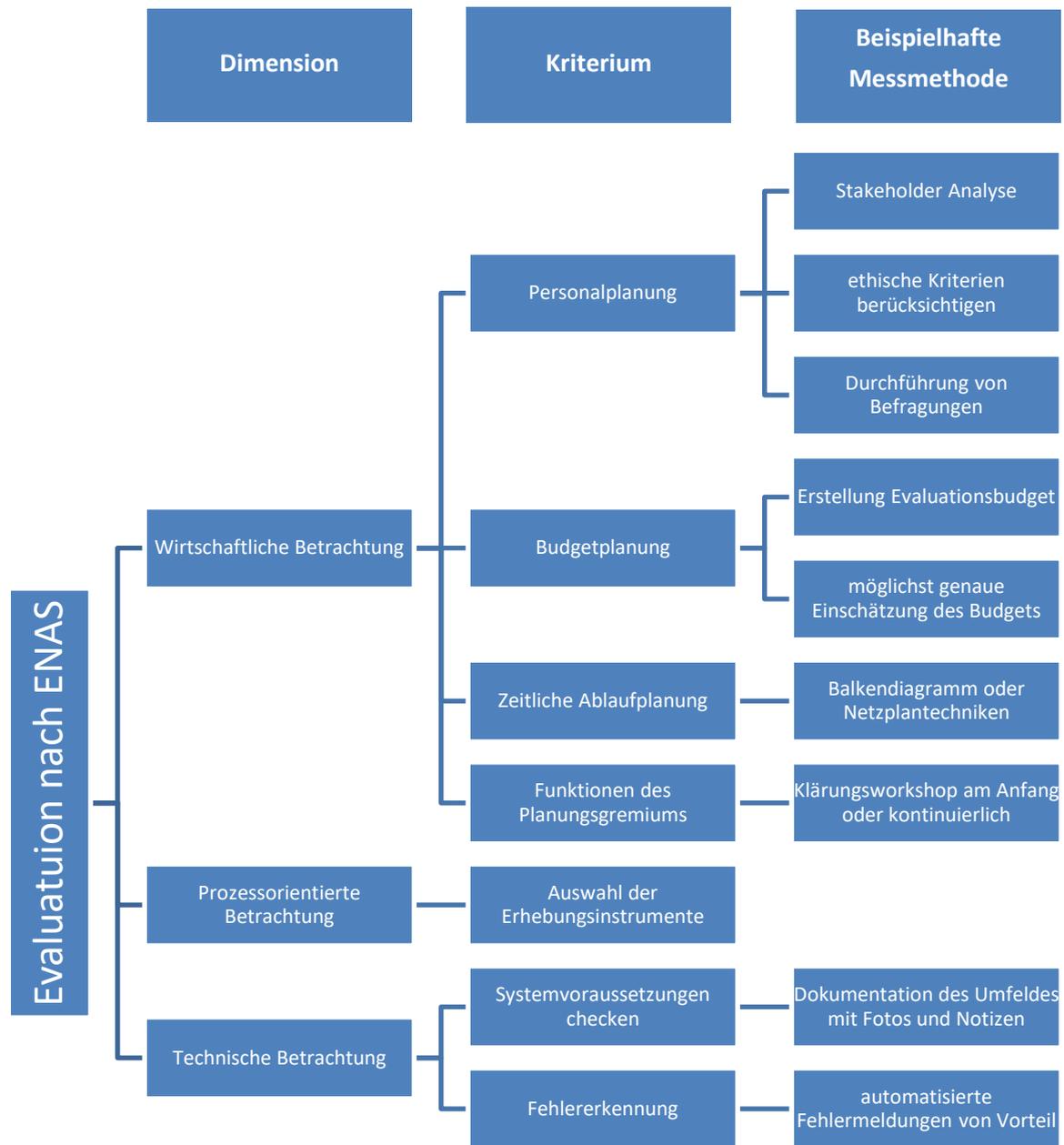


Abbildung 23: Evaluation nach ENAS ¹⁵⁴

¹⁵⁴ vgl. Lindwedel-Reime et al., 2016, S.21ff

3.1.5 Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotentialen der Mensch-Roboter Kollaboration

Mit einer Recherche und einem Vergleich von fünf bestehenden Methoden zur Bewertung jener Kollaborationen, suggeriert das Paper einen neuen Ansatz. Dieser deckt die Bereiche spezifischer Anwendung in der Montage, Methodenunterstützung, sowie die Dimensionen: Prozessbezogen, Qualität, Wirtschaftlichkeit und Ergonomie ab. Die ganzheitliche Vorgehensweise, die von der initialen Partizipation bis hin zur Feinplanung und Implementierung geht, beinhaltet zudem die Ist-Analyse, sowie die Entwicklung, Bewertung und Auswahl der Einsatzpotentiale.

Bei Bewertung und Auswahl der MRK-Einsatzpotentiale erfolgt die Abwägung möglicher Einsatzszenarien von Cobot-Anwendungen. Hier liegt ein starker Fokus auf der Bewertung der Dimensionen Qualität, Wirtschaftlichkeit und Ergonomie. Die monetäre Betrachtung basiert hier auf dem Vergleich der Soll- und Ist-Zeiten. Eine Reduktion der Zeit hat eine Reduktion der Prozesszeit zur Folge, was sich wiederum in geringeren Produktionskosten infolge von gesunkenen Lohnkosten widerspiegelt. Die eingesparten jährlichen Lohnkosten werden den Investitionskosten gegenübergestellt. Mittels statischer oder dynamischer Investitionsrechnung kann die Amortisationszeit errechnet werden. Qualitätssicherung wird durch die Reduktion an Fehlern monetarisiert, die durch den kollaborativen Roboter gegeben ist. Einbußen in Bezug auf Qualität und kleinere Absatzzahlen werden in der Rechnung außer Acht gelassen. Mittels adaptierter monetär bewerteten FMEA werden diese Kosten, die durch wahrscheinlich eintretende Fehler auftreten können, bewertet und schließlich in die Rechnung einbezogen. Für den MRK Soll-Zustand wird der Vorgang wiederholt. Nun werden beide Rechnungen, die des Ist- und Sollzustandes gegenübergestellt, und es ergibt sich die Differenz, die den möglichen Einsparungen oder Mehrkosten entspricht. Durch die jährlichen Differenzen können die Beträge in der Amortisationsrechnung gegengerechnet werden.

Ergonomische Bewertungen erfolgen nicht monetär, sondern über die gängigen Ergonomiebewertungsverfahren (EAWS, LMM, etc.). Hier werden die Risikowerte der Auswertung des Ist- und Soll-MRK Prozesses miteinander verglichen.

Die Kombination aus der kürzesten Amortisationszeit und der ergonomisch besten Variante, werden als MRK-Lösung definiert. Hierbei können die beiden Komponenten noch divers gewichtet werden, dies ist vom Anwendungsfall abhängig. ¹⁵⁵

¹⁵⁵ vgl. Petzoldt et al., 2021, S.8ff

3.1.5.1 Fazit und grafische Darstellung des Modells nach Petzoldt

Die evaluierten Anwendungen im Rahmen des Papers sind alle im Bereich der kollaborativen Arbeitsumfelder, demnach lässt sich die Evaluation der physischen Unterstützung zuordnen, vor allem den Cobots.

Die grafische Darstellung zeigt den Prozess in kompakter Form wieder. Der Fokus liegt hier auf den drei Dimensionen Qualität, Wirtschaftlichkeit und Ergonomie.

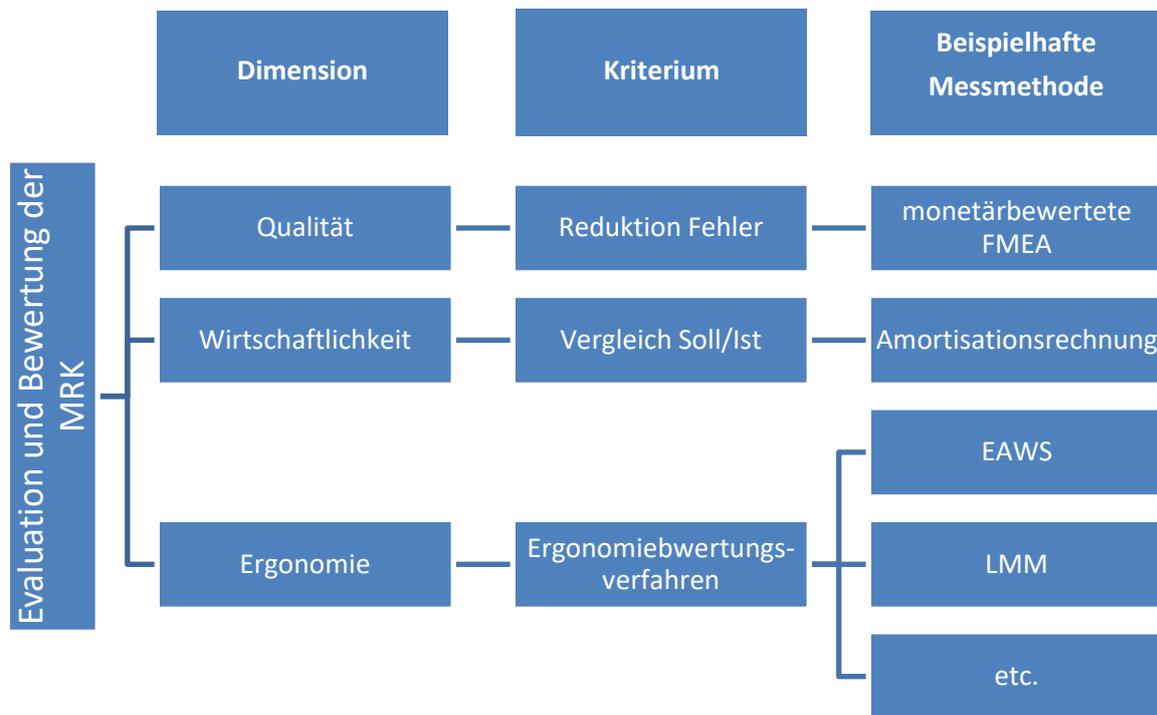


Abbildung 24: Grafische Darstellung Petzoldt Modell¹⁵⁶

3.1.6 Planung und Evaluierung von Digitalen Assistenzsystemen

Für die Gestaltung von Assistenzsystemen im Kontext mit Cyber-Physischen Montage Systemen wurde von Hold (2020) bereits ein Paper publiziert. Hierbei wird attestiert, dass die Evaluierungen erhebliche Schwächen in Bezug auf die Planung und Bewertung der Arbeitssysteme im Vorfeld haben. Insbesondere wird der Mangel an einer systematischen Analyse von Zusammenhängen zwischen den Eigenschaften von Montageaufgaben, der qualitativen und quantitativen Bewertung ihrer Komplexität, sowie der Ableitung von Anforderungen an ein digitales Assistenzsystem unterstellt.

Die gefundene Methode für die Planung, berücksichtigt die einzelnen Arbeitsaufgaben sowie die individuellen Fähigkeiten, Qualifikationen und das Leistungsniveaus der Personen, die für die Bedienung verantwortlich sind. Hinzu kommt die Berücksichtigung sowohl technischer, als auch wirtschaftlicher Evaluation des

¹⁵⁶ vgl. Petzoldt et al., 2021, S.9

Systems, um eine optimale Integration zu ermöglichen. Abbildung 25 gibt einen Überblick über die gefundene Lösung des Papers.¹⁵⁷

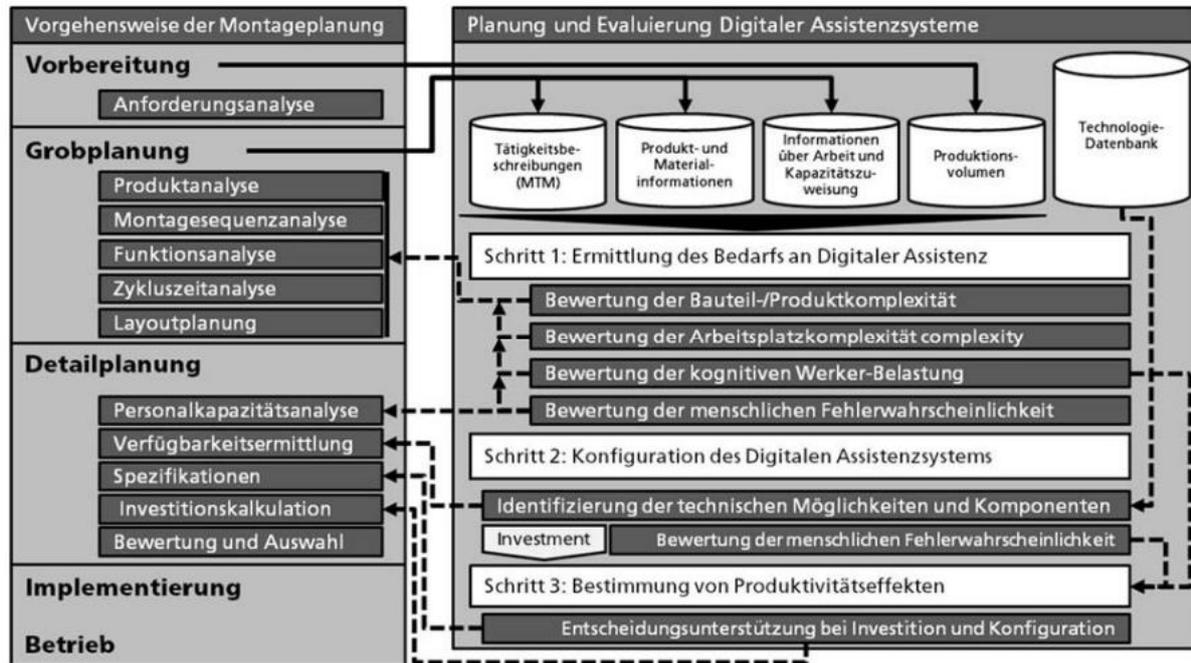


Abbildung 25: Methode zur Planung und Evaluation von digitalen Assistenzsystemen¹⁵⁸

Hierbei gilt es die Arbeitsschritte eins bis drei zu befolgen und auf Basis der Unterpunkte abzuarbeiten. In Abstimmung mit der Montageplanung wird die Planung des Assistenzsystems durchgeführt. Im ersten Schritt geht es darum, die Arbeitsaufgaben detailliert zu beschreiben, wie es mit MTM möglich ist. Mit Hilfe weiterer Parameter, wie der Information über das Produkt, Arbeits- und Kapazitätsauslastung, sowie der Quantität, lässt sich die Notwendigkeit eines digitalen Assistenzsystems eruieren. In Phase 1 werden weitere wichtige Punkte evaluiert, wie die Komplexität des Produktes, des Arbeitsplatzes, sowie der menschlichen Arbeitsbelastung und Zuverlässigkeit. Phase 2 beinhaltet die Konfiguration des Assistenzsystems, welche mit der detaillierten Planung des Montageprozesses abgestimmt wird. Die Identifizierung der technischen Möglichkeiten korreliert mit dem gewünschten Investment. Im finalen Schritt drei gilt es die Auswirkungen auf die Produktivität sowie nochmals die Unterstützung bei der Entscheidungsfindung in Bezug auf Konfiguration und Investition von DAS zu untersuchen. Der technologische Fortschritt der Systeme ist jedoch schon soweit ausgereicht, dass eine grundsätzliche Evaluation bereits stattfinden kann. Jedoch sind eine detaillierte Planung und Bewertung jener DAS Voraussetzung für die Steigerung der Produktivität und sinkender Stückkosten.¹⁵⁹

¹⁵⁷ vgl. Hold, 2020, S.38 ff

¹⁵⁸ ebenda, S.159

¹⁵⁹ ebenda, S.38 ff

3.1.6.1 Fazit

Digitale Assistenzsysteme finden im Bereich der miteinander vernetzten cyber-physischen Systeme ihren Nutzen. Der kognitive Unterstützungsbereich ist jener, der mit dieser Evaluation bedient werden kann und für die in Kapitel 2.3.2.3 vorgestellte Big Data Analytics herangezogen werden kann.

3.1.7 Nutzenbewertung von digitalen Assistenzsystemen für Montagearbeitsplätze

Im Paper von Keller (2019) geht es um Assistenzsysteme, die im Bereich der Montage evaluiert werden. Das betrachtete Arbeitssystem ist durch die Interaktion zwischen dem Arbeiter und dem Arbeitsmittel gekennzeichnet, sodass die Arbeitsaufgabe unter den gegebenen Bedingungen erfüllt werden kann. Die Assistenzsysteme unterstützen bei der Arbeit am Arbeitssystem. Da es sich um die Bewertung von digitalen Assistenzsystemen handelt, liegt der Fokus auf sensorischen und kognitiven Unterstützungssystemen.

Das Assistenzsystem hat einen indirekten Einfluss auf den Produktionsprozess, da es in erster Linie den Arbeiter unterstützt. Dessen Leistungen wirken sich auf den Prozess aus. Kosten, Qualität und Zeit sind die drei treibenden Faktoren in Prozessen, jedoch kommt im Falle von Assistenz der Faktor Flexibilität hinzu. Dieser Faktor ist eine wesentliche Herausforderung in der Fertigungsindustrie. Im Falle der Qualität bewirken AS eine Reduktion der Fehlerrate, verbesserte Fehlerkorrektur und Erkennung von Fehlern. Bezüglich Zeit beeinflussen sie den Aufwand für den Informationsfluss und die Kommunikation. Die Flexibilität wird vor allem durch das Qualifikationsniveau des Mitarbeiters und der Qualifikationsanforderung der Aufgabe sichergestellt. Die Qualifikationsanforderungen von Mitarbeitern können insbesondere durch intuitive Führung und die entsprechende Bereitstellung von Informationen beeinflusst werden. Durch den Einsatz eines digitalen Assistenzsystems ist es zudem möglich, ausgewählte Lerninhalte den Mitarbeitern zur Verfügung zu stellen und damit das Qualifikationsniveau zu erhöhen. Kostenreduktion wird nicht berücksichtigt, da diese von anderen Faktoren abhängig sind.

Geeignete KPIs, die direkt am Montageplatz von Assistenzsystemen beeinflusst werden, sind in den Kategorien:

1. Qualität
 - Anzahl der Ausschussteile x_s
 - Anzahl der nachbearbeiteten Teile x_r
 - Gesamtzahl der produzierten Teile x_t
2. Zeit
 - Gesamtzeit t

- Zeit für Arbeitsaufgabe t_w
- Zeit für Nacharbeit t_r
- Einarbeitungszeit t_t
- Rüstzeit t_s
- Ausfallzeit t_d

3. Flexibilität

- Know-How carrier quota q_k – beschreibt das Verhältnis zwischen Arbeitern mit einem Know-How für den gewählten Montageplatz, zu der gesamten Anzahl an Mitarbeitern.

Um prozessrelevante KPIs definieren zu können wird die „overall equipment effectiveness“ (OEE) eingeführt. Die OEE umfasst wesentliche zeitliche Effekte, sowie die Qualität des Prozesses, in einer Kennzahl und kann als Indikator für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses verwendet werden. Anhand der folgenden Formel kann der OEE mit den Daten des Arbeitsplatzes unter der Berücksichtigung der geplanten Anzahl der produzierten Teile (x_{target}) berechnet werden:

$$OEE = \frac{x_t - x_s - x_r}{x_t} * \frac{t - t_d - t_s}{t} * \frac{x_t}{x_{target}}$$

Formel 2: Berechnung OEE ¹⁶⁰

Somit kann die vierte Kategorie ebenfalls abgebildet werden:

4. Prozess

- OEE

Die Komplexität der Aufgabe definiert drei Prozesstypen, die in Tabelle 5 aufgelistet sind. Ein Prozess wird als ausreichend komplex eingestuft, wenn einer der beiden Kriterien den Wertebereich der höheren Komplexitätsstufe erreicht. Ein spezifischer Parameter ist die Entropie der Arbeitsaufgabe, die sich aus der Anzahl der Komponenten des betrachteten Produkts sowie der Anzahl der Elemente, die für die Beschreibung der Aufgabe nach MTM notwendig sind ergibt. In der Regel sind nicht genügend Informationen vorhanden, um die Entropie zu beschreiben. Dies führt zu einem enormen Aufwand, um sie zu bestimmen. Deshalb wird ein einfacherer Ansatz gewählt, entsprechend der drei Kriterien Prozesskomplexität, Produktvarianz und dem Umfang der Arbeitsaufgabe. Die Varianz beschreibt die unterschiedlichen Produktvarianten, die zu montieren sind. Der Umfang der Aufgabe gibt die Zeit an, die benötigt wird, um das Problem zu lösen.

¹⁶⁰ vgl. Keller et al., 2019, S.443

Tabelle 5: Unterscheidung der Prozesse ¹⁶¹

Prozesskomplexität	Produktvarianz	Umfang der Arbeitsaufgabe
Niedrig	<30	<5min
Mittel	31-500	5min bis 60 min
Hoch	>500	>60min

Die Erfahrung des Mitarbeiters mit der Aufgabe ist als eine entscheidende Voraussetzung für korrektes kontextspezifisches Handeln des Mitarbeiters einzustufen. Als unerfahren gilt ein Mitarbeiter, der die Aufgabe noch nicht erledigt hat.

Auf Basis der beiden Faktoren, der Erfahrung des Mitarbeiters und Komplexität der Aufgabe, werden Mitarbeiter in sechs Kategorien geteilt, um die Testszenarien objektiv miteinander vergleichen zu können.

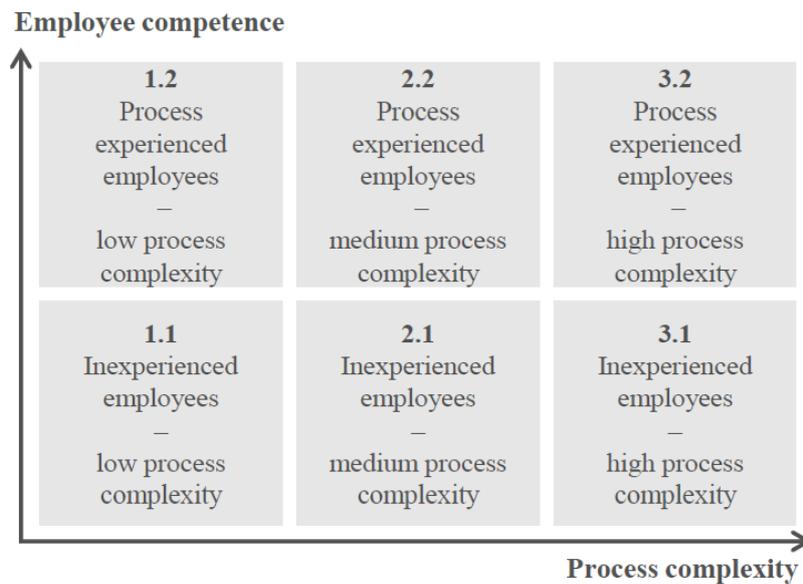


Abbildung 26: Testszenarien der unterschiedlichen Use-Cases ¹⁶²

Mit den definierten Grundlagen wird ein Modell auf Basis von statistischen Zusammenhängen aufgestellt. Diese Kodedependenzen ergeben kausale Zusammenhänge der Dimensionen Qualität, Zeit und Flexibilität in Abhängigkeit der KPIs, Auswirkungen auf den Mitarbeiter und Funktionen des Assistenzsystems. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse werden die Ursache-Wirkungs-Beziehungen quantifiziert, um eine fundierte Aussage über den Nutzen digitaler Assistenzsysteme

¹⁶¹ vgl. Keller et al., 2019, S.444

¹⁶² vgl. ebenda, S.445

in unterschiedlichen Produktionsumgebungen zu treffen. Zum jetzigen Zeitpunkt handelt es sich um ein theoretisches Modell, dass im Rahmen einer praktischen Evaluation unter realen Bedingungen erst getestet werden muss. Damit bildet das vorgestellte Kausalmodell die Grundlage für ein umfassendes Verständnis des Themas sowie für die weitere Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen digitalen Assistenzsystemen, Mitarbeitern und Produktionssystemen.¹⁶³

3.1.7.1 Fazit und grafische Darstellung des Prozesses

Auf Basis der Bewertung von digitalen Assistenzsystemen wird jene Evaluation der kognitiven Unterstützung zugerechnet. Für eine Anwendung in der dynamischen Projektion könnte sich diese Evaluation anbieten. Lernprozesse für Montagemitarbeiter können auf Basis der Qualität und der Zeit gut gemessen und verglichen werden, um Schwachstellen gezielt aufzuspüren und dort mit Optimierungen anzusetzen. Ebenso die OEE kann drei Dimensionen in einem einzigen KPI zusammenfassen, um so verschiedene Prozesse miteinander vergleichbar zu machen.

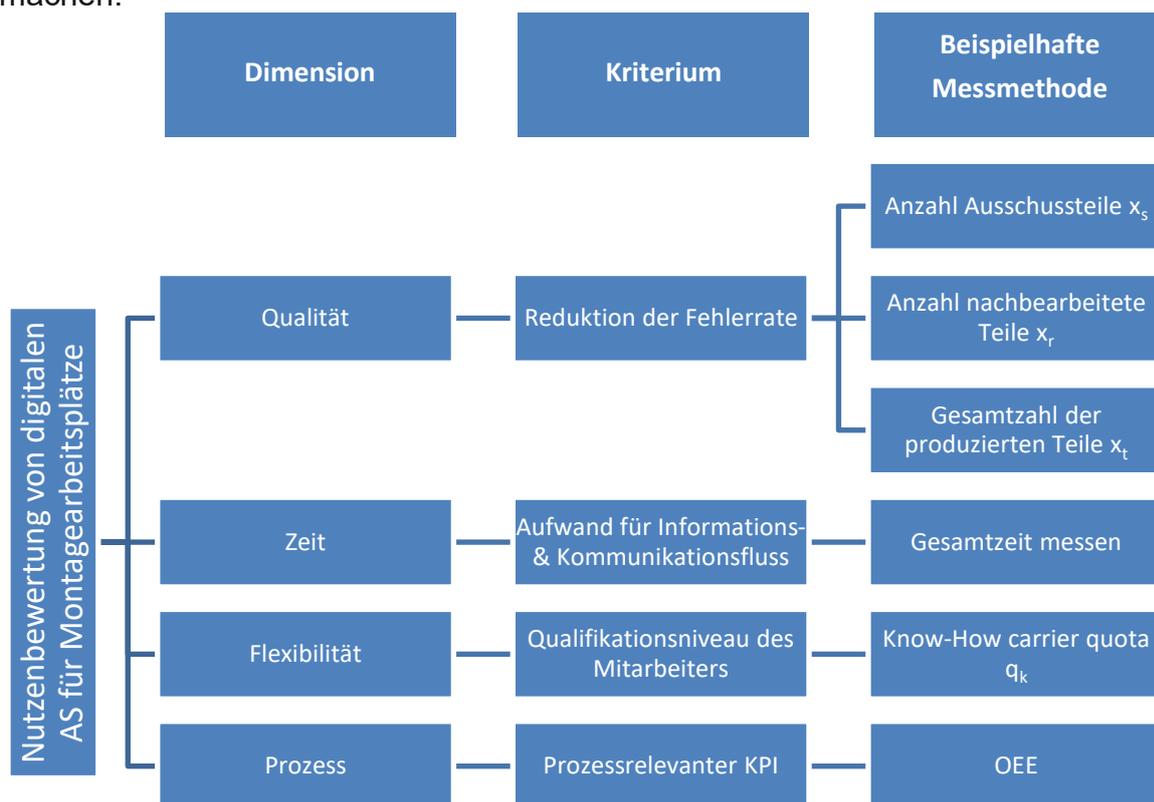


Abbildung 27: Grafische Darstellung des Modells nach Keller¹⁶⁴

¹⁶³ vgl. Keller et al., 2019, S.441ff

¹⁶⁴ vgl. ebenda

3.1.8 Modell für ein arbeitsplatznahes Beschreibungsmodell

Die Notwendigkeit sich mit dem Arbeitsplatz der Zukunft zu beschäftigen beruht darauf, dass dieser im Zuge der Digitalisierung und Automatisierung nicht ausschließlich ohne Menschen auskommen wird. Zwei mögliche Szenarien für die Mitarbeiter werden prognostiziert – die Schwarmorganisation und die polarisierte Organisation. Die Vorhersage für die Schwarmorganisation geht davon aus, dass im Zuge von IoT, die miteinander durchgängig vernetzte Welt, Großteils hochqualifizierte und spezialisierte Arbeitskräfte gebraucht werden. Der polarisierte Ansatz betrachtet den zusätzlichen Bereich jener Arbeitskräfte, die den Anforderungen nicht genügen. Diese werden mit Rest-Tätigkeiten beschäftigt werden.

Damit die Beschreibung dieser komplexen Thematik gelingt, wurde in dem Paper ein arbeitsplatznaher Modellansatz entwickelt, mit dem Ziel „möglichst nah und praktikabel an der sichtbaren betrieblichen Realität im verarbeitenden Gewerbe“¹⁶⁵ zu sein. Faktoren, wie „die Auswirkungen auf physische und psychische Belastungen, grundsätzliche Veränderungsprozesse von Organisationen sowie Aussagen zu Beschäftigung und Qualifizierungsbedarf“¹⁶⁶ sollen dem Modell mehr Spielraum verleihen. Dazu wird mit Hilfe von 14 Beschreibungsdimensionen die mögliche Veränderung in Bezug auf die Arbeitstätigkeiten untersucht. Diese beruhen auf technologischen Fortschritten aus den Bereichen Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen. Einige dieser Dimensionen werden auf Basis von bereits existierenden Pilotprojekten herangezogen, andere beschreiben grundsätzliche Veränderungen von Arbeitstätigkeiten. Tabelle 6 zeigt die 14 Dimensionen mit den zugehörigen Leitfragen:

Tabelle 6: Beschreibungsdimensionen des Modellansatzes¹⁶⁷

Modelldimension Leitfragen

Bedarf	<i>Werden mehr oder weniger Mitarbeiter mit dieser betrieblichen Funktion benötigt?</i>
Problemlösung	<i>Werden mehr oder weniger Mitarbeiter mit dieser betrieblichen Funktion benötigt?</i>
Monotone Aufgaben	<i>Steigt oder sinkt der Anteil monotoner, sich wiederholender Tätigkeiten?</i>
Komplexe Aufgaben	<i>Steigt oder sinkt der Anteil komplexer Arbeitsinhalte (wenig Wiederholung, relativ hohe kognitive Beanspruchung)?</i>

¹⁶⁵ Bauer et al., 2018, S.151

¹⁶⁶ ebenda

¹⁶⁷ ebenda, S.152

<i>Planen</i>	<i>Steigt oder sinkt der Anteil planerischer Aktivitäten?</i>
<i>Kontrolle</i>	<i>Steigt oder sinkt der Anteil kontrollierender/überwachender Tätigkeiten?</i>
<i>Lernen, informell</i>	<i>Erhöht oder verringert sich die Möglichkeit/Notwendigkeit des Lernens im Prozess der Arbeit?</i>
<i>Lernen, formell</i>	<i>Erhöht oder verringert sich die Möglichkeit/ Notwendigkeit des formellen Lernens (bspw. Durch Weiterbildungsmaßnahmen, neue Ausbildungsmodule, neue Studiengänge etc.)?</i>
<i>Selbstbestimmend</i>	<i>Steigt oder sinkt der Grad der Selbstbestimmung der betroffenen Mitarbeiter hinsichtlich: Bestimmung der Reihenfolge der auszuführenden Tätigkeiten, Auswahl der Arbeitsmethoden und/oder -mittel, Arbeitsgeschwindigkeit, Auswahl der Mitarbeiter, mit denen zusammengearbeitet wird?</i>
<i>Optimierung</i>	<i>Steigt oder sinkt die Möglichkeit der Optimierung der eigenen Arbeit (hinsichtlich der Prozesse aber auch der Organisation)?</i>
<i>Kooperation</i>	<i>Wird die Tätigkeit mehr oder weniger in Team-Strukturen eingebunden und entstehen damit höhere/ niedrigere Anforderungen an kooperative Fähigkeiten der Mitarbeiter?</i>
<i>Kommunikation</i>	<i>Steigen oder sinken die Anforderungen hinsichtlich kommunikativer Fähigkeiten (bspw. durch verstärkte Team-Arbeit, stärkere vertikale/horizontale Vernetzung im Betrieb)?</i>
<i>Interdisziplinarität</i>	<i>Steigen oder sinken die Anforderungen hinsichtlich interdisziplinären Wissens, das über die Kenntnisse im eigenen Fachbereich hinausgeht?</i>
<i>IT-Kennntnis</i>	<i>Steigen oder sinken die Anforderungen an die betroffenen Mitarbeiter hinsichtlich ihrer IT-Kompetenzen?</i>

In weiterer Folge werden die Funktionsträger die momentan und auch in Zukunft notwendig sein werden, bestimmt. Darunter fallen Intralogistiker, Monteure, Instandhalter, Meister, Konstrukteure IT-/Software-Ingenieure etc. Im nächsten Schritt folgt die Bewertung des angestrebten Veränderungsprozesses bezüglich der Arbeit. Mit einer fünf-stufigen Skala (-2 starker Rückgang bis +2 starker Anstieg) werden die

Faktoren in Bezug auf den Funktionsträger gewichtet. Durch die projektnahe Testung des Modells in der Industrie, weißt der Ansatz eine gute Anwendbarkeit auf.

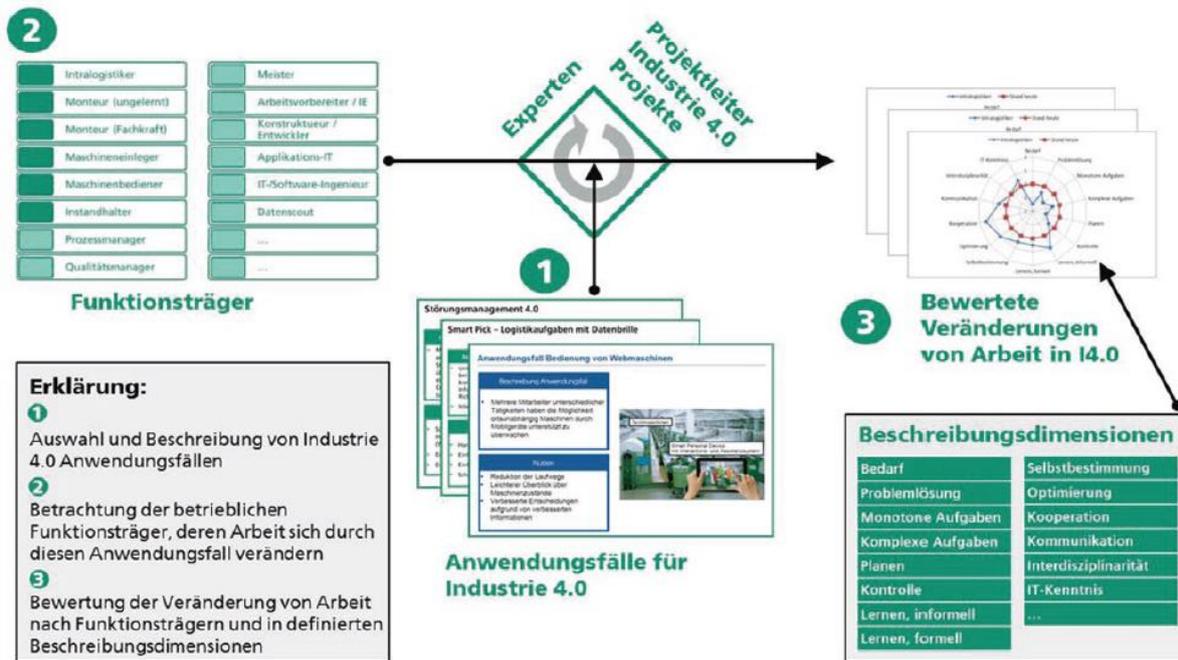


Abbildung 28: Modellansatz für ein arbeitsplatznahes Beschreibungsmodell der "Arbeitswelt Industrie 4.0" ¹⁶⁸

Der Ansatz der These behauptet, dass die Anhäufung der individuellen Veränderungen bei vielen Szenarien und Funktionsträgern dazu führen, dass man für allgemeinere Anwendungen Aussagen treffen kann, in Bezug auf die Arbeitswelt in der Industrie 4.0. Besonders qualitative Veränderungen bezüglich der Arbeitstätigkeit lassen sich somit gut darstellen.

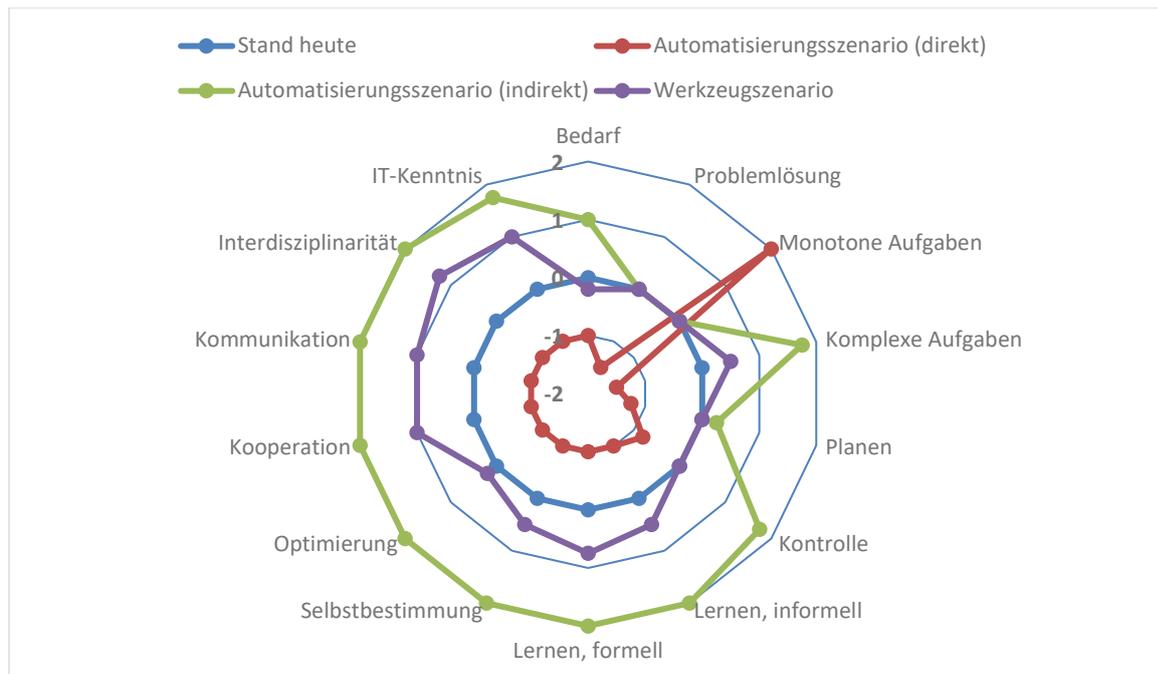


Abbildung 29: Automatisierungsszenario vs. Werkzeugszenario - Mögliches Arbeitsprofil für einen Monteur in unterschiedlichen Szenarien ¹⁶⁹

Abbildung 29 zeigt den Vergleich eines Arbeitsprofils von heute, zu einem möglichen in der Zukunft. Wird die Dimension Automatisierungsszenario (direkt/indirekt) betrachtet, sieht man die Auswirkungen von einem System, das den Mitarbeiter lenkt und die Aufgaben bestimmt. Dies führt zu einer verminderten Kompetenz des Personals, das im Falle einer Störung nicht mehr eingreifen kann, da das Fachwissen nicht mehr vorhanden ist. Im Gegenzug, dem Werkzeugszenario, bestimmen die MitarbeiterInnen die Arbeitsprozesse und behalten ihre Kompetenzen, um den Arbeitsprozess aktiv begleiten zu können. ¹⁷⁰

3.1.8.1 Fazit

Das vorgestellte Modell wird für die Dimension „Mensch“ in der Evaluation einen wichtigen Input liefern, da der „*Mensch eine zentrale Rolle in der Produktion von Morgen einnehmen wird.*“ ¹⁷¹ Auch die neuen Qualifikationsanforderungen werden die MitarbeiterInnen in Bewegung setzen, monotone Tätigkeiten hinter sich zu lassen und auf die Hilfe von Assistenzsystemen für jene Aufgaben zu greifen. ¹⁷² Somit wird dieser Ansatz nicht direkt einer Unterstützung zugeschrieben, sondern lässt sich für die Anwendungen pauschal im Bereich der menschlichen Dimension anwenden.

¹⁶⁹ Bauer et al., 2018, S.155

¹⁷⁰ vgl. ebenda, S.149 ff

¹⁷¹ Reinhart, 2017, S.51

¹⁷² vgl. ebenda, S.63

3.1.9 Modell zur Evaluierung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF)

Der Fokus für die Evaluation FTF hat einen starken Fokus auf Routenplanung und Optimierung der Arbeitslastverteilung, wie die wissenschaftlichen Arbeiten von Hoshino et al. (2007), Ploeg et al. (2002) und Seifert et al. (1998). Das Paper von Hellmann et al. (2019) betrachtet das Problem etwas spezifischer und vergleicht einen Use-Case bei dem Menschen, FTF und AIV (automated intelligent vehicles) miteinander verglichen werden.¹⁷³

Bei der Planung eines FTF gibt es Dinge zu beachten, wie quantitative (z.B.: Ladekapazität, Kosten und Energieverbrauch) und qualitative Kriterien (z.B.: Flexibilität, Zuverlässigkeit und Sicherheit). Auf Basis der verschiedenen Kriterien handelt es sich bei diesem Prozess ebenfalls um eine mehrdimensionale Betrachtung eines Assistenzsystems. Aufgrund der Bedeutung der Materialhandhabung als Faktor für die Systemleistung und ihrer hohen Implementierungskosten, erfordert eine effektive Entscheidungsfindung eine sorgfältige Betrachtung und Bewertung von quantitativen und qualitativen Kriterien.¹⁷⁴

Basis für das vorgestellte Modell ist ein modifizierter analytischer Hierarchieprozess (AHP) mit einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA). Erstere unterscheidet zwischen qualitativen und quantitativen Kriterien. Die qualitativen werden mit einer Punkteskala von 1 bis 9 bewertet, die quantitativen mit gemessener oder geschätzter Leistung. Die FMEA dient der Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit und gibt eine Gesamtrisikoprioritätszahl (TRPN) als ein globales Maß für Risiko an.¹⁷⁵

3.1.9.1 Fazit und grafische Darstellung des Modells

Basierend auf einer Anwendung aus der Industrie liegt der Fokus der Methode auf der Einbeziehung der Sicherheit und Zuverlässigkeit in den Entscheidungsprozess, unter der Berücksichtigung der qualitativen und quantitativen Kriterien. Abbildung 30 zeigt das Vorgehen des Modells. Die modifizierte AHP wird mit den gemessenen bzw. geschätzten Werten aus der FMEA und den anderen Quellen gespeist. Gemeinsam mit den Expertenmeinungen, die einen Bias haben können, kann die finale Bewertung und Reihung der Alternativen dargelegt werden. So kann für Stakeholder und Entscheidungsträger eine Lösung präsentiert werden.¹⁷⁶

Das Paper wurde für die Evaluation der FTF konzipiert. Es geht methodisch stärker in eine zahlenbasierte Evaluation auf Basis der fünf Dimensionen aus Abbildung 31, mit

¹⁷³ vgl. Hellmann et al., 2019, S.815

¹⁷⁴ vgl. ebenda, S.816

¹⁷⁵ vgl. ebenda, S.818ff

¹⁷⁶ vgl. ebenda, S.823

einem starken Fokus auf Sicherheit (durch FMEA). Dennoch werden die finanziellen Aspekte und prozessrelevante Faktoren berücksichtigt.

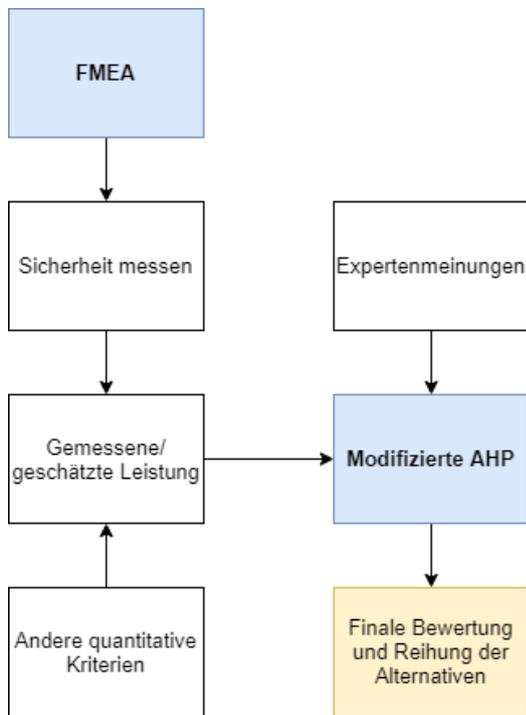


Abbildung 30: Vorgeschlagenes Modell ¹⁷⁷

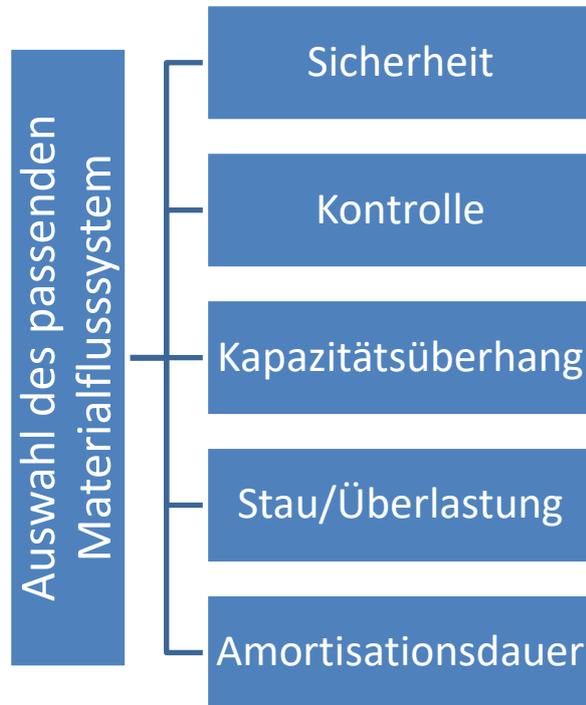


Abbildung 31: Überblick der betrachteten Dimensionen ¹⁷⁸

¹⁷⁷ vgl. Hellmann et al., 2019, S.819

¹⁷⁸ vgl. ebenda, S.819

4 Verwendete Methoden

4.1 Definition der ausgewählten Evaluation

Die vorgestellten Evaluationsmethoden aus Kapitel 3 bieten eine breite Palette an Möglichkeiten, um Assistenzsysteme zu evaluieren. Mit den jeweiligen Faziten am Ende der vorgestellten Evaluationsmethoden werden jene ausgewählt, die für eine Evaluation der beiden Use-Cases geeignet sind. Abbildung 32 zeigt die gewählten Dimensionen, Kriterien und die Messmethoden, mit denen die Evaluation bewertet werden kann. In Kapitel 4.2 werden die verwendeten Messmethoden genau erläutert und der Grund für die Auswahl erklärt.

Für den Bereich der Kosten wird eine Life-Cycle-Costing Methode vorgeschlagen, die die ganzheitlichen Kosten in Betracht zieht. Der ROI ist für Unternehmen aus der Industrie ein wichtiger KPI, auf Basis dessen Investitionsentscheidungen getroffen werden, da die Einführung neuer Systeme immer mit einem Risiko behaftet ist.¹⁷⁹

Die Prozessparameter werden mit der Durchlaufzeit und der Flexibilität betrachtet. Erstere lässt sich mit den Messmethoden, der Durchlaufzeitmessung, MTM oder einer qualitativen Analyse ermitteln. Die Flexibilität, bei hybriden Prozessen einer der wichtigsten Faktoren, ergibt sich aus qualitativer Analyse.

Die Dimension Erlernen & Entwickeln gliedert sich in Qualifikation und Einschulungsdauer. Der Kompetenzatlas ist eine Unterstützung, um zukünftige Qualifikationsprofile zu eruieren.

Für den Anwender kommen die Ergonomie, Nutzerakzeptanz und Usability in den Evaluationsprozess. Erstere wird mit Hilfe von EAWS und NASA-RTLX erklärt. Die Akzeptanz durch den Nutzer kann mit Fragen bezüglich der Technologieoptabilität und der richtigen Kommunikation evaluiert werden. Der SUS erläutert die Usability im Zuge der Evaluation.

Die letzte Dimension, die Technologie, betrachtet den Stand der Technik mit Hilfe des Technology Readiness Levels und die mögliche Hardware/Vendor-Lock-in, wiederum mit einer qualitativen Analyse.

¹⁷⁹ vgl. Gronau, 2010, S.17

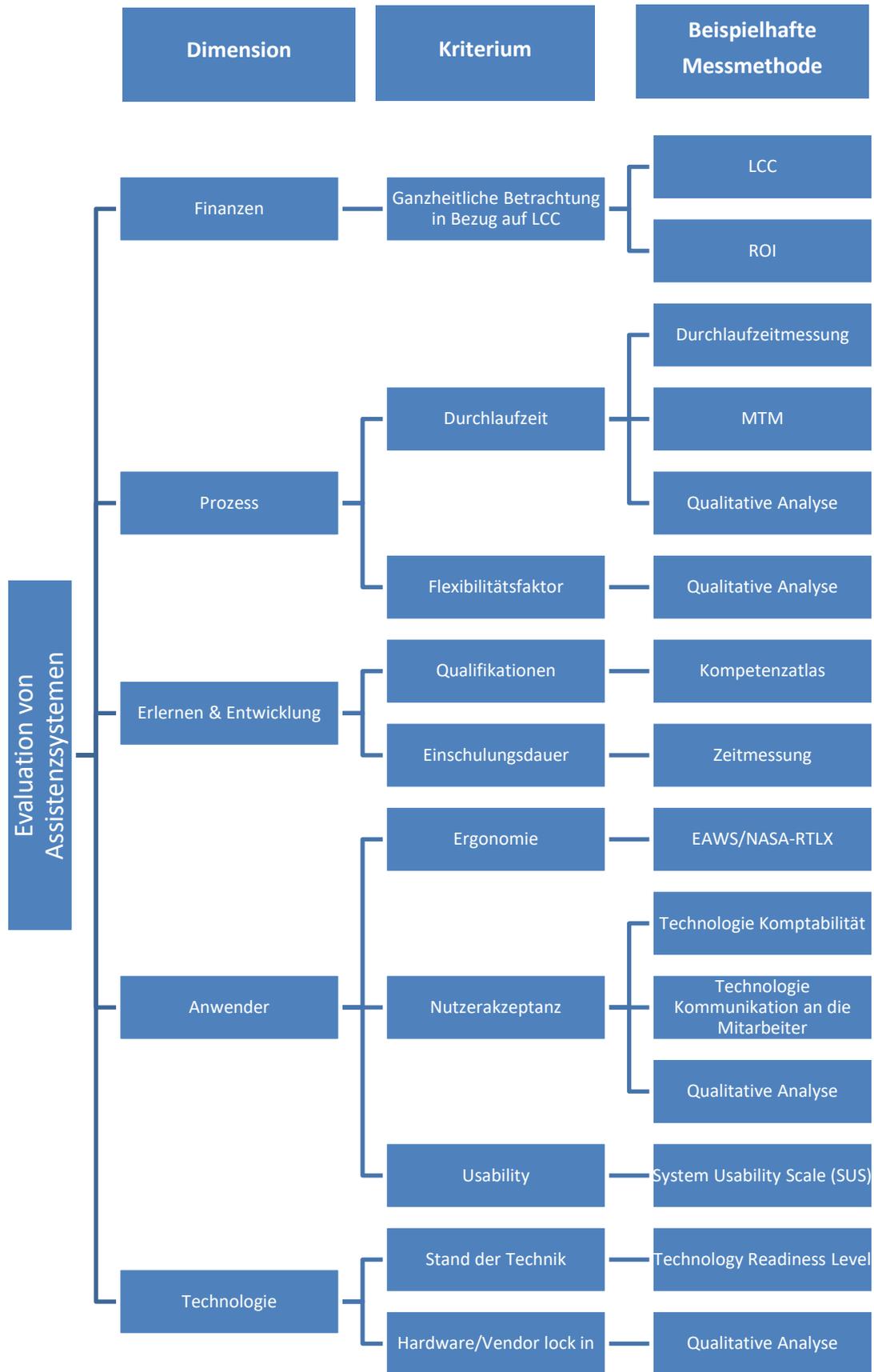


Abbildung 32: Evaluationsmodell, eigene Darstellung an ¹⁸⁰ ¹⁸¹

¹⁸⁰ vgl. Zigart & Schlund, 2020, S.4

¹⁸¹ vgl. Franke, 2019, S.311 ff

4.2 Methodenbeschreibung der Messmethoden

Die angewendeten Methoden zur Evaluation der einzelnen Dimensionen werden einzeln vorgestellt und beschrieben. Es ist zu beachten, dass für den Use-Case in der Pilotfabrik und bei AT&S nicht immer dieselben Methoden vorkommen. Dies beruht auf der Tatsache, dass sich je nach Use-Case und Assistenzsystem gewisse Methoden besser oder schlechter zu Evaluation eignen.

4.2.1 Life-Cycle-Costing (LCC)

Für die Betrachtung der finanziellen Lage einer Implementierung von Assistenzsystemen müssen einige Faktoren berücksichtigt werden. Wichtig ist jedoch die Tatsache, dass der ganze Lebenszyklus der Anwendung in Betracht gezogen wird, das sogenannte Life-Cycle Costing (LCC). Hierbei werden alle Kosten berücksichtigt, die mit der Benutzung und dem besitzen der Investition in Verbindung stehen. Somit werden nicht nur die anfänglich hohen Investitionskosten berücksichtigt, sondern auch alle in der Zukunft anfallenden Kosten.¹⁸² Die Methode wird des Weiteren angewandt, um Alternativmöglichkeiten abzuschätzen. Der Hauptunterschied zwischen anderen traditionellen Methoden der Investitionsrechnung und der LCC-Methode ist, dass die LCC eine erweiterte Lebenszyklusperspektive hat. Die Lebenszykluskosten eines Artikels sind die Summe aller Kosten, die von der Konzeption und Produktion über den Betrieb bis zum Ende der Nutzungsdauer anfallen. LCC hilft bei der Verlagerung vom besten Preis-Leistungs-Verhältnis zum besten Wert über den gesamten Lebenszyklus des Assistenzsystems. Es ermöglicht die Bewertung der Kosten für Anschaffung, Entwicklung, Betrieb, Verwaltung, Reparatur, Entsorgung und Stilllegung.¹⁸³ Für die Berechnung des LCC der beiden Use-Cases werden Werte auf Basis der Hersteller bzw. im Falle eines Fehlens eines Betrages, eine realistische Schätzung angenommen, die klar deklariert wird.¹⁸⁴

¹⁸² vgl. Weißfloch et al., 2010, S.791ff

¹⁸³ vgl. Toniolo et al., 2020, S.46ff

¹⁸⁴ vgl. Franke, 2019, S.338

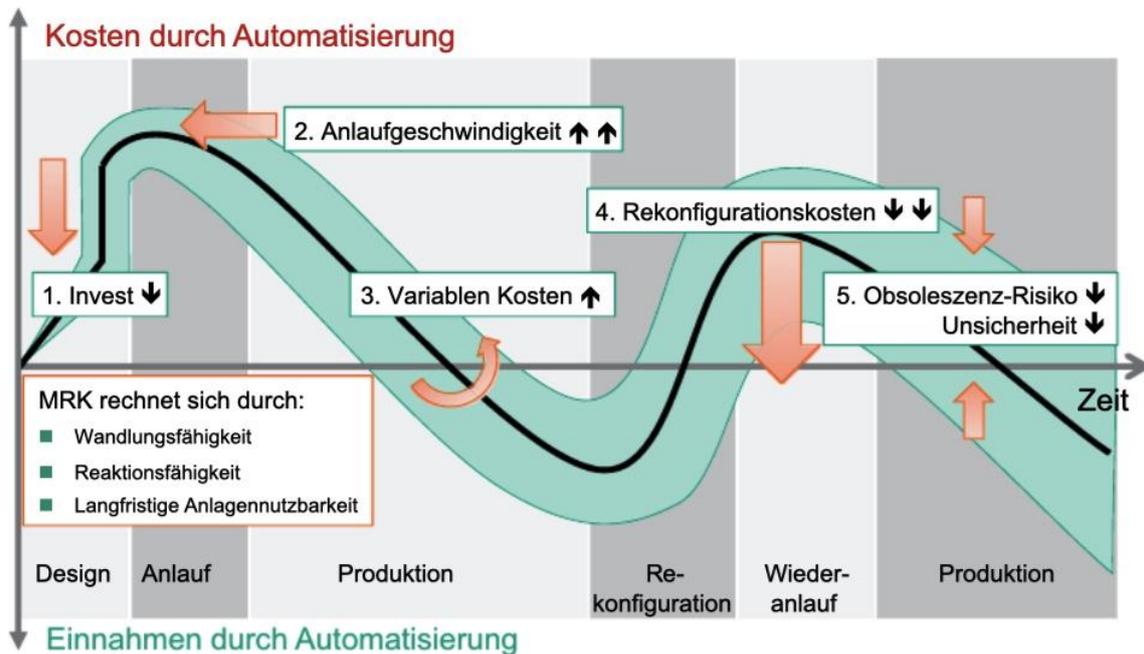


Abbildung 33: Kostenverteilung über einen Lebenszyklus einer Roboteranlage und Potentiale durch den Einsatz von MRK ¹⁸⁵

Abbildung 33 zeigt einen möglichen Verlauf der Amortisierung einer MRK Implementierung. Entlang der waagrechten zeitlichen Achse werden die Kosten für die einzelnen Projektphasen angeführt. Die schwarze Strecke zeigt das nominale Amortisationsverhalten, welches von einem grünen Intervall begrenzt wird, welches mögliche Unsicherheiten in der Berechnung berücksichtigt. Nach anfänglichen Investitionskosten im Design und Integration erfolgt nach erfolgreichem Anlaufen der Produktion eine Reduktion der Kosten. Dies basiert auf den gesunkenen variablen Kosten, die auf Basis der effizienteren MRK im Vergleich zur manuellen Fertigung, zu geringeren Stückkosten führt. Aufgrund der flexiblen Systeme kommt es im Laufe des Produktionszyklus immer wieder zur Anpassung der Fertigung. Deshalb fallen in der Phase der Rekonfiguration wiederum Kosten an, um die Anlage an die neuen Bedürfnisse anpassen zu können. Nach erfolgreicher Adaptierung wird das System wieder rentabel. ¹⁸⁶ Für FTF lässt sich der Graph ebenso anwenden. Nach anfänglicher Implementierung eines Systems, entstehen die größten Kosten, wie die für die Anschaffung der FTF oder der notwendigen baulichen Maßnahmen. Nach Einstellung des FTS reduzieren sich die Kosten, da das Personal für wertschöpfende Tätigkeiten eingesetzt werden kann. Nach weiterer Adaptionsmaßnahmen, wie die Vernetzung von mehreren FTF und Routen, werden ebenfalls wieder Kosten fällig. Dies entspricht der Rekonfigurationsphase. Somit ist das Modell für FTF ebenfalls anwendbar.

Bei passiven Exoskeletten ist der Graph nicht direkt anwendbar, da die Implementierung, aus technischer Sicht, nicht so komplex ist. Die relevanten Kosten

¹⁸⁵ Franke, 2019, S. 339

¹⁸⁶ vgl. ebenda

setzen sich hier aus Anschaffungskosten, Wartungskosten, Kosten für Schulungen, Trage und Lagerung, sowie Nutzungskosten, Patent- und Lizenzkosten zusammen.¹⁸⁷ Mit der Betrachtung eines gesamtheitlichen Produktionsprozesses, bei dem mehrere Fertigungsstationen mit Exoskeletten ausgestattet werden, kann das Modell wiederum interessant werden. Nach anfänglicher Implementierung eines Exoskeletts, können für weitere Schritte ebenfalls die Assistenzsysteme eingesetzt werden, was wiederum die Kostenkurve ähnlich verlaufen lassen könnte.

4.2.2 Zeitmessung

Die Zeitmessung findet mit einfachen Mitteln statt, da sich die Prozesse nicht auf Millisekunden Bereiche beziehen. Eine einfache Zeitaufnahme mittels Mobiltelefon und Stoppuhr dienen hier als Instrument. Hierbei wird nach REFA-Standardprogramm die Methode – Zeitaufnahme, gewählt. Der Grund dafür liegt in der einfachen Umsetzung der Methode und der Flexibilität. Ein gravierender Nachteil besteht jedoch darin, dass im Falle einer Änderung des Arbeitssystems eine neuerliche Aufnahme der Zeit stattfinden muss.

In Bezug auf die Ablaufgliederung wird für den Use-Case in der Pilotfabrik der Mensch (M), im Einsatz (MI), bei seiner Tätigkeit (MT), hinsichtlich seiner Haupt-, Neben- und zusätzlichen Tätigkeit betrachtet. Unterbrechen der Tätigkeit (MK) ist in diesem Fall nicht vorhanden, genauso wenig der Bereich außer Einsatz (ML), Betriebsruhe (MR), sowie nicht erkennbare (MX) Tätigkeiten.¹⁸⁸

4.2.3 MTM

Die Analyse wird nach MTM-UAS durchgeführt. Hierbei wird mit Hilfe von Abbildung 34 der vorgegebene Prozess analysiert und eine mögliche Soll-Zeit ermittelt. Der Vorgang wird in sieben Grundvorgänge eingeteilt, mit dem der gesamte Prozess beschrieben werden soll:¹⁸⁹

1. Aufnehmen und Platzieren
2. Platzieren
3. Hilfsmittel handhaben
4. Betätigen
5. Bewegungszyklen
6. Körperbewegungen
7. Visuelle Kontrolle

¹⁸⁷ vgl. Todorovic et al., 2018, S.226

¹⁸⁸ vgl. Schlick et al., 2018, S.576

¹⁸⁹ MTM-UAS, 2019, S.II-23

Der Entfernungsbereich wird in drei Bereiche eingeteilt, der jeweils in einem Zentimeter Bereich abgegrenzt wird. Nach der Definition der einzelnen Arbeitsschritte, werden jene mit den jeweiligen TMU's versehen und ergeben am Ende eine Gesamtdauer für den Prozess an, der als Soll Zeit gewertet werden kann. Dieser Wert gilt als Ziel für den betrachteten Prozess. ¹⁹⁰

Bewegungslänge in cm		≤ 20	> 20 bis ≤ 50	> 50 bis ≤ 80
Entfernungsbereich		1	2	3

Bewegungslänge in cm		≤ 20	> 20 bis ≤ 50	> 50 bis ≤ 80
Entfernungsbereich		1	2	3

Aufnehmen und Platzieren		Kode	1	2	3	
			TMU			
≤ 1 kg	Fall des Aufnehmens	ungefähr	AA	20	35	50
		lose	AB	30	45	60
	Fall des Platzierens	ungefähr	AC	40	55	70
		lose	AD	20	45	60
	leicht	ungefähr	AE	30	55	70
		lose	AF	40	65	80
	schwierig	ungefähr	AG	40	65	80
		lose	AH	25	45	55
	Hand voll	ungefähr	AJ	40	65	75
		lose	AK	50	75	85
eng		AL	80	105	115	
> 1 kg bis ≤ 8 kg	ungefähr	AM	95	120	130	
	lose	AN	120	145	160	
	eng					

Platzieren		Kode	1	2	3
			TMU		
	ungefähr	PA	10	20	25
	lose	PB	20	30	35
	eng	PC	30	40	45

Hilfsmittel handhaben		Kode	1	2	3
			TMU		
	ungefähr	HA	25	45	65
	lose	HB	40	60	75
	eng	HC	50	70	85

Betätigen		Kode	1	2	3
	einfach	BA	10	25	40
	zusammengesetzt	BB	30	45	60

Bewegungszyklen		Kode	1	2	3
	eine Bewegung	ZA	5	15	20
	Bewegungsfolge	ZB	10	30	40
	Umsetzen und eine Bewegung	ZC	30	45	55
	Festmachen oder Lösen	ZD	20		

Körperbewegungen		Kode	TMU
	Gehen / m	KA	25
	Beugen, Bücken, Knien (incl. Aufrichten)	KB	60
	Setzen und Aufstehen	KC	110

Visuelle Kontrolle		Kode	TMU
		VA	15

Abbildung 34: Bewertung nach MTM-UAS ¹⁹¹

4.2.4 Qualitative Analyse

Die Durchführung der qualitativen Analyse beruht auf den geführten Interviews im Rahmen des Projektes. Für die multikriterielle Evaluation im Rahmen der Praxisbeispiele kommt sie für die Messung der Durchlaufzeit, des Flexibilitätswahrscheinlichkeitsfaktors und der Hardware/Vendor-Lock-in zum Einsatz. Es handelt sich um semi-strukturierte Interviews. Hierbei werden Themenbereiche im Vorhinein definiert und die Teilnehmer durch gezielt gestellte Fragen in eine gewisse Richtung gelenkt. Der Vorteil dieser Methode beruht darauf, dass die befragte Person Raum für Kreativität und Ausschweifungen in Bezug auf die Fragestellung hat, jedoch bleibt die Unterhaltung in einem begrenzten Rahmen. ¹⁹²

¹⁹⁰ vgl. MTM-UAS, 2019, S.III-3

¹⁹¹ ebenda, S.II-22

¹⁹² vgl. Galetta, 2013, S.1ff

Zwei Bedingungen gilt es für das Interview zu beachten. Zum einen die Güte und die Problemsituation, die durch die zu befragende Person verändert werden kann. Bezüglich des ersten Punktes ist gemeint, dass der Interviewer zu viele Suggestivfragen stellt und somit den zu Befragenden zu stark beeinflusst. Das Gegenteil kann auch der Fall sein, dass zu wenig nachgefragt wird, sodass Nachweise für gewissen Entscheidungen nicht herausgefunden werden. Der zweite Punkt streift das Thema der eingeführten Bedingungen an, die ein Interviewer vorgibt, bevor er eine Alternative vorschlägt. Nun gilt es das Interview durchzuführen. Im Anschluss werden die relevanten Textabschnitte herausgearbeitet und für die Beantwortung der gewünschten Fragen herangezogen. Hierbei kann es zur Sequenzanalyse oder dem Abkürzungsverfahren kommen.¹⁹³

Hinzu kommen statistische Auswertungen bei dem Use-Case aus der Pilotfabrik. Hier wurde eine Umfrage im Anschluss an den Versuch durchgeführt. Diese wird mit Hilfe des Chi-Square Test untersucht. Hierbei werden verschiedene Hypothesen, die im Vorhinein definiert werden aufgestellt und mit Hilfe des Tests überprüft. Es gilt Zusammenhänge und Gemeinsamkeiten zu finden und die vorgestellten Hypothesen so zu bestätigen oder zu widerlegen.¹⁹⁴

Im Falle des Industrie-Use Cases werden mit Hilfe eines semi-strukturierten Interviews möglichst viele wichtige Informationen über die gesamten Dimensionen der Evaluation eingeholt, da vor allem Ist- und Sollzustand des Prozesses anders, wenig bis gar nicht erhoben werden können.

4.2.5 Kompetenzatlas

Der Kompetenzatlas in Abbildung 36 besteht aus 64 Teilen, die in einer Matrix mit den vier Quadranten Personale Kompetenz (P), Aktivitäts- und Handlungskompetenz (A), Sozial Kommunikative Kompetenz (S) und Fach- und Methodenkompetenz, aufgeteilt sind.¹⁹⁵ „Die vier Grundkompetenzen sind Fähigkeiten zur Selbstorganisation des Handelns in Bezug:

¹⁹³ vgl. Garz, 1991, S.45ff

¹⁹⁴ vgl. Everitt, 1977, S.1 ff

¹⁹⁵ vgl. Heyse und Erpenbeck, 2007, S.32ff



Abbildung 35: Grundkompetenzen“¹⁹⁶

Querschnittskompetenzen sind normalerweise eine Kombination aus 12 bis 16 Schlüsselkompetenzen, somit sind sie Schlüsselkompetenz-Gruppen. Beispielsweise kommt der Begriff Führungskompetenz im Atlas nicht vor, jedoch setzt er sich aus verschiedenen Querschnittskompetenzen zusammen, wie z.B. Führen, Belastbarkeit oder Mitarbeiterförderung. Auf Basis von Querschnittsprofilen werden Kompetenz-Anforderungsprofile entwickelt. Da Grundkompetenzen in der Realität nicht glasklar auftreten, werden sie den Kategorien P, P/A, A/P, A, etc. so gut wie möglich zugeordnet. Somit kann man Schlüssel- und Teilkompetenzen nach einem Schema zuordnen und mögliche Zusammenhänge darstellen.¹⁹⁷

¹⁹⁶ Heyse und Erpenbeck, 2007, S.15

¹⁹⁷ vgl. <https://www.kodekonzept.com/wissensressourcen/kode-kompetenzatlas/> (Gelesen am 01.08.2021)



KODE® KompetenzAtlas - Erweitert / Stand 04.2019

Dritte revidierte Fassung / © 2017 KODE GmbH / Alle Rechte vorbehalten.

Abbildung 36: Kompetenzatlas nach KODE mit beispielhafter Hervorhebung von Schlüsselkompetenzen¹⁹⁸

4.2.6 Ergonomic Assembly Worksheet (EAWS)

EAWS ist eine Risikobewertungsmethode der ersten Stufe für die biomechanische Belastung des gesamten Körpers und der oberen Gliedmaßen, die vor allem in der Fertigungsindustrie als Prozessdesign-Tool für präventive Ergonomie eingesetzt wird. Es ist nach ISO Standards zertifiziert und deckt folgende vier Bereiche ab:¹⁹⁹

¹⁹⁸ vgl. <https://www.kodekonzept.com/wissensressourcen/kode-kompetenzatlas/> (Gelesen am 01.08.2021)

¹⁹⁹ vgl. Lavatelli et al., 2012, S.4436

1. Körperhaltungen,
2. Einwirkungskräfte,
3. manuelle Materialhandhabung und
4. obere Gliedmaßen bei sich wiederholenden Aufgaben.

Vor allem kurzzyklische und repetitive Belastungen werden im Bereich der Arme im Rahmen vom EAWS zusätzlich betrachtet. Das Ergebnis der Auswertung ist ein Punktwert und eine Einstufung nach dem Ampelprinzip. Entstanden ist die Methode aus einer Zusammenarbeit des Internationalen MTM Direktorat und der Technischen Universität Darmstadt und ist seit 2009 die offizielle Methode, der MTM Vereinigung.²⁰⁰

Insbesondere der Punkt 4) aus der Auflistung wird für den Use-Case in der Pilotfabrik in den Fokus rücken. Zunächst erfolgt die Zusammenfassung der Punkte aus den Bereichen eins bis drei. Die Gesamtsumme wird dann dem Punkt vier gegenübergestellt. Der höhere der beiden Werte bestimmt die Risikoeinstufung, die in Tabelle 7 als Ampelbereich dargestellt wird. Die Bewertung der Ergonomie erfolgt nach dem Ampelprinzip und wird in Tabelle 7 aufgelistet.²⁰¹

Tabelle 7: Risikobewertung nach EAWS ²⁰²

Punktwert	Ampelbereich	Beschreibung
≤ 25,0	Grün	Niedriges Risiko, empfehlenswert Maßnahmen nicht erforderlich.
> 25,0 bis 50,0	Gelb	Mögliches Risiko, nicht empfehlenswert, Maßnahmen zur erneuten Gestaltung/ Risikobeherrschung sind zu ergreifen.
> 50,0	Rot	Hohes Risiko, vermeiden, Maßnahmen zur Risikobeherrschung sind erforderlich.

4.2.7 National Aeronautics and Space Administration - Raw Task Load Index (NASA-RTLX)

NASA-TLX ist eine Skala, die zur Messung der subjektiven Aufgabenbelastung verwendet wird. In den letzten Jahrzehnten gab es einige Adaptierungen, wie den NASA- Raw Task Load Index (NASA-RTLX). In einem Paper von Hart (2006) wurde jedoch festgestellt, dass es eine geschmackliche Frage ist, welche der Methoden man nimmt, da die Ergebnisse sehr ähnlich sind.²⁰³ Für diese Arbeit wurde das NASA-RTLX gewählt. Es handelt sich um ein Forschungsinstrument, mit dem Daten von Benutzern zur Arbeitsbelastung gesammelt werden. Viele Fallstudien haben die

²⁰⁰ vgl. Schlick et al., 2018, S.524

²⁰¹ vgl. Kunze, 2019, S.56 f

²⁰² ebenda, S.57

²⁰³ vgl. Hart, 2006, S.1ff

Nützlichkeit von NASA-RTLX für Schnittstellenprobleme zwischen Mensch und Maschine sowie deren Auswirkungen auf die Benutzer aufgezeigt.²⁰⁴

Den Teilnehmern des Use-Cases in der Pilotfabrik wurden sechs Fragen gestellt, die die folgenden Bereiche abdecken:

- Mentale-,
- Körperliche-,
- zeitlichen Anforderungen,
- Leistung,
- Anstrengung und
- Frustration

Es handelt sich bei jeder der Kategorien um eine Skala, die mit 20 Werten von 0-20 bewertet werden kann. Jeder der einzelnen Werte wird mit dem Faktor 5 multipliziert und das Gesamtergebnis der Summe dieser Werte, wird durch 6 dividiert.²⁰⁵

$$NASA\ Score = \frac{5 \cdot \sum\ Summe\ der\ Werte}{6}$$

Somit ergibt sich ein Wert zwischen 0 und 100.

4.2.8 Technologie Akzeptanz und Komptabilität

Im Rahmen des Exoskelett Use-Cases an der Pilotfabrik wurden den teilnehmenden Personen die folgenden Fragen gestellt, die sie mit den Werten 1 (stimme gar nicht zu) bis 5 (stimme ganz zu) beantworten konnten:²⁰⁶

- Komptabilität mit bisheriger Technologieerfahrung:
 - Umgang mit Assistenzsystemen (AS) ist eine neue Erfahrung für mich.
 - Die Verwendung mit AS ist mit nichts vergleichbar, was ich vorher gemacht habe.
 - Die Nutzung des Assistenzsystems ist anders als andere Erfahrungen, die ich gemacht habe.
 - Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich eine neue Arbeitserfahrung.
- Komptabilität mit den eigenen Werten:
 - Der Einsatz des AS in der Praxis würde meinen eigenen Werten widersprechen.
 - Die Nutzung des AS passt nicht in mein Weltbild.

²⁰⁴ vgl. Afridi, 2020, S.3ff

²⁰⁵ vgl. NASA, 1986, S.17

²⁰⁶ vgl. Karahanna & Srite, 2006, S.679ff

- Die Verwendung des AS widerspricht dem, wofür Computer meiner Meinung nach verwendet werden sollen.
- Die Verwendung des AS ist für eine Person mit meinen Werten bzgl. der Rolle von Computern nicht angemessen.
- Die Nutzung des AS widerspricht meinen Wertvorstellungen darüber, wie die Arbeit erledigt werden sollte.
- Komptabilität mit den eigenen Präferenzen:
 - Der Einsatz von solchen AS würde zu meinem bevorzugten Arbeitsablauf passen.
 - Das AS würde es mir ermöglichen, so zu arbeiten, wie ich es bevorzuge.
 - Die Verwendung des AS würde gut zu meiner Arbeitsweise passen.
 - Die Verwendung des AS würde meiner bevorzugten Arbeitsweise entsprechen.²⁰⁷

Die statistische Auswertung der erhaltenen Fragen ermöglicht eine Aussage bezüglich der Akzeptanz der User gegenüber dem Assistenzsystem. Die jeweiligen Faktoren wurden im Rahmen der Umfrage in der Pilotfabrik der TU Wien erfragt und im Kapitel 6.1.1.4 evaluiert. Für die Resultate der Firmenkooperation wird auf das semi-strukturierte Interview zurückgegriffen.

4.2.9 System Usability Scale (SUS)

Die System Usability Scale (SUS) als subjektives Usability-Maß entwickelt, das schnell durchgeführt werden kann, nachdem die Benutzer die Evaluationsaufgaben bearbeitet haben. Mit Hilfe eines Fragebogens werden Testpersonen in Bezug auf ihre Zustimmung zu Aussagen bewertet, die eine Vielzahl von Usability-Merkmalen erfassen. Hierzu gehört die Komplexität des Systems und jegliche Unterstützung oder Schulung, die die Teilnehmer für eine effektive Nutzung des Systems für notwendig empfinden. Aus zehn Fragen können so die Benutzerfreundlichkeit eines Produktes schnell und ohne komplizierte Analysen bewertet werden.²⁰⁸

Diese zehn Fragen lauten:

1. Ich denke, ich würde dieses System gerne häufig verwenden.
2. Ich finde das System unnötig komplex.
3. Ich finde das System war leicht zu bedienen.
4. Ich denke, dass ich technische Unterstützung benötige, um dieses System zu bedienen.
5. Ich finde, die unterschiedlichen Funktionen sind in diesem System gut integriert.
6. Ich finde, dass es zu viel Unstimmigkeiten in diesem System gibt.

²⁰⁷ Nowak, 2021, Excel-Sheet_geamt

²⁰⁸ vgl. Drew et al., 2018, S.357

7. Ich denke, dass die meisten Menschen dieses System sehr schnell beherrschen werden.
8. Ich finde, das System ist sehr umständlich zu bedienen.
9. Ich fühlte mich sehr sicher im Umgang mit dem System.
10. Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit diesem System loslegen konnte.

Jede dieser Fragen kann mit einem Wert von 1 (stimme überhaupt nicht zu), 2 (stimme nicht zu), 3 (neutral), 4 (stimme zu), 5 (stimme voll zu) bewertet werden. Um den SUS-Score zu berechnen, werden zunächst die Score-Beiträge der einzelnen Elemente addiert. Für die Fragen 1,3,5,7 und 9 ist das Ergebnis der Score-Beitrag minus 1. Für die Fragen 2,4,6,8 und 10 ist das Ergebnis der Wert 5 minus den angegebenen Score des Users. Schlussendlich werden die Scores addiert und das Ergebnis mit 2,5 multipliziert. Somit entsteht ein Wert zwischen 0 und 100.²⁰⁹

Abbildung 37 zeigt eine Möglichkeit das SUS-Ergebnis zu klassifizieren, um eine Bewertung für die vorliegenden Werte zu liefern. Sollte der Wert einer SUS-Auswertung unter 50 ausfallen, sollte das Produkt einer erneuten Überprüfung unterzogen werden und kontinuierlich verbessert werden. Produkte die einen SUS-Wert von 70 Punkten erreichen, werden als akzeptabel eingestuft. Bessere Produkte schlagen mit Werten bis zu 89 zu Buche. Alle Ergebnisse, die über 90 eingestuft werden gelten als hervorragend. Die drei verschiedenen Einteilungen in Bezug auf Quartil-, Akzeptanzbereiche und Adjektivbewertung dienen ebenfalls der Einteilung und erlauben es, je nach Präferenz, die Werte zu beschreiben.²¹⁰

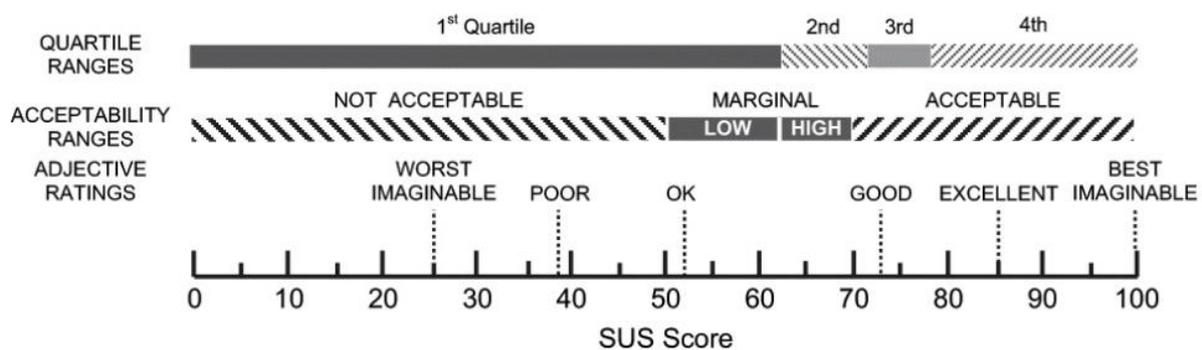


Abbildung 37: Gesamt-SUS Ergebnis²¹¹

²⁰⁹ vgl. Brooke, 1995, S.5

²¹⁰ vgl. Bangor et al., 2008, S.591 f

²¹¹ ebenda, S.592

4.2.10 Technology Readiness Level (TRL)

Die Beurteilung, auf welcher Stufe sich eine Technologie befindet, kann mit dem Technology Readiness Level stattfinden. Auf neun Stufen können die unterschiedlichen Stadien des Status eingeteilt werden. Die amerikanische Raumfahrtbehörde hat eine zehnte Stufe eingeführt, die in dieser Arbeit ebenfalls berücksichtigt wird. Die zehnte Stufe sammelt zusätzliche Informationen über die Inbetriebnahme des Produktes hinweg und kann so zukünftigen Projekten nützliche Berichte liefern.²¹²

Die zehn Stufen ergeben sich wie folgt:

1. Technologieforschung
2. Technologiekonzept
3. Machbarkeitsstudie
4. Technologiedemonstration
5. Konzeptionelles Design und Prototypen-Demonstration
6. Vorläufiges Design und Prototypen Validierung
7. Feinentwurf und Baugruppenerstellungen
8. Aufbau und Prüfung des Teilsystems
9. System im Betrieb
10. Bewährter Ablauf

Um eine Stufe zehn zu erreichen, gilt es die folgenden vier Kriterien zu erfüllen:

1. Das Produkt wurde bereits mehrfach getestet, validiert und für den Gebrauch zertifiziert. Das Produkt ist bereits ohne Zwischenfälle über einen längeren Zeitraum in Benutzung.
2. Die Technologie wurde bereits zertifiziert.
3. Die Fehlerquoten für das System sind bekannt und die Ausfallbedingungen sowie deren Ursachen ebenso.
4. Das Assistenzsystem funktioniert, ohne dass ein unakzeptables Ausmaß an ungeplanter Störungssuche oder Reparatur erforderlich ist.²¹³

Sind diese Bedingungen erfüllt, kann dem System ein Level von zehn zugesprochen werden.

²¹² vgl. Straub, 2015, S.316 f

²¹³ vgl. ebenda, S.315

5 Darstellung der praktischen Anwendungsfälle

Der praktische Teil beinhaltet einen Use-Case, der auf Basis einer realen Industrieanwendung der Firma Volkswagen, in der Pilotfabrik der TU Wien. Dort wurde dieser Anwendungsfall als Mockup nachgebaut und evaluiert. Der zweite Teil wurde in Kooperation mit dem Unternehmen Austria Technologie & Systemtechnik (AT&S) am Standort Leoben durchgeführt. Hier wird ein Use-Case mit einem FTF evaluiert und auf Basis der multikriteriellen Evaluation untersucht.

5.1 Evaluation eines Exoskelett Use-Cases in der Pilotfabrik der TU Wien

Der praktische Teil unter Laborbedingungen findet in der TU Wien statt. Es handelt sich um einen Use-Case mit einem passiven Exoskelett. Das Unternehmen Volkswagen testet mit dem Exoskelett Paexo Shoulder von Ottobock die Überkopfmontage in einem Werk in der Slowakei. Dieser Anwendungsfall aus der Industrie bietet das Grundgerüst für eine Überkopfmontage in der Pilotfabrik. Es werden in der industriellen Umgebung Kabeln, Tüllen und/oder Verbindungselemente in der Heckklappe Überkopf verbaut. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die Mitarbeiter bei Ihrer Tätigkeit. Das Verbauen der notwendigen Verkabelung erfordert Fingerfertigkeit. Mit der Annahme, einer acht-stündigen Schicht, verbringt der Mitarbeiter einen großen Zeitraum mit einer Überkopf-Haltung der Arme. Genau hier kann ein passives Exoskelett den Mitarbeiter unterstützen. ^{214 215}



Abbildung 38: Überkopf-Montage Volkswagen ²¹⁶



Abbildung 39: Überkopf-Montage Volkswagen Teil 2 ²¹⁷

²¹⁴ vgl. <https://paexo.com/fuenf-verbreitete-anwendungsaeflle-fuer-exoskelette/> (Gelesen am 05.07.21)

²¹⁵ vgl. https://www.wko.at/service/arbeitsrecht-sozialrecht/faqs-arbeitszeit.html#heading_1__Grundlagen_der_Arbeitszeit_2 (Gelesen am 09.07.2021)

²¹⁶ vgl. <https://paexo.com/fuenf-verbreitete-anwendungsaeflle-fuer-exoskelette/> (Gelesen am 05.07.21)

²¹⁷ vgl. <https://paexo.com/fuenf-verbreitete-anwendungsaeflle-fuer-exoskelette/> (Gelesen am 05.07.21)

5.1.1 Analyse der Ausgangslage – IST Zustand

Der in Abbildung 40 aufgebaute Use-Case zeigt die Aufgabe, die durchzuführen ist. Der Versuchsstand besteht aus folgenden Einzelteilen, die an dem gezeigten Versuchsstand montiert sind:

- Fünfft metallische Ösen ([Abbildung 41](#)).
- Ein vier Meter langes Kabel, welches durch die fünf Ösen geführt werden muss und anschließend an das Motherboard angeschlossen werden muss. ([Abbildung 42](#)).
- Ein drei Meter langes Kabel ([Abbildung 43](#)).
- Ein Motherboard, welches den Anschluss der Kabel an die Stromversorgung simulieren soll ([Abbildung 44](#)).
- Eine L-förmige Röhre ([Abbildung 45](#)).
- Ein Anschluss, der im Zuge des Versuches verbunden werden soll ([Abbildung 46](#)).
- Am Motherboard müssen schlussendlich die Kabel mit einem Schraubendreher fixiert werden ([Abbildung 47](#)).



Abbildung 40: Versuchsstand in der Pilotfabrik

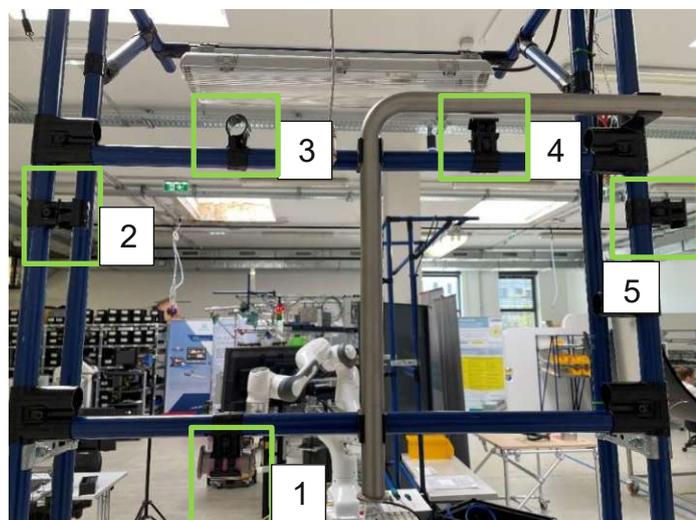


Abbildung 41: Fünf Ösen



Abbildung 42: Kabel 1 für die Beleuchtung des Hecks



Abbildung 43: Kabel 2



Abbildung 44: Motherboard Anschluss



Abbildung 45: L-Förmige Röhre



Abbildung 46: Anschlusskabel mit Drehverschluss

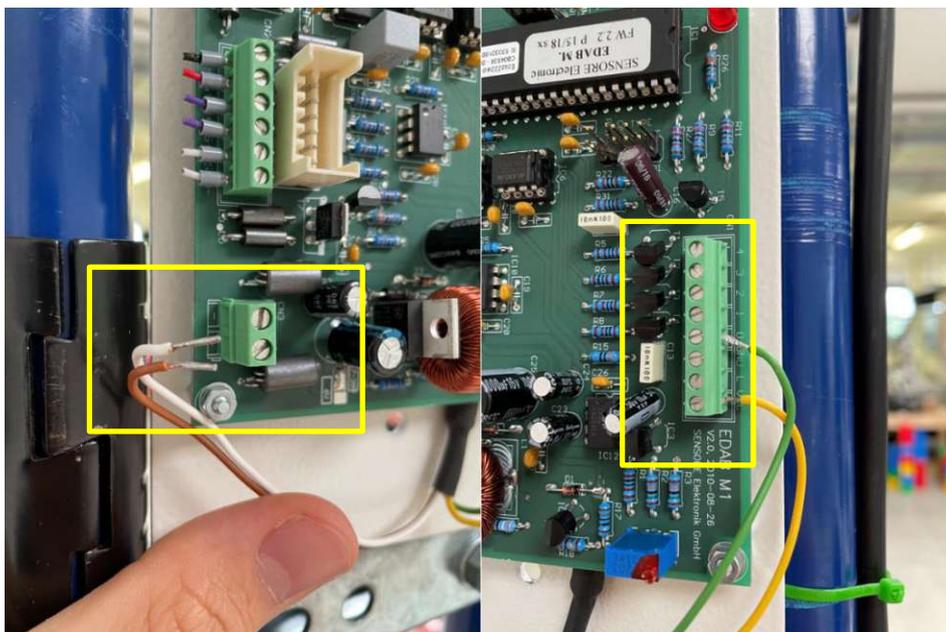


Abbildung 47: Kabelmontage

Die Aufgabe wird den teilnehmenden Personen über ein digitales Informationsdisplay (siehe Kapitel 13.5) angezeigt und gibt die folgenden Arbeitsschritte vor.

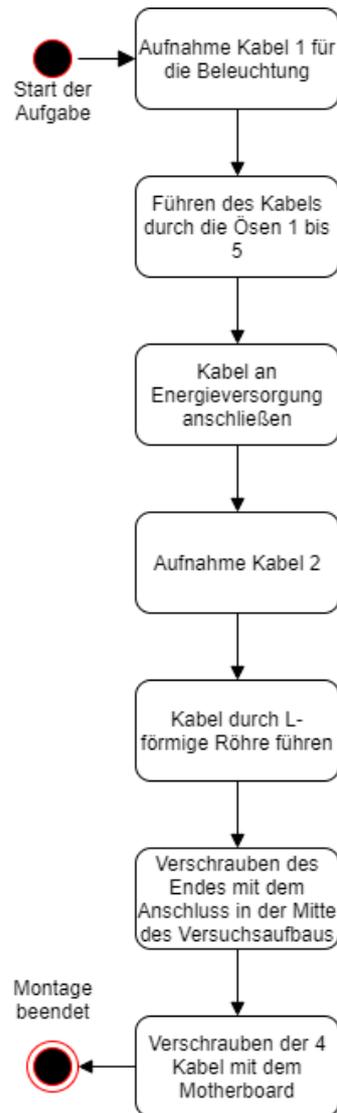


Abbildung 48: Versuchsdurchführung nach BPMN Darstellung

Nach Abschluss der Aufgabe mit und ohne Exoskelett wurden die Teilnehmer zur Beantwortung eines Fragebogens gebeten. Die Auflistung der einzelnen Fragen und die Resultate sind im Anhang zu entnehmen (Kapitel 13.4). Im Zuge des Fragebogens wurden folgende Themenbereiche aufgenommen:

- SUS für das Exoskelett, sowie die digitale Informationsbereitstellung
- Belastung mittels NASA-TLX
- Zeitmessung
- Nutzerakzeptanz und Technologiekomptabilität
- Videoaufnahme (nur im Falle einer Einwilligung)

Der Versuch wird mit einer Person jeweils zweimal durchgeführt. Das erste Mal wird der Versuch ohne Exoskelett durchgeführt, die zweite Runde mit Exoskelett. Um ein mögliches Bias so gering wie möglich zu halten, werden zwischen den beiden

Versuchen mindestens 30 Minuten Zeit eingeplant, in der die Teilnehmer sich mit anderen Themen beschäftigen können.

Der Arbeitsbereich liegt im Bereich von 150cm bis zu 195 cm. Auf Basis der ermittelten Körpergrößen wurde dieser Bereich gewählt. Dies beruht auf der Tatsache, dass das 50. Perzentil beim Mann, im Alter von 18-65 Jahre, in Deutschland bei 175cm liegt. Somit wird ein großer Teil der männlichen Bevölkerung bei diesem Use-Case abgedeckt. Bei der weiblichen Bevölkerung liegt dieser Wert bei 162,5 cm.²¹⁸ Die maximale Reichweite bei Männern liegt beim 50. Perzentil bei 208cm und bei Frauen bei 195cm.²¹⁹

5.1.2 User-Gruppe

Im Zuge der Durchführung wurden die Teilnehmer der Studie anonymisiert zu Ihren Erfahrungen mit dem Use-Case befragt. Die Aufteilung hinsichtlich Alter, Bildungsgrad, Geschlecht und Arbeitsverhältnis werden in den Abbildung 49 bis Abbildung 51 bildlich dargestellt.

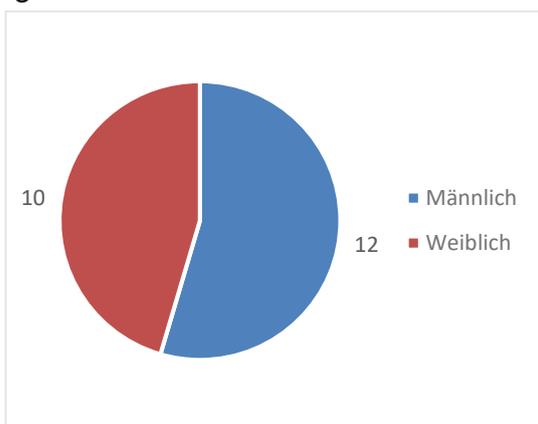


Abbildung 49: Geschlechterverteilung

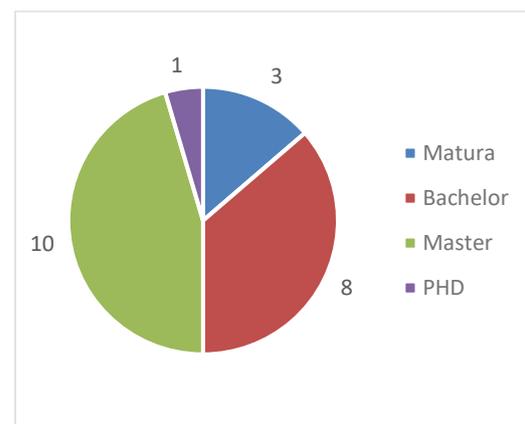


Abbildung 50: Höchster Bildungsabschluss

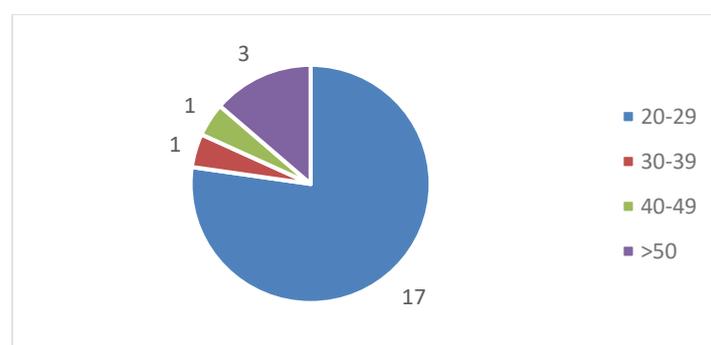


Abbildung 51: Altersverteilung

²¹⁸ vgl. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) - DIN 33402-2, 2020, S.9

²¹⁹ vgl. ebenda, S.27

5.2 Evaluation eines FTF-Use Cases bei AT&S

Der Standort der Firma AT&S in Leoben ist die Unternehmenszentrale. Aufgrund des historischen Wachstums ist die Anlage durch bauliche Rahmenbedingungen beschränkt. Somit kann keine komplett neue Fabrik gebaut werden, bei der alle State-of-the-Art Assistenzsysteme und Fabriklayouts berücksichtigt werden können, sondern es muss mit den bestehenden Umständen geplant werden (Brownfieldplanung).²²⁰

5.2.1 Ausgangslage – IST Zustand

Der Umfang des Use-Cases aus der Industrie beschäftigt sich mit einer Strecke, die momentan von den Mitarbeitern der Firma, manuell, bedient wird. Abbildung 52 visualisiert den derzeitigen Prozess in einer vereinfachten Form. Der Prozess wird mit der Bestellung der Produktwareträger, in denen die gewünschten Leiterplatten liegen, gestartet. Diese sind am Ende eines Arbeitsschrittes zur Abholung bereit.

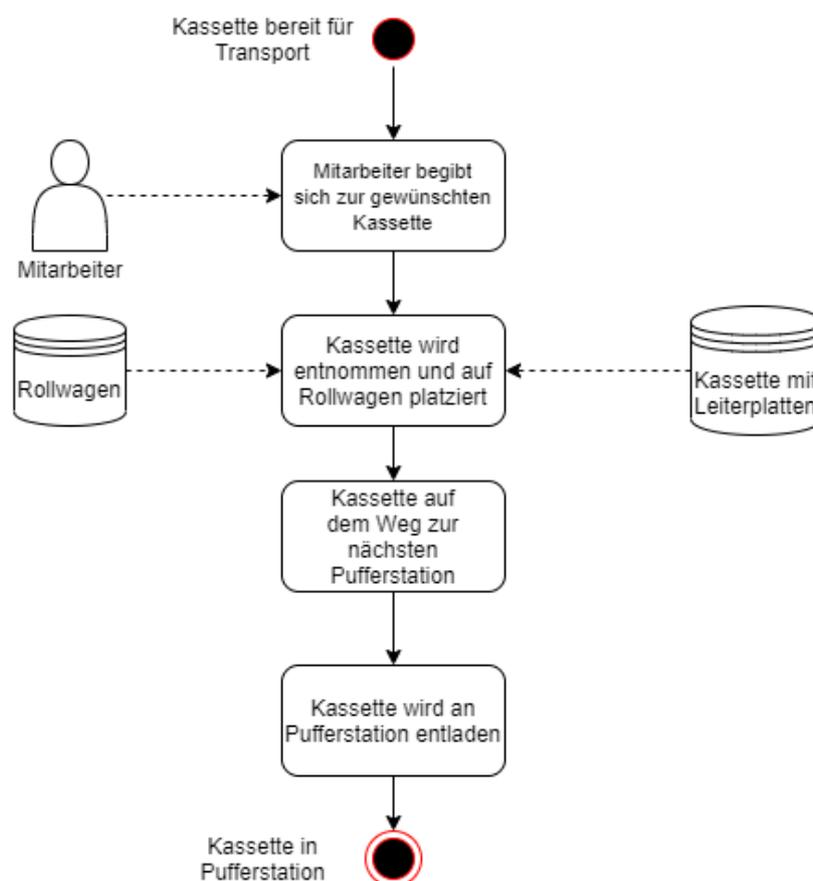


Abbildung 52: Vereinfachter Prozess des Transportes nach BPMN Darstellung

Sobald der Mitarbeiter den Produktwareträger mit den Leiterplatten auf den Rollwagen gebracht hat, kann der Weg zwischen den Pufferstationen zurückgelegt

²²⁰ vgl. Burggräf & Schuh, 2021, S.4

werden. Zur Visualisierung des Transportweges dienen Abbildung 53 und Abbildung 54. Es handelt sich um eine Strecke von 225 Metern, beginnend bei der zentralen Pufferstation in Werk 1, die auf Abbildung 53 (rot eingezeichnet – central buffer) zu sehen ist. Auf dem Weg zum Lift, befindet sich eine Schleuse, die der Mitarbeiter mit seiner ID-Card manuell öffnen muss. Dies geschieht durch das Scannen der Karte an einem Kartenleser. Das Ziel befindet sich im Stock darüber, welches auf Abbildung 54 zu sehen ist. Die Überbrückung des Stockwerkes erfolgt mit einem Lift. Im zweiten Stock befindet sich eine automatische Türe, die sich dem Mitarbeiter im Falle einer Annäherung automatisch öffnet. Am Ende des Prozesses erfolgt die Ablage in einer Zwischenpuffer Zone (sub hub puffer) in der die Rollwägen inklusive Produktwarenräger für die weiteren Fertigungsschritte zwischengelagert werden. Die Produktwarenräger werden an der Pufferstation entladen und die Rollwägen werden vom Mitarbeiter wieder zur ursprünglichen Zentralpufferstation zurückgeschoben. Somit fällt derselbe Weg doppelt an.

Das FTF soll mit Hilfe eines linienbasierten Systems durch die Fertigungshalle manövrieren. Für die manuell geführte Route wurde ein Testlauf durchgeführt, um die Zeitmessung für einen SOLL-Zustand herauszufinden und abzuschätzen. Diese Routen werden von Servicetechnikern der Firma, die die Assistenzsysteme implementiert hat, eingerichtet. Hierbei werden Magnetpunkte gesetzt, die dem Transportsystem die Route vorgeben. Entlang der zu betrachtenden Route befinden sich jedoch einige Hindernisse, die das autonom fahrende Fahrzeug während der Fahrt behindern. Auf diese wird im Zuge der Evaluation genauer eingegangen. ²²¹

²²¹ vgl. Interview AT&S C.G und R.T., 2021



Abbildung 53: FTF-Route 1.Stock

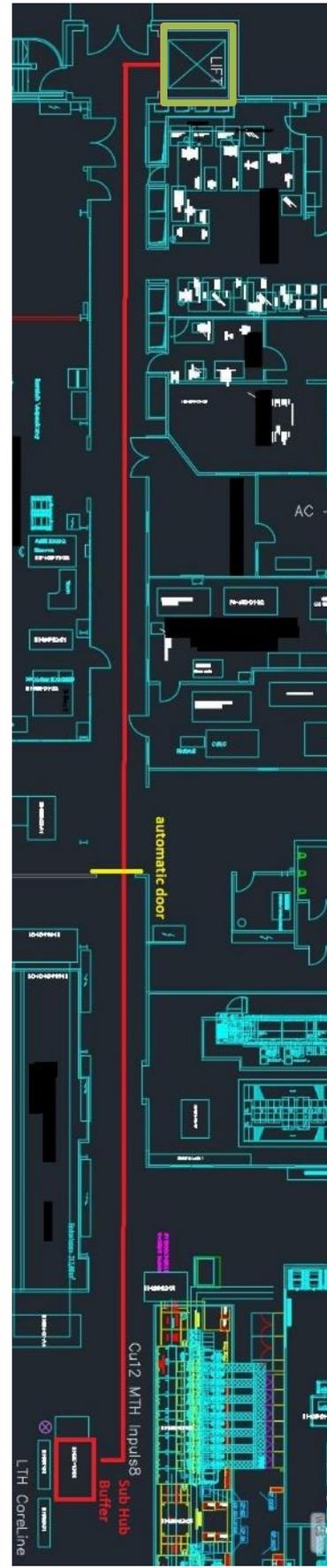


Abbildung 54: FTF-Route 2.Stock

6 Auswertung und Evaluation der praktischen Anwendungsfälle

Die dargelegten theoretischen Inhalte, sowie die Vorstellung der Use-Cases aus der Industrie und Forschung werden in diesem Kapitel ausgewertet und die Ergebnisse der Evaluation aufgezeigt.

6.1 Resultate Use-Case Exoskelett in der Pilotfabrik

Die Resultate der Evaluation, die Fragebögen, sowie die Betrachtung der Ergonomie für die teilnehmenden Personen wurden ausgewertet und in den folgenden Unterkapiteln aufbereitet.

6.1.1 Auswertung Evaluation

Der Versuch wird in Bezug auf die fünf Dimensionen Finanzen, Prozess, Erlernen & Entwickeln, Anwender und Technologie evaluiert.

6.1.1.1 Dimension Finanzen

Das Thema Kosten ist für die meisten industriellen Anwendungen ein grundlegendes Entscheidungskriterium für das Management. Im Falle der Evaluation in der Pilotfabrik der TU Wien, wird das Thema Kosten sehr wohl in die Bewertung miteinfließen, jedoch wird es bei der Bewertung einen kleineren Stellenwert bekommen, als die Industrieanwendung in Kapitel 6.2.

Das Exoskelett der Firma Ottobock, mit dem Namen Paexo Shoulder, wurde für diesen Use-Case evaluiert. Es sei erwähnt, dass es andere Unternehmen gibt, die ebenfalls Exoskelette anbieten, jedoch steht in der Pilotfabrik der TU Wien das Produkt der Firma Ottobock zur Verfügung. Das Produkt wurde speziell für Überkopfanwendungen konzipiert. Mit einem Gewicht von 1,9 Kilogramm ist es eines der leichtesten auf dem Markt. Der Preis beträgt, nach Rückfrage mit dem österreichischen Vertriebspartner awb Schraubtechnik- und Industriebedarf GmbH, 4.900 € pro Stück.²²² Es gibt zwei unterschiedliche Servicepakete, die vom Produzenten angeboten werden, die in Kapitel 13.6 genau aufgelistet sind. In Summe ergeben sich Servicekosten von 240 € pro Jahr. Optional gibt es die Möglichkeit das Gerät im Tausch gegen die neueste Version komplett zu ersetzen. Hier kommt eine Garantie für 12 Monate hinzu, sowie ein kostenloses Paexo Neck. Die Kosten belaufen sich auf 2.490 €. ²²³

²²² Bauer, G. (g.bauer@awb.at), 27.07.2021, Preisanfrage Paexo Shoulder, Email an Nowak M., (maximilian.nowak.at@gmail.com)

²²³ vgl. Ottobock Paexo Shoulder Service-Offering, siehe Anhang Kapitel 13.6

Die Evaluation hinsichtlich der Kosten wird auf Basis der erforderlichen Investition für das Assistenzsystem und der daraus folgenden Reduktion der Krankheitstage berechnet. Rund 13% der Arbeitsunfähigkeitstage in Österreich im Jahr 2019 sind aufgrund einer Muskel-Skelett-Erkrankung (MSE) zurückzuführen. Die durchschnittliche Ausfallsdauer betrug rund 16 Tage.²²⁴ Das durchschnittliche Einkommen in der Industrie und Gewerbe betrug in Österreich rund 3.600€ brutto pro Monat, basierend auf einem Nettoeinkommen von 2.336 € im Median, was einem Jahreseinkommen von rund 50.400€ entspricht.²²⁵ Für den Arbeitgeber ergibt sich, mit Berücksichtigung aller Lohnnebenkosten, eine Belastung von rund 65.500€ pro Jahr für einen Mitarbeiter.²²⁶ Bei rund 250 Arbeitstagen pro Jahr²²⁷ ergibt sich für den Arbeitgeber ein Tagessatz für einen Mitarbeiter von:

$$P_{Tag} = \frac{\text{Lohnkosten Arbeitgeber}}{\text{Arbeitstage}} = \frac{65.500\text{€}}{250 \text{ Tage}} = 262 \frac{\text{€}}{\text{Tag}}$$

Formel 3: Mitarbeitertagessatz

In Folge dessen, kann bei einem Ausfall, auf Grund einer MSE ein Verlust für den Arbeitgeber von rund 4.192 € pro Jahr²²⁸ ausgegangen werden, basierend auf einer durchschnittlichen Ausfallsdauer von rund 16 Tagen bei einer MSE Krankheit:

$$\text{Kosten}_{\text{Ausfall}} = \# \text{Ausfallstage} * P_{\text{Tag}} = 16 \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}} * 262 \frac{\text{€}}{\text{Tag}} = 4.192 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

Formel 4: Ausfallkosten Mitarbeiter

Hinzu kommt die Bedingung, dass auf 1.000 erwerbstätige Personen 1.367 Krankenstandfälle kommen. Somit erkranken Personen rund 1,37 Mal pro Jahr.²²⁹ Demnach fallen folgende Kosten für einen Ausfall pro Jahr an:

$$\text{Kosten}_{\text{Gesamt}} = \text{Kosten}_{\text{Ausfall}} * 1,37 = 4.192 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} * 1,37 = 5.743 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

Formel 5: Gesamtausfallskosten

Des Weiteren müssen noch Kosten in Betracht gezogen werden, die mit dem Ausfall der Person zusammenhängen. Opportunitätskosten gehören dazu. Das sind jene Kosten, die im Falle eines Ausfalls eines Mitarbeiters auf nicht produzierte Teile und

²²⁴ Zur Statistik der Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2019 siehe Abbildung 86 im Anhang Kapitel 13.7.1

²²⁵ Zur Statistik des Nettomonatseinkommens 2019, siehe Abbildung 88 im Anhang Kapitel 13.7.3

²²⁶ vgl. <https://www.karriere.at/hr/lohnkostenrechner> (Gelesen am 09.07.2021)

²²⁷ vgl. <https://www.ferienwiki.at/tools/arbeitstagerrechner> (Gelesen am 09.07.2021)

²²⁸ Zur Statistik der Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2019 siehe Abbildung 86 im Anhang Kapitel 13.7.1

²²⁹ Zur Statistik der Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2019 siehe Abbildung 86 im Anhang Kapitel 13.7.1)

einen in Folge dessen entgangenen Gewinnes zurückzuführen sind.²³⁰ Seltener produzierte Teile, führen zu einem geringeren Umsatz, was wiederum den Gewinn des Unternehmens schmälert.²³¹ Hinzu kommt, dass der Ausfall durch andere Mitarbeiter ersetzt werden muss und die Überstunden in Folge dessen abgegolten werden müssen. Dies schlägt sich für das Unternehmen wieder zu Buche. Für den Use-Case in der Pilotfabrik gibt es diesbezüglich keine Daten, jedoch könnte in einem Unternehmen auf Basis der täglich gefertigten Stückzahlen, die pro Mitarbeiter produziert werden, eine Kalkulation aufgestellt werden.

Kosten für das Produktlebensende konnten nicht erhoben werden, da das Produkt noch nicht lange genug im Umlauf ist, was auch nach telefonischer Rücksprache mit der Firma awb Schraubtechnik- und Industribedarf GmbH bestätigt wurde.

Ein vereinfachtes ROI-Modell lässt sich mit den Annahmen, für die Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit treffen. Bei den passiven Exoskeletten wurde eine 10- bis 40-prozentige Verringerung der Rückenmuskelaktivität beim dynamischen Heben und statischen Halten festgestellt.²³² Die 25% Reduktion basiert auf de Looze et al. (2017). Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist ein geschätzter Wert. Er ergibt sich aus der Reduktion der Muskelaktivitäten und der Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles auf Basis einer MSE. und ergibt eine Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit von:

$$p_{aus} = 1,37 * 0,75 = 1,03 = 103\%$$

Formel 6: Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit

Tabelle 8: Kostentabelle für den Use-Case

Exoskelett (Inv)	4.900 €
Paexo Care (k _{PC})	240 € pro Jahr
Personalkosten (k _P)	65.500 €
Kosten für einen Ausfall (k _{AUS})	4.192 € pro Jahr
Ausfallwahrscheinlichkeit (p _{AUS})	1,03

Für beide Varianten, mit und ohne passives Exoskelett, fallen dieselben jährlichen Kosten für das Personal an. Deshalb werden die Personalkosten nicht in die Rechnung miteinkalkuliert, da sie sich bei der ROI Betrachtung herauskürzen und es hilft der grafischen Darstellung den Zeitpunkt des ROI leichter zu erkennen.

Die jährlichen Kosten für den Use-Case ohne Exoskelett (P_{oE}) können der Formel 5 entnommen werden und belaufen sich auf 5.743€ pro Jahr. Die jährlichen Kosten für das passive Exoskelett (P_{mE}) inklusive Servicekosten und eine um 25% angenommene Reduktion an Krankenständen ergibt jährliche Kosten von:

²³⁰ vgl. Domschke & Klein, 2004, S.279ff.

²³¹ vgl. Abel, 2011, S.13

²³² vgl. de Looze et al., 2017, S.198

$$P_{mE} = k_{aus} * p_{aus} + k_{pc} = 1,03 * 4.192\text{€} + 240\text{€} = 4.547 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

Formel 7: Jährliche Kosten mit passivem Exoskelett

Somit lässt sich mit vereinfachter statischer Berechnung beider Optionen, die in Abbildung 55 eruierte ROI definieren. Betrachtet man ein passives Exoskelett und einen Mitarbeiter ergibt sich nach knapp vier Jahren eine Amortisierung des Assistenzsystems.

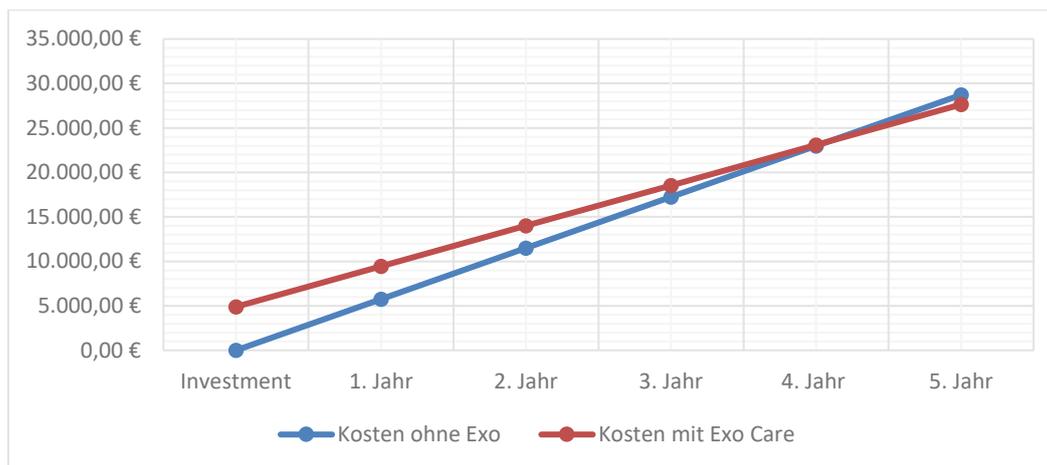


Abbildung 55: ROI passives Exoskelett Use-Case

Tabelle 9: ROI Berechnung PF Use-Case

	Investment	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
Kosten ohne Exo	0,00 €	5.743,04 €	11.486,08 €	17.229,12 €	22.972,16 €	28.715,20 €
Kosten mit Exo Care	4.900,00 €	9.447,28 €	13.994,56 €	18.541,84 €	23.089,12 €	27.636,40 €
Differenz	-4.900,00 €	-3.704,24 €	-2.508,48 €	-1.312,72 €	-116,96 €	1.078,80 €

6.1.1.2 Dimension Prozess

Der Prozess lässt sich hinsichtlich verschiedener Kriterien beurteilen. Auf Basis der durchgeführten User-Tests wurden die Zeiten aufgenommen, sowohl mit als auch ohne Exoskelett. Die Resultate sind in der Tabelle 10 aufgelistet:

Tabelle 10: Auswertung Zeitaufnahme Use-Case Pilotfabrik ²³³

Teilnehmer	Zeit ohne Exoskelett [s]	Zeit mit Exoskelett [s]	Differenz
1	139	253	-114
2	278	153	125
3	335	158	177
4	172	113	59
5	189	99	90
6	255	146	109

²³³ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

7	150	156	-6
8	339	227	112
9	226	144	82
10	254	176	78
11	176	150	26
12	332	184	148
13	307	186	121
14	456	270	186
15	171	103	68
16	341	113	228
17	237	171	66
18	237	237	0
19	273	183	90
20	184	91	93
21	335	165	170
22	179	151	28
Durchschnitt	253	165	88
Standardabweichung	79,31	47,51	73,13

Um einen Bias möglichst gering zu halten, wurde zwischen den beiden Versuchsdurchgängen eine zeitliche Pause von mindestens 30 Minuten eingehalten. In dieser Zeit wurde den Teilnehmern die Pilotfabrik gezeigt, um die Gedanken vom Versuchsstand wegzubringen. Dennoch ist dieser Erfolg der Reduktion der Durchlaufzeit kritisch zu betrachten. Aufgrund der Tatsache, dass derselbe Versuchsstand zwei Mal durchgeführt wurde. Hinzu kommen die großen Standardabweichungen von 80 Sekunden für den ersten und 48 Sekunden für den zweiten Durchgang. Die Lösung für diese Problematik könnte einen weiteren Versuchsstand beinhalten, der eine ähnliche Komplexität aufweist.

Eine Versuchsperson hat angegeben, dass der Versuch nicht lang genug ausgefallen ist, um hier die möglichen Vorteile des Assistenzsystems zu erfahren.²³⁴ Bezogen auf das Kriterium Qualität lässt sich nur eine oberflächliche Aussage treffen. Auf Basis der detaillierten Anleitung wurde die Aufgabe von allen teilnehmenden Personen ohne zusätzliche Hilfestellung erledigt. Es gab in diesem Fall keine Materialien, die fehlerhaft produziert wurden.

Um im Rahmen des MTM von einer standardisierten Durchlaufzeitmessung sprechen zu können, wurde die Zeit und der Arbeitsvorgang eines geschulten Teilnehmers gemessen und dokumentiert. In Summe wurde für den Prozess ohne Exoskelett eine Zeit von 98 Sekunden gemessen und mit Assistenzsystem eine Zeit von 95 Sekunden. Der zeitliche Unterschied von drei Sekunden ist hier nicht ausschlaggebend für einen kausalen Zusammenhang bei einer Versuchsperson.

²³⁴ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

Die Arbeitszeitverteilung kann für beide Prozesse annähernd ähnlich beschrieben werden und setzt sich für beide Versuche wie folgt zusammen:

Tabelle 11: Zeitmessung Montageprozess Exoskelett PF

Sekunden	Aktion
0-4	Aufnahme von Kabel 1
5-31	Prozess 1 - Führung des Kabels durch 5 Ösen und Montage an Stromquelle
31-44	Aufnahme Kabel 2
44-74	Prozess 2 - Führung von Kabel 2 durch die L-Förmige Röhre
74-78	Aufnahme Schraubenzieher
78-97	Montage der Schrauben
97-98	Ablegen des Schraubenziehers

Somit setzt sich die Zeitermittlung des Prozesses wie folgt zusammen:

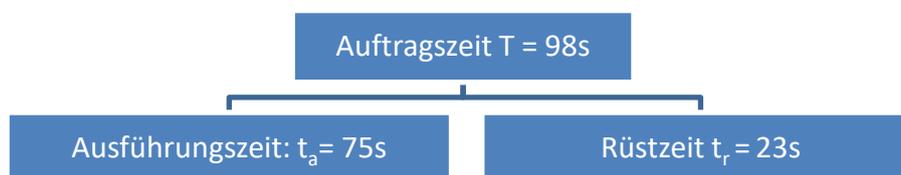


Abbildung 56: Zeitgliederung Montageprozess Exoskelett PF ²³⁵

Nach MTM ergibt sich folgende Bewertung des Prozesses:

Tabelle 12: Prozessbewertung nach MTM

Nr	Bezeichnung	Kode	TMU	A x H	Gesamt TMU
1	Aufnahme Kabel 1				
	Aufnehmen & Platzieren	AB3	60	1x1	60
2	Führen des Kabels und Montage				
	Kabel durch Öse führen	PC3	45	5x1	225
	Montage an Stromquelle	ZD	20	1x1	20
3	Kabel 2 durch L-Röhre führen				
	Aufnehmen und Platzieren Kabel 2	AC3	70	1x1	70
	Kabel durch L-Röhre	HC3	85	1x1	85
	Verschrauben Überkopf 1.Drehung	ZA1	5	1x1	5
	2-8. Drehung	ZB1	10	7x1	70
4	Verschrauben der Platine				
	Aufnahme & Platzieren Schraubenzieher	AC3	70	1x1	70
	Ansetzen Schraubenzieher	HC1	50	1x4	200
	1.Drehung	ZA1	5	1x4	20
	2-8. Drehung	ZB1	10	7x4	280
	Festziehen	ZD	20	4x1	80
SUMME					1100

²³⁵ vgl. Schlick et al., 2018, S.578

„Untersuchungen des Instituts für angewandte Arbeitswissenschaft (IfaA 1970) zur Vergleichbarkeit von MTM-Normleistung und REFA-Normleistung haben ergeben, dass die mit dem MTM-Grundverfahren ermittelten Tätigkeitszeiten mit dem Faktor 1,05 zu multiplizieren sind, damit die normierten REFA-Zeiten mit den MTM-Zeiten übereinstimmen.“²³⁶

$$98s \cdot 1,05 = 102,9 = 2.858 \text{ TMU}$$

Die Abweichung ist mit einem Faktor 2,5 sehr markant. Dies lässt darauf schließen, dass der Prozess noch Verbesserungspotential bei der Durchführung hat. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass der Arbeiter, der als qualifizierte Kraft definiert wurde, nicht die notwendigen Qualifikationen besitzt, um als erfahrener und routinierter Mitarbeiter für die Aufgabe zu gelten.²³⁷

6.1.1.3 Dimension Erlernen & Entwickeln

In diesem Punkt kann das passive Exoskelett besonders stark punkten. Aufgrund der sehr einfachen Benutzbarkeit kann das System schnell von den Menschen verwendet werden. Es lässt sich einfach wie einen Rucksack anziehen und ist für Personen, die das Produkt wenige Male benutzen, bereits nach 20 Sekunden einsatzbereit. Somit genügt es, dass mit dem Straffen des Schultergurtes, dem Schließen des Gurtes an der Brust und dem Fixieren der Oberarme in den Schalen des Exoskelettes, das Produkt ohne weitere Einschulung genutzt werden kann. Somit kann ein Mensch sehr schnell auf das Assistenzsystem eingeschult werden und benötigt keine intensive Qualifikation. Dennoch können statische Arbeiten sehr gut unterstützt werden.

Mit der Betrachtung der notwendigen Kompetenzen nach dem Kompetenzatlas liegt ein Fokus auf den Grundkompetenzen P und A. Soziale Komponente und Fach-/Methodenkompetenz haben beim passiven Exoskelett keinen großen Einfluss, da das Produkt eine sehr schnelle Einlernphase hat und es keinen Einfluss auf die Arbeit eines anderen Mitarbeiters hat. Querschnittskompetenzen aus P/A und A/P hingegen legen eine Offenheit für Veränderung, sowie der Möglichkeit zu Reduktion der Belastbarkeit nahe.

6.1.1.4 Dimension Anwender

Für die Betrachtung der Ergonomie wird das EAWS Verfahren verwendet. Hierfür wurde eine männliche Person mit einer Körpergröße von 175cm gewählt, da dies dem 50. Perzentil entspricht.²³⁸ Das Arbeitsblatt, mit der Begründung der gefundenen Zahlenwerte befindet sich im Anhang (Kapitel 13.2).

²³⁶ Schlick et al., 2018, S.577

²³⁷ vgl. MTM-UAS, 2019, S.I-18

²³⁸ vgl. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) - DIN 33402-2, 2020, S.9

Die erste Betrachtung basiert auf den oberen Extremitäten. Krafteinfluss auf die Tätigkeit ist wenig bis gar nicht gegeben. Jedoch muss von einer Schicht von rund acht Stunden ausgegangen werden, welche mit geplanten Pausen für den Mitarbeiter durchgeführt wird. Je nach Dauer der Pausen und der Form der Arbeitsorganisation kann die Gesamtbewertung der Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten beeinflusst werden. In der folgenden Annahme ist er 49 (siehe Abbildung 70 in Kapitel 13.2), 63% der Zeit wird die Tätigkeit durchgeführt und mit moderater Pausenregelung von 3 Einheiten pro Schicht. Dieser Wert kann in ein paar Punkten, je nach Auslegung der Schicht variieren, jedoch wird er nicht unter die gewünschten 25 Punkte fallen, was der Tätigkeit einen ungenügenden ergonomischen Zustand, ohne Exoskelett zuspricht. Beim Vergleich mit den Punkten für den Gesamtkörper, ist der größere Wert ausschlaggebend. Ist jedoch bereits der Wert für die oberen Extremitäten so hoch, muss ohnehin eine Optimierung des IST-Zustandes ohne das Exoskelett vorgenommen werden.

Aus einer groß angelegten Studie aus dem Jahr 2014 geht hervor, dass physische Arbeitsbelastung in einer Korrelation mit Fehlzeiten steht. Je höher die Belastung der Belegschaft ist, desto höher ist die Abwesenheitsdauer. Hinzu kommt, dass erhöhte körperliche Belastung die Fehlerquote ebenfalls negativ beeinflusst.²³⁹ Passive Exoskelette können die Rückenmuskulatur bei Montagetätigkeiten um bis zu 40% entlasten.²⁴⁰ Besondere Entlastung kommt den Bereichen der Schulter zu gute. Am Stärksten fällt die muskuläre Entlastung in den Bereichen des Muskel Deltoides und dem Biceps brachii aus. Kommt es zur Entlastung der Muskulatur, hat dies eine langfristige Wirkung auf die internen Gelenkkompressionskräfte, welche wiederum geringere Verschleißerscheinungen zur Folge haben.²⁴¹

Risiken wie Muskelzerrungen bei übermäßiger Unterstützung oder Hautirritation aufgrund von ausrinnenden Flüssigkeiten der Batterie, sind nur bei aktiven Exoskeletten möglich. Hier hat das passive Exoskelett weniger Risikofaktoren. Für passive und für aktive Systeme geht sowohl aus Anwendersicht, als auch aus diversen literarischen Quellen hervor, dass es bei manchen Teilnehmern zu Druckstellen, sowie komprimierten Nerven im Kontaktbereich zwischen den Armen und dem Exoskelett bei längerem Gebrauch kommen kann. Hinzu kommen Bedenken hinsichtlich der Hygiene. Besonders in wärmeren Gebieten kann es zur Übertragung von Infektionskrankheiten kommen. Eine gründliche Reinigung oder die fixe Zuteilung der Geräte auf die Mitarbeiter kann hier die Bedenken der Belegschaft reduzieren.²⁴²

Schlussendlich muss die Tatsache in Betracht gezogen werden, dass es im Bereich der Exoskelette in der Produktion noch keine Langzeitstudien gibt. Um Exoskelette als

²³⁹ vgl. Fritzsche et al., 2014, S.150

²⁴⁰ vgl. de Looze et al., 2017, S. 198

²⁴¹ vgl. Schmalz et al., 2019, S.6

²⁴² vgl. Howard et al., 2020, S.203

Arbeitsmittel in Unternehmen erfolgreich zu etablieren, sind weitere Kenntnisse erforderlich, um geeignete Einsatzbedingungen zu definieren. Selbst Exoskelette, die dieselbe Körperregion entlasten sollen, erzeugen bei den Anwendern höchst unterschiedliche Empfindungen.²⁴³

Auf Basis des Feedbacks im Rahmen der Umfrage kann des Weiteren attestiert werden, dass die Dauer des Prozesses für die tatsächliche Durchführung des Versuches länger sein kann. Eine Person hat angegeben, dass die Laufzeit der Aufgabe länger sein sollte, damit die Erschöpfung der Arme deutlicher auffällt.²⁴⁴

11 Versuchsteilnehmer hatten keine Probleme mit der Nutzung des Exoskelettes angegeben. Unter den anderen 12 Teilnehmer haben sich jeweils folgende Kritikpunkte herauskristallisiert:²⁴⁵

- Ein Teilnehmer gab an, dass nach einer gewissen Zeit der Blutfluss in den Armen gestört wird, was keinen angenehmen Zustand widerspiegelt.
- Drei Teilnehmer geben an bei der Feinmotorik Schwierigkeiten zu haben. Es handelt sich hierbei um den Prozess des Verschraubens am Motherboard.
- Eine weibliche Teilnehmerin hat ein Female-Bias beanstandet. Es wird keine Rücksicht auf Frauen genommen, hinsichtlich des Brustumfangs.
- Zwei Personen gaben an, dass bei der Abwärtsbewegung mit dem Exoskelett das Assistenzsystem zu stark eingreift und die Bewegung unnatürlich erscheint.

Die Betrachtung der Arbeitsbelastung wurde mit Hilfe von NASA-TLX erhoben. Dabei wurden folgende Werte erhoben:

- NASA-RTLX nach den Kategorien:
 - Mentale Belastung
 - Körperliche Belastung
 - Zeitliche Belastung
 - Performance
 - Anstrengung
 - Frustration
- NASA-RTLX Wert der einzelnen Teilnehmer und deren statistischen zugehörigen Werte

Werden die einzelnen Kategorien betrachtet, werden die einzelnen Ergebnisse hinsichtlich der Belastungen ersichtlich. Abbildung 57 dient als grafische Unterstützung. Es werden die Belastungen mit und ohne Exoskelett betrachtet. Um die Ergebnisse in Relation setzen zu können, werden sie mit einer anderen Studie

²⁴³ vgl. Kinne et al., 2021, S.476

²⁴⁴ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

²⁴⁵ vgl. ebenda

verglichen, die sich ebenfalls eine Überkopfmontage mit einem Exoskelett beschäftigt hat (Maurice, et al., 2020).

Der Mittelwert aller sechs Kategorien ergibt sich wie folgt:

$$\bar{x}_{ohneExo} = 28,51$$

$$\bar{x}_{mitExo} = 24,20$$

Somit reduziert sich der NASA-RTLX Score um 17,81 %. Verglichen mit Maurice, in dem Paper lag der Wert bei 21%, kommt es der Verbesserung mit Hilfe des Assistenzsystems sehr nahe.

Der niedrige Wert für die mentale Belastung ist bei beiden Versuchen ähnlich, spricht der Aufgabe eine geringe Komplexität zu und deklariert sie als nicht anspruchsvoll. Diese ist auch beim Versuch ohne Exoskelett kaum unterschiedlich.

Einzig die körperliche Anstrengung sticht über den Wert von 30 hinaus. Genau in diesem Bereich, der physischen Assistenz, ist das Exoskelett unterstützend als Assistenzsystem im Einsatz. Mit einem klaren Unterschied zwischen den beiden Versuchsdurchführungen, werden die Möglichkeiten des Exoskeletts erkennbar. Durch länger andauernde Versuchsdurchführungen werden die Vorteile des Exoskeletts noch deutlicher. ²⁴⁶

Der zeitliche Druck ist überraschenderweise sehr hoch, obwohl keine zeitliche Limitierung für die Aufgabe gesetzt war. Die Ursache könnte in der zweifachen Durchführung der Aufgabe liegen. Die Teilnehmer könnten sich im zweiten Durchgang unter Druck gesetzt gefühlt haben, da sie schneller performen wollten. Hier ist der Unterschied zwischen den beiden Versuchsdurchführungen ebenfalls marginal.

Bei der Performance gilt es zu beachten, dass 0 eine ausgezeichnete Performance attestiert und 100 eine sehr schlechte. Der Wert von 15,65 lässt darauf schließen, dass die Teilnehmer sehr zufrieden mit ihren Leistungen waren. Dennoch gilt zu beachten, dass die Teilnehmer mit einem Wert von 26,96 auch dementsprechend hart für den Erfolg arbeiten mussten. Hier ist ebenfalls ersichtlich, dass es einen groben Unterschied zwischen den beiden Versuchen gibt. Dafür war der Frustrationslevel auf einem niedrigen Niveau. ²⁴⁷

Bei allen Faktoren ist die Punktzahl des NASA-RTLX mit dem Exoskelett niedriger. Der Unterschied ist bei den beiden kräftebezogenen Faktoren (physical demand und effort) am größten. Dies ist bei der Studie von Maurice ebenso der Fall. ²⁴⁸

²⁴⁶ vgl. Fraunhofer Austria Research GmbH, 2020, S.15

²⁴⁷ vgl. Nowak, 2021, Excel_NASA-TLX

²⁴⁸ Maurice et al., 2020, S.152ff.

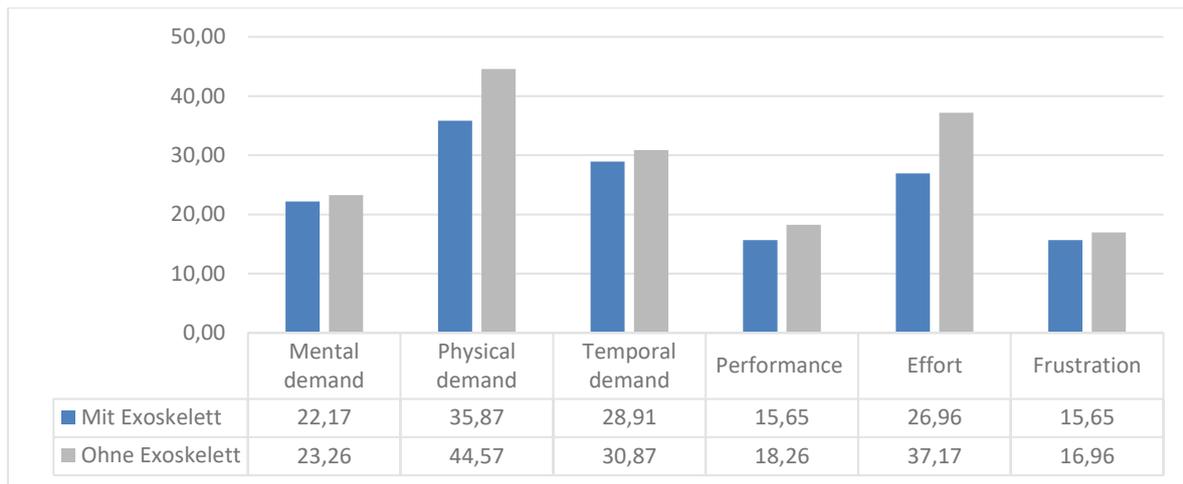


Abbildung 57: Vergleich NASA-RTLX Scores mit und ohne Exoskelett

Nach Betrachtung der einzelnen Kategorien gilt es auch den gesamten NASA-RTLX Score der teilnehmenden Personen zu betrachten. Dies geschieht auf Basis von Abbildung 58. Die Datentabelle ist im Anhang zu entnehmen (Kapitel 13.4).

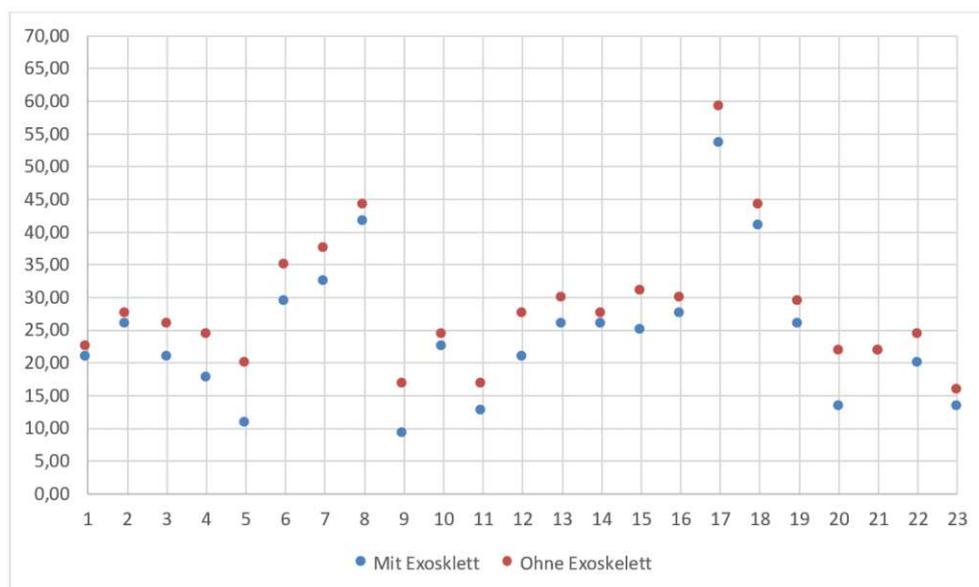


Abbildung 58: Vergleich NASA-RTLX Score mit und ohne Exoskelett der einzelnen Teilnehmer²⁴⁹

Die eingezeichneten Punkte geben die jeweiligen Werte des NASA-TLX Scores der einzelnen Teilnehmer wieder. Für Teilnehmer 21 ergibt sich derselbe Wert, weshalb nur ein Punkt zu sehen ist. Wie es die Grafik andeutet, befindet sich die Arbeitsbelastung auf einem eher niedrigeren Niveau. Der durchschnittliche Wert, Median und die Standardabweichung für die beiden Versuche sind:

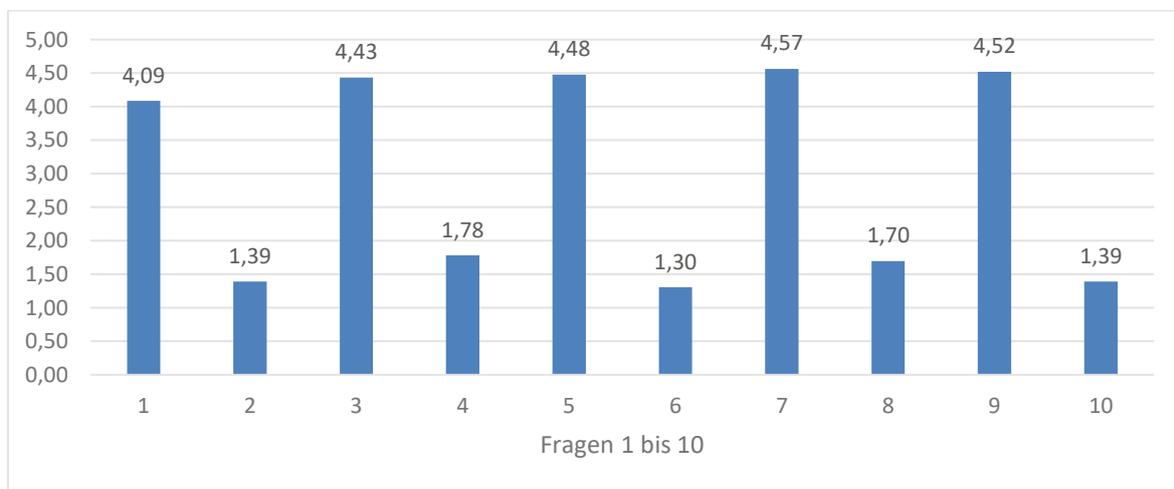
²⁴⁹ vgl. Nowak, 2021, Excel_NASA-TLX

Tabelle 13: Vergleich der beiden Durchführungen ²⁵⁰

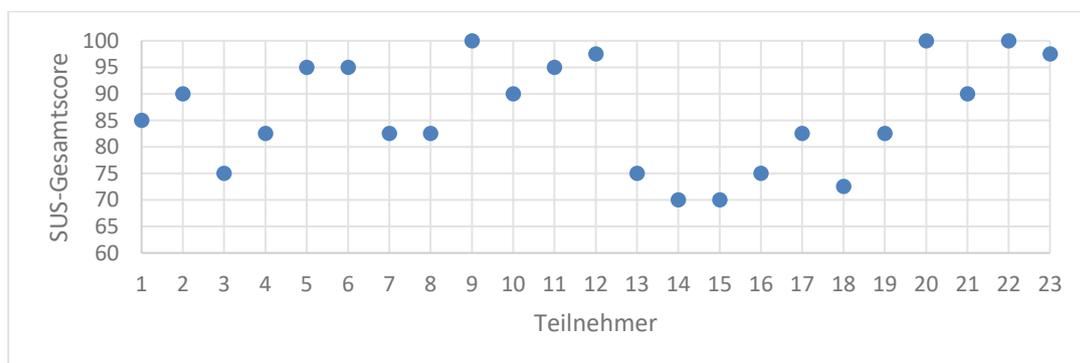
Mit Exoskelett	Ohne Exoskelett
$\bar{x} = 24,20$	$\bar{x} = 28,51$
$\tilde{x} = 22,5$	$\tilde{x} = 27,5$
$\sigma = 10,28$	$\sigma = 9,94$

Abbildung 57 und Abbildung 58 verdeutlichen, dass der Grad der Belastungen auf einem moderaten Level, bezogen auf den Überkopfmontagestand, liegt.

Eine weitere Betrachtung liefert die Umfrage. Im Rahmen dieser wurden die Teilnehmer nach der SUS befragt. Die Ergebnisse der Umfrage sind wie folgt ausgefallen:

Abbildung 59: Durchschnitt SUS-Wert der Fragen 1-10 ²⁵¹

Auf Basis der ermittelten Werte der einzelnen Teilnehmer wurden die jeweiligen SUS Scores, nach dem in Kapitel 4.2.9 beschriebenen Vorgehen berechnet. Diese Werte der einzelnen Teilnehmer verteilen sich wie folgt:

Abbildung 60: SUS-Score Exoskelett ²⁵²

²⁵⁰ vgl. Nowak, 2021, Excel_NASA-TLX

²⁵¹ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

²⁵² vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

Die statistische Auswertung ergibt die folgenden Werte:

- $\bar{x} = 86,30$
- $\sigma = 9,91$
- 95%-Konfidenzintervall: [82,25; 90,36]

Mit einem durchschnittlichen Score von rund 86 Punkten befindet sich das Exoskelett im vierten Quartil, ist akzeptabel und kann mit dem Prädikat exzellent deklariert werden. Somit kann dem Produkt, im Rahmen dieses Use-Cases, eine generell gute Benutzerfreundlichkeit zugesprochen werden. Dies deckt sich auch mit anderen Studien, die dem passiven Exoskelett ebenfalls einen hohen SUS Wert zusprechen.

253

Die Technologiekomptabilität ist ein weiterer Punkt, der im Rahmen der Umfrage von den Usern erfragt wurde. Die Fragen, die den Teilnehmern gestellt wurden, sind im Kapitel 4.2.8 ausführlich dargelegt. Die Ergebnisse der Teilnehmer sehen in Bezug auf die Komptabilität mit bisheriger Technologieerfahrung (es wurde der Durchschnitt der 23 Teilnehmer für jede Frage ermittelt) wie folgt aus:

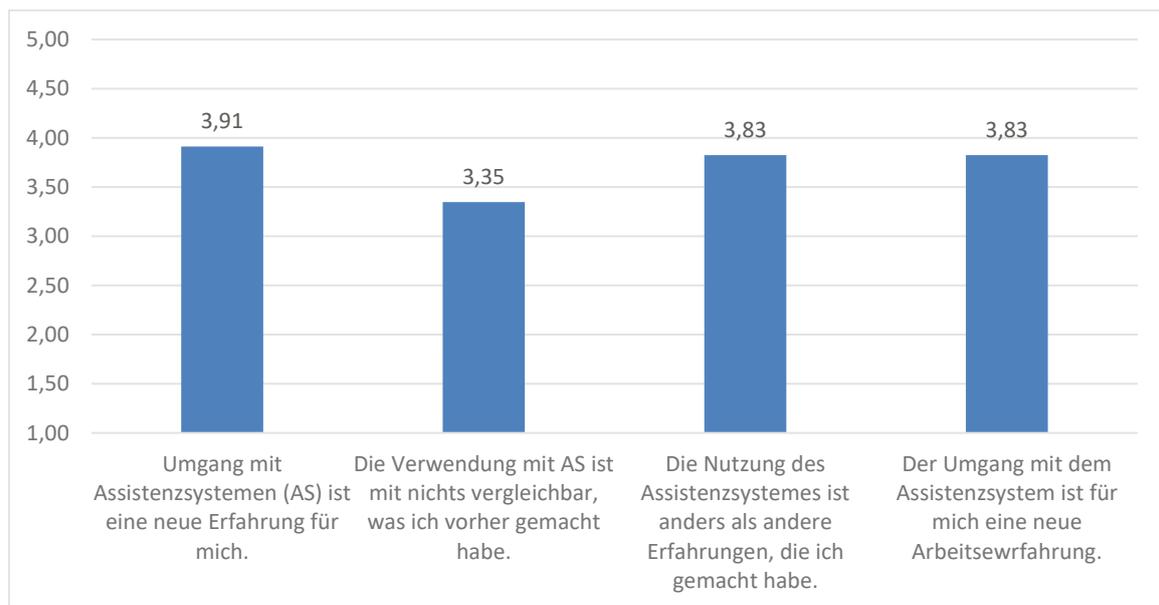


Abbildung 61: Komptabilität mit bisheriger Technologieerfahrung ²⁵⁴

Die Komptabilität mit den eigenen Werten hat die folgende ergibt die folgende Verteilung, wobei für die Werte wieder der Mittelwert aller Teilnehmer herangezogen wurde:

²⁵³ vgl. Fraunhofer Austria Research GmbH, 2020, S.30

²⁵⁴ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

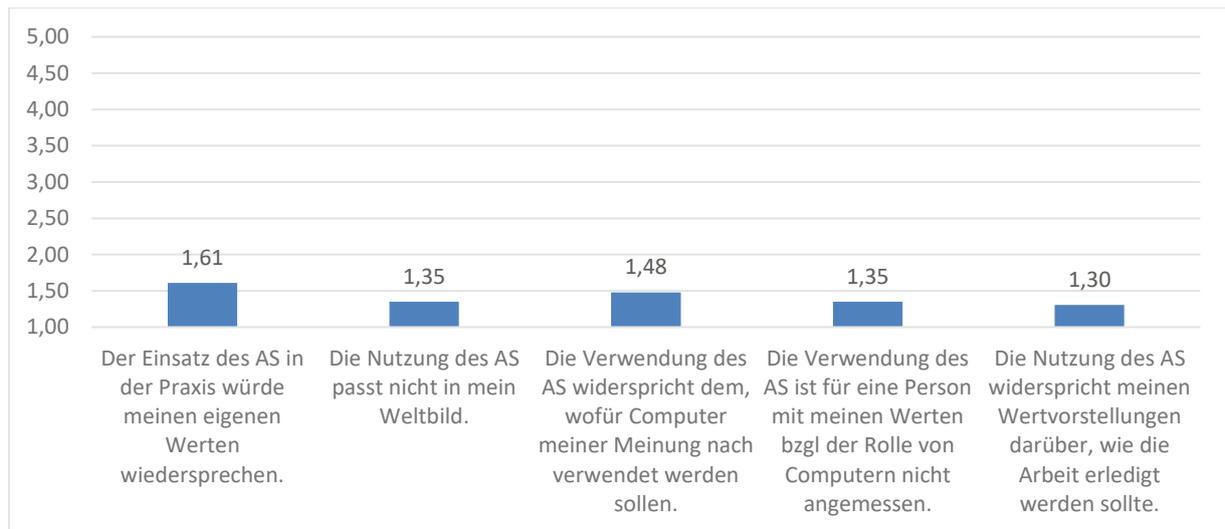


Abbildung 62: Kompatibilität mit den eigenen Werten ²⁵⁵

Die letzte Befragung, in Zusammenhang mit der Technologieakzeptanz, beinhaltet die Kompatibilität mit den eigenen Präferenzen:

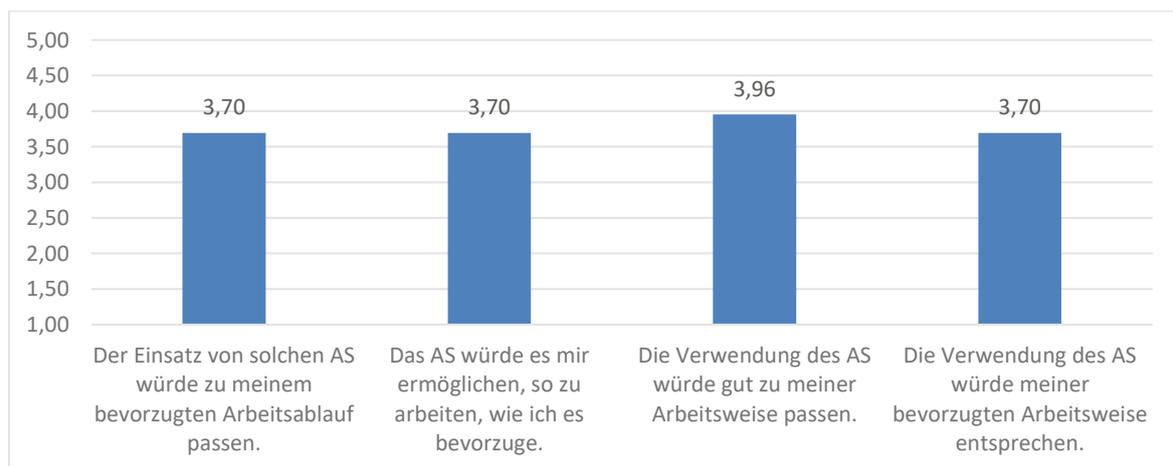


Abbildung 63: Kompatibilität mit den eigenen Präferenzen ²⁵⁶

Die Kompatibilität mit der bisherigen Technologieerfahrung spiegelt den Grad der Neuheit des Produktes für die Zielgruppe wider. Die basiert darauf, dass der Großteil der Teilnehmer noch keine bzw. sehr wenig Erfahrung mit Assistenzsystem und passiven Exoskeletten hatten.

Bezogen auf die eigenen Werte sind die Resultate auf einem sehr niedrigen Niveau. Dies spricht für eine Akzeptanz bezogen auf die persönlichen Werte der Studienteilnehmer.

²⁵⁵ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

²⁵⁶ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

Werden die eigenen Präferenzen betrachtet, ergeben sich hohe Werte. Somit kann festgestellt werden, dass die Teilnehmer der Studie die neue Technologie in ihrem persönlichen Umfeld akzeptieren würden.

6.1.1.5 Dimension Technologie

Auf Basis der TRL Skala kann dem Exoskelett ein Wert von 10 gegeben werden. Die notwendige Begründung beruht auf der Erfüllung der vier Kriterien, die bereits in der Einleitung des vorherigen Kapitels definiert wurden. Hinzu kommen die immer wachsenden Absatzzahlen sowie die bereits breite Palette an Herstellern auf dem Markt, die dem Produkt das Level 10 geben. ^{257 258}

Die Frage nach einer möglichen Abhängigkeit bzw. einem Vendor lock-in stellt sich dennoch. In Anbetracht des Angebotes auf dem Markt, lässt sich darauf schließen, dass die Vielzahl an Herstellern und deren Produkte im Bereich der Exoskelette, keine vollkommene Abhängigkeit von einem Produzenten hervorbringen wird.

Im Falle des im Use-Case verwendeten Exoskelett, der Firma Ottobock, ist diese frei auf dem Markt erhältlich. Mit Stand 1. Februar 2019 sind rund 7.000 Exoskelette weltweit im Einsatz. Diese Zahl soll bis ins Jahr 2025 auf bis zu 1.1 Mio. ansteigen. Hier wird ein weiterer Anstieg der Produzenten, sowie eine größere Vielfalt an Produkten erwartet werden können. ²⁵⁹

6.1.2 Auswertung Fragebögen

Die Auswertung der Fragebögen basiert auf einfacher Betrachtung von Mittelwerten und Standardabweichungen, sowie statistischen Methoden, wie dem Chi-Square Testverfahren. Die Grundlagen der Hypothesen beruhen auf der Auswertung der Fragebögen. Diese befinden sich im Anhang der Arbeit im Kapitel 13.3.

Die Darstellung der Studienteilnehmer, Kapitel 5.1.2, ergibt einen ausgewogenen Anteil von männlichen und weiblichen Studienteilnehmern. 16 von 23 Studienteilnehmern geben an, sehr wenig Erfahrung mit Assistenzsystemen zu haben. Dies zeigt sich auch in der Tatsache, dass die fünf vorgestellten Assistenzsysteme (Cobots - $\bar{x} = 1,43$, Exoskelett - $\bar{x} = 1,35$, FTF - $\bar{x} = 1,39$, Dynamische Projektion - $\bar{x} = 1,26$ und VR/AR - $\bar{x} = 1,70$) auf einer Skala von 1 (gar keine Vorkenntnisse) bis 5 (sehr gute Vorkenntnisse), bei sehr wenigen Studienteilnehmern Vorkenntnisse da sind. ²⁶⁰

²⁵⁷ Zur Statistik der Absätze von Exoskeletten siehe Abbildung 87 im Anhang Kapitel 13.7.2

²⁵⁸ vgl. Fraunhofer Austria Research GmbH, 2020, S.14

²⁵⁹ vgl. Fraunhofer Austria Research GmbH, 2020, S.13

²⁶⁰ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

6.1.2.1 Korrelation zwischen Arbeitsverhältnis und Expertise in Zusammenhang mit Assistenzsystemen

Eine erste Hypothese wäre eine Korrelation der derzeitigen Beschäftigung mit der Expertise im Umgang mit Assistenzsystemen. Keiner der Studienteilnehmer behauptet von sich, auf einer Skala von eins (gar keine Expertise) bis fünf (sehr viel Expertise), seine Erfahrung mit dem maximalen Wert fünf zu bewerten. Eins und zwei, sowie drei und vier werden zusammengefasst, um statistische Korrelationen deutlicher zu machen.

Tabelle 14: Kontingenztabelle Arbeitsverhältnis und Expertise in Zusammenhang mit AS²⁶¹

	Expertise mit AS	
	1, 2	3, 4
Angestellte (Industrie und andere)	11	3
Studenten und Arbeitslos	9	0

Der P-Wert des Chi-Square Tests ergibt einen Wert von 0,253 und ist somit statistisch nicht signifikant. Demnach kann attestiert werden, dass die Vorerfahrung mit Assistenzsystemen in der untersuchten Zielgruppe keine Korrelation mit dem Beschäftigungsverhältnis hat. Eine kritische Betrachtung ergibt, dass die Gruppe der industriellen Angestellten sehr klein ist. Die Durchführung des Versuchsstandes in einem industriellen Umfeld könnte hier ein anderes Ergebnis liefern.

6.1.2.2 Betrachtung der Performance ohne und mit Exoskelett ²⁶²

Es wird die Bewertung der persönlichen Performance jedes Studienteilnehmers betrachtet. Die Skala reicht von 1 (sehr niedrig) bis 5 (sehr hoch). Die Fragen, die gestellt wurden, werden im Folgenden mit den jeweiligen Mittelwerten dargelegt:

- Wie gut würden Sie Ihre Leistung ohne das Assistenzsystem bewerten?
 - $\bar{x} = 3,57$ und $\sigma = 0,88$
- Wie gut würden Sie Ihre Leistung mit dem Assistenzsystem bewerten?
 - $\bar{x} = 4,17$ und $\sigma = 0,92$

Die Performance, die die Teilnehmer mit dem Exoskelett verspüren, hat sich um rund 17% verbessert. Es kann eine leichte Verbesserung des persönlichen Empfindens der einzelnen Teilnehmer attestiert werden. Dies geht auch mit der Bewertung aus dem NASA-TLX Score hervor (17,81%).

²⁶¹ vgl. ebenda

²⁶² vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

6.1.2.3 Korrelation Performance mit Exoskelett und SUS-Score

Um die Bewertung des SUS-Scores zu überprüfen gilt die Behauptung, dass Personen, die die Aufgabe gut bis sehr gut gemeistert haben, grundsätzlich dem System einen höheren SUS-Wert zusprechen.²⁶³ Hierbei werden alle SUS-Ergebnisse kleiner und größer als 90 klassifiziert. Diese werden in Abhängigkeit von der Performance-Bewertung der Teilnehmer geordnet. Die Kontingenztabelle sieht für diese Hypothese wie folgt aus:

Tabelle 15: Kontingenztabelle Performance und SUS-Score ²⁶⁴

		SUS-Score	
		<90	≥90
Performance	1,2,3,4	8	5
	5	4	6

Die Auslegung der Tabelle soll zeigen, dass Personen die sich eine überdurchschnittliche gute Performance ($\bar{x} = 4,17$) zusprechen, dem Exoskelett auch einen besseren SUS-Score geben. Deshalb ist nur der Wert 5 in einer eigenen Gruppe, die restlichen kleineren Werte sind unter dem Durchschnitt. Mit einem P-Wert von 0,3053 ist dem nicht so, wonach die Hypothese verworfen werden kann. Die Tatsache, dass die Aussage nicht übereinstimmt, kann auf der Tatsache beruhen, dass es zu wenige Studienteilnehmer gab. Des Weiteren könnte der große Teil an nicht Industrieangestellten die Auswertung verzerren.

6.1.2.4 Korrelation Alter und Performance

Die Behauptung, dass ältere Personen die Aufgabe weniger erfolgreich lösen, gilt es zu testen. Hierfür werden die Teilnehmer in die Gruppe jünger als 30 Jahre und 30 oder älter geclustert. Die Performance wird analog zu Kapitel 6.1.2.3 zusammengefasst. Somit ergibt sich folgende Kontingenztabelle:

Tabelle 16: Kontingenztabelle Performance und Alter ²⁶⁵

		Performance	
		1,2,3,4	5
Alter	<30	1	4
	≥30	12	6

Mit einem P-Wert von 0,0626 ist die Hypothese, rein statisch betrachtet wiederlegt. Die Tatsache, dass der Grenzwert für eine statistische Signifikanz bei 0,05 liegt, lässt hier

²⁶³ vgl. Bangor et al., 2008, S.592

²⁶⁴ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

²⁶⁵ vgl. Nowak, 2021, Excel_gesamt

Interpretationsspielraum offen. Somit lässt es sich die Hypothese verwerfen, jedoch könnte hier eine größere Versuchsgruppe eine konkretere Aussage zulassen.

6.1.2.5 Korrelation Geschlecht und Performance

Eine weitere Hypothese ist es, die geschlechterspezifische Leistung zu untersuchen. Die Frage, die sich stellt, ist, ob es geschlechtsabhängig ist, wie gut die Leistung einzustufen ist. Folgende Kontingenztabelle ergibt sich:

Tabelle 17: Kontingenztabelle Performance und Geschlecht ²⁶⁶

	Performance	
	1,2,3,4	5
Männlich	7	6
Weiblich	6	4

Mit einem P-Wert von 0,7679 kann die Hypothese verworfen werden. Somit kann für die Versuchsgruppe attestiert werden, dass das Geschlecht keinen Einfluss auf die Performance am Versuchsstand gehabt hat.

6.1.3 Fazit Evaluation

Auf Basis von literarischen Quellen ist ganz klar ersichtlich, dass im Zuge einer flexibleren und anpassungsfähigeren Produktionslinie Menschen nicht komplett durch vollautomatisierte Systeme ersetzt werden können. Bezogen auf das Exoskelett geht hervor, dass eine flexible Produktion nicht durch Automatisierung erreicht werden kann, da häufige Änderungen von Aktivitäten, Produkttypen und Auftragsgrößen vorkommen. Im Falle von dynamischen Umgebungen wird von der menschlichen Kreativität und Flexibilität profitiert, solange der Mensch die Kontrolle hat und es somit keine Notwendigkeit gibt Roboter zu programmieren und zu trainieren. ²⁶⁷

Die Dimension der Kosten spielt im Forschungsumfeld, in Bezug auf den Implementierungsprozess eine geringere Rolle, als in der Industrie. Dennoch ist die Betrachtung, in Bezug auf eine multikriterielle Evaluation unabdingbar. Faktoren wie langfristige Reduktion von MSE bedingten Ausfällen lässt sich nicht direkt bilanzieren, sondern schlägt sekundär zu Buche. Die langfristig länger gesunden Mitarbeiter haben einen positiven Benefit für das Unternehmen. Betrachtet man die vereinfachte ROI-Kalkulation sieht man, dass nach vier sich das passive Exoskelett amortisiert hat.

Die Betrachtung des Prozesses ist in diesem Zusammenhang kritisch zu betrachten. Die teilnehmenden Personen haben denselben Versuch zweimal, mit einem zeitlichen Abstand, hintereinander durchgeführt. Lediglich zwei von 23 Teilnehmern haben den Versuch beim zweiten Mal langsamer absolviert. Hier würde ein ähnlicher

²⁶⁶ vgl. ebenda

²⁶⁷ vgl. de Looze et al., 2017, S.197

Versuchsaufbau, der vom Komplexitätsgrad und zeitlichen Rahmen ähnlich ist, eventuell einen vergleichbaren Wert generieren. Aus diesem Grund ist es nicht möglich zu sagen, dass das Exoskelett die Prozesszeit reduziert. Die Tatsache, dass eine Person den Versuchsstand aufbauen muss, lässt es wiederum schwer zu beurteilen, was ein ähnlicher Aufbau ist. Dies liegt stark im Auge des Konstrukteurs. Ein Bias zu vermeiden ist nicht zur Gänze möglich. Des Weiteren kann der Versuch mit mehr Teilnehmern durchgeführt werden, um eindeutiger statistische Aussagen treffen zu können. Zusätzlich wäre es möglich, eine Versuchsgruppe den Use-Case ohne Exoskelett durchspielen zu lassen und die andere Kohorte mit dem Exoskelett.

Dennoch gaben 21 von 23 Personen an, dass sie den Versuch mit dem Exoskelett bevorzugen. Dies zeigt, dass das Assistenzsystem sehr gut angenommen wurde und für unerfahrene Benutzer geeignet ist. Dies spiegelt sich in den positiver SUS Bewertung wieder. In Anlehnung an den Prozess aus der Realität wurde der Versuchsstand aus Sicht der Teilnehmer als sehr gut adaptiert eingestuft. Auf einer Skala von 1 bis 5 wurde das Adaptionniveau mit $\bar{x} = 4,34$ bewertet.

Die Ermüdungserscheinungen, die mit der Überkopfmontage miteingehen, werden umso stärker, je länger der Versuch dauert. Hier können mit einer länger dauernden Aufgabenstellung die Vorteile eines Exoskelettes noch besser zum Vorschein kommen. Dementsprechend sind auch die Ergebnisse des NASA-TLX Scores niedrig ausgefallen. Dies ist ein Indiz dafür, das für zukünftige Evaluationen längere Versuchsdurchführen von Vorteil sind.

Fehlerraten bekommen vor allem bei Fertigungsprozessen eine tragende Rolle. Besonders in Zeiten von variantenreichen Montageprozessen kann die Fehlerrate rapide ansteigen. Hier können vor allem Assistenzsysteme unterstützen, die IT-gestützt agieren. Diese können die Fehlerraten und Anlernzeiten reduzieren.²⁶⁸ Im Zuge einer komplexeren Betrachtung eines Montageprozesses kann hier auf die Hilfe von dynamischer Projektion zurückgegriffen werden, um die Arbeiter besser durch den Prozess zu führen. Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass es für ungeschulte und unerfahrene Benutzer, dennoch eine Herausforderung war, den Versuchsstand zu bewältigen.

6.2 Resultate FTF in Kooperation mit AT&S

Die Auswertung im Praxisbeispiel erfolgt nach den fünf definierten Dimensionen der multikriteriellen Evaluation – Finanzen, Prozess, Anwender, Erlernen & Entwickeln und Technologie.

²⁶⁸ vgl. Kleineberg et al., 2017, S.6

6.2.1 Auswertung Evaluation

6.2.1.1 Dimension Finanzen

Im Vergleich zum Versuch im Labor der Pilotfabrik, haben Unternehmen aus der Industrie bezogen auf die Dimension Kosten, einen anderen Stellenwert. Jährliche Jahresberichte spiegeln die Situation des Unternehmens gegenüber der Öffentlichkeit wider. Diverseste Shareholder erwarten Profite, was ganz grob gesprochen durch eine Erhöhung des Umsatzes oder eine Senkung der Kosten stattfinden kann. Im Idealfall geschieht dies durch eine Kombination aus beiden Aspekten.²⁶⁹

Für die Evaluation des FTF Use-Cases wird der Life-Cycle Cost Ansatz betrachtet. Mit Hilfe des Returns on Investment (ROI) lässt sich hier, gerechnet auf den gesamten Lebenszyklus, eine gute Einschätzung für das benötigte Investment treffen. Mit Hilfe der folgenden Tabellen können die Kosten für die Einführung FTS eingeteilt und übersichtlich dargelegt werden:²⁷⁰

Tabelle 18: Investitionen in einer FTS-Kalkulation²⁷¹

Position	Beschreibung
FTS	Fahrzeuge, Leitsteuerung, Bodenanlage, projektbezogene Dienstleistung
Systemperipherie	Lastübergabestationen und Puffer, sofern dem FTS und nicht der stationären Fördertechnik anzurechnen
Bauliche Maßnahmen	Bodensanierung, Schutzvorrichtungen, Anpassung von Brandschutztoeren, Brücken und Rampen
Einbindung in vorhandene Strukturen	Schnittstellen zu über-, unter- oder nebengeordneten Steuerungen, Integration von automatischen Waagen, Scannern etc.

Tabelle 19: Direkte Kosten in einer FTS-Kalkulation²⁷²

Position	Beschreibung
Instandhaltung	Durch die gleichmäßige und schonende Fahrweise wird der Verschleiß von Reifen, Batterien, Antrieben usw. minimiert.
Energie	Im Wesentlichen der Ladestrom für die Traktionsbatterien.

²⁶⁹ vgl. Buxbaum, 2020, S.111

²⁷⁰ vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S.252

²⁷¹ Ullrich & Albrecht, 2019, S.252

²⁷² ebenda, S.253

Personal des Anlagenbetriebs	Nur auf das Transportsystem bezogen; Leitstandpersonal nur anteilig!
Steuern und Versicherungen	-
Transportschäden am Produkt	Ein automatischer Transport minimiert die Transportschäden. Zu berücksichtigen sind Material, Mehrarbeit und Nacharbeit, aber auch Kundenreklamationen
Transportschäden an betrieblichen Einrichtungen	Schäden an z.B.: Ladehilfsmittel, Säulen, Wände, Gestelle, Regale, Tore.

Tabelle 20: Indirekte Kosten in einer FTS-Kalkulation ²⁷³

Position	Beschreibung
Personalkosten in angrenzenden Bereichen	Ggf. erforderliche Staplerfahrer, Personal für Paletten Bereitstellung und für die Feinverteilung
Lagerbestände	Durch die Verbesserung des Informationsflusses und die hohe Verfügbarkeit können die Lagerbestände verringert werden
Materialbestände in der Fertigung	-
Durchlaufzeit	Die Auftragsdauer wird verringert und die Auftragsdichte erhöht – damit steigt die Effizienz der Produktion.

Tabelle 21: Zusatznutzen eines FTS ²⁷⁴

Position	Beschreibung
Flexibilität und Anpassungsfähigkeit	Flexible Flächennutzung, Anpassung an Transportschwankungen, Materialfluss- und Layoutänderungen.
FTS als Organisationsmittel	Die Leitsteuerung sorgt für optimalen Material- und Informationsfluss und damit für mehr Transparenz.
Minimierung der Fehllieferungen	Die Automatisierung sorgt für absolut zuverlässige Transporte und eine hohe Prozesssicherheit
Sicherheit	Das FTS arbeitet sicher und unfallfrei
Ordnung und Sauberkeit	Der Stress wird reduziert, und es entsteht eine angenehme Umgebungs-atmosphäre.
Verfügbarkeit und Kontinuität	Das FTS arbeitet unspektakulär, ohne Unterbrechung, ohne jegliche Hektik.

²⁷³ ebenda²⁷⁴ Ullrich & Albrecht, 2019, S.253

Ökologischer Nutzen	Niedriger Schallpegel, keine Emissionen, geringer Energieverbrauch.
Ideelle Vorteile	Vorzeigefertigung, Imagewirkung nach innen und außen, Technologievorsprung.

Im Folgenden werden die relevanten Kostenstellen, die für die Berechnung notwendig sind angeführt. Hierbei basieren die Werte auf den referenzierten Quellen in der Fußnote und aus dem Interview und den E-Mail Konversationen mit den zuständigen Mitarbeitern von AT&S.

Im ersten Schritt werden die direkten Investitionskosten berücksichtigt. Für den Transport der Leiterplatten, die sich in Produktwarenrägern befinden, bieten sich FTFs an, die typischerweise für Paletten ausgelegt sind. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Leiterplatten nicht auf Bodenniveau aufgehoben werden, sondern von einer Fertigungsstation auf das FTF verschoben werden. Für diesen Fall bietet sich eine spezielle Konstruktion eines Huckepack-FTF an. Der Vorteil jener Fahrzeuge ist es, dass es nicht rangieren muss. Das heißt, dass es direkt an die Ladestation anfahren kann, ohne sich drehen zu müssen.²⁷⁵ Mit einem Preis von rund 40.000 € pro FTF²⁷⁶ schlagen die Kosten als Investition nieder.

Für die Projektleitung werden Kosten, sowohl für die interne als auch die externe Leitung fällig. Für die Projektdauer von rund vier Monaten werden aus Sicht des Unternehmens in Summe 75.000 € verbucht. Dokumentationen kommen auf rund 7.000 €. Für die Betrachtung im Werk in Leoben entfallen die Punkte Systemperipherie, bauliche Maßnahme und die Einbindung in vorhandene Strukturen, da bereits für den ersten Piloten diese Maßnahmen adaptiert wurden. Dennoch muss ein Budget für bauliche Maßnahmen zurückgestellt werden, um auf der sicheren Seite zu sein. Hier liegt der Betrag bei 100.000€. Für die Inbetriebnahme der Soft- und Hardware werden weitere 8.000 € verbucht. Somit werden in Summe 270.000 € für das erste Investment veranschlagt.²⁷⁷

Für die laufenden Kosten werden jährliche Rechnungen vorgenommen, um diese im ROI gut einbinden zu können. Der größte Kostenfaktor, wie es auch beim manuellen Betrieb der Fall ist, bleiben die Personalkosten. Das Personal in der Fabrik wird im Unternehmen als Gesamtheit betrachtet, sodass hier keine Kosten direkt dem FTF zuzurechnen sind. Jeder Mitarbeiter ist ein Teil der Produktion und ist somit ein Produktionsmitarbeiter. Die Tatsache, dass alle Produktionsmitarbeiter grundlegende Probleme mit den FTFs beheben können, werden hier keine Kosten für das Personal fällig. Dennoch muss ein Wartungstechniker während der Betriebszeiten anwesend sein, um im Falle eines Ausfalles einschreiten zu können. Da dieser Mitarbeiter nicht

²⁷⁵ vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S.73ff

²⁷⁶ vgl. E-Mail von C.G. AT&S, 2021, unveröffentlicher Anhang Kapitel 14.1

²⁷⁷ vgl. E-Mail von C.G. AT&S, 2021, unveröffentlicher Anhang Kapitel 14.1

zu 100% mit dieser Tätigkeit beauftragt ist, werden hier 20% der Arbeitsleistung angenommen. Um hier, 365 Tage im Jahr diesen Service bieten zu können, müssen rund 5 Personen kalkuliert werden. Die genauere Erklärung für diesen Faktor folgt in diesem Kapitel. Momentan fallen in Österreich keine Steuern für FTFs an, somit wird hier kein Betrag fällig. Für Instandhaltung fallen rund 1.000€ jährlich an. Hier sind diverse kleine Reparaturen am FTF einkalkuliert, wie das Austauschen eines Reifens. Für die Kosten der Energie, wird ein Wert von 18 Cent pro kWh Strom herangezogen.²⁷⁸ Gerechnet auf ein Jahr, mit 2,4 vollständigen Ladezyklen pro Tag, ergeben sich rund 315€ Stromkosten pro Jahr für ein FTF. Diese Summe basiert auf den Angaben des Herstellers. Dieser gibt an, dass rund 3000-5000 Ladezyklen stattfinden können und eine neue Batterie mit 3.000€ zu Buche schlägt.²⁷⁹ Die Anzahl der Schäden, beziehungsweise die Qualität in diesem Fall, bleibt gleich, somit müssen diese Kosten nicht spezifisch berücksichtigt werden.²⁸⁰

Auch die indirekten Kosten müssen in Betrachtung gezogen werden. Die Tatsache, dass jede Person ein Produktionsmitarbeiter ist, zeigt, dass hier keine extra Kosten in Bezug auf das Personal am Shop-Floor hinzukommen, wie bereits bei den direkten Kosten angesprochen. Außerdem geschieht die Entnahme der Produktwarenträger an den Pufferstationen automatisch, sodass hier keine Mitarbeiter zusätzlich eingesetzt werden müssen. Das Thema Lagerbestände umfasst eine sehr komplexe Betrachtung der Lagerlogistik, des Waren Zu- und Abflusses, sowie einer genauen Betrachtung der kompletten Fertigung. Dies sprengt den Rahmen dieser Arbeit, die sich mit der reinen Evaluation in der Dimension Kosten eines Assistenzsystems beschäftigt. Die Berücksichtigung der Durchlaufzeiten erfolgt in der Betrachtung der Dimension – Prozess, im Kapitel 6.2.1.2. Ebenso die Zusatznutzen werden zur Vollständigkeit angegeben, um das weitere Nutzen eines FTS aufzuzeigen und die möglichen Vorteile einer Implementierung zusätzlich hervorzuheben. Zusätzlich gilt es auch die Folgen eines möglichen Platzgewinnes zu berücksichtigen. Dazu wurde bereits eine Benefit Berechnung durchgeführt. Dadurch würden, mit Hilfe der automatisierten Pufferplätze, in den betroffenen Bereichen Flächen von ca. 40-50m² für die Produktion gewonnen werden. Der Raumgewinn wird durch die hohen Puffersysteme ermöglicht. Durch die Automatisierung zum Beispiel in der Liftgasse, der Schaltschränke oder der Übergabeschleusen wird ebenso Platz eingenommen, der nicht für Stellplätze genutzt werden kann.²⁸¹

Die Zusatznutzen werden, zum Teil, wie die erhöhte Verfügbarkeit, bereits in den dargelegten Kosten mitberücksichtigt. Themen, wie ideelle Vorteile, werden in der Rechnung nicht berücksichtigt.

²⁷⁸ vgl. Hütter & Stigler, 2012, S.6

²⁷⁹ E-Mail von C.G. AT&S, 2021, unveröffentlichter Anhang Kapitel 14.1

²⁸⁰ vgl. Interview AT&S Groß & Triller, 2021, Frage 6

²⁸¹ E-Mail von C.G. AT&S, 2021, unveröffentlichter Anhang Kapitel 14.1

Folgend wird der Use Case für 40 Transporte behandelt. Diese 40 Transporte basieren auf folgendem Szenario, mit dem das Unternehmen rechnet:

40 Transporte zwischen den beiden Pufferstationen in einer Schicht

AT&S gibt eine Verfügbarkeit von 97% für das FTF an. Für Österreich kommen die folgenden Werte für die Mitarbeiter zustande:

- 25 Tage sind per Gesetz in Österreich als Urlaub definiert. ²⁸²
- Die Krankenstandtage gehen aus der Statistik hervor. Auf 1.000 beschäftigte Personen in Österreich fallen rund 1.336 Krankenstandfälle. ²⁸³
- Im Falle eines Krankenstandes bleibt der Arbeitnehmer durchschnittlich 13,1 Tage der Arbeit fern. ²⁸⁴
- Somit wird pauschal der Wert mit der durchschnittlichen Anzahl an Krankenständen multipliziert, was den Wert von 17,816 Tagen Krankenstand im Jahr pro Arbeitnehmer ergibt.

Für den Menschen ergeben sich, auf Basis der statistischen Daten folgende Verfügbarkeiten:

$$\begin{aligned} \text{Verfügbar}_{\text{Mensch}} &= 40 \frac{h}{\text{Woche}} * (52 \text{ Wochen} - \text{Urlaub} - \text{Krankenstand}) \\ &= 40 \frac{h}{W} * (52 W - 5 W - 2,5 W) = 1778 h \end{aligned}$$

Formel 8: Verfügbarkeit des Menschen

Bei in Summe 8.760 Stunden pro Jahr ergibt sich eine Verfügbarkeit von rund 20% der Zeit eines Jahres pro Mitarbeiter. Alleine auf Basis dieser Rechnung werden knapp **5 Mitarbeiter** benötigt, um dieselbe Zeit an Arbeitszeit aufzubringen, wie ein FTF. Um das Modell nicht zu komplex zu gestalten, werden Überstunden, sowie Nacharbeitszuschläge nicht berücksichtigt und der Kostenfaktor des Menschen schlägt mit rund 65.500 € pro Jahr, analog zu Kapitel 6.1.1.1, zu Buche. ²⁸⁵

Für die FTFs ergibt sich auf Basis der Betriebs- und Ladezeiten folgende Berechnung: Für einen acht-stündigen Betrieb müssen die Batterien rund zwei Stunden lang geladen werden. Daraus ergibt sich, dass das FTF 80% der Zeit im Betrieb ist und die restlichen 20% im Ladezustand verbringt. Um die geforderten 97% Verfügbarkeit zu erreichen, werden rund 1,2 FTF pro Jahr benötigt. Somit muss ein Investment für **2 FTF** getätigt werden, um die Kapazität zu erreichen. Zusätzlich gilt es die Reduktion

²⁸² vgl. Pelzmann, 2011, S.69ff

²⁸³ Zur Statistik der Krankenstandfälle, -dauer und -tage 2019 siehe Abbildung 86 im Anhang Kapitel 13.7.1

²⁸⁴ Zur Statistik der Krankenstandfälle, -dauer und -tage 2019 siehe Abbildung 86 im Anhang Kapitel 13.7.1

²⁸⁵ vgl. <https://www.karriere.at/hr/lohnkostenrechner> (Gelesen am 21.07.2021)

der Batteriekapazität zu berücksichtigen und der Wartungszeit. Für die Kalkulation des Use-Case, nämlich nur einer Route, werden mit 2 FTF all die anfallenden zusätzlichen zeitlichen Beschränkungen großzügig berücksichtigt.

Somit fallen folgende Kosten für die Implementierung des FTF an, die im Vergleich zur menschlichen Lösung gegeneinandergestellt werden:

Tabelle 22: Kostenaufstellung FTF-System ²⁸⁶

Kostenkategorie	FTF
Anschaffungskosten	80.000 €
Projektleitung Intern	50.000 €
Projektleitung Extern	25.000 €
Infrastrukturkosten	100.000 €
Inbetriebnahme Soft-/Hardware	8.000 €
Dokumentation	7.000 €
Stromkosten/Jahr	315 €
Akkukosten/Jahr	657 €
Service/Instandhaltung/Jahr	1.000 €
Servicemitarbeiter FTF/Jahr	66.776 €
Softwarelizenz/Jahr	1.000 €
Summe Investitionskosten	270.000 €
Summe laufen Kosten/Jahr	69.748 €

Für den Servicemitarbeiter FTF werden 0,2 FTE eingeplant, da hier nur im Falle eines notwendigen Einsatzes eine Fachkraft anrücken muss. Dennoch müssen, gemäß der Verfügbarkeit des Menschen, 5 Personen berücksichtigt werden. Für den Menschen entstehen folgende laufende Kosten jährlich an:

$$Kosten_{Mensch} = 65.500 \frac{\text{€}}{\text{Person}} * 5,1 \frac{\text{Personen}}{\text{Jahr}} = 333.380 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

Formel 9: Jährliche Kosten für das Personal

Hierbei sind alle Faktoren berücksichtigt, wie Urlaube und mögliche Krankenstände. Der Faktor 5,1 Personen/Jahr wird im Kapitel 6.2.1.2 genauer erläutert. Somit kann folgendes statisches Modell zum ROI aufgestellt werden:

Tabelle 23: ROI-Werte für das FTF

Zeitpunkt [Jahr]	0	1	2	3	4	5
Summe Mensch	0 €	333.880 €	667.759 €	1.001.639 €	1.335.519 €	1.669.398 €
Summe FTF	270.000 €	339.748 €	409.497 €	479.245 €	548.993 €	618.741 €
Differenz	- 270.000 €	- 5.869 €	258.263 €	522.394 €	786.525 €	1.049.690 €

²⁸⁶ E-Mail von C.G. AT&S, 2021, unveröffentlichter Anhang Kapitel 14.1

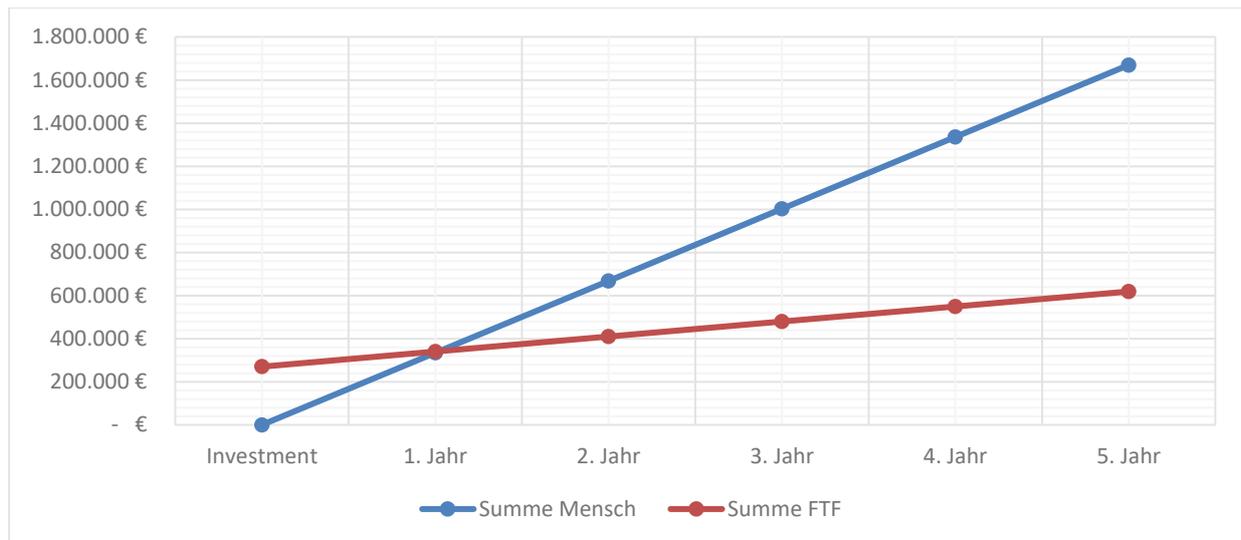


Abbildung 64: ROI für die FTF Implementierung

Wie leicht zu erkennen ist, spielt sich das System schon ungefähr nach Ablauf eines Jahres ein. Die eingesparten Kosten wachsen in den folgenden Jahren rapide an. Maßgeblich treibender Faktor in der Berechnung sind die sehr hohen Personalkosten am Wirtschaftsstandort Österreich.

In der LCC Betrachtung fehlt die End-of-Life Betrachtung. Die Lebensdauer eines Systems beträgt in der Regel rund zehn bis zwanzig Jahre. Hier kommen einige Faktoren zusammen, die diese Lebenszeit beeinflussen, wie beispielsweise Wartungsintervalle oder wie regelmäßig die steuerungstechnischen Komponenten upgedated werden. Zusätzlich kommen gegen Ende der Lebenszeit betriebliche und gesetzliche Regeln, die vom Betreiber befolgt werden müssen. Drei mögliche Gründe, für das Stilllegen eines Systems sind:

- „System ist veraltet: Leistung/Verfügbarkeit/Wirtschaftlichkeit ist nicht mehr gegeben.
- *Wartung und Instandhaltung ist nicht mehr rationell durchführbar; Retrofitting wäre unwirtschaftlich.*
- *Es hat grobe Veränderungen im Einsatzbereich der Anlage gegeben, wie z. B. Produktionsaufgabe.“*²⁸⁷

Selbst im Falle einer Neuimplementierung eines FTS kommt die Investition für das Unternehmen erheblich günstiger als weiterhin die Transportroute mit Mitarbeitern zu gestalten. Es gibt die Möglichkeit die Fahrzeuge an andere Unternehmen weiter zu verkaufen oder den Weg der Entsorgung zu gehen.

Das Thema der Batterie gilt es noch zu beachten. Laut Hersteller hält die Batterie 3.000-5.000 Ladezyklen. Mit Durchschnittlich 2,4 Zyklen am Tag hält eine Batterie bei

²⁸⁷ Ullrich & Albrecht, 2019, S.269

geschätzten 4.000 Zyklen rund 4,5 Jahre. Somit müssen hier Kosten für die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus bedacht werden. Die Kosten für die neue Batterie sind bereits in der ROI berücksichtigt.

6.2.1.2 Dimension Prozess

Der gewünschte SOLL-Zustand mit den FTFs wird in Abbildung 65 bildlich dargestellt, um die folgenden Zeiten besser nachvollziehen zu können. Beginnend mit einem Auftrag, der aus dem zentralen Puffersystem zur Abholung bereitsteht, wird der Auftrag an das FTF geschickt. Dies geschieht über die FTS-Leitsteuerung, die die Aufträge intelligent an das passendste Fahrzeug vermittelt. Schon bevor das passende FTF an der Station angekommen ist, kann der Auftrag bereits über die Leitsteuerung bereitgestellt werden, sodass eine direkte Entladung bei der Andockung des FTFs stattfinden kann. Sobald die Palette auf dem FTF verladen wurde, macht es sich auf den Weg in den zweiten Stock. Auf der Route wird zuerst die Mitarbeiterschleuse geöffnet, dann wird der Weg zum Aufzug zurückgelegt. Nach dem Wechsel des Stockwerkes wird die letzte automatische Türe passiert, bevor das FTF die Produktwarenräger an der nächsten Pufferstation entlädt.

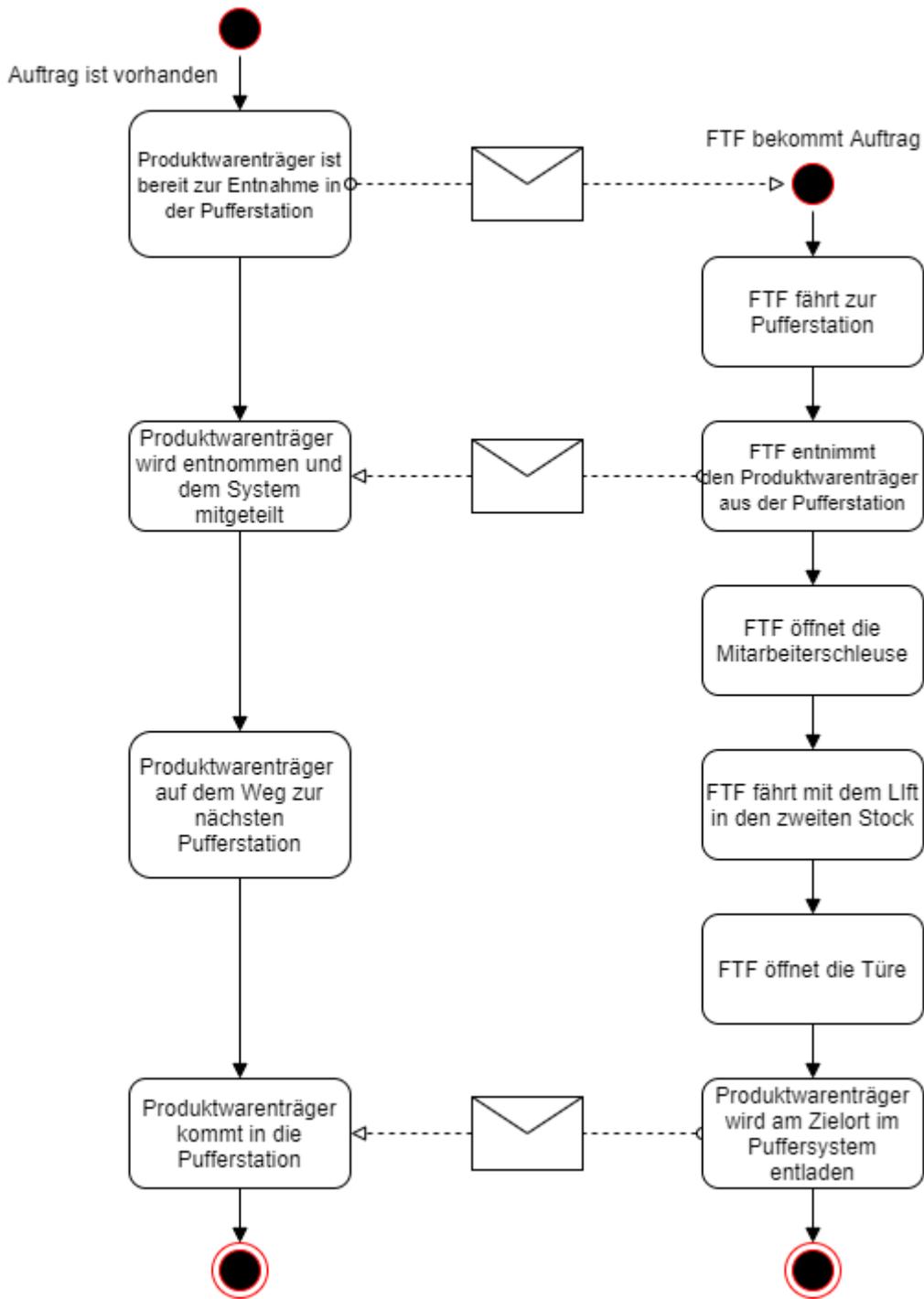


Abbildung 65: SOLL-Zustand FTF

Im Falle der Prozessbetrachtung haben sich sehr interessante Beobachtungen ergeben. Tabelle 24 zeigt die unterschiedlichen Zeitmessungen an. Es wurde zunächst der Weg mit einem Menschen gemessen, der dem IST-Prozess entspricht. In weiterer Folge fand die Messung der zurückgelegten Strecke mit einem FTF statt. Die Weglänge, die in diesem Use-Case betrachtet wird, beträgt 225 Meter. Die Geschwindigkeit des FTF beträgt laut Herstellerangaben 0,6 Meter pro Sekunde. Daraus ergibt sich der Wert für die zeitliche Aufwendung der Fahrtzeit. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen die Route, die das FTF zurückzulegen hat.

Tabelle 24: Prozesszeiten FTF und Mensch

Prozessschritt	Mensch [s]	FTF [s]
1) Aufnahme aus dem Puffersystem	180	90
2) Durchfahrt durch die Mitarbeiter-/Maschinenschleuse	15	10
3) Aufzug	130	130
4) Puffersystem	180	90
Zeitliche Aufwendung für die gesamte Fahrtzeit	240	375
Summe	745	695

Die genauen Erläuterungen für die zeitlichen Unterschiede müssen spezifiziert werden. Für den Prozess des Transportes zwischen den beiden Pufferstationen, die auf zwei verschiedenen Stockwerken sind, ergibt sich ein signifikanter zeitlicher Unterschied von 50 Sekunden für eine Fahrt in eine Richtung. Dieser beruht darauf, dass der Mitarbeiter bei einer Entnahme des Produktwarenrägers am Puffersystem die Tätigkeit manuell erledigen muss. Hier muss dieser den gewünschten Artikel auf einem Display auswählen und wartet bis das automatische Puffersystem den gewünschten Produktwarenräger bereitstellt. Hinzu kommt der Arbeitsschritt Scannen, der dem System den aktuellen Status des Produktwarenrägers mitteilt. Beim FTF wird vorab, bevor das Fahrzeug an die Pufferstation gelangt, bereits der Auftrag für die Bereitstellung des Produktwarenrägers gesendet. Somit kann die Verladung im Moment des Eintreffens bereits stattfinden und das autonome System 90 Sekunden Zeit einsparen.

Beim Passieren der Mitarbeiterschleuse profitiert das autonome System vom Flottenmanagementsystem, welches bereits im Anfahren des Fahrzeuges das Signal zum Öffnen der Schleuse aussendet. Im manuellen Prozess verliert der Mitarbeiter rund fünf Sekunden durch das Zücken seiner Mitarbeiterkarte, der Reaktionszeit des Kontrollsystems und dem drauffolgenden Öffnen der Türe.

Als nächstes folgt ein längerer gerader Weg, der bis zum nächsten Hindernis, dem Aufzug, die bestimmende Komponente ist. Hier muss das FTF zweimal abbiegen, bevor es dem langen Gang folgt. Im Lift werden beide Prozesse, den Umständen entsprechend, keine zeitliche Differenz erfahren, da der Lift hier die determinierende Konstante ist.

Nach einer weiteren Geraden, gelangen sowohl Mensch als auch FTF an der nächsten Pufferstation an, wo die beiden Pufferzeiten, äquivalent zum Prozessschritt 1, wieder in die Berechnung einfließen.

Der Vergleich der beiden Methoden hinsichtlich Anzahl an Betriebsmitteln ist wie folgt:

Tabelle 25: Vergleich FTF-Use Case

Zeitdauer	Mensch	FTF
Summe Fahrt [s]	745	695
Summe Hin- und Rückfahrt [s]	1490	1390
Dauer zur Erreichung der geforderten 40 Transporte in [h]	8,28	7,72
Dauer zur Erreichung der geforderten 40 Transporte für Hin- und Rückfahrt in [h]	33,11	30,89
Notwendige Einheiten nach Verfügbarkeit	4,93	1,21
Anzahl Einheiten pro Jahr	5,10	1,17
Anzahl Einheiten pro Schicht für Hin- und Rückfahrt pro Jahr	20,39	4,67

Dabei ergibt sich die Anzahl der Einheit pro Jahr aus der Verfügbarkeit des jeweiligen Mediums multipliziert mit der Anzahl an Einheiten, die man in einer Schicht benötigt um die Transporte zu bewerkstelligen:

$$\begin{aligned}
 \#Einheiten_{FTF} &= \\
 &= \text{Prozesszeit [h]} * \frac{\#Transporte}{\text{Schicht}} * \text{Notwendige Einheiten nach Verfügbarkeit} \\
 &= 0,19h (= 695s) * \frac{40}{8h} = \frac{7,72}{8h} = 1,17 \frac{FTFs}{\text{Jahr}}
 \end{aligned}$$

Formel 10: Notwendige FTF pro Schicht

$$\begin{aligned}
 \#Einheiten_{Mensch} &= \\
 &= \text{Prozesszeit [h]} * \frac{\#Transporte}{\text{Schicht}} * \text{Notwendige Einheiten nach Verfügbarkeit} \\
 &= 0,21h (= 745s) * \frac{40}{8h} * 4,93 = \frac{8,28}{8h} * 4,93 = 5,10 \frac{Menschen}{\text{Jahr}}
 \end{aligned}$$

Formel 11: Notwendige Menschen pro Schicht

Somit ergibt sich ein Faktor 4 Unterschied, zwischen dem Bedarf eines FTFs und einer menschlichen Kraft.

6.2.1.3 Dimension Erlernen & Entwickeln

Bezogen auf das Qualifikationsprofil der Mitarbeiter erfordert das FTF einige Fähigkeiten von den Produktionsmitarbeitern. Im Unternehmen AT&S wird in der Fertigung nicht zwischen den einzelnen Mitarbeitern unterteilt, sondern sie werden alle als Produktionsmitarbeiter definiert. Die Belegschaft ist für den Fall eines Ausfalles geschult, das Fahrzeug aus dem Weg zu räumen. Die Schulung wird vor der Inbetriebnahme durch den Hersteller durchgeführt. Da im Falle eines Stillstandes die Bremsen einsetzen, müssen diese über das Bediensystem gelöst und das FTF manuell verschoben werden und an speziell markierten Stellen entlang des Transportweges abgestellt werden. Die Schulungen für die schnelle Problembehandlung werden in der Regel vom Hersteller durchgeführt.²⁸⁸

Den Abtransport, sowie die Reparatur werden von einem Wartungstechniker durchgeführt. Die sind auf das System geschult und können die Probleme eines Stillstandes beheben. Hinzu kommen Wartungs- und Servicetätigkeiten, die von den Wartungstechnikern durchgeführt werden.²⁸⁹

Die Thematik der Routenprogrammierung ist im Falle der linienbasierten Technologie nur vom Personal des Herstellers möglich und wird nicht von AT&S durchgeführt. Sollten die technologischen Voraussetzungen für ein konturbasiertes System geschaffen sein, kann über die eigenständige Programmierung nachgedacht werden. Die FTF Systeme können mit einem Joystick gesteuert werden, durch die Fertigungshalle gefahren werden und scannen dabei die Umgebung ab. Diese Fähigkeiten werden zukünftig von den Wartungstechnikern des Unternehmens gefordert, um zusätzlich weniger Abhängigkeit von den Herstellern zu haben.²⁹⁰

Wird in Folge dessen der Kompetenzatlas betrachtet, stellen sich mehr Kompetenzen in den Vordergrund, als beim passiven Exoskelett. Querschnittskompetenzen im Bereich P/A, wie die der Offenheit für Veränderung müssen vorhanden sein. P/F, in dem neue Technologien erlernt werden, wie das grundlegende Bedienen eines defekten FTF für einen Mitarbeiter in der Produktion. Passend dazu, gilt es experimentierfreudig S/A zu sein, um in den neuen Situationen neu zu handeln.

6.2.1.4 Dimension Anwender

Die Betrachtung der ergonomischen Aspekte ist in der Evaluation von fahrerlosen Transportsystemen weniger bedeutend, als bei klassischen Montagelinien in der Automobilindustrie. Die größte körperliche Beanspruchung ist das Verschieben der

²⁸⁸ vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 12

²⁸⁹ vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 9

²⁹⁰ vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 9

Behälter auf den Transportwagen. Weiters kommt es beim Lift, aufgrund des Spaltes, zu einer leicht erhöhten Kraftaufwendung. Es handelt sich hier um eine sehr kurze dynamische Muskelarbeit.²⁹¹ Diese werden nicht berücksichtigt, da sie nur sehr kurz auftreten und keinen dauerhaften Zustand darstellen. Im Falle des FTFs wären diese Arbeiten nicht mehr notwendig, da die Be- und Entladung der Behälter durch das autonome Transportsystem übernommen wird.

Ein wesentlicher Faktor sind die Nutzerakzeptanz und die Usability des FTF-Systems. Im Indoorbereich teilen sich Mitarbeiter und autonom fahrende Transportmittel den Shop-Floor. Bevor solche Systeme implementiert werden können, muss der Produktionsmitarbeiter auf das System eingeschult werden. Hier gibt es interne Schulungen im Unternehmen, die bei der Belegschaft sehr gut ankommen. Hands-on werden die FTFs den Mitarbeitern vorgestellt. Diese können mit einer Fernsteuerung das FTF steuern, um so ein Gefühl für das Assistenzsystem zu bekommen. Zusätzlich wird ihnen erklärt, welchen Mehrwert so ein System bietet und wie es funktioniert, damit die Produktionsmitarbeiter Aufträge abschicken können. Innerhalb der ersten 14 Tage, die das System im Einsatz ist, gewöhnt sich die Belegschaft an die Fahrzeuge. Die Sicherheitssensorik löst in dieser Zeit öfters aus, was zu einer Unterbrechung der Fahrt führt. Diese Phase dauert in der Regel zwei Wochen. Die positive Komponente nach dieser Einführungsphase ist, dass das Fahrverhalten aus Mitarbeitersicht leicht vorhersehbar ist. Die Wege, sowie die Geschwindigkeiten sind konstant, sodass es zu keinen überraschenden Begegnungen der beiden Parteien kommt. Ein zusätzlicher Akzeptanzförderer ist es, den FTFs Namen zu geben, damit sie von den Mitarbeitern besser angenommen werden.^{292 293}

Die Umfragen im Unternehmen waren zu einem Zeitpunkt geplant gewesen, zu dem das FTF noch sehr neu im Betrieb war und noch nicht fehlerfrei funktioniert hat. Auf Basis dessen wurde diese Umfrage zu diesem Moment nicht durchgeführt. Das Feedback der Fertigung an die leitenden Angestellten war nach der Anlaufphase durchwegs positiv: *„wenn's gut geht, dann sind die Mitarbeiter sehr zufrieden und sie nehmen das System an.“*²⁹⁴ Dies spiegelt sich auch in der Anzahl der Transporte wieder, die mit dem FTF durchgeführt werden. Die Mitarbeiter sind grundsätzlich dem System positiv gestimmt, jedoch im Falle eines Fehlers, bei dem das FTF stehen bleibt und der Prozess manuell durchgeführt werden muss, ist das Frustrationslevel umso höher.²⁹⁵

Ein wichtiger Faktor ist die frühe Einbeziehung aller Produktionsmitarbeiter, die mit dem FTS in Berührung kommen. Themen wie Arbeitssicherheit (die mit

²⁹¹ vgl. Schlick et al., 2018, S.148

²⁹² vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S.116f

²⁹³ vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 9,10,12,13

²⁹⁴ Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 13

²⁹⁵ vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 13

Werksvorschriften in Konflikt geraten) und menschliche Gewöhnungsprozesse können, wenn das System zu spät vorgestellt wird, zu massiven Akzeptanzproblemen führen. Die Mitarbeiter sollten das Gefühl haben, dass sie ein Teil der zukünftigen Lösung sind und das Produkt mitgestalten. Dies führt zu einer erhöhten Akzeptanz bei der Belegschaft.²⁹⁶

Die Fertigungshalle wird in den nächsten Jahren mit Menschen und FTF existieren. Somit wird es noch länger einen hybriden Betrieb geben, in dem sich beide Parteien in der Halle entgegenkommen. Dabei gilt es eine Kollision zwischen den Menschen und den FTF zu verhindern. Hierfür unterstützen diverse Algorithmen das FTS, um einen reibungsfreien Ablauf zu gewährleisten.²⁹⁷

Abbildung 66 gibt einen Überblick über die Kompetenzen, über die Produktionsmitarbeiter in der zukünftigen Fabrik verfügen sollten. Ausgehend von einem Standpunkt aus heutiger Sicht, werden die einzelnen Komponenten evaluiert. Der Bedarf an einer FTF Lösung ist auf Basis der Kosten und Verfügbarkeit eindeutig vorhanden. In Folge dessen wird sich der Bedarf an Mitarbeitern, bezogen auf den Prozess des Transportes, reduzieren. Das Problemlösungsszenario ist heute auf einem neutralen Stand, wird jedoch mit steigender technischer Komplexität zunehmen, ebenso die Aufgabenstellungen, im Falle einer Interaktion. Die heute monotonen Aufgaben verschwinden dafür zu einem sehr hohen Prozentsatz. Planung geschieht heute, in dem der Mitarbeiter sich regelmäßig über die Auftragslage informiert, zukünftig übernimmt das FTS diese Planung. Ebenso wird die Kontrolle an das System abgegeben. Lernkuren werden für den Mitarbeiter nur im Bereich der IT vorhanden sein, im Falle eines Ausfalles. Mit dem jetzigen Stand lernt der Mitarbeiter beim Schieben der Produktwareträger ebenso nichts dazu. Das Optimierungspotential für ein komplettes FTS ist enorm und wird, sobald eine ganzheitliche Transportstrategie aufgebaut wurde, zu einer Weiterentwicklung der Technik führen. Kooperationen werden zukünftig nicht mehr stattfinden, da die Produktwareträger autonom transportiert werden. Ebenso die Kommunikation geschieht über ein FTS. IT-Kenntnisse werden von den Mitarbeitern umso mehr benötigt, um im Falle einer Störung und Neukalibrierung einer Route, behilflich zu sein.²⁹⁸

²⁹⁶ vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S.280

²⁹⁷ vgl. Cao & Zhu, 2021, S.1068 ff.

²⁹⁸ vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 12

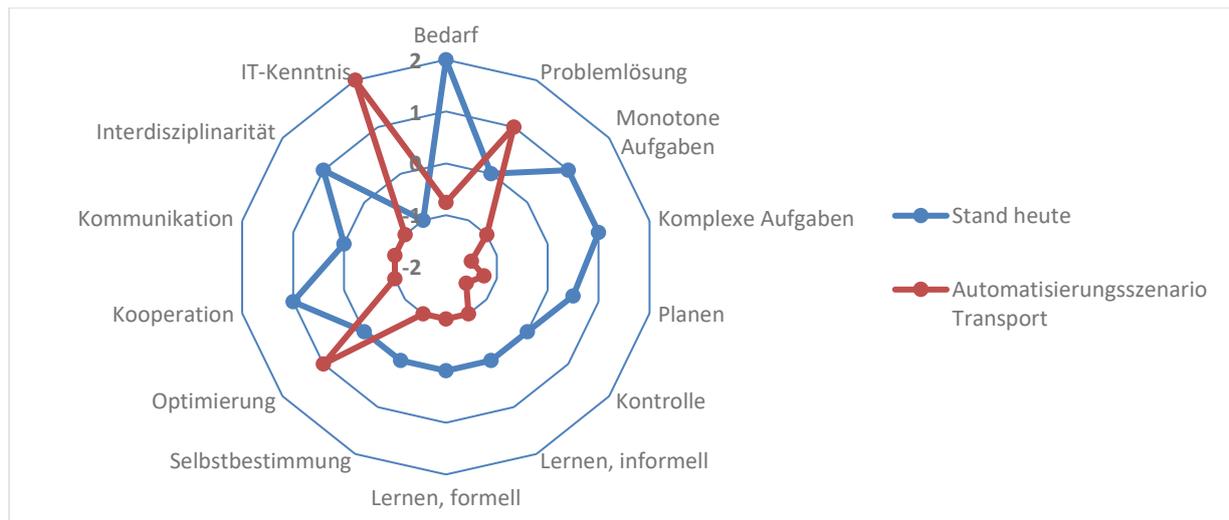


Abbildung 66: Arbeitsprofil für den Produktionsmitarbeiter

6.2.1.5 Dimension Technologie

In Bezug auf das betrachtete Assistenzsystem bei der Firma AT&S, ist ein „Technology Readiness Level“ zu bestimmen. Auf Basis der TRL Skala kann dem autonom fahrenden Fahrzeug ein Wert von 10 gegeben werden. Die notwendige Begründung beruht auf der Erfüllung der vier Kriterien im Kapitel 4.2.10.

Auf Basis der geführten Experteninterviews, mit den leitenden Angestellten im Unternehmen, werden weitere technologische Aspekte unterstrichen. Gerade in Bezug auf den Vendor Lock-In besteht eine Abhängigkeit vom Hersteller, der die autonom fahrenden Systeme zur Verfügung stellt. Im Falle der Firma AT&S, die sowohl in Europa als auch in Asien Produktionsstätten hat, ist eine Standardisierung der FTF-Systeme eine Voraussetzung. Des Weiteren gibt es auf der evaluierten Strecke einen Wechsel des Stockwerkes mit Hilfe eines Aufzuges, der von FTF und Mensch in Verwendung ist. Dies schließt weitere Hersteller aus, die nicht in der Lage sind, etagenübergreifende Lösungen anzubieten. Hinzu kommen Softwarelizenzen, die jährliche Beträge verbuchen. Im Falle, dass Ersatzteile oder neue Batterien benötigt werden, können diese nur bei dem Hersteller des gewünschten Systems nachgekauft werden. Weiters muss die Positioniergenauigkeit der FTF Systeme, im Falle der AT&S, mit einer Positioniergenauigkeit von weniger als 1 cm garantiert werden können. Der nächste Punkt in Bezug auf die Technologie des FTFs ist die Frage, wie die Objekte transportiert werden sollen. Im Falle der AT&S sind es Plattformen, die die verschiedenen Behältergrößen auf- und wieder entladen können.²⁹⁹

All jene Faktoren schränken die Auswahl des Anbieters stark ein, was wiederum in einer hohen Abhängigkeit von dem ausgewählten Produzenten endet.

²⁹⁹ vgl. Interview AT&S mit C.G. und R.T., 2021, Frage 3

6.2.2 Fazit Evaluation

Die multikriterielle Betrachtung des FTF Use-Cases des Unternehmens AT&S liefert einen Überblick über die verschiedenen Dimensionen der Implementierung hinweg. Die Betrachtung der Kosten ist ein wichtiger Faktor, der in die Bewertung miteinfließt. Alleine die Tatsache, dass sich das System mit der vereinfachten Kalkulation bereits nach einem Jahr amortisiert, spricht für die Einführung des Assistenzsystems.

Aus prozesstechnischer Sicht ist der Zeitgewinn kein ausschlaggebendes Kriterium, da das FTF die Strecke um rund 7% schneller bewältigt. Ein viel wesentlicher Faktor ist der der Verfügbarkeit. Mit allen Urlaubsansprüchen, Krankenstandtagen und den gesetzlichen 40 Stunden Arbeitssoll steht ein Produktionsmitarbeiter rund 20% der Gesamtzeit eines Jahres dem Unternehmen zur Verfügung. Das FTF schafft es hier auf 80%. Für den evaluierten Prozess benötigt man rund 4-mal so viele Personen, wie FTF, um die geforderte Menge an Produktwarenräger zu transportieren. Gerade in Bezug auf den Fachkräftemangel, ist es notwendig die Arbeitszeit der vorhandenen Mitarbeiter best möglichst zu optimieren und den Fokus auf deren Haupttätigkeiten zu legen.³⁰⁰ Hinzu kommt, dass die Betrachtung einer einzelnen Route bereits Vorteile in der Prozessoptimierung liefert. Wird ein größeres Bild betrachtet und nicht nur ein einzelner Prozess, sondern parallel bzw. vor- und nachgelagerte Transportwege miteinbezogen, kann das Optimierungspotential weit reichender sein.

Die Kompetenzen, die die Mitarbeiter in Zukunft mitbringen werden müssen, werden sich den technischen Umständen entsprechend wandeln. Für Mitarbeiter aus der Produktion werden grundlegende Schulungen notwendig sein, um sie auf Probleme vorzubereiten, die rasch und ohne großes Know-How erledigt werden können. Kommt es jedoch zu gravierenden Problemen, werden speziell ausgebildete Servicetechniker benötigt, die neue Kompetenzen mitbringen müssen. Dementsprechend länger dauert es hier, das Assistenzsystem zu implementieren und die jeweiligen Mitarbeiter darauf einzuschulen.

Ein weiteres großes Thema ist die Sicht des Anwenders, in dem Fall des Produktionsmitarbeiters. Die ergonomische Betrachtung beschränkt sich auf das Wegfallen des Fußweges, hat aber keinen Einfluss auf die Haltung oder diverse Kräfteeinwirkung auf den Mitarbeiter. Es gab im Zuge der Evaluation keine Umfrage unter den Angestellten, was die Aussagen in Bezug auf Akzeptanz und Usability nur aus qualitativer Analyse Quelle kommen lässt. Da die Gespräche nur mit Projektleitern geführt worden sind, ist von einem Bias auszugehen.

Ein weiteres Learning war, dass die Pilotversuche im kleinen Rahmen gestartet werden sollten. Bei AT&S wurde mit der Implementierung von drei FTF Systemen gestartet, es gab anfängliche Eingewöhnungsprobleme, wie dies bei vielen

³⁰⁰ vgl. Rolfs et al., 2021, S. 161

experimentellen Prozessen der Fall ist. Das Problem lag teilweise bei der Bereitstellung der Ladestationen, die zwar zahlenmäßig gleich wie bei den FTFs sind, aber durch blockierte Wege diese zum Teil nicht mehr erreichen konnten. In Folge dessen wurde das gesamte FTF System blockiert. Hinzu kommt, „*wenn man das ganze System vom Durchsatz überbelastet, dann geht die Batterie bei allen runter und dann kann es sein, dass ein AGV stehen bleiben würde.*“ Hier müssen Regeln definiert werden, damit das System weiß, wie es zu agieren hat. ^{301 302}

Das Thema Vendor Lock ist momentan ein großes Thema. Um in Zukunft unabhängiger zu sein, gilt es das System auf konturbasiert umzustellen und das notwendige Know-How aufzubauen, um die Streckenplanung eigenständig durchzuführen.

³⁰¹ Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 13

³⁰² vgl. Interview AT&S C.G. und R.T., 2021, Frage 10,12,13

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Diskussion der Ergebnisse

Mit der multikriteriellen Evaluationsmethode aus Kapitel 4.1 wurden zwei Assistenzsysteme evaluiert. Die Dimensionen Finanzen, Prozess, Erlernen & Entwickeln, Anwender und Technologie wurden hinsichtlich ihrer vorgeschlagenen Messmethoden untersucht und ausgewertet. Wie die Durchführung gezeigt hat, lassen sich das passive Exoskelett und ein FTF hinsichtlich der gewählten Dimensionen evaluieren. Eine Ebene tiefer, der beispielhaften Messmethoden, kann diese Aussage nicht pauschal getroffen werden. Je nach Datenlage lassen sich Methoden mit mehr bzw. weniger Aufwand anwenden als andere. Auch der Fokus der Schwerpunkte in Bezug auf die Kriterien kann abhängig vom System und den Zielen verschieden sein.

Ein Kernpunkt der Forschungsfrage ist, welche Methoden sich für welche Assistenzsysteme anwenden lassen. Hier gilt es zu unterscheiden, welche Grundvoraussetzungen gegeben sind und auf welche Datengrundlagen zurückgegriffen werden kann. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei physische Assistenzsysteme in einer praktischen Abhandlung evaluiert. Des Weiteren ist ein Praxisbeispiel unter Laborbedingungen, das andere im industriellen Umfeld getestet worden. Unter Laborbedingungen können alle notwendigen Messmethoden angewandt werden, der Versuchsstand kann selbst gestaltet werden und es können Teilnehmer, die nicht mit der Thematik vertraut sind und keinen Industriebezug haben, zur Evaluation eingebunden werden. Für die Evaluation im industriellen Umfeld gibt es nicht nur ein paar Versuchsteilnehmer, sondern mehrere hunderte bzw. tausende Mitarbeiter, eine Geschäftsführung und im Falle einer Aktiengesellschaft noch Aktionäre. Somit gibt es viele verschiedene Stakeholder, bei denen nicht alle dieselben Ziele anstreben. Je nach Ansatz in der hierarchischen Leiter im Unternehmen, gibt es unterschiedliche Zielvorstellungen, welche Aufgaben Assistenzsysteme haben sollen. Die Geschäftsführung, die eine stark finanzielle Betrachtung an den Tag bringt, wird die Entscheidung einer möglichen Implementierung von FTF eher auf Basis von Kennzahlen, wie dem ROI bzw. LCC treffen. Kommt es zur Befragung eines Mitarbeiters, wird die Nutzerakzeptanz eine größere Rolle spielen, um den Mitarbeiter von einer Implementierung zu überzeugen. Deswegen ist eine offene und breit angelegte Kommunikation der Veränderungen, unter Einbeziehung der betroffenen Mitarbeiter wichtig.³⁰³

Aus finanzieller Sicht sticht der kostentreibende Faktor hervor der in der Industrie, im Vergleich zum Forschungsumfeld, einen maßgeblichen Faktor für die Evaluation darstellt. Die genaue Eruiierung der anfallenden Kosten, insbesondere bei neuen

³⁰³ vgl. Franke, 2019, S. 349

Assistenzsystemen, wie dem passiven Exoskelett, sind grobe Schätzungen. Selbst mit einem vereinfachten Kostenmodell, wie es beim Exoskelett durchgerechnet wurde, muss man auf die Resultate von Langzeitstudien warten. Dennoch liegt der Fokus auf Einführungskosten und den laufenden Kosten. Im Zuge von nachhaltigeren Unternehmenskonzepten wird die End-of-Life Betrachtung von Assistenzsystemen für zukünftige Implementierungen einen großen Stellenwert einnehmen.

Für die prozessrelevante Betrachtung sind die Verfügbarkeiten, die hybride Unterstützung, sowie die Abnahme nicht wertschöpfender Tätigkeiten Faktoren, die für eine Implementierung sprechen, Prozesszeitreduktionen sind kein Fokus des betrachteten FTF-Use Cases. Hinzu kommt eine erhöhte Flexibilität der Montage- bzw. Produktionslinien, die eine höhere Anforderung für die Zukunft sein wird.³⁰⁴ Wichtige Faktoren, um diese hoch zu halten sind Anpassungsfähigkeit der Bedingungen in der Produktion, Verfügbarkeit aller notwendigen Informationen, „*Flexibilität gegenüber technologischen Anforderungen*“ und „*Flexibilität gegenüber zeitlichen und kapazitiven Anforderungen*.“³⁰⁵ Standardisierte Verfahren wie MTM dienen als optimale Methode, um SOLL Prozesse zu definieren. Diese können mit den tatsächlich gemessenen Ist-Zeiten verglichen werden, um hier Verbesserungen zu orten.

Die Anforderungen an die Mitarbeiter der Zukunft werden stetig wachsen. „*Eine Verschiebung bzw. Anpassung in den Kompetenzen*“³⁰⁶ wird notwendig sein. Kommt es bei passiven Exoskelette zu einer schnellen Implementierung beim Arbeiter, benötigt das FTS eine größere Umstellung. Neben der Eruiierung und der Verbesserungen in den Bereichen Ergonomie, Usability und Nutzerakzeptanz, wird es zu anderen Maßnahmen kommen müssen, um Mitarbeiter in der Fertigung zufrieden zu stellen. Hierbei geht es nicht nur um monetäre Wertschätzung, sondern um Themen wie „*flexible Arbeitszeiten, Entwicklungsperspektiven und Team Events*.“³⁰⁷

Die Evaluation der Anwenderdimension ist bei den beiden Use Cases ebenfalls unterschiedlich. Die ergonomische Betrachtung eines passiven Exoskeletts ist ein wichtiger Faktor in der Bewertung der Evaluation, wo hingegen das FTF keinen direkten Einfluss auf den Arbeitsschritt des Mitarbeiters hat, mit Ausnahme der Reduktion der Fußwege. Somit ist es einfacher, eine ergonomische Verbesserung durch ein passives Exoskelett nachzuweisen. Für die Eruiierung der Nutzerakzeptanz hingegen, ist es für einen Use-Case im Forschungsbetrieb einfach direktes Feedback von der betroffenen Person zu erhalten. Dies gilt ebenso für die Betrachtung der Usability.

³⁰⁴ vgl. Pistorius, 2020, S.22

³⁰⁵ vgl. Sendler. 2016. S.249ff

³⁰⁶ Tropschuh et al., 2021, S.389

³⁰⁷ ebenda

Für die Betrachtung der technologischen Aspekte der beiden Systeme, war die Evaluation ähnlich. Beide Produkte sind bereits seit längerem am Markt und bereits im Einsatz. Sie erhalten beide einen TRL von 10 und sind somit einsatzbereit. Ebenso die Betrachtung möglicher Abhängigkeiten verläuft ähnlich, mit der Durchführung einer qualitativen Analyse, um mögliche Abhängigkeiten herauszufinden.

7.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Die Ergebnisse der Evaluation sind großteils für beide Assistenzsysteme zufriedenstellend und die Messmethoden konnten ebenfalls angewandt werden. Bezogen auf die finanzielle Betrachtung erscheint die LCC Methode noch nicht reif für die beiden Implementierungen. Fehlende Langzeitdaten, sowie der Fall der Entsorgung sind für die beiden Assistenzsysteme noch nicht anwendbar. Deshalb sind die Berechnungen der ROI nur mit Vorsicht zu genießen und sollen einen guten ersten Eindruck verschaffen, wann die Amortisierung der beiden Systeme eintreten kann. Für das FTF trifft die Schätzung gut ein ³⁰⁸, für das passive Exoskelett sind viele, nicht monetär messbare Daten, die in die Berechnung einfließen.

Kommt es zu einer Evaluation eines Arbeitsplatzes bzw. eines Prozessschrittes, wird das Thema der vollständigen Automatisierung immer eine mögliche Alternative zur hybriden Fertigung sein. Die Vollautomatisierung ist für flexible Montagelinien keine Alternative. Sollten die technischen Möglichkeiten jedoch zukünftig Menschen aus immer mehr Produktionen vertreiben, ist der Ansatz einer Assistenzsystemevaluation obsolet. Aus Unternehmenssicht sind die Personalkosteneinsparungen eine gute Möglichkeit Kosten zu sparen, jedoch ist das Risiko im Falle einer Störung oder eines Ausfalles immense Kosten zu verursachen, sehr hoch. ³⁰⁹

7.3 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Mit der Tatsache, dass bei FTF in den nächsten fünf Jahren schätzungsweise rund 40% mehr zum Einsatz kommen werden, ist eine weitere Evaluation und Betrachtung des Themas wichtig. Hinzu kommen steigende Investitionen in diesem Bereich. ³¹⁰ Für Überkopfassistenzsysteme und FTF liegen die Schätzungen für die Investitionen in Produkte und Services für die nächsten drei Jahre bei 21%. ³¹¹ Gründe, die für eine Unterstützung von Assistenzsysteme sprechen, sind „*schwierig zu automatisierende Teilprozesse, (...)*“ und eine „*höhere Ergonomie für den Werker (...) im Prozess.*“ ³¹²

³⁰⁸ vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S. 161

³⁰⁹ vgl. Korge, 2018, S. 413

³¹⁰ vgl. MHI Deloitte, 2021, S. 1

³¹¹ vgl. ebenda, S.37

³¹² Buxbaum, 2020, S.22

Bezogen auf die Evaluation unter Laborbedingungen in der Pilotfabrik, könnten noch mehr Versuchsteilnehmer für die Evaluation betrachtet werden. Je mehr Teilnehmer an den Versuchen teilnehmen, desto mehr Daten sind für eine statistische Auswertung vorhanden. Hinzu kommt die große Anzahl an Personen, die nicht in der Industrie arbeitet. Hier gilt es, den Versuchsstand mit Personen aus der Industrie zu simulieren, um weitere Aussagen in Bezug auf die Evaluation treffen zu können. Insbesondere die Aussagen im Bereich des Anwenders können mit einer größeren Anzahl an Versuchsteilnehmern statistisch signifikanter getroffen werden. Langfristige Betrachtung, große Anzahl an Studienteilnehmern und eine tatsächliche Implementierung des Exoskelettes in einen Prozess in der Industrie könnten der Evaluation zusätzliche Aussagekraft geben.

Verglichen mit der Literatur sind FTF vor allem in der Elektronikindustrie gefragt, da dort die Automatisierungstechnik bereits weiter fortgeschritten ist. Genau in dieser Branche werden meist kleinere Gewichte transportiert, jedoch ist die Produktion stark flexibel ausgelegt.³¹³ Die Betrachtung weiterer Branchen und komplexerer Zusammenhänge einer gesamten FTF-Flotte, kann der Evaluation im Bereich der FTF weitere Aussagekraft verleihen. Insbesondere die Betrachtung eines ganzen Fabriklayouts, könnte der Evaluation noch mehr Gewichtung verleihen. Hinzu kommt die Einbeziehung aller betroffenen Mitarbeiter in die Umfrage und Entscheidungsfindung, um einen Bias von Seiten der leitenden Mitarbeiter minimal zu halten.

Technologien im Kontext mit Assistenzsystemen gibt es zahlreich und sie befinden sich bereits in verschiedenen Bereichen im Einsatz. Dies belegen viele Studien, die im Rahmen der Arbeit betrachtet wurden (Fraunhofer Austria Research GmbH, 2020), (Franke, et al., 2019) oder auch (Ullrich & Albrecht, 2019). Die Anbieter für die jeweiligen Assistenzsysteme werden in den nächsten Jahren stetig zunehmen, sodass Abhängigkeiten in Bezug auf Hard- bzw. Software stetig abnehmen werden und das Preisniveau in weiterer Folge ebenfalls fallen wird. Dies wird für viele KMU's die Schwelle für die erste Investition ebenfalls schmälern.

Die Anforderungen an die Mitarbeiter der Zukunft werden stetig wachsen. „*Eine Verschiebung bzw. Anpassung in den Kompetenzen*“³¹⁴ wird notwendig sein. Pauschale Aussagen sind schwierig vorherzusagen, jedoch lassen sich vier Zukunftsbilder abzeichnen, die es zukünftig geben wird. In diesem Zusammenhang gibt es zwei Diskussionen. In der ersten geht es darum, ob Tätigkeiten im Rahmen der Digitalisierung substituiert oder assistiert werden. Die zweite beschäftigt sich mit der Aufgabenkomplexität und der Qualifikation, die den Angestellten abverlangt wird, wobei es zu einer Aufwertung (Upgrading) oder einer Aufspaltung (Polarisierung)

³¹³ vgl. Ullrich & Albrecht, 2019, S.159 f

³¹⁴ Tropschuh et al., 2021, S.389

kommen kann. Werden die beiden Hypothesen kombiniert, ergeben sich vier mögliche für den Arbeitsplatz der Zukunft, wobei in Bezug auf Assistenzsysteme nur das Upgrading mit Assistenz in Frage kommt, da die anderen drei Szenarien nicht in die Diskussion der Assistenzsysteme fallen. Dabei handelt es sich um die Fach- und Wissensarbeit, bei der hochqualifizierte Arbeitskräfte durch technische Hilfssysteme unterstützt werden.³¹⁵

Das Thema der Evaluation von Assistenzsystemen ist noch nicht lange Thema wissenschaftlicher Arbeiten, rückt jedoch mit steigenden Absatzzahlen und der Notwendigkeit stetig in den Vordergrund. Wie die Evaluationen gezeigt haben, gibt es stets ein Grundgerüst, an dem sich die Evaluation für ein Assistenzsystem anleiten lassen kann, jedoch müssen diese situationselastisch mit den richtigen Methoden gespeist und adaptiert werden.

³¹⁵ vgl. Korge, 2018, S.412f.

8 Literaturverzeichnis

- Abel, J. (2011). Die flexible Produktion. *Verlag: mi-Wirtschaftsbuch Münchner Verlagsgruppe GmbH, München*, 11-17.
- Afridi, A., & Mengash, H. (2020). NASA-TLX-based workload assessment for academic resource recommender system. *Personal and ubiquitous computing*, S. 1-19. doi:10.1007/s00779-020-01409-z
- AT&S. (2020/21). *AT&S Geschäftsbericht 2020/21*. Leoben: AT&S. Von https://ats.net/de/wp-content/uploads/sites/3/2021/06/ATS_Geschaeftsbericht_2020-21.pdf abgerufen
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, S. 355-385.
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (29. 7 2008). An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 574-594. doi:10.1080/10447310802205776
- Bauer, W., Schlund, S., & Strölin, T. (2018). Modellierungsansatz für ein arbeitsplatznahes Beschreibungsmodell der "Arbeitswelt Industrie 4.0". In S. Wischmann, & E. Hartmann, *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung* (S. 147-158). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-662-49266-6
- Bischoff, J., Hegmanns, T., & Braun, S. (2015). *Erschließen der Potenziale der Potentiale der Anwendung von "Industrie 4.0" im Mittelstand: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. agiplan GmbH.
- Bornewasser, M., & Hinrichsen, S. (2020). *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage*. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag.
- Bowman, D., & McMahan, R. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 36-43.
- Britzke, B. (2010). *MTM in einer globalisierten Wirtschaft*. München: mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch Verlag GmbH.
- Brooke, J. (30. 11 1995). SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*
- Burggräf, P., & Schuh, G. (2021). *Fabrikplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-61969-8
- Buxbaum, H.-J. (2020). *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Gabler.

- Cao, X., & Zhu, M. (2021). Research on global optimization method for multiple AGV collision avoidance in hybrid path. *Optimal Control Applications and Methods*, S. 1064-1080.
- de Looze, M., Krause, F., & O'Sullivan, L. (2017). The Potential and Acceptance of Exoskeletons in Industry. *Wearable Robotics: Challenges and Trends* (S. 195-199). Cham: Springer International Publishing.
- Deutinger, G. (2017). Emotionen im Change und ihre kommunikative Bewältigung. In G. Deutinger, *Kommunikation im Change: Erfolgreich kommunizieren in Veränderungsprozessen* (S. 45-66). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-53687-2_3
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). (2016). *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). (2019). DIN EN ISO 9241-210:2019. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). (2019). DIN EN ISO 9241-220:2019. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 220: Prozesse zur Ermöglichung, Durchführung und Bewertung menschenzentrierter Gestaltung für interaktive Systeme in Hersteller- und Betreiberorganisationen*.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). (12 2020). DIN 33402-2. *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*.
- DGUV Fachbereich Handel und Logistik. (18. 04 2019). Einsatz von Exoskeletonen an gewerblichen Arbeitsplätzen. Berlin, Berlin.
- Dietz, T., Pott, A., Hägele, M., & Verl, A. (2015). Knowledge-based cost engineering for industrial robot systems. *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (S. 1200-1205). Gothenburg, Sweden: IEEE.
- Domschke, W., & Klein, R. (2004). Bestimmung von Opportunitätskosten am Beispiel des Produktionscontrolling. *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung*, S. 275-294.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., & Jung, B. (2013). *Virtual und Augmented Reality*. Springer: Berlin und Heidelberg.
- Drew, M., Falcone, B., & L. Baccus, W. (2018). What Does the System Usability Scale (SUS) Measure? *Design, User Experience, and Usability: Theory and Practice* (S. 356-366). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-91797-9_25

- Eurofound. (2017). *Seventh European Working Conditions Survey - Overview report (2017 update)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Everitt, B. (1977). *The analysis of contingency tables*. London: Chapman and Hall.
- Festo. (2016). *APPsist-Einführungsleitfaden*.
- Franke, J., Müller, R., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A., & Verl, A. (2019). *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. München: Carl Hanser Verlag.
- Fraunhofer Austria Research GmbH. (2020). *Exoskelette in Produktion und Logistik*. Fraunhofer Austria Research GmbH. Von <https://www.fraunhofer.at/de/zusammenarbeit/advanced-industrial-management/cobots-und-physische-assistenzsysteme/Exoskelette.html> abgerufen
- Fritzsche, L., Wegge, J., Schmauder, M., Kliegel, M., & Schmidt, K.-H. (15. 1 2014). Good ergonomics and team diversity reduce absenteeism and errors in car manufacturing. *Ergonomics*, S. 148-161. doi:10.1080/00140139.2013.875597
- Galletta, A. (2013). *Mastering the Semi-Structured Interview and Beyond*. New York University Press. doi:doi:10.18574/9780814732953
- Garz, D. (1991). *Qualitativ-empirische Sozialforschung: Konzepte, Methoden, Analysen*. Opladen: Westdeutscher Verlag GmbH.
- Geldermann, J., & Lerche, N. (2014). *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung*. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen. Von <https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/285813337d59201d34806cfc48dae518-en.pdf/MCDA-Leitfaden-PROMETHEE.pdf> abgerufen
- Gronau, N. (2010). ERP-Auswahl mittels Rol-Analyse–Risikoreduzierung und Nutzensteigerung. *ERP Management*, S. 17-20.
- Hart, S. (2006). *Nasa-task load index (Nasa-TLX); 20 years later*. doi:10.1177/154193120605000909
- Hellmann, W., Marino, D., Megahed, M., Suggs, M., Borowski, J., & Negahban, A. (2019). Human, AGV or AIV? An integrated framework for material handling system selection with real-world application in an injection molding facility. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 815-824. doi:10.1007/s00170-018-2958-x
- Heyse, V., & Erpenbeck, J. (2007). *Kompetenzmanagement: Methoden, Vorgehen, KODE® und KODE® X im Praxistest*. Waxmann Verlag.

- Hinrichsen, S., Riediger, D., & Unrau, A. (2016). *Assistance Systems in Manual Assembly*. Lemgo: OWL University of Applied Sciences.
- Hold, P. (2020). *Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage*. Wien.
- Hold, P., Erol, S., & Reisinger, G. (9 2017). Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. *Procedia Manufacturing*, S. 143-150.
- Hoshino, S., Ota, J., Shinozaki, A., & Hashimoto, H. (2007). Hybrid Design Methodology and Cost-Effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, S. 360-372. doi:10.1109/TASE.2006.887162
- Howard, J., Murashov, V., Lowe, B., & Lu, M.-L. (Issue 3. Volume 63 2020). Industrial exoskeletons: Need for intervention effectiveness research. *American journal of industrial medicine*, S. 201-208.
- Hunt, V., Prince, S., Dixon-Fyle, S., & Yee, L. (Jänner 2018). *Delivering through Diversity*. Von <https://www.mckinsey.com/https://www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/delivering-through-diversity> abgerufen
- Hütter, D., & Stigler, H. (2012). Kosten und Bepreisungsmodelle einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für Österreich. *12. Symposium Energieinnovation*. Graz: TU Graz.
- Karahanna, E., & Srite, M. (2006). The Role of Espoused National Cultural Values in Technology Acceptance. *MIS Quarterly*, 679-704. doi:10.2307/25148745
- Keller, T., Bayer, C., Bausch, P., & Metternich, J. (2019). Benefit evaluation of digital assistance systems for assembly workstations. *Procedia CIRP* (S. 441-446). Elsevier B.V.
- Kinne, S., Bednorz, N., Kretschmer, V., & Griese, L. (2021). Reality-Based Laboratory for Exoskeleton Studies in Logistics. *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)* (S. 475-482). Cham: Springer International Publishing.
- Kleineberg, T., Hinrichsen, S., Eichelberg, M., Busch, F., Brockmann, D., & Vierfuß, R. (2017). *Leitfaden: Einführung von Assistenzsystemen in der Montage*.
- Korge, A. (2018). Vier realistische Zukunftsbilder für Arbeit 4.0. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, S. 411-414.

- Kraiss, K.-F. (1998). Benutzergerechte Automatisierung – Grundlagen und Realisierungskonzepte. *at - Automatisierungstechnik*, S. 457-467. doi:10.1524/auto.1998.46.10.457
- Krause, D., & Gebhardt, N. (2018). *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-53040-5
- Kunze, T. (2019). *Entwicklung und Evaluierung eines Grobscreenings zur Anwendung von EAWS-Sektion 4 in der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-27893-9
- Kuschefski, A., Haasper, M., & Vallese, A. (2010). Advanced Rider Assistance Systems for Powered Two-Wheelers (ARAS-PTW) . *Forschungshefte Zweiradsicherheit*.
- Lavatelli, I., Schaub, H.-H., & Caragnano, G. (1. 1 2012). Correlations in between EAWS and OCRA Index concerning the repetitive loads of the upper limbs in automobile manufacturing industries. *Work*(41), S. 4436-4444.
- Lindwedel-Reime, U., Röhl, N., Lautenschläger, S., Gradel, C., Kunze, C., & König, P. (2016). *Effekte und Nutzen altersgerechter Assistenzsysteme (ENAS): Leitfaden für die Planung und Durchführung von Studien zur Evaluation neuer technischer Assistenzsysteme in Forschungs- und Entwicklungsprojekten*. doi:10.13140/RG.2.2.30324.76164
- Lotter, B., & Wiendahl, H.-P. (2012). *Montage in der Industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.
- Maurice, P., Čamernik, J., Gorjan, D., Schirrmeister, B., Bornmann, J., Tagliapietra, L., . . . Babič, J. (2020). Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, S. 152-164. doi:10.1109/TNSRE.2019.2945368
- Mayrhofer, W., Kames, D., & Schlund, S. (2020). *Made in Austria: Produktionsarbeit in Österreich 2020*. Wien: Technische Universität Wien.
- MHI Deloitte. (2021). *2021 MHI Annual Industry Report*. Von <https://www.mhi.org/publications/report> abgerufen
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1. 1 1994). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telem manipulator and Telepresence Technologies*, S. 282-292.

- Mohamad Said, M., & Ismail, N. (2. 11 2007). Overview of open source augmented reality toolkit. *1st International Malaysian Educational Technology Convention*, S. 1144-1149.
- Mori, M., MacDorman, K., & Kageki, N. (1. 6 2012). The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, S. 98-100. doi:10.1109/MRA.2012.2192811
- MTM ASSOCIATION e.V. (2019). MTM-1 Lehrgangsunterlagen. Hamburg: Eigenverlag MTM ASSOCIATION e.V.
- MTM ASSOCIATION e.V. (2019). *MTM-UAS Lehrgangsunterlagen*. Hamburg: Eigenverlag MTM ASSOCIATION e.V.
- NASA. (1986). Task Load Index (TLX) v. 1.0 Manual. *NASA, NASA-Ames Research Center Moffett Field*.
- Ottobock. (2018). *Ottobock.com*. Von Ottobock: <https://www.ottobock.com/de/newsroom/media/medieninformationen-exoskelett-paexo/> abgerufen
- Pelzmann, H. (2011). Arbeitsrecht in Österreich. In M. Henssler, & A. Braun, *Arbeitsrecht in Europa* (S. 927-944). Verlag Dr. Otto Schmidt. doi:<https://doi.org/10.9785/ovs.9783504381875.927>
- Peshkin, M., & Colgate, J. (1999). Cobots. *Industrial Robot: An International Journal*, S. 335-341.
- Petzoldt, C., Keiser, D., Siesenis, H., Beinke, T., & Freitag, M. (2021). Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen der Mensch-Roboter-Kollaboration. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 8-15. doi:10.1515/zwf-2021-0002
- Pistorius, J. (2020). *Industrie 4.0 -- vierte Industrielle Revolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ploeg, J., Knaap, A., & Verburg, D. (2002). ATS/AGV-design, implementation and evaluation of a high performance AGV. *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE*, S. 127-134. doi:10.1109/IVS.2002.1187940
- Ragan, E., Sowndararajan, A., Kopper, R., & Bowman, D. (2010). The Effects of Higher Levels of Immersion on Procedure Memorization Performance and Implications for Educational Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 527-543.
- Reinhart, G. (2017). *Handbuch Industrie 4.0 : Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser.

- Rolfs, L., Schweers, D., Hoppe, N., Petzoldt, C., Shahwar, Z., & Freitag, M. (2021). Integration eines omnidirektionalen FTF in eine Produktionsprozesssteuerung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, S. 161-165. doi:10.1515/zwf-2021-0032
- Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J., & Fasth Åsa, F.-B. (3. 9 2016). The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. doi:10.1007/978-3-319-51133-7_80
- Roßnagel, A., Laue, P., & Peters, J. (2009). *Delegation von Aufgaben an IT-Assistenzsysteme*. Wiesbaden: Gabler.
- Rupprecht, P., Kueffner-Mccauley, H., & Schlund, S. (1-3. 07 2020). Information provision utilizing a dynamic projection system in industrial site assembly. *Procedia CIRP*, S. 1182-1187.
- Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schlund, S., & Mayrhofer, W. (kein Datum). Assistenzsysteme in der Produktion 1. 2019. TU Wien - Institut für Managementwissenschaften.
- Schlund, S., Mayrhofer, W., & Rupprecht, P. (2018). Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 72, S. 276-286. doi:https://doi.org/10.1007/s41449-018-0128-5
- Schmalz, T., Bornmann, J., Schirrmeister, B., Schändlinger, J., & Schuler, M. (2019). Prinzipstudie zur Wirkung eines industriellen Exoskeletts bei Überkopfarbeit. *Orthop. Tech*, S. 36-41.
- Schmauder, M., & Spanner-Ulmer, B. (2014). *Ergonomie : Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. München: Hanser.
- Seifert, R., Kay, M., & Wilson J. (15. November 1998). Evaluation of AGV routing strategies using hierarchical simulation. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/002075498193057
- Sendler, U. (2016). *Industrie 4.0 grenzenlos*. Springer.
- Sheridan, T., & Verplank, W. (1978). *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*. Marine Engineering Human Factors Engineering and Man Machine Systems.

- Slater, M., Lotto, B., Arnold, M., & Sanchez-Vives, M. (2009). How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement. *Anuario de psicología*, S. 193-210.
- Stockmann, R. (2004). *Was ist eine gute Evaluation? Einführung zu Funktionen und Methoden von Evaluationsverfahren*. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, Fak. 05 Empirische Humanwissenschaften.
- Straub, J. (2015). In search of technology readiness level (TRL) 10. *Aerospace Science and Technology*, S. 312-320.
- Todorovic, O., Constantinescu, C., & Popescu, D. (September 2018). Foundations for economic evaluation of exoskeletons in manufacturing. *Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, S. 221-230.
- Toniolo, S., Tosato, R., Gambaro, F., & Ren, J. (2020). Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment. In J. Ren, & S. Toniolo, *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making* (S. 39-56). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00003-8>
- Tropschuh, B., Dillinger, F., Korder, S., Maier, M., Gärtner, Q., & Vernim, S. (2021). Industrie 5.0 – ein menschenzentrierter Ansatz: Ansätze zur flexiblen und menschenzentrierten Einbindung und Unterstützung der Mitarbeitenden in der digitalisierten und vernetzten Produktion der Zukunft. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, S. 387-392. doi:10.1515/zwf-2021-0091
- Ullrich, G., & Albrecht, T. (2019). *Fahrerlose Transportsysteme*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- VDI-Fachbereich Technische Logistik. (2005). *Compatibility of Automated Guided Vehicle Systems (AGVS) - AGVS guidance control system (VDI 4451 Blatt 7)*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik.
- Weidner, R. (2016). *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen (Band zur zweiten transdisziplinären Konferenz 2016)*. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität.
- Weißfloch, U., Lerch, C., & Kinkel, S. (2010). Produktionskostensenkung durch LCC-Konzepte. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 791-795.
- Zigart, T., & Schlund, S. (2020). Multikriterielle Evaluation von industriellen Assistenzsystemen. *Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020*. Berlin.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: MTO-Konzept	11
Abbildung 2: Serielle Arbeitsteilung	13
Abbildung 3: Parallele Arbeitsteilung	14
Abbildung 4: Parallelredundant mit menschlicher Überwachung	14
Abbildung 5: Parallelredundant mit maschineller Überwachung	14
Abbildung 6: Klassifikation der Eingriffsarten.....	14
Abbildung 7: Projektphasen eines Implementierungsprojektes	20
Abbildung 8: Morphologie für Assistenzsysteme, angepasst nach Prof. Schlund auf Basis von Weidner, Hinrichsen, Kuschefski, Kraiss und Romero (siehe Fußnote)	24
Abbildung 9: Definition der Zusammenarbeitsgrade von Menschen und Roboter	31
Abbildung 10: Interaktionsraum Mensch – Roboter	32
Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung des RV Kontinuums	32
Abbildung 12: Stufen der Immersion	33
Abbildung 13: Teilsysteme eines VR-Systems	34
Abbildung 14: VR versus AR	35
Abbildung 15: Schematischer Überblick eines Dynamischen Projektionssystems ...	35
Abbildung 16: MTM-Grundzyklus	38
Abbildung 17: Strukturschema menschlicher Arbeit	38
Abbildung 18: Konzept zur Evaluation von industriellen Assistenzsystemen	43
Abbildung 19: Einführung MRK nach Franke.....	43
Abbildung 20: 3-Phasen-Modell nach Lewin und mögliche Medien zur Interaktion ..	46
Abbildung 21: Evaluation von MRK basierend auf Franke	49
Abbildung 22: Modifizierter Idealtypischer Evaluationsprozess	51
Abbildung 23: Evaluation nach ENAS	54
Abbildung 24: Grafische Darstellung Petzold Modell.....	56
Abbildung 25: Methode zur Planung und Evaluation von digitalen Assistenzsystemen	57
Abbildung 26: Testszenerien der unterschiedlichen Use-Cases	60
Abbildung 27: Grafische Darstellung des Modells nach Keller	61
Abbildung 28: Modellansatz für ein arbeitsplatznahes Beschreibungsmodell der "Arbeitswelt Industrie 4.0"	64
Abbildung 29: Automatisierungsszenario vs. Werkzeugszenario - Mögliches Arbeitsprofil für einen Monteur in unterschiedlichen Szenarien	65
Abbildung 30: Vorgeschlagenes Modell	67
Abbildung 31: Überblick der betrachteten Dimensionen	67
Abbildung 32: Evaluationsmodell, eigene Darstellung an	69
Abbildung 33: Kostenverteilung über einen Lebenszyklus einer Roboteranlage und Potentiale durch den Einsatz von MRK	71

Abbildung 34: Bewertung nach MTM-UAS	73
Abbildung 35: Grundkompetenzen“	75
Abbildung 36: Kompetenzatlas nach KODE mit beispielhafter Hervorhebung von Schlüsselkompetenzen	76
Abbildung 37: Gesamt-SUS Ergebnis	80
Abbildung 38: Überkopf-Montage Volkswagen	82
Abbildung 39: Überkopf-Montage Volkswagen Teil 2	82
Abbildung 40: Versuchsstand in der Pilotfabrik	83
Abbildung 41: Fünf Ösen	83
Abbildung 42: Kabel 1 für die Beleuchtung des Hecks	84
Abbildung 43: Kabel 2	84
Abbildung 44: Motherboard Anschluss	84
Abbildung 45: L-Förmige Röhre.....	84
Abbildung 46: Anschlusskabel mit Drehverschluss	85
Abbildung 47: Kabelmontage.....	85
Abbildung 48: Versuchsdurchführung nach BPMN Darstellung.....	86
Abbildung 49: Geschlechterverteilung	87
Abbildung 50: Höchster Bildungsabschluss.....	87
Abbildung 51: Altersverteilung	87
Abbildung 52: Vereinfachter Prozess des Transportes nach BPMN Darstellung.....	88
Abbildung 53: FTF-Route 1.Stock	90
Abbildung 54: FTF-Route 2.Stock	90
Abbildung 55: ROI passives Exoskelett Use-Case	94
Abbildung 56: Zeitgliederung Montageprozess Exoskelett PF	96
Abbildung 57: Vergleich NASA-RTLX Scores mit und ohne Exoskelett	101
Abbildung 58: Vergleich NASA-RTLX Score mit und ohne Exoskelett der einzelnen Teilnehmer.....	101
Abbildung 59: Durchschnitt SUS-Wert der Fragen 1-10	102
Abbildung 60: SUS-Score Exoskelett	102
Abbildung 61: Komptabilität mit bisheriger Technologieerfahrung	103
Abbildung 62: Komptabilität mit den eigenen Werten	104
Abbildung 63: Komptabilität mit den eigenen Präferenzen	104
Abbildung 64: ROI für die FTF Implementierung	116
Abbildung 65: SOLL-Zustand FTF	118
Abbildung 66: Arbeitsprofil für den Produktionsmitarbeiter	124
Abbildung 67: EAWS-Formblatt 1	155
Abbildung 68: EAWS-Formblatt 2	156
Abbildung 69: EAWS-Formblatt 3	157
Abbildung 70: EAWS-Formblatt 4	158
Abbildung 71: NASA-TLX Sheet.....	159
Abbildung 72: Anleitung Exoskelett Use-Case 1	160

Abbildung 73: Anleitung Exoskelett Use-Case 2	160
Abbildung 74: Anleitung Exoskelett Use-Case 3	161
Abbildung 75: Anleitung Exoskelett Use-Case 4	161
Abbildung 76: Anleitung Exoskelett Use-Case 5	162
Abbildung 77: Anleitung Exoskelett Use-Case 6	162
Abbildung 78: Anleitung Exoskelett Use-Case 7	163
Abbildung 79: Anleitung Exoskelett Use-Case 8	163
Abbildung 80: Anleitung Exoskelett Use-Case 9	164
Abbildung 81: Anleitung Exoskelett Use-Case 10	164
Abbildung 82: Anleitung Exoskelett Use-Case 11	165
Abbildung 83: Anleitung Exoskelett Use-Case 12	165
Abbildung 84: Anleitung Exoskelett Use-Case 13	166
Abbildung 85: Serviceleistungen für Paexo Shoulder	166
Abbildung 86: Krankenstandfälle, -dauer und -tage 2019 nach Geschlecht, Alter und Wirtschaftsabschnitt	167
Abbildung 87: Absatz Exoskelette von 2015 bis 2025	168
Abbildung 88: Nettojahreseinkommen nach Gewerbe 2019	169

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung TMU	37
Formel 2: Berechnung OEE	59
Formel 3: Mitarbeitertagesatz	92
Formel 4: Ausfallkosten Mitarbeiter	92
Formel 5: Gesamtausfallkosten	92
Formel 6: Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit	93
Formel 7: Jährliche Kosten mit passivem Exoskelett.....	94
Formel 8: Verfügbarkeit des Menschen	114
Formel 9: Jährliche Kosten für das Personal	115
Formel 10: Notwendige FTF pro Schicht	120
Formel 11: Notwendige Menschen pro Schicht	120

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Exoskeletten	27
Tabelle 2: Kategorien FTF	29
Tabelle 3: MTM Grundbewegungen	37
Tabelle 4: Anwendung von Erkenntnissen der Ergonomie	39
Tabelle 5: Unterscheidung der Prozesse	60
Tabelle 6: Beschreibungsdimensionen des Modellansatzes	62
Tabelle 7: Risikobewertung nach EAWS	77
Tabelle 8: Kostentabelle für den Use-Case	93
Tabelle 9: ROI Berechnung PF Use-Case.....	94
Tabelle 10: Auswertung Zeitaufnahme Use-Case Pilotfabrik	94
Tabelle 11: Zeitmessung Montageprozess Exoskelett PF	96
Tabelle 12: Prozessbewertung nach MTM	96
Tabelle 13: Vergleich der beiden Durchführungen	102
Tabelle 14: Kontingenztafel Arbeitsverhältnis und Expertise in Zusammenhang mit AS.....	106
Tabelle 15: Kontingenztafel Performance und SUS-Score	107
Tabelle 16: Kontingenztafel Performance und Alter	107
Tabelle 17: Kontingenztafel Performance und Geschlecht	108
Tabelle 18: Investitionen in einer FTS-Kalkulation	110
Tabelle 19: Direkte Kosten in einer FTS-Kalkulation	110
Tabelle 20: Indirekte Kosten in einer FTS-Kalkulation	111
Tabelle 21: Zusatznutzen eines FTS	111
Tabelle 22: Kostenaufstellung FTF-System	115
Tabelle 23: ROI-Werte für das FTF	115
Tabelle 24: Prozesszeiten FTF und Mensch	119
Tabelle 25: Vergleich FTF-Use Case	120

12 Abkürzungsverzeichnis

AGV	Autonomous guided vehicle
AHP	analytischer Hierarchieprozess
AIV	Automated intelligent vehicle
AR	Augmented Reality
BPMN	Business Process Model and Notation
CPS	Cyber-Physische Systeme
EAWS	Ergonomic Assembly Worksheet
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FTE	Full-time equivalent
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
HCD	Human-centred design
IoT	Internet of Things
LCC	Life-Cycle Costing
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankung
MTM	Methods-Time-Measurement
OEE	overall equipment effectiveness
PLM	Product Lifecycle Management
ROI	Return on Investment
TBS-GA	Tätigkeitsbewertungssystem – Geistige Arbeit
TMU	Time Measurement Unit
VR	Virtual Reality

13 Anhang

13.1 Transkription des semi-strukturieren Interviews

Das Interview wurde am 16.07.2021 durchgeführt mit:

- Christoph Groß
- Rene Triller

Fabriksgasse 13,
8700 Leoben

Frage 1: Was sind die Erwartungen bei der Einführung des Systems?

Christoph Groß.: Grundsätzlich erwarten wir uns bei der Einführung eines AGV Systems Unterstützung der Operation, eine Entlastung der Mitarbeiter, hohe Verfügbarkeit, automatisierte Transporte, generell einen höheren Automatisierungsgrad in der Fertigung.

Frage 2: Welche Ziele sollen erreicht werden? (Auf Kriterienbasis)

C.G.: Wir sind es etwas anders angegangen. Auch wir haben einen Use-Case definiert. Wir haben automatisierte Puffersysteme und unterschiedliche Produktionsbereiche. Wir haben einen manuellen Transport zwischen den Transportbereichen und wir möchten diesen zukünftig automatisieren. Und basierend auf den Produktionsmengen, die in der Linie sind, basierend auf den Aufträgen, die dort gefertigt, berechnen wir die benötigten AGVs. Daraus spezifizieren und definieren wir das gesamte AGV System.

Frage 3: Life-Cycle Cost Ansatz. Vom Investment, bis zu Amortisation im Betrieb. Welche Phasen berücksichtigen Sie bisher, mit welchen Kosten rechnen Sie ca.? Gibt's bereits erste Rechnungen?

Rene T.: LCC, wir haben eher Benefits Berechnungen gemacht. Es geht eher um die Zeitersparnisse durch die Transporte und genauso die Flächen, die wir uns jetzt durch das Puffersystem ersparen würden, wenn man mehrere solcher Systeme zum Puffern implementiert. Auch wie diese AGVs leichter an die Puffersysteme kommen, denn die AVGs haben einen gewissen Sicherheitsradius, der immer berücksichtigt werden muss, damit das Assistenzsystem mit der höchsten Geschwindigkeit fahren kann. Das war bei den Benefits-Berechnungen ein Thema.

Auch mit den Kosten der Supplier: was kostet ein AGV, mit welchem Betrag müssen wir rechnen, die ganze Infrastruktur. WLAN zum Beispiel, das muss flächendeckend sein. Man muss schauen, dass IO Devices für Lift, Türen und alle möglichen Teile und Systeme, die geöffnet werden müssen, für das AGV vorhanden sind. Genauso Servicekosten. Das sind Dinge, die wir hochgerechnet haben und mit dieser Benefits Berechnung gegenübergestellt haben.

R.T.: Wie schon erwähnt haben wir einen Use-Case definiert. Das sind die IO Devices, die wir für diese Strecke benötigen. Noch ein großes Thema ist die Batterie, Ladezyklen, wie lange hält die Batterie, wie viel kostet eine Batterie, das sind auch alles Erfahrungswerte durch unser jetziges System, wo wir schon mehr im Detail fragen. Das war dann bei einer Neuanschaffung ein Thema, die Batteriekosten miteinzubeziehen. Genauso Ladestationen. Hinzu kommen noch Positionierungsgenauigkeiten. Die Geräte fahren ca. auf 10mm Genauigkeit brauchen dafür aber manchmal Hilfsmittel. Das kann ein Magnet sein, der im Boden eingesetzt ist, oder ein Positionierdreieck, das eine Zentrierung macht. Das sind Dinge, die man sich bei den Kosten ansehen muss. Wie viele von diesen Dingen benötige ich und genauso auch von der Inbetriebnahme her. Linienbasierte Systeme haben das Problem, dass für jede Routenveränderung ein Servicetechniker kommen muss, weil er eben Magnete oder Programmierung für virtuelle Punkte im Raum machen muss, damit es wieder passt. Das kann für manche Werke schwierig sein, weil das ziemlich kostspielig ist, weil man hier viele Maschinen umstellen muss, weil sich die Routen verändern. Das wäre bei einem Konturbasierten System nicht mehr der Fall. Hier stellt sich die Frage ob man für einen neuen Weg den Servicetechniker holen muss, oder ob das unser Mitarbeiter kann. Sind schon einige Punkte die aufkommen, die man berücksichtigen muss.

Frage 4: Bezüglich einer markanten Route, welche würde sich hier gut eignen? Warum, bzw. was sind hier die Stolpersteine beziehungsweise Knackpunkte?

R.T.: Vom Technologischen macht es einen gewaltigen Unterschied, ob es einen Lift gibt oder nicht. Sind es ein oder zwei Stöcke, oder doch mehr? Viele Hersteller können nicht Lift fahren, weil sie das Kartenmaterial wechseln müssen. Es geht nämlich immer um den Referenzpunkt. Es hat immer einen Nullpunkt für das AGV, weil es sich immer anhand eines Koordinatensystems orientiert. Der Lift erschwert die ganze Sache. In der Intralogistik fahren die AGVs meist auf einer Ebene weshalb das viele Hersteller nicht machen. **Output/Input, wie viele Teile müssen pro Schicht auf dieser Route transportiert werden? Vergleich zwischen Mensch und AGV**

R.T.: Hängt sehr stark von der Programmierung des AGVs ab. Wenn Sie sich ein automatisiertes Puffersystem vorstellen, wenn die Software dafür so intelligent ist, und sagt jetzt habe ich einen Behälter bekommen, und jetzt schicke ich ihm gleich diesen Behälter mit. Hier geht es darum, dass das System die Hin- und Rückwege wirtschaftlich nutzt, dann ist das AGV natürlich besser. Wenn das AGV nicht so intelligent ist und nur eine gewisse Liste abarbeitet ohne intelligentes System dahinter, dann wird der Mensch schneller sein, weil er mitdenkt. Bei einem Bottleneck wie dem Lift, in den 2 oder mehr Personen können, kann im Falle des AGVs nur eines rein da es sich mittig im Lift positioniert.

Weiterer Vorteil beim AGV ist die Batterielaufzeit. Das kann auch außerhalb der Schicht, unbegleitet fahren, wo es Behälter innerhalb der Puffersysteme hin und her transportiert. Genauso die Anfälligkeit gegenüber Hindernissen.

Frage 5: Flexibilität im Falle eines Ausfalles, hätte man Alternative bzw einen Menschen der Worst-Case hier einspringen könnte?

R.T.: Es gibt keine andere Alternative, da wird er Mensch eingreifen.

C.G.: Unsere Systeme sind so designed, dass der Mensch und die Maschine die Aufgabe erledigen können.

Frage 6: Thema Prozessqualität: Gebe es eine Rechnung/Schätzung wie sich die Fehlerrate verschlechtert/verbessert? Passieren momentan Fehler durch MA auf den Wegen?

R.T.: Ich denke, das wird gleich sein. Der Mensch wird länger brauchen, weil er andere Wege nimmt. Das AGV fährt konsequent seine Route, bringt es von A nach B und da kann man die Zeit genau vorhersagen für diesen Transport. Beim Menschen kann eine andere Tätigkeit dazwischenkommen, was dann zu unterschiedlichen Zeiten führen kann.

Frage 7: Gegebenenfalls wäre eine Gegenrechnung für einen möglichen Hinzugewinn an Fläche zu denken? Bei einem völlig automatisierten Puffersystem kann eventuell der Lagerplatz minimiert werden, was wiederum mehr Platz für Fertigungsinseln, Maschinen Stellplätze, etc... bedeuten würde. Habt ihr hier schon mal darüber nachgedacht, oder ist der hinzugewonnene Platz so klein, dass er vernachlässigt werden kann?

C.G.: Ja, dazu wurden bereits Benefit Berechnungen durchgeführt. Durch automatisierte Puffersysteme könnten wir in diesen Bereichen sehr schnell 40 – 50m² an Produktionsfläche gewinnen. Dies ist möglich da die Raumhöhen bei automatisierten Puffersystemen ausgenutzt werden können.

Frage 8: Wie kann man hier den Unterschied zwischen manuellem und autonomem Transport am besten beschreiben?

R.T.: Die Andockmöglichkeiten haben immer beide, manueller Transport und AGV, um auch flexibel zu bleiben. Im Falle eines Ausfalls z.B. Die Flottenmanagement Software kümmert sich darum, dass im Falle eines Ausfalles ein anderes AGV den Transport übernimmt. Wenn es am Weg zum Auftrag passiert, wird es einfach ersetzt und ein anderes fährt hin. Wenn bereits ein Behälter drauf ist, muss ein Servicemitarbeiter eingreifen.

Frage 9: Die Frage nach den Personen/die Person, die die AGV betreiben/warten wäre noch zu klären. Welche Leute kümmern sich um Programmierung, Wartung und Service?

R.T.: Aktuell beim jetzigen System sind die Mitarbeiter geschult, dass es im Falle eines Ausfalls und einem Stillstand mitten im Weg, die AGVs auf die Seite schieben. Es ist in diesem Fall eingebremst und muss gelöst werden, damit es bewegt werden kann. Oder den Carrier runterholt, das wissen die Mitarbeiter der Produktion. Den Abtransport und die Reparatur übernimmt der Wartungstechniker. Die sind soweit geschult, kennen sich mit den Systemen aus. Die Programmierung der jetzigen Systeme ist schwierig, da es ein linienbasiertes System ist, das muss ein Servicetechniker vom Hersteller machen. Programmierung würde von uns nicht durchgeführt werden.

C.G.: Auch in Zukunft, wir übernehmen primär das Service, die Wartung, wir betreiben das System. Und wenn einmal ein Konturbasiertes System kommt, möchten wir selbst zumindest neue Anfahrpunkt definieren können.

R.T.: Die neuen Systeme sind viel benutzerfreundlicher. Man kann sich das vorstellen, dass man ein Servicekabel an das AGV ansteckt und dann mit einem Joystick man durch die Fertigung fahren kann. Währenddessen werden die Räumlichkeiten gescannt. Diese Karte, die dann aufgezeichnet wird, wird in den Flottenmanager geladen und somit hat es dann jedes AGV. Das wäre dann ein Kartenupdate. Dies sind Dinge, die man in einer Schulung auch unseren Wartungstechnikern dann auch übertragen kann. Damit man nicht abhängig vom Hersteller ist. Vor allem in Bezug darauf, wenn sich Maschinenpositionen ändern, macht das Sinn.

Frage 10: Wie werden die Leute auf solche Systeme eingeschult und wie lange würde das dauern?

R.T.: Bei uns werden die Mitarbeiter nicht unterteilt. Das sind alles Produktionsmitarbeiter, die an den Maschinen arbeiten, die haben eine Einschulung bekommen. Intern oder vom Inbetriebnahme Techniker. Aus meiner Sicht wird das System sehr gut angenommen von den Personen. Das wurde in den Prozess miteingebaut. Da gibt es Übergabestellen aktuell, wo der Mitarbeiter diesen Behälter zur Verfügung stellt, das AGV dockt an, da gibt's einen fixen Prozess, auch eine Prozessbeschreibung, wie das abläuft. Und das funktioniert soweit. Sollten dann irgendwelche Probleme auftreten oder der Mitarbeiter nicht weiß wie er damit umgeht, dann würde er einen Wartungstechniker anrufen, das ist im Prozess definiert. Ich denke, dass bei uns im Betrieb neue Systeme sehr gut angenommen werden, da es immer wieder Schnittstellen gibt, die eine Einstellung der Automatisierung bedarf.

C.G.: Diese Schulung für Störungsbehebung wird vom Hersteller gemacht, im Zuge dieser Inbetriebnahme. Diese dauert einen halben Tag bis Tag. Da werden unterschiedliche Szenarien durchprobiert mit den Mitarbeitern, die dann dafür verantwortlich sind. Wir bekommen dann noch eine Maschinendokumentation dazu, dass wenn das AGV einen Fehler ausgibt, dass wir wissen was zu tun ist. Neu aufsetzen oder an eine Grundposition bringen beispielsweise. Das ist von der Komplexität her, überschaubar.

Frage 11: Werden die Mitarbeiter allgemein geschult oder werden hier 1-2 Experten vor Ort sein, um das System zu betreuen?

R.T.: Carrier abnehmen, AGV verschieben sind die einen Sachen. Den Weg wieder frei machen für die Produktion, dass der Fluss wieder funktioniert, keine Barrieren sind. Aber jetzt zu sagen, man startet das AGV neu, man muss das vielleicht irgendwie referenzieren, das wird von der Wartungstechnik durchgeführt. Das sind Dinge, die dann nicht mehr den Produktionsmitarbeiter betreffen. Das sind Wartungs- bzw. Servicetätigkeiten, damit beschäftigt sich der Produktionsmitarbeiter nicht.

Frage 12: Was für Qualifikationen werden notwendig sein beziehungsweise was für zusätzliche Qualifikationen werden die Mitarbeiter in Zukunft haben müssen?

R.T.: Vom AGV, wie es jetzt verwendet wird, wird sich stand jetzt nicht viel ändern. Es ist ein Fahrzeug, dass sich durch die Gassen bewegt und einen Transport erledigt. Trotzdem kann es sein, dass es stehen bleibt und verschoben werden muss. Das heißt für den Produktionsmitarbeiter ändert sich nicht viel.

Software übergeordnet, die Intelligenz des Fahrzeugs natürlich, weil das Flottenmanagementsystem schon auf ganz andere Dinge reagiert. Es gibt die Möglichkeit andere Wege zu nutzen, wenn es die Möglichkeit dafür gibt. Die entscheiden schon viel mehr. Das macht aber direkt keinen Unterschied für den Produktionsmitarbeiter. Trotzdem ist es ein Fahrzeug, dass sich in den Gängen bewegt, andockt, etwas übergibt an die Dockingstation, aber das macht es jetzt genauso. Es verändert sich etwas von den Prozessen, aber dann gibt es für jeden Mitarbeiter eine Einschulung darauf. Falls es noch Fragen gibt werden diese geklärt und im Zuge von Schulungen oder weitere Trainings erledigt.

C.G.: Das ist unsere Aufgabe das System so zu spezifizieren und so mit dem Lieferanten zu designen, dass es in der Fehlerbehebung einfach ist, die Fehlermeldungen klar sind, dass es für den Mitarbeiter sehr einfach ist. Es soll klar sein, was er im Falle des Falles zu tun hat.

R.T.: da gibt es oft schon sehr gute Beschreibungen von den Herstellern. Wie werden gewisse Fehler angezeigt, Stichwort Batterie. Das sind Einstellungen, die man im Flottenmanager treffen muss, da muss es jemanden in der Firma geben, der sich mit der Software des Flottenmanagers auskennt und die Einstellungen treffen kann. Das wäre dann eine Person oder eine Handvoll Personen aus dem Servicebereich. Für den Produktionsmitarbeiter wird es keine zusätzlichen Qualifikationen geben. Servicetechniker vereinzelt vielleicht. Eventuell das Einlernen neuer Routen und das Flottenmanagementsystem. Das er es gesehen hat und weiß wo er welche Einstellungen treffen kann.

Frage 13: Thema Nutzerakzeptanz, haben Sie bereits Erfahrungen gemacht wie die Mitarbeiter auf jene System reagieren?

C.G.: Wir wollten eine Umfrage machen, wo das AGV noch nicht ideal im Betrieb eingebunden war. Es hat auch Ideen gegeben, dass man die AGVs in einer Art und

Weise personalisiert, das man ihnen Namen gibt. Quasi, der Stefan steht wieder vor dem Lift und wartet auf ein Freigabesignal. Zu der Zeit war wie erwähnt die Verfügbarkeit nicht gut, aus unterschiedlichen Gründen. Es war nicht immer das AGV System schuld. Wenn der Lift z.B. aus irgendeinem Grund kein Signal zurückschickt, weil er nicht in die richtige und überwachte Position findet, dann ist für jeden ersichtlich, dass das AGV steht und nicht in den Lift fährt. Der Hintergrund ist aber, dass der Lift kein Signal schickt. Das Feedback, dass ich von der Fertigung bekomme, wenn's gut geht, dann sind die Mitarbeiter sehr zufrieden und sie nehmen das System an. Das sieht man auch an den Transporten, dass viele durchgeführt werden. Wenn es nicht funktioniert, und bei einem Gate stehen bleibt, dann müssen die Leute auf die manuelle Variante umsteigen und dann ist die Akzeptanz nicht so gut.

Es war auch ein Learning für uns, wie man so ein System hochfährt. Wir haben drei Stück in die Fertigung gestellt. Dann haben wir gesehen wo es Probleme gibt, vielleicht sind die nächsten zwei Ladestationen belegt, dann kommt das letzte AGV nicht mehr zur Ladestation und die Batterie wird leer.

Das würden wir heute anders machen. Wir würden mit einem AGV anfangen, das System stabilisieren und machen dann den Ramp-up dazu.

R.T.: Beim ersten AGV System waren es Erfahrungen, die wir gesammelt haben. Hier liegt es auch an uns, die Spezifikation zu schreiben und auch aus dem jetzigen System zu lernen und auch diese Fragen jetzt zu stellen. Das ist ein guter Punkt von vorhin, meistens hat man weniger Ladestationen als AGVs und wenn man das ganze System vom Durchsatz überbelastet, dann geht die Batterie bei allen runter und dann kann es sein, dass ein AGV stehen bleiben würde. Dann muss es gewisse Automatismen geben, die dem AGV sagen, was es machen muss. Das haben wir beim jetzigen System nicht gehabt. Auch ein System, dass nicht reagiert, wie zum Beispiel ein automatisches Tor, dass sich nicht öffnet, dann muss auch das Flottenmanagementsystem wissen, wie es damit umgeht. Leitet es den Fehler an einen Wartungstechniker weiter oder versuche ich es nochmal, 3-mal, bis es funktioniert. Das sind Dinge, die wir bei diesem System gelernt haben und müssen es beim nächsten System berücksichtigen.

C.G.: Unser internes Schulungsprogramm, bei dem Mitarbeiter verschiedene Kurse belegen können, da hat es eine Schulung zum Thema automatische Transporte gegeben, die sehr gut angekommen ist. Da hat man ein AGV mit einer Fernsteuerung genommen und die Leute damit fahren lassen. Dabei wurde ihnen auch erklärt, was ist der Mehrwert, was ist der Sinn dahinter, was macht das AGV, wie funktioniert es und wie man Aufträge wegschicken kann. Umso mehr Informationen man gibt, desto besser wird es angenommen.

Es werden neue Fertigungslinien kommen, weshalb wir jetzt auf die Bremse mit neuen Systemen getreten sind. Zuerst möchten wir den Use Case definieren um herauszufinden wo es Sinn macht, so ein AGV zu implementieren.

R.T.: Sie haben die Fertigung gesehen, es ist sehr wichtig für die AGVS dass es auch die Wege gibt. Es braucht mindestens einen halben Meter Radius rundherum, um mit voller Geschwindigkeit fahren zu können. Wenn der nicht gegeben ist oder sich das AGV zur Dockingstation hindrehen muss, dann fährt es vielleicht nur mit 0,3 m/s. Da ist der Mitarbeiter dann schneller. Es muss alles so ausgelegt sein, dass das AGV mit voller Geschwindigkeit fahren kann.

Frage 14: Die ergonomische Betrachtung bezieht sich hier vor allem auf die langen Fußwege, weshalb ich in diesem Fall nicht stark auf die Ergonomischen Punkte eingehen werde. Fokus: Akzeptanz des AS.

R.T.: Unsere Behälter haben ein Gewicht von maximal 120 Kilogramm. Das ist schon eine Masse, die bewegt wird. Zwar mit Rollen, aber es gibt Situationen wie den Lift, wo man einen Spalt hat und das Ding reinbekommen muss. Da muss man genauso anschieben. Oder bei der Übergabe des Carriers von der Transportplattform zum nächsten Fertigungsschritt. Das sind Sachen, die das AGV automatisch machen würde. Es ist Kraftaufwand notwendig, aber vom ergonomischen Punkt her, nicht vergleichbar mit einer Montagelinie aus der Automobilindustrie.

Frage 15: Die Frage nach der Abhängigkeit/Vendor-Lock-In?

R.T.: Natürlich ist man abhängig vom Hersteller, es ist seine Technologie, sein System. Da wir ein internationaler Konzern sind, muss es für alle passen. Wir müssen sowohl für Europa, als auch Asien ein System finden, dass für alle Fabriken passt. Es muss ein Standard reinkommen. Es macht keinen Sinn in jedem Werk ein unterschiedliches AGV System zu haben. Vielleicht gibt es in der Zukunft eine andere Technologie, die besser ist als die von Hersteller A, weil gewisse Funktionalitäten gegeben sind. Beispiel Lift fahren. Wenn das nicht gegeben ist und das Werk mehrstöckig ausgebaut wird, kann das System nicht genutzt werden. Diese Dinge müssen natürlich berücksichtigt werden bei der Auswahl.

Abhängigkeiten bezüglich der Servicetätigkeiten, wie wir es jetzt mit den linienbasierten Systemen haben. Momentan sind wir auf den Servicetechniker angewiesen, der die Programmierung dementsprechend anpasst, die Magnetpunkte setzt. Von dem wollen wir eigentlich weggehen. Wir wollen soweit unabhängig agieren, dass wir die Routen selbst anbieten können für diese Systeme.

C.G.: Man macht sich bei solchen Systemen immer abhängig, darum ist eine Evaluation wichtig. Dann sieht man, dass man zum Beispiel die Software Lizenz jährlich von dem einen Hersteller kaufen muss oder Komponenten, Ersatzteile Batterien nur von dem Hersteller beziehen muss. Da sollte man vorab einen guten Überblick haben von den unterschiedlichen Möglichkeiten.

R.T.: Es geht auch immer um die Genauigkeit dieser Systeme, manche sind auf 5 cm genau. Das reicht meist für die Intralogistik. Bei uns muss eine Genauigkeit von weniger als 1 cm gegeben sein. Da stoßen schon einige Hersteller an Ihre Grenzen beziehungsweise brauchen dann Hilfsmittel. Lasersensoren haben eine Genauigkeit

von maximal 1 cm. Beeinträchtigungen durch die Umgebung sind zu berücksichtigen. Da gibt's verschiedene Hilfsmittel, manche nutzen Referenzpunkte, die man an Säulen montiert, die mit Hilfe von Reflektoren arbeiten. Manche Positionierdreiecke, manche Schrägen. Da braucht man dann schon einen guten Überblick über die Hersteller.

Ein weiterer entscheidender Faktor, was möchte man transportieren und wie möchte man es transportieren. Bei uns waren die Plattformen ein großes Thema. Die Frage war, ob es eine Rollenplattform sein soll oder ein Roboterarm. Wie viel müsste der Arm heben? Wie soll der ganze Aufbau aussehen. Da gibt es wieder grobe Unterschiede, weil die AGV Hersteller das wieder mit Partnern machen. So hätte man dann zwei Hersteller, mit denen man diskutiert, wenn eine Servicetätigkeit zu tun ist. Wenn dann noch Automatisierung dazu kommt, muss es das AGV steuern, brauche ich zusätzliche PS, wie sieht es mit der Batterie aus, schafft es die Ladezeit, verändert sich was von der Betriebsdauer? Das sind viele Fragen, die noch auftreten. Da braucht man den richtigen Hersteller, der das gewährleisten kann.

Gerade bei uns, wir haben sehr viele verschiedene Behälterformen, war das ein entscheidender Faktor.

Frage 16: TRL ist ihrer Meinung nach bereits gegeben?

R.T.: Der ist gegeben. Hängt natürlich sehr stark von den Branchen ab. In unserem konkreten Fall macht es sehr viel Sinn. Es ist eine Erleichterung für den Mitarbeiter, da er sonst einige Hundert Meter zurücklegen muss und wir sehr viele Transporte zwischen den Produktionsbereichen haben. Die Wege zwischen denen können schon sehr lange sein.

Frage 17: Was sind ihre größten Bedenken bei der Einführung eines solchen Systems?

C.G.: Für mich ist es zum einen der Mischbetrieb. Wir werden immer einen manuellen und einen automatischen Transport haben. Das heißt Mensch und AGV werden sich den Transportweg teilen. Hier wäre ein konturbasiertes System flexibler, da die AGVs ausweichen können. Dann stellt sich die Frage, ob das die Mitarbeiter nicht mehr verwirrt, als wenn das AGV nur der geraden Linie entlangfährt. Historisch bedingt ist unser Shop-Floor Layout sehr eng. Die Transportwege sind nicht sehr breit. Unsere Linien verändern sich auch immer wieder, da eben genug Platz zu lassen und zu schaffen, dass das AGV System stabil arbeiten kann ist sicher ein wichtiger Punkt.

R.T.: Die Korridore sind eng, das AGV hat nicht viele Ausweichmöglichkeiten. Die Hersteller gehen in die Richtung, dass wenn der Weg A blockiert ist, dann fährt das AGV Weg B. Das ist bei uns nicht möglich. Bei uns ist das in einer langen Linie angeordnet. Es gibt hier keine Möglichkeiten, dass das AGV, jetzt einen anderen Weg nehmen kann. Unsere Maschinen sind in den Produktionsbereichen für das AGV eher zu eng angeordnet, dass das AGV dazwischen auch durchfahren könnte. Beziehungsweise mit einer sehr langsamen Geschwindigkeit. Da stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, so ein AGV zu nehmen. Bei einem Greenfield Projekt, legt man

einfach das ganze Werk danach aus, oder macht sogenannte Fast-Lanes, wo nur AGVs fahren, da können sie auch dementsprechend schneller fahren. Auch bei schmälere Gängen. Aber beim Mischbetrieb mit anderen Personen ist das nicht möglich. Sobald ein Mitarbeiter davor läuft wird das AGV auch abbremsen.

13.2 EAWS-Formblatt

Downloadlink: <https://www.eaws.it/download/de/>

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6

Werk	Mitarbeiter: Geschlecht m <input type="checkbox"/> w <input type="checkbox"/>	Körpergröße 175cm
Linie	MTM-Analyse	Analyst
Arbeitsaufgabe/-platz	Dauer der Aufgabe [s] 98	Beobachtung <input type="checkbox"/> Planung <input type="checkbox"/>
		Datum 14.07.2021

Gesamtergebnis Punkte für "Gesamtkörper" berechnen und mit "Obere Extremitäten" vergleichen. Der höhere Wert bestimmt das Gesamtergebnis. Die entsprechende Ampelfarbe ist zu markieren. Beim Auswerten beide Werte betrachten.

<input type="checkbox"/> Grün	Gesamtkörper = Haltung + Kräfte + Lasten + Extra	Obere Extremit.
<input type="checkbox"/> Gelb	= + + + 4,5	49
<input type="checkbox"/> Rot		

EAWs Bewertung	0-25 Punkte	Grün	Niedriges Risiko: empfehlenswert; Maßnahmen nicht erforderlich
	>25-50 Punkte	Gelb	Mögliches Risiko: nicht empfehlenswert; Maßnahmen zur erneuten Gestaltung / Risikobeherrschung ergreifen
	>50 Punkte	Rot	Hohes Risiko: vermeiden; Maßnahmen zur Risikobeherrschung erforderlich

Extrapunkte "Gesamtkörper" (pro Minute / Schicht)						Extrapunkte		
0a	Beeinträchtigung durch Arbeit an sich bewegenden Objekten	<input type="checkbox"/> 0 keine	3 mittel	8 stark	15 sehr stark	Intensität 0		
0b	Zugänglichkeit (z. B. im Motor- oder Fahrgastraum)	0 gut	<input checked="" type="checkbox"/> 2 erschwert	5 schlecht	10 sehr schlecht	Status 2		
0c	Rückschlagkräfte, Impulse, Schwingungen 	<input type="checkbox"/> 0 gering	1 sichtbar	2 stark	5 sehr stark	Intensität x Häufigkeit 0		
		0 [n]	1 - 2 4 - 5	4 8 - 10	6 18 - 20		8 > 20	
0d	Gelenkstellung (insb. Handgelenk) 	0 neutral	<input checked="" type="checkbox"/> 1 ~ 1/3 max	3 ~ 2/3 max	5 maximal	Intensität x Dauer oder Häufigkeit 1*2,5=2,5		
		0 [s]	2 3	2,5 10	4 20		6 40	8 60
		0 [n]	1 8	10 11	20 16		40 20	60 100
0e	Andere körperliche Belastungen (bitte beschreiben)	<input type="checkbox"/> 0 keine	5 mittel	10 stark	15 sehr stark	Intensität 0		
Extra = Σ Zeilen 0a – 0e		Achtung: Max. Punktzahl = 40 (Zeilen 0c, 0d), = 15 (Zeilen 0a, 0e) bzw. = 10 (Zeile 0b)			Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s		= 4,5	

Zeilen 0a-b gelten vor allem für die Autoindustrie. In anderen Branchen können weitere Elemente hinzukommen. Details s. Lehrgangsunterlage EAWS.

Daten für die Bewertung der repetitiven Tätigkeiten		
Beschreibung	Formel	Ergebnis
Tatsächliche Schichtdauer [min]		
Mittagspause [min]	-	
Andere offizielle Pausen [min]	-	
Nichtrepetitive Tätigkeiten [min] (z. B. Reinigung, Materialbeschaffung, etc.)	-	
Nettodauer der repetit. Tätigkeit/en (a) [min]	=	
Anzahl an Einheiten (od. Takten/Zyklen) (b)		
Netto-Zykluszeit [s]	(a/b x 60) =	
Taktausgleichszeit [s]		

Bemerkungen / Verbesserungsvorschläge

Abbildung 67: EAWS-Formblatt 1

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6																																																																
Körperstellung / Rumpf- und Armhaltungen										Körperhaltung																																																						
(inkl. Lasten < 3 kg Fingerkräfte < 30 N und Arm-,Ganzkörperkräfte < 40 N) Statische Körperhaltungen ≥ 4 s Hochfrequente Bewegungen: Rumpfbeugungen (> 60°) ≥ 2/min Knien/Hocken ≥ 2/min Arm heben (> 60°) ≥ 10/min										Symmetrische										Asymmetrische																																												
										Bewertung statischer Körperhaltungen und/oder hochfrequenter Bewegungen des Rumpfes/der Arme/Beine										Zeile	Rumpfdrehung 1)	Rumpfneigung 1)	Reichweite 2)																																									
										Dauer [s/min] = $\frac{\text{Dauer der Körperhaltung [s]} \times 60}{\text{Dauer der Aufgabe [s]}}$											Inten.: Dauer	Inten.: Dauer	Inten.: Dauer																																									
[%]	5	7,5	10	15	20	27	33	50	67	≥ 83	0-5	0-3	0-5	0-3	0-5	0-2																																																
[s/min]	3	4,5	6	9	12	16	20	30	40	≥ 50	Intensität x Dauer	Intensität x Dauer	Intensität x Dauer																																																			
[min/8h]	24	36	48	72	96	130	160	240	320	≥ 400																																																						
Stehen (und Gehen)																																																																
1		Stehen & Gehen im Wechsel, Stehen mit Abstützung	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1,5	2																																																				
2		Stehen, beengter Raum	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13	6																																																			
3		a Nach vorn gebeugt (20-60°) b Mit geeigneter Abstützung	2	3	5	7	9,5	12	18	23	32	40																																																				
4		a Stark gebeugt >60° b Mit geeigneter Abstützung	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63																																																				
5		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63	21																																																			
6		Hände über Kopfhöhe	5,3	8	14	19	26	33	47	60	80	100	60																																																			
Sitzen																																																																
7		Aufrecht mit Rückenstütze, ggf. leicht nach vorne/hinten geneigt	0	0	0	0	0	0,5	1	1,5	2																																																					
8		Aufrecht ohne Rückenstütze (für weitere Einschränkungen s. Extrapunkte)	0	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5	7																																																				
9		Nach vorn gebeugt	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13																																																				
10		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	2,7	4	7	10	13	16	23	30	40	50																																																				
11		Hände über Kopfhöhe	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75																																																				
Knien oder Hocken																																																																
12		Aufrecht	3,3	5	7	9	12	15	21	27	36	45																																																				
13		Nach vorn gebeugt	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75																																																				
14		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	6	9	16	23	33	43	62	80	108	135																																																				
Liegen & Klettern																																																																
15		Liegen (auf Rücken, Brust oder Seite) mit Armen über dem Kopf	6	9	15	21	29	37	53	68	91	113																																																				
16		Klettern	6,7	10	22	33	50	66																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="5">1) Rumpf</td> <td colspan="5">2) Reichweite</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">Σ</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">87</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">0 (max.=15)</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">0 (max.=15)</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">0 (max.=10)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Inten.</td> <td colspan="3">Dauer</td> <td colspan="2">Inten.</td> <td colspan="3">Dauer</td> <td rowspan="2" style="vertical-align: middle; text-align: center;">Arm gestreckt</td> <td rowspan="2" style="vertical-align: middle; text-align: center;">Σ (max. = 40)</td> <td rowspan="2" style="vertical-align: middle; text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>leicht ≤10°</td> <td>mittel 15°</td> <td>stark 25°</td> <td>extrem ≥30°</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1,5</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1,5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>nie</td> <td>4 s</td> <td>10 s</td> <td>≥ 13 s</td> <td>0%</td> <td>6%</td> <td>15%</td> <td>≥ 20%</td> <td>0%</td> <td>6%</td> <td>15%</td> <td>≥ 20%</td> <td></td> </tr> </table>											1) Rumpf					2) Reichweite					Σ	87	0 (max.=15)	0 (max.=15)	0 (max.=10)	Inten.		Dauer			Inten.		Dauer			Arm gestreckt	Σ (max. = 40)	0	leicht ≤10°	mittel 15°	stark 25°	extrem ≥30°	0	1	1,5	3	5	0	1	1,5	3	nie	4 s	10 s	≥ 13 s	0%	6%	15%	≥ 20%	0%	6%	15%	≥ 20%	
1) Rumpf					2) Reichweite					Σ	87	0 (max.=15)	0 (max.=15)	0 (max.=10)																																																		
Inten.		Dauer			Inten.		Dauer								Arm gestreckt	Σ (max. = 40)	0																																															
leicht ≤10°	mittel 15°	stark 25°	extrem ≥30°	0	1	1,5	3	5	0									1	1,5	3																																												
nie	4 s	10 s	≥ 13 s	0%	6%	15%	≥ 20%	0%	6%						15%	≥ 20%																																																
Achtung: Max. Einstufungsdauer = Dauer der Aufgabe oder 100%!											Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s																																																					
Haltung = Σ Zeilen 1 - 16			87 (a)			+			0 (b)			= 87																																																				

Abbildung 68: EAWS-Formblatt 2

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6

Aktionskräfte (pro Minute)										Kräfte						
17		Fingerkräfte (z. B. Clipse, Stecker)	Int	0	7	15	25	50	Intensität × Dauer							
			F _{max}	16,7%	33,3%	50,0%	66,7%	F _{max}								
			start	[s]	3	6	9	12				20	≥30			
18		Arm-, Ganzkörperkräfte	Int	0	6	15	25	50	Intensität × Dauer							
			F _{max}	16,7%	33,3%	50,0%	66,7%	F _{max}								
			start	[s]	3	6	9	12				20	≥30			
			Dauer	[n]	4	10	15	≥20								
			dyn	[n]	1	3	6	8	10	≥12						
F _{max} Arm-, Ganzkörperkräfte			ST aufrecht	M	F	ST gebeugt	M	F	ST über Kopf	M	F	F _{max} Fingerkräfte (F=Frauen M=Männer)				
M für Männer & F für Frauen				A	480	315		A	435	285		A	430	280	A1 (Umfassunggriff, Zangengriff)	
				B	320	210		B	400	280		B	305	200	F _{max}	
				C	485	315		C	605	390		C	480	310	M	F
 median plane			KN aufrecht		M	F	KN gebeugt		M	F	KN über Kopf		M	F	A2 (Kontaktgriff)	
			A	420	270	A	380	245	A	425	275	F _{max}				
			B	445	290	B	495	320	B	495	320	M		F	235	155
Daten aus: "Montagespezifischer Kräfteatlas" (Wakula, Berg, Schaub, Gitsch, Ellegast 2009)			SI aufrecht		M	F	SI gebeugt		M	F	SI über Kopf		M	F	B1 (Daumenkontaktgriff, Zufassunggriff)	
			A	405	265	A	385	250	A	395	255	F _{max}				
			B	405	260	B	455	295	B	365	240	M		F	75	50
			C	380	250	C	425	275	C	370	240	F _{max}				
			C	250	165	C	270	175	C	200	130	M		F	85	55
			C	235	155	C	205	135	C	210	135	F _{max}				
Aktionskräfte = Σ Zeilen 17 – 18			Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s						=		<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>					

Manuelles Handhaben von Lasten (pro Schicht)										Lasten											
Lastgewichte [kg] beim Umsetzen (Heben / Absetzen), Tragen und Halten sowie Ziehen und Schieben																					
+	Umsetzen, Tragen & Halten	Männer (Kg)	3	10	15	20	25	30	35	≥40											
		Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25											
		Frauen (Kg)	2	5	7	10	12	15	20	≥25											
		Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25											
+	Ziehen und Schieben	M1	Karren	Männer (Kg)	<50	75	100	150	200	≥250											
				Frauen (Kg)	<40	60	80	115	155	≥195											
		M2	Trolleys und Transportwagen	Männer (Kg)	<50	75	100	150	250	350	≥550										
				Frauen (Kg)	<40	60	80	115	195	270	≥425										
		M3	Schienenwagen, Hubwagen	Männer (Kg)	<50	75	150	250	350	500	600	800	≥1250								
				Frauen (Kg)	<40	60	115	195	270	385	460	615	≥960								
Lastpunkte		Transportmittel		0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8									
Körperhaltung, Position der Last (charakteristische Körperhaltung wählen)																					
+		1	2				4				8										
		Oberkörper aufrecht und nicht verdreht, Last am Körper	geringes Rumpfnneigen oder -drehen; Last am Körper oder körperrnah				tiefes Beugen oder weites Vorneigen; geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers; Last körperrfern o. über Schulterhöhe				Asymmetrische Körperhaltungen (Rumpf weit nach vorne beugen und verdrehen; Last körperrfern; eingeschränkte Haltungsverstabilität beim Stehen oder Hocke) oder kniend										
		Haltungspunkte	1				2				4										
Ausführungsbedingungen (nur bei Ziehen und Schieben von Wagen)																					
(+)	sehr geringer Rollwiderstand	Wagen ziehen/schieben auf glattem Boden	auf rauem Boden; über kleine Fugen/Kanten	auf Riffelblech, in/aus Gleis bzw. Spur				Wagen müssen b. Anfahren losgeriss. werden, stark beschädigter Fahrweg				sehr hoher Rollwiderstand									
	Ausführungspunkte	0		1		3		5		6		8									
Häufigkeit der Lastenhandhabung [Häufigkeit/Schicht], Haltedauer [min/Schicht] oder Wegstrecke [Meter/Schicht]																					
x	Häufigkeit (#) Umsetzvorgänge / Ziehen & Schieben kurz			5	25	120	350	750	1000	1500	2000	2500	≥3000								
	Haltedauer [min]			2,5	10	37	90	180	≥240												
	Strecke (Tragen, Ziehen & Schieben lang) [m]			300	650	2500	6000	≥16000													
	Dauerpunkte			1	2	4	6	8	10	11	13	14	15								
Manuelles Handhaben von Lasten (Ergebnis)																					
19	(Last + Haltung + (Ausführung)) × Dauerpunkte	Umsetzen 1)	(+)	x	=	Halten 1)	(+)	x	=	Tragen 1)	(+)	x	=	Ziehen & Schieben kurz 1)	(+ +)	x	=	Ziehen & Schieben lang 1)	(+ +)	x	=
		Handhaben Lasten = Σ Zeile 19			1) Summe der Dauerpunkte für Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen & Schieben maximal = 15						=		<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>								

Abbildung 69: EAWS-Formblatt 3

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6																																																																
Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten															Obere Extremitäten																																																	
Kraft & Häufigkeit & Griff (FFG)										Anzahl der realen Aktionen pro Min. bzw. Anteil stat. Aktionen (zu betrachten ist die am meisten belastete Extremität)																																																						
		Legende		%SA = % Statische Aktionen										%DA = 100% - %SA																																																		
				FDS = Kraft-Dauer - Punkte für statische Aktionen										FFD = Kraft-Häufigkeit - Punkte für dynamische Aktionen																																																		
				GS' = Modifi. Griffpunkte für statische Aktionen (Griff x %SA)										GD = Griffpunkte für dynamische Aktionen																																																		
%FLS = Prozentsatz der statischen Aktionen im Kraftniveau										%FLD = Prozentsatz der dynamischen Aktionen im Kraftniveau																																																						
SC = Statischer Anteil										DC = Dynamischer Anteil																																																						
FDGS = Summe der statischen Anteile										FFGD = Summe der dynamischen Anteile																																																						
Kraft [N]	Berechnung stat.				Statische Aktionen (s/min)				Greifbeding.				Dynamische Aktionen (reale Akt./min)					Berechnung dyn.																																														
	FDS	GS'	%FLS	SC	≥45	30	20	10	5	3	0	2	4	2	10	15	20	25	30	35	≥40	FFD	GD	%FLD	DC																																							
0 – 5			80	0	1	1	0	0	0	0	ab			0	0	0	1	2	3	4	7																																											
> 5 – 20			20	2	4	2	1	0	0	0	ab	bc		0	0	1	2	3	4	6	9																																											
> 20 – 35					7	5	3	2	1	1	ab	b	c	0	1	2	3	4	6	8	12																																											
> 35 – 90					11	8	5	3	2	1	a	b	b	1	2	3	5	7	9	12	18																																											
> 90 – 135					16	11	7	4	3	2	a	ab	b	2	3	5	7	9	12	15	24																																											
> 135 – 225					21	14	10	6	4	3	a	a	b	4	5	6	8	11	14	20	32																																											
> 225 – 300					28	18	12	8	5	4	a	a	b	5	6	7	9	12	16	26	40																																											
20a	FDGS = Σ SC _i				FFG = FDGS + FFGD				2				%DA = Σ FLD _i					FFGD = Σ DC _i				%DA																																										
Hand- / Arm- / Schulterhaltungen (Zeitanteil der ungünstigsten Haltung von Handgelenk/Ellbogen/Schulter berücksichtigen)																																																																
Handgelenk (Rad/ul, Flex/Exten)					Ellbogen (Pronation/Supin., Flex/Exten)					Schulter (Flexion/Extension, Abduktion)																																																						
Haltungspunkte					10%					25%					33%					50%					65%					≥85%																																		
0					0,5					1					2					3					4					5					PP																													
Zusatzfaktoren																																																																
Ungeeignete Handschuhe (welche die Handhabung beeinträchtigen) müssen für über die Hälfte der Zeit verwendet werden																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge mindestens 2 Mal pro Minute (z. B. Hämmern auf harter Oberfläche)																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge (Hand wird als Werkzeug benutzt), mindestens 10 Mal pro Stunde																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Arbeit bei Kälte oder Kühlung (unter 0° C), über die Hälfte der Zeit oder mehr																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Arbeit mit vibrierenden Werkzeugen, über ein Drittel der Zeit oder mehr																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Verwendung von stark vibrierenden Werkzeugen																				4					<input type="checkbox"/>																																							
Die verwendeten Werkzeuge verursachen Kompressionen der Haut (Rötungen, Schwielen, Blasen etc.)																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Präzisionsaufgaben (Aufgaben mit einer räumlichen Genauigkeit von < 2-3 mm), über die Hälfte der Zeit oder mehr																				2					<input type="checkbox"/>																																							
Zwei oder mehr Zusatzfaktoren treten gleichzeitig und über die ganze Zeit hinweg auf																				3					<input type="checkbox"/>																																							
Zusatzfaktorenpunkte (den höchsten auftretenden Wert wählen)																				=					0					AF																																		
Dauer der repetitiven Tätigkeiten																																																																
Nettodauer [min/Schicht]					< 60					90					180					300					420					480																																		
Schichtpunkte (1 Stunde = 1 Punkt)					1					1,5					3					5					7					8					+	5																												
Arbeitsorganisation					Arbeitsunterbrechungen jederzeit möglich					Unterbrechungen möglich innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen					Unterbrechungen führen zu Prozessunterbrechung					Unterbrechungen führen zu Prozessunterbrechung (kürzere Zykluszeit von 1 min)					+	1																																						
Organisationspunkte					0					1					2					2																																												
Pausen (≥ 8 min) [#]/Schicht					0					1					2					3					4					5					6					≥7																								
Pausenpunkte					3					2					1					0					-1					-2					-3					-4					+	1																		
Dauerpunkte					0					-0,5					-1					-1,5					-2																																							
Gesamtbewertung der Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten																				20					(a) Kraft & Häufigkeit & Griff					(b) Haltungspunkte					(c) Zusatzfaktorenpunkte					(d) Dauerpunkte					Obere Extremitäten																			
2					FFG					+					5					PP					+					0					AF					x					7					DP					=					49				

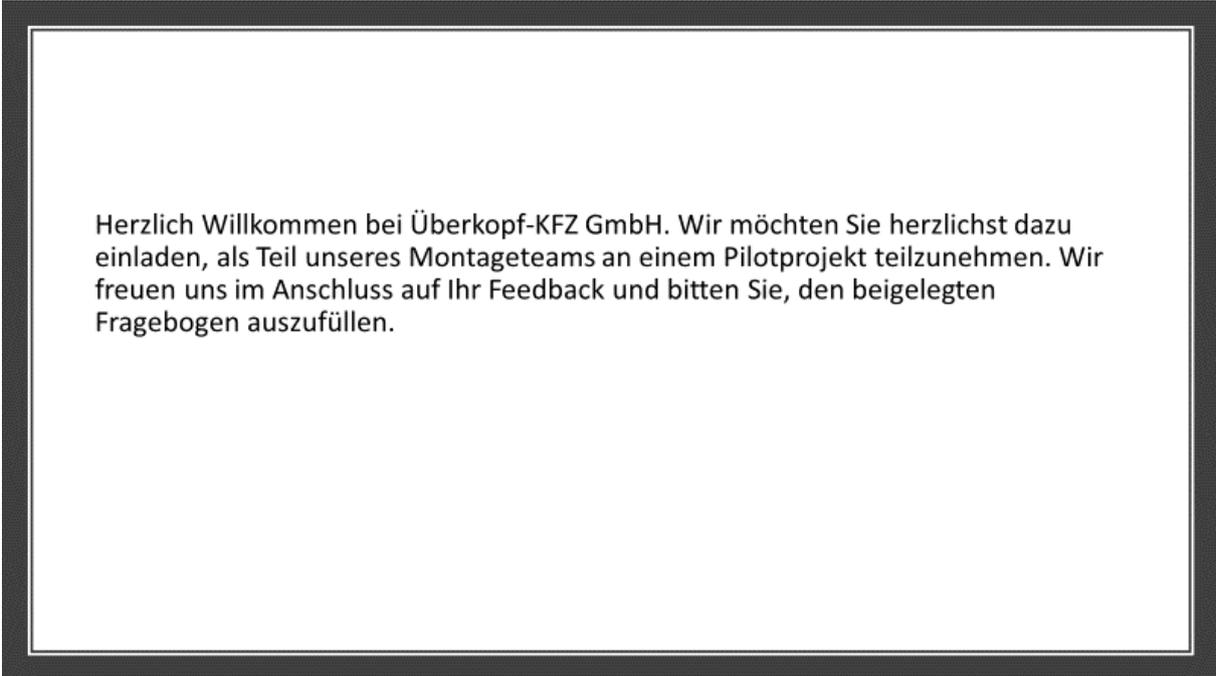
Abbildung 70: EAWS-Formblatt 4

13.5 Anleitung über das digitale Informationsdisplay



Anleitung Überkopfmontage

Abbildung 72: Anleitung Exoskelett Use-Case 1



Herzlich Willkommen bei Überkopf-KFZ GmbH. Wir möchten Sie herzlichst dazu einladen, als Teil unseres Montageteams an einem Pilotprojekt teilzunehmen. Wir freuen uns im Anschluss auf Ihr Feedback und bitten Sie, den beigelegten Fragebogen auszufüllen.

Abbildung 73: Anleitung Exoskelett Use-Case 2



Sie sehen einen Piloten einer Überkopf Montage. Ziel der Aufgabe ist es, die Verkabelung für die Heckbeleuchtung durch die dafür gefertigten Ösen zu führen und diese am Ende an die Energieversorgung anzuschließen.

Abbildung 74: Anleitung Exoskelett Use-Case 3

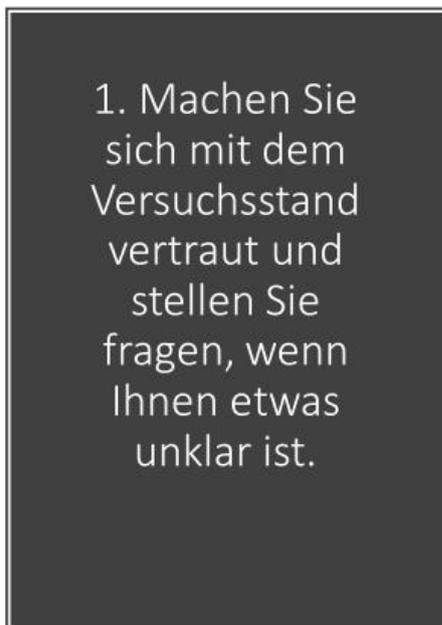


Abbildung 75: Anleitung Exoskelett Use-Case 4

2. Nehmen Sie das Kabel für die Beleuchtung auf.



Abbildung 76: Anleitung Exoskelett Use-Case 5

3. Führen Sie das Kabel der Reihenfolge nach, beginnend bei 1 durch die Ösen. Entnehmen Sie die notwendigen Informationen aus dem Bild.

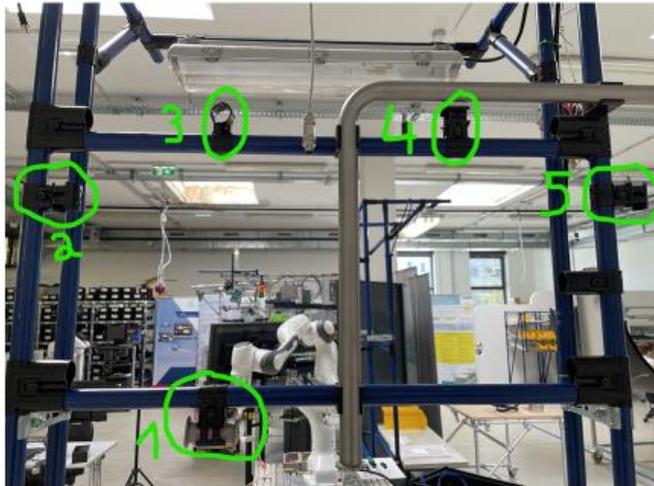


Abbildung 77: Anleitung Exoskelett Use-Case 6

4. Schließen Sie das Kabel an die Energieversorgung an.



Abbildung 78: Anleitung Exoskelett Use-Case 7

5. Nehmen Sie nun das zweite Kabel auf.

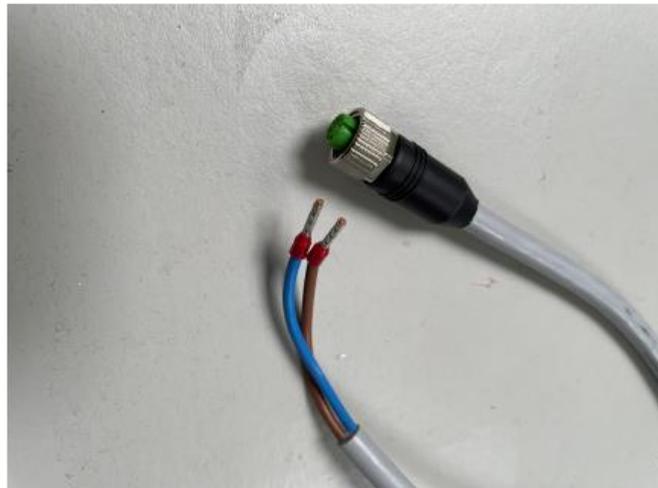


Abbildung 79: Anleitung Exoskelett Use-Case 8

6. Führen Sie dieses durch die L-förmige Röhre.



Abbildung 80: Anleitung Exoskelett Use-Case 9

7. Verschrauben Sie das Ende des Kabels mit dem Anschluss in der Mitte des Versuchsaufbau



Abbildung 81: Anleitung Exoskelett Use-Case 10

8. Nehmen Sie
den beigelegten
Schraubenzieher
zur Hand



Abbildung 82: Anleitung Exoskelett Use-Case 11

9.
Verschrauben
Sie die 4 Kabel
mit dem
Motherboard.

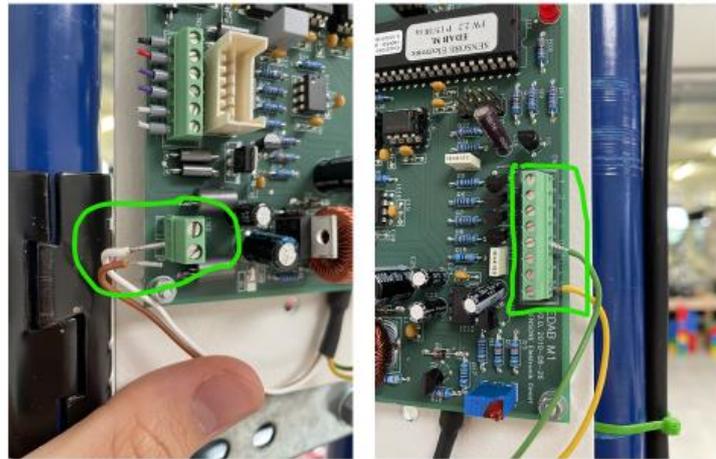


Abbildung 83: Anleitung Exoskelett Use-Case 12

Vielen Dank für Ihr Interesse an der Studie

Abbildung 84: Anleitung Exoskelett Use-Case 13

13.6 Paexo Shoulder – Servicepreise

Das Angebot wurde per Mail, von Bauer G. (g.bauer@awb.at) am 27.07.2021 an Nowak M. (maximilian.nowak.at@gmail.com) zugestellt.

		ottobock.		
		Ihre professionellen Serviceleistungen für Paexo Shoulder		
EUR	PaexoCare Alle Grundlagen für die Wartung für Ihr Paexo Shoulder ²	PaexoCare+ Alles was Sie von unseren Technikern für Ihr Paexo Shoulder benötigen	Paexo Trade-In Tauschen Sie ihr Paexo Shoulder gegen die neueste Version	
Jährliche Wartung nach Betriebsanleitung ¹	✓	✓	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Erhalte das neueste Paexo Shoulder ✓ Erhalte das neueste Zubehör ✓ Inklusive 12 Monate Garantie </div> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;">+</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Erhalte ein Paexo Neck kostenlos </div>	
Mikrobielle Desinfizierung	✓	✓		
Professionelle Reinigung		✓		
Austausch von Kleinteilen bei Verschleiß		✓		
Austausch der Polsterelemente		✓		
Upgrade des Textilsystems auf den neuesten Stand		✓		
Netto Preis	190 €	690 €	2,490 €	
Versand innerhalb EU³	50 €	50 €	Inklusive	

1. Betriebsanleitung des Herstellers 2. Sie erhalten ein Angebot mit empfohlenen Ersatzteilen zum Kauf 3. Umfasst den UPS Abhol- und Rückholservice
Notiz: Es gelten unsere Bedingungen und Konditionen

Copyright © 2020 by Ottobock. All rights reserved.

Abbildung 85: Serviceleistungen für Paexo Shoulder

13.7 Diverse Statistiken

13.7.1 Krankenstandfälle, -dauer und -tage 2019 nach Geschlecht, Alter und Wirtschaftsabschnitt

https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/gesundheit/gesundheitszustand/krankenstaende/index.html

Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2019 nach Geschlecht, Alter und Wirtschaftsabschnitt

Alter, Wirtschaftsabschnitt	Krankenstandsfälle absolut			Durchschnittliche Dauer eines Krankenstandes in Tagen			Durchschnittliche Zahl an Krankenstandstagen pro erwerbstätiger Person		
	Insgesamt	Männer	Frauen	Insgesamt	Männer	Frauen	Insgesamt	Männer	Frauen
Insgesamt	4.734.597	2.486.402	2.248.195	9,7	9,8	9,6	13,1	12,7	13,6
Alter									
Bis 19 Jahre	364.280	221.303	142.977	4,7	4,9	4,5	13,1	13,4	12,7
20 bis 34 Jahre	1.796.971	961.287	835.684	6,8	6,9	6,6	10,9	10,4	11,4
35 bis 49 Jahre	1.474.386	748.800	725.586	10,1	10,1	10,1	11,6	11,2	12,1
50 bis 64 Jahre	1.090.587	549.256	541.331	15,7	16,3	15,1	18,7	18,5	18,9
65 Jahre und älter	8.373	5.756	2.617	22,1	22,9	20,4	13,6	15,2	10,8
Wirtschaftsabschnitt									
Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	16.348	9.441	6.907	13,6	15,2	11,5	8,9	8,9	8,8
Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	6.567	5.753	814	11,4	11,8	8,8	12,5	12,9	9,1
Herstellung von Waren	961.591	703.710	257.881	9,3	9,3	9,1	14,2	14,0	14,8
Energieversorgung	31.216	24.146	7.070	9,7	10,0	8,7	12,5	12,3	13,4
Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen	23.537	18.333	5.204	11,4	11,6	10,7	15,4	15,5	14,8
Bau	342.162	308.787	33.375	10,8	11,0	8,9	13,6	14,3	8,8
Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen	789.792	347.491	442.301	9,4	9,1	9,7	13,4	12,5	14,2
Verkehr und Lagerei	245.266	174.756	70.510	11,2	12,0	9,2	15,3	15,2	15,6
Beherbergung und Gastronomie	220.783	85.672	135.111	11,0	10,7	11,2	11,1	9,4	12,3
Information und Kommunikation	111.555	68.132	43.423	7,5	7,4	7,7	8,3	7,4	9,9
Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	132.454	56.571	75.883	9,0	9,3	8,8	10,6	9,5	11,6
Grundstücks- und Wohnungswesen	41.899	15.269	26.630	11,4	12,1	11,0	11,3	10,6	11,8
Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen	187.875	77.438	110.437	7,9	8,3	7,7	8,0	7,4	8,5
Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen	373.687	213.126	160.561	9,9	9,7	10,1	16,6	16,2	17,1
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung; Sozialversicherung	484.150	153.047	331.103	11,0	11,7	10,7	14,5	14,0	14,8
Erziehung und Unterricht	148.397	57.109	91.288	6,8	6,1	7,2	9,7	8,2	10,7
Gesundheits- und Sozialwesen	435.310	107.421	327.889	9,7	8,4	10,1	15,5	14,0	16,0
Kunst, Unterhaltung und Erholung	41.172	19.713	21.459	10,4	11,5	9,4	11,0	10,8	11,3
Erbringung von sonstigen privaten Haushalten mit Hauspersonal; Herstellung von Waren und Erbringung von Dienstleistungen durch private Haushalte für den Eigenbedarf ohne ausgeprägten Schwerpunkt	2.239	297	1.942	14,5	13,9	14,6	11,7	7,6	12,6
Exterritoriale Organisationen und Körperschaften	905	318	587	9,2	9,8	8,8	10,2	8,8	11,4
Wirtschaftsabschnitt unbekannt	3.936	1.415	2.521	18,6	20,5	17,6	-	-	-

Q: Dachverband der Sozialversicherungsträger. Erstellt am 21.09.2020. Bezugnahme auf alle im Berichtsjahr abgeschlossenen, mit Arbeitsunfähigkeit verbundenen ärztlich bestätigten Krankenstandsfälle (ohne normal verlaufene Entbindungen) von Arbeiterinnen/Arbeitern und Angestellten (ohne pragmatisierte Bedienstete, Präsenzdienere und Kinderbetreuungsgeldbeziehende). - Krankenstandstage sind Kalendertage.

Abbildung 86: Krankenstandfälle, -dauer und -tage 2019 nach Geschlecht, Alter und Wirtschaftsabschnitt

13.7.2 Absatz Exoskelette von 2015 bis 2025

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/796472/umfrage/absatz-von-exoskeletten-weltweit/>

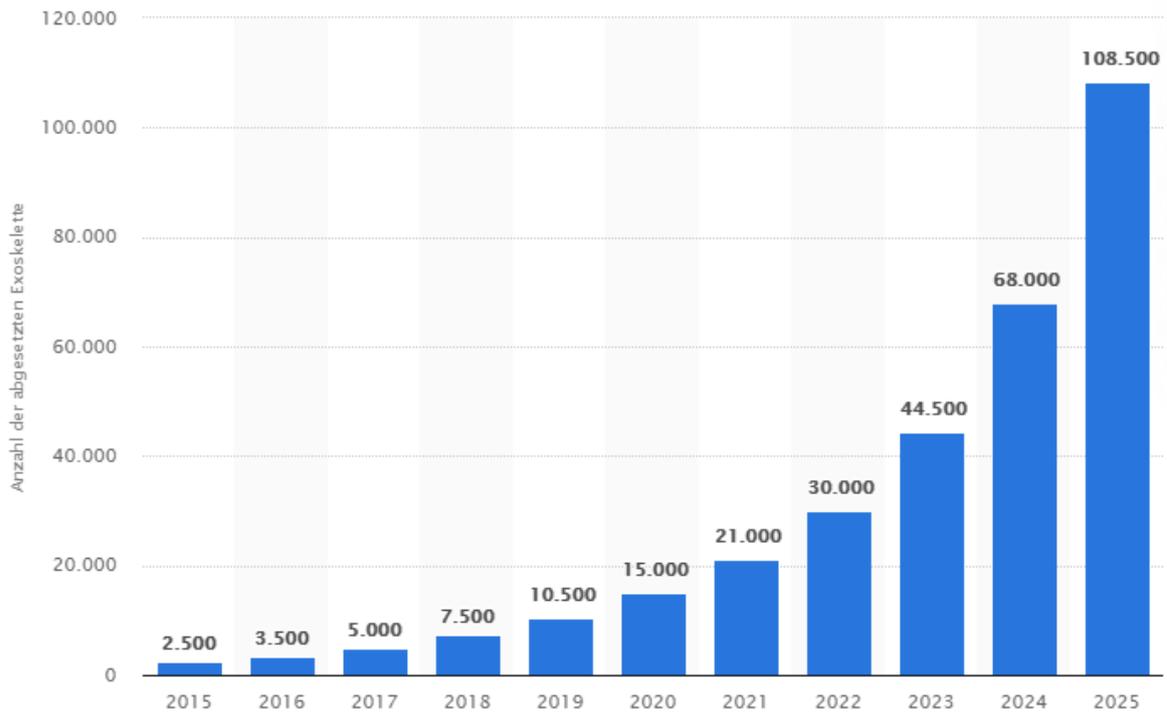


Abbildung 87: Absatz Exoskelette von 2015 bis 2025

13.7.3 Nettomonatseinkommen in Österreich 2019

[https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/soziales/personen-einkommen/nettomonatseinkommen/index.html#:~:text=Unterschieden%20nach%20Wirtschaftsbereichen%2C%20wurden%20die,der%20Landwirtschaft%20\(1.446%20Euro\)](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/soziales/personen-einkommen/nettomonatseinkommen/index.html#:~:text=Unterschieden%20nach%20Wirtschaftsbereichen%2C%20wurden%20die,der%20Landwirtschaft%20(1.446%20Euro))

Nettomonatseinkommen unselbständig Erwerbstätiger nach sozioökonomischen Merkmalen - Jahresdurchschnitt 2019

	Unselbständig Erwerbstätige in 1.000	arithmetisches Mittel	10%	Quartile			90%
				25%	50% (Median)	75%	
				verdienen weniger oder gleichviel als ... EUR			
Insgesamt¹⁾	3.726,3	2.301	887	Insgesamt 1.498	2.105	2.823	3.760
Alter (in Jahren)							
15-19 Jahre	126,6	1.025	497	734	947	1.278	1.667
20-29 Jahre	758,9	1.841	698	1.364	1.877	2.296	2.733
30-39 Jahre	881,3	2.261	1.009	1.554	2.155	2.783	3.483
40-49 Jahre	890,2	2.498	1.127	1.646	2.270	3.045	4.010
50-59 Jahre	921,2	2.652	1.161	1.699	2.355	3.293	4.441
60+ Jahre	148,1	2.629	403	909	2.302	3.682	5.198
Staatsangehörigkeit							
Österreich	3.095,5	2.373	925	1.559	2.182	2.908	3.872
Nicht-Österreich	630,8	1.949	759	1.281	1.775	2.323	3.124
Geburtsland							
Österreich	2.907,3	2.382	921	1.559	2.189	2.923	3.899
Nicht-Österreich	819,1	2.014	798	1.339	1.845	2.418	3.233
Höchste abgeschlossene Schulbildung							
Pflichtschule	460,3	1.489	592	907	1.420	1.920	2.428
Lehre	1.379,6	2.202	1.107	1.621	2.116	2.648	3.314
BMS	437,1	2.178	982	1.514	2.067	2.718	3.383
Höhere Schule	730,1	2.331	743	1.466	2.102	2.911	3.995
Universität ²⁾	719,3	3.057	1.238	1.934	2.737	3.765	5.249
Vollzeit/Teilzeit (Selbstzuordnung)							
Vollzeit	2.684,8	2.665	1.478	1.883	2.379	3.114	4.145
Teilzeit	1.041,6	1.364	463	817	1.290	1.752	2.316
Berufliche Stellung							
Lehrlinge	104,3	1.080	663	775	976	1.266	1.602
Angestellte(r)	2.180,7	2.439	927	1.542	2.180	3.007	4.135
Arbeiter(in)	1.063,0	1.902	805	1.390	1.928	2.359	2.832
Beamte und Vertragsbedienstete	378,3	2.968	1.763	2.190	2.788	3.534	4.371
Wirtschaftsbereiche							
Land- und Forstwirtschaft	35,2	1.576	(505)	885	1.446	2.089	2.698
Industrie und Gewerbe	1.026,2	2.554	1.244	1.865	2.336	2.990	3.953
Dienstleistungen	2.665,0	2.214	804	1.387	1.989	2.748	3.703
ÖNACE 2008³⁾							
Herstellung von Waren	654,2	2.635	1.307	1.907	2.421	3.086	4.062
Bau	321,0	2.323	1.079	1.776	2.165	2.695	3.550
Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kfz	554,1	1.975	749	1.250	1.766	2.364	3.233
Verkehr und Lagerei	206,2	2.289	1.039	1.668	2.145	2.742	3.540
Beherbergung und Gastronomie	224,3	1.418	470	889	1.448	1.801	2.227
Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	119,0	3.152	1.358	1.984	2.875	3.830	5.292
Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen	138,6	1.713	535	1.093	1.606	2.131	2.764
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	274,5	2.681	1.358	1.900	2.497	3.243	4.084
Erziehung und Unterricht	272,5	2.482	1.056	1.640	2.329	3.189	4.002
Gesundheits- und Sozialwesen	404,4	2.175	936	1.465	1.975	2.610	3.360

Abbildung 88: Nettojahreseinkommen nach Gewerbe 2019

14 Unveröffentlichter Anhang

14.1 E-Mail-Verkehr mit AT&S

Email-Unterhaltung von Groß C. (c.gross@ats.net) an Nowak M. (maximilian.nowak.at@gmail.com) vom 28.07.2021

Frage 1) Mit welchen Investment Kosten kann ich für die AGV/Stück rechnen. Könntet ihr mir hier vielleicht das gewünschte AGV (ungefähre Kosten/Stück) nennen, welches in Zukunft auf der Strecke in Betrieb sein soll?

- Ein AGV kostet im Schnitt 30.000-50.000€
- Inbetriebnahme SW/HW, Infrastruktur, Projektleitung, Dokumentation ~150.000-250.000€
- laufende Kosten pro Jahr ~1000€-3000€

Frage 2) Welche Art von AGV habt ihr? Wird es als ein Huckepack-, Unterfahr-AGV klassifiziert oder ist es eine spezielle AGV-Kategorie?

Huckepack FTS

Frage 3) Das einzige was ich ansatzweise als Kosten für AGVs finde ist die Seite:

- <https://www.mm-logistik.vogel.de/flexibel-transportieren-mit-fahrerlosen-systemen-a-194802/?p=2>
- also zwischen 60-150k für ein Projekt. Kommt das nur für die technische Implementierung hin?
- Siehe Punkt 1

Frage 4) Die Annahme einer 97% Verfügbarkeit der AGVs ist ein Erfahrungswert oder wird vom Hersteller genannt ?

Ist eine Anforderung von uns. Es wird teilweise auch eine maximal zulässige Zeit für Service pro Woche definiert.

Frage 5) Der Projektmanager, der für die Einführung eines AGV-Systems verantwortlich, schlägt der als 1 FTE nieder, oder sind seine Kapazitäten nicht zu 100% bei dem Implementierungsprojekt? Ich würde bei einer durchschnittlichen Projektdauer von 18 Monaten, inklusiver aller Lohnnebenkosten, auf Personalkosten von 120k kommen. Kann das stimmen?

Ich gehe davon aus das du den Projektmanager auf unserer Seite meinst, richtig? (Für die Lieferantenseite, siehe Punkt 1.)

Grundsätzlich von den Kosten her könnte es passen, allerdings kommen mir die 18 Monate Projektdauer eher lange vor. Ich hätte für so ein Projekt (wie in unserem Use Case definiert) vielleicht maximal 4 Monate angenommen (Netto Zeitaufwand).
Phase 01: 1-2 Monate Spezifikation, Planung und Projektausarbeitung

Phase 02: 1-2 Monate Implementierung

Zwischen Phase 1 und 2 werden einige Monate vergehen bis das/die AGVs geliefert werden, die Zeit wird auch nicht auf das Projekt gerechnet (da der Projektmanager an anderen Themen arbeiten kann).

Frage 6) Die Dauer eines Ladezyklus für die Ladung einer Batterie nehme ich mit 12min an (<https://www.wiferion.com/produkte/batterien-agv-flurfoerderzeuge-fahrerlose-transportsysteme-etastore/>). Ich würde hier einen induktiven Ladezyklus an der Entnahmestelle bei den Puffersystemen vorschlagen. Hier kann das AGV innerhalb der 90s in kurzen Zyklen die Batterie immer wieder induktiv aufladen. Stimmt das mit euren Einschätzungen überein?

Ich meinte bei diesem Punkt das ein AGV 8h betrieben werden kann und 2h benötigt um die Batterie wieder vollständig zu laden. Eine vollständige Entladung/Beladung einer Batterie ist 1 Ladezyklus. Durch die Gespräche mit Lieferanten wissen wir, dass diese Batterien eine Lebensdauer von 3000-5000 Ladezyklen haben. Das Level ab wann ein AGV zur Ladestation fährt, kann individuell eingestellt werden (in der Regel mit 20% akkustand).

Frage 7) Fallen irgendeine Art Maschinensteuer bzw. Versicherungen an?

Nein.

Frage 8) Gegebenenfalls wäre eine Gegenrechnung für einen möglichen Hinzugewinn an Fläche zu denken? Bei einem völlig automatisierten Puffersystem kann eventuell der Lagerplatz minimiert werden, was wiederum mehr Platz für Fertigungsinseln, Maschinen Stellplätze, etc... bedeuten würde. Habt ihr hier schon mal darüber nachgedacht, oder ist der hinzugewonnene Platz so klein, dass er vernachlässigt werden kann?

Ja, dazu wurde bereits eine Benefit Berechnung durchgeführt, wir würden mit der möglichen Bufferfläche ca. 280 Plätze von 450 Plätzen automatisieren. Dadurch kann eine Fläche von ca. 40-50m² eingespart werden. Durch die Automatisierung zb. Liftgasse, Schaltschränke, Übergabeschleusen wird ebenso Platz eingenommen der nicht für Stellplätze genutzt werden kann.