



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## DISSERTATION

# Entwicklung eines multikriteriellen Evaluierungsmodells für industrielle Assistenzsysteme

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von

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

Technische Universität Wien

Institut für Managementwissenschaften, Mensch-Maschine-Interaktion

unter Begutachtung von

**Prof. Dr. Doris Aschenbrenner**

Hochschule Aalen

Forschungsbereich Digitale Methoden in der Produktion

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ulrich Bauer**

Technische Universität Graz

Institut für Betriebswirtschaftslehre und Betriebssoziologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Dipl.-Ing. Tanja Zigart**

Matrikelnummer: 00925968

Wien, im Oktober 2022

---

Dipl.-Ing. Tanja Zigart



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

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

## Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, im Oktober 2022

---

Dipl.-Ing. Tanja Zigart

## Kurzfassung

Individualisierte Produkte und Dienstleistungen ermöglichen zufriedener Kund:innen, höhere Gewinnspannen und Wettbewerbsvorteile. Das bringt Herausforderungen für die Produktion und insbesondere für manuelle Arbeit mit sich. Die Individualisierung der Produkte führt zu einer Reduzierung des Produktvolumens pro Variante bis hin zur Produktion in Losgröße 1. Demografischer Wandel und unterschiedliche Bildungshintergründe führen zu einer heterogenen Belegschaft und höherer Fluktuation. Industrielle Assistenzsysteme wirken diesen Herausforderungen entgegen und stellen eine Variante dar, menschenzentrierte und ergonomische Produktionsarbeitsplätze zu erhalten.

Assistenzsysteme haben sich in der industriellen Produktion etabliert. Ein objektiver Vergleich von Assistenzsystemen ist jedoch bei der auf dem Markt verfügbaren großen Anzahl an Systemen aufwendig. Bisherige Bewertungen befassen sich hauptsächlich mit der Beurteilung eines einzelnen Assistenzsystems und nicht mit dem Vergleich mehrerer Assistenzsysteme. Eine Schwierigkeit besteht darin, kognitive und physische Assistenzsysteme miteinander zu vergleichen, wie z. B. eine Augmented-Reality-Anwendung mit einem Cobot.

Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines multikriteriellen Evaluierungsmodells zur Bewertung und Vergleichbarkeit von industriellen Assistenzsystemen für die industrielle Anwendung. Auf Basis der Design Science Research Methodology wird das Evaluierungsmodell in mehreren Zyklen erstellt, getestet und weiterentwickelt.

Das Ergebnis dieser wissenschaftlichen Arbeit ist ein multikriterielles Evaluierungsmodell, bestehend aus den fünf Dimensionen (1) Kosten, (2) Prozess, (3) Lernen und entwickeln, (4) Nutzer:innen und (5) Technologie, welche sich weiter in zehn Kriterien unterteilen. Mit dem Analytical Hierarchy Prozess (AHP) wird eine prozess- und unternehmensspezifische Gewichtung der Kriterien festgelegt.

Eine Fallstudie mit 300 Durchläufen in der TU Wien Pilotfabrik und in einem Industrieunternehmen demonstriert die Anwendbarkeit des Evaluierungsmodells auf einen Produktionsprozess, der durch kognitive und physische Assistenzsysteme unterstützt wird. Die Ergebnisse werden in einem Spinnennetzdiagramm gegenübergestellt und zeigen den, je nach Gewichtung der Ziele, am höchsten bewerteten Anwendungsfall. Daraus lassen sich für den Produktionsprozess die geeignetsten Assistenzsysteme ableiten.

Schlagworte zur Forschungsarbeit: multikriterielle Evaluierung, Assistenzsysteme in der Produktion, physische Assistenzsysteme, kognitive Assistenzsysteme

## Abstract

Individualized products and services enable more satisfied customers, higher profit margins, and competitive advantages that are difficult to copy. This development brings challenges for production and especially for human labor. The individualization of products reduces the product volume per variant up to production in batch size 1. Demographic change and different educational backgrounds lead to a heterogeneous workforce and higher fluctuation. Industrial assistance systems help to meet these challenges while maintaining a human-centered and ergonomic production workplace.

Some assistance systems have already found their way into production and are, in some cases, indispensable. However, selecting the right assistance system is complex, given the high number of assistance systems on the market. Previous evaluations have been concerned with assessing a particular system without comparing it to other assistance systems. For example, the difficulty lies in comparing a cognitive assistance system with a physical assistance system, such as comparing an augmented reality application and a cobot.

This dissertation aims to develop a multi-criteria evaluation model for assessing industrial assistance systems and comparability of industrial assistance systems for industrial application. The evaluation model is developed, tested, and improved in several cycles based on the Design Science Research Methodology.

The result of the work is a multi-criteria evaluation model consisting of five dimensions (1) cost, (2) process, (3) learning and developing, (4) user, and (5) technology, which are further subdivided into ten criteria. The Analytical Hierarchy Process (AHP) is used to determine a process- and company-specific weighting of the criteria.

A case study in the TU Vienna pilot factory and in a company with 300 run-throughs demonstrates the applicability of the evaluation model to a process that is supported with cognitive and physical assistance systems. The results are compared in a spider web diagram, from which a recommendation for the best variant corresponding to the weighted objectives is derived.

Keywords related to the work: multi-criteria evaluation, assistance systems in production, physical assistance systems, cognitive assistance systems

## Vorwort und Danksagung

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Managementwissenschaften an der TU Wien, gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), dem Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) sowie der Stiftungsprofessur für „Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems (HCCPPAS)“ (FFG-852789).

Ich danke Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund für die außergewöhnliche Betreuung meiner Dissertation. Sein laufendes, konstruktives Feedback und seine herausfordernden Fragen haben wesentlich zur Entwicklung meiner Dissertation beigetragen. Zusätzlich möchte ich mich für die schöne Zeit am Institut, das entgegengebrachte Vertrauen und die Offenheit, die es mir ermöglichten, neue Ideen auszuprobieren und umzusetzen, bedanken.

Prof. Dr. Doris Aschenbrenner und Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ulrich Bauer, die meine Forschungsarbeit begutachteten, danke ich für die Übernahme dieser Aufgabe und die wertvollen Hinweise zur Verbesserung dieser Dissertation.

Außerdem bedanke ich mich bei den zahlreichen Studienteilnehmer:innen, den Teilnehmer:innen an den Interviews, den Unternehmen und Forschungseinrichtungen für die Ermöglichung der Durchführung meiner Forschungsarbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank der gesamten Forschungsgruppe „Mensch-Maschine-Interaktion“ für die freundschaftliche Zusammenarbeit, den Zusammenhalt, die Unterstützung und die spannenden gemeinsamen Projekte, unseren wertvollen Austausch und unsere (größtenteils virtuellen) gemeinsamen Schreibsessions. Spezieller Dank geht an meine ehemaligen Kolleginnen und Kollegen Christina Schmidbauer, Patrick Rupprecht, Matthias Buhl und Walter Mayrhofer und meiner langjährigen Studienfreundin Lisa Greimel für die Inputs und das Feedback zur Dissertation.

Meinem Partner danke ich vor allem für seine Geduld, die mentale Unterstützung und die motivierenden Worte während meiner Dissertationszeit.

Abschließend gebührt ganz besonderer Dank meiner gesamten Familie, meinen Eltern und meinem Bruder, die mich auf meinem Lebensweg stets unterstützen.

Wien, Oktober 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>VORWORT UND DANKSAGUNG</b> .....	<b>4</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>5</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>8</b>
1.1    MOTIVATION, PROBLEMSTELLUNG, ABGRENZUNG DER ARBEIT .....	8
1.2    FORSCHUNGSFRAGEN UND ZIELSETZUNG .....	10
1.3    AUFBAU UND STRUKTUR DER FORSCHUNGSARBEIT .....	11
1.4    FORSCHUNGSDESIGN UND VORGEHENSWEISE .....	13
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>16</b>
2.1    INDUSTRIELLE ASSISTENZSYSTEME .....	16
2.2    KOGNITIVE ASSISTENZSYSTEME .....	18
2.2.1 <i>Digitale Werkerassistenzsysteme</i> .....	18
2.2.2 <i>Mixed Reality (MR)</i> .....	19
2.2.3 <i>Augmented Reality (AR)</i> .....	20
2.2.4 <i>Virtual Reality (VR)</i> .....	22
2.3    PHYSISCHE ASSISTENZSYSTEME .....	22
2.3.1 <i>Kollaborationsfähige Roboter (Cobots)</i> .....	23
2.3.2 <i>Aktive und passive Exoskelette</i> .....	25
2.4    GRUNDLAGEN DER EVALUIERUNG .....	27
2.5    MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS (MCDA) .....	28
2.5.1 <i>Multi-Attribute Decision Making (MADM)</i> .....	29
2.5.2 <i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i> .....	31
2.6    MENSCH-TECHNIK-ORGANISATION-KONZEPT .....	36
<b>3 STAND DER FORSCHUNG</b> .....	<b>38</b>
3.1    METHODOLOGIE DER LITERATURRECHERCHE .....	38
3.2    SYSTEMATISCHE LITERATURRECHERCHE (SLR) .....	38
3.2.1 <i>Methodologie der systematischen Literaturrecherche</i> .....	38
3.3    QUANTITATIVE DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE DER LITERATURRECHERCHE .....	40
3.4    QUALITATIVE AUSEINANDERSETZUNG MIT DER LITERATUR .....	43
3.4.1 <i>Evaluierung digitaler Assistenzsysteme</i> .....	43
3.4.2 <i>Evaluierung von Augmented-Reality-Anwendungen</i> .....	46
3.4.3 <i>Evaluierung von Virtual-Reality-Anwendungen</i> .....	48
3.4.4 <i>Evaluierung von kollaborationsfähigen Robotern (Cobots)</i> .....	49
3.4.5 <i>Evaluierung von Exoskeletten</i> .....	52
3.4.6 <i>Evaluierungsmodelle für technische Systeme in der Produktion</i> .....	55
3.4.7 <i>Klassifizierung der Publikationen</i> .....	58
3.5    DISKUSSION DER LITERATURRECHERCHE UND AUFZEIGEN DES FORSCHUNGSBEDARFS .....	60
<b>4 MODELLANFORDERUNGEN</b> .....	<b>62</b>
4.1    BEGRIFFSDEFINITION „MODELL“ .....	62
4.2    ANFORDERUNGEN AN EIN MULTIKRITERIELLES EVALUIERUNGSMODELL FÜR ASSISTENZSYSTEME IN DER PRODUKTION .....	63

<b>5</b>	<b>EVALUIERUNGSMODELL FÜR ASSISTENZSYSTEME</b>	<b>65</b>
5.1	DIMENSION KOSTEN	66
5.1.1	<i>Wirtschaftlichkeit</i>	66
5.2	DIMENSION PROZESS	69
5.2.1	<i>(Produktions-) Durchlaufzeit</i>	70
5.2.2	<i>Produktivität</i>	70
5.2.3	<i>Qualität</i>	72
5.3	DIMENSION LERNEN UND ENTWICKELN	73
5.3.1	<i>Qualifikation</i>	74
5.4	DIMENSION NUTZER:INNEN	75
5.4.1	<i>Ergonomie</i>	76
5.4.2	<i>Arbeitsbelastung</i>	78
5.4.3	<i>Gebrauchstauglichkeit (Usability)</i>	80
5.4.4	<i>Nutzer:innenakzeptanz</i>	81
5.5	DIMENSION TECHNOLOGIE	83
5.5.1	<i>Technologischer Reifegrad</i>	83
5.6	VORGEHENSWEISE DER ANWENDUNG DES EVALUIERUNGSMODELLS	84
5.6.1	<i>Auswahl und Gewichtung der Evaluierungskriterien</i>	85
5.6.2	<i>Bewertungsparameter und -skalen</i>	87
5.6.3	<i>Prozesserfassung</i>	89
<b>6</b>	<b>PRAKTISCHE ANWENDUNG DES MODELLS</b>	<b>91</b>
6.1	VORGEHENSWEISE ZUR EVALUIERUNG	91
6.1.1	<i>Industrielle Relevanz</i>	91
6.2	BESCHREIBUNG DES FALLBEISPIELS	92
6.2.1	<i>Arbeitsplatzbeschreibung</i>	92
6.2.2	<i>Eingesetzte Assistenzsysteme</i>	93
6.2.3	<i>Materialbereitstellung</i>	94
6.2.4	<i>Prozessbeschreibung</i>	95
6.2.5	<i>Montageanleitung</i>	97
6.3	DURCHFÜHRUNG DER TESTSZENARIEN	97
6.3.1	<i>Forschungsethik und Datenschutz</i>	97
6.3.2	<i>Testablauf</i>	98
6.3.3	<i>Evaluerte Assistenzsysteme</i>	98
6.3.4	<i>Demografische Daten der Testpersonen</i>	99
6.4	ERGEBNISSE DER DURCHGEFÜHRTEN TESTSZENARIOS	100
6.4.1	<i>Dimension Kosten</i>	100
6.4.2	<i>Dimension Prozess</i>	106
6.4.3	<i>Dimension Lernen und entwickeln</i>	110
6.4.4	<i>Dimension Nutzer:innen</i>	112
6.4.5	<i>Dimension Technologie</i>	117
6.5	ZUSAMMENFÜHRUNG DER ERGEBNISSE UND VERGLEICH DER TESTFÄLLE	118
6.5.1	<i>Einordnung aller Fälle in das Evaluierungsmodell</i>	118
6.5.2	<i>Gewichtung der Dimensionen und Kriterien</i>	120
6.5.3	<i>Gewichtete Auswertung der Ergebnisse</i>	121
6.5.4	<i>Interpretation der Ergebnisse aus der Fallstudie</i>	123
6.6	VALIDIERUNG DER EVALUIERUNG	124
6.6.1	<i>Limitationen der Anwendbarkeit des Evaluierungsmodells</i>	124
6.6.2	<i>Vergleich der Ergebnisse mit Evaluierungsergebnissen im Feldtest</i>	126

6.6.3	<i>Validierung durch Expert:innen – Methodik</i> .....	127
6.6.4	<i>Validierung durch Expert:innen – Auswertung</i> .....	129
6.6.5	<i>Diskussion der Validierungsergebnisse</i> .....	132
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG, DISKUSSION, AUSBLICK</b> .....	<b>134</b>
7.1	ZUSAMMENFASSUNG.....	134
7.2	DISKUSSION DER FORSCHUNGSERGEBNISSE.....	134
7.3	LIMITATIONEN DER ANWENDUNG DES EVALUIERUNGSMODELLS.....	135
7.4	AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF.....	136
<b>8</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>140</b>
8.1	SYSTEMATISCHE LITERATURERCHE.....	140
8.2	METHODENSAMMLUNG.....	141
8.2.1	<i>Qualifikation</i> .....	141
8.2.2	<i>Ergonomie</i> .....	144
8.2.3	<i>Arbeitsbelastung</i> .....	145
8.2.4	<i>Usability</i> .....	145
8.2.5	<i>Nutzer:innenakzeptanz</i> .....	146
8.3	STATISTIKEN FÜR KOSTENABSCHÄTZUNG.....	148
8.4	KOSTENAUFSTELLUNG DER ASSISTENZSYSTEME.....	150
8.5	FORSCHUNGSETHIK UND DATENSCHUTZ.....	151
8.5.1	<i>Forschungsethnisches Dokument</i> .....	151
8.5.2	<i>Datenschutzrechtliche Einwilligungserklärung</i> .....	153
8.6	GEWICHTUNG MIT AHP.....	156
8.7	MONTAGEANLEITUNG.....	159
8.8	ANWENDUNG IN ANDEREN FALLBEISPIELEN.....	159
8.9	INTERVIEWLEITFADEN.....	159
8.10	TRANSKRIPTE DER INTERVIEWS.....	160
8.10.1	<i>Interview 1</i> .....	160
8.10.2	<i>Interview 2</i> .....	164
8.10.3	<i>Interview 3</i> .....	170
8.10.4	<i>Interview 4</i> .....	173
8.10.5	<i>Interview 5</i> .....	181
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>184</b>
<b>10</b>	<b>FORMELVERZEICHNIS</b> .....	<b>187</b>
<b>11</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>188</b>
<b>12</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>191</b>
<b>13</b>	<b>BETREUTE STUDIERENDENARBEITEN</b> .....	<b>193</b>
<b>14</b>	<b>LISTE DER VERÖFFENTLICHTEN TEILERGEBNISSE</b> .....	<b>194</b>
<b>15</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE PROJEKTE</b> .....	<b>195</b>
<b>16</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>196</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation, Problemstellung, Abgrenzung der Arbeit

Steigende Variantenzahlen führen zu kleineren Stückzahlen bis hin zu Losgröße 1, kürzere Lieferzeiten werden vom Markt gefordert, der demografische Wandel wirkt sich auf die Belegschaft und die Rekrutierung von Fachkräften aus und immer kürzere Produktlebenszyklen werden zur Normalität. Der steigende Grad an Digitalisierung und Automatisierung ermöglicht vielfältige neue Wertschöpfungsmöglichkeiten und bedroht gleichzeitig etablierte Geschäftsmodelle. Die Perspektive, die industrielle Sachgüterproduktion wieder zunehmend in Hochlohnländern zu erbringen, führt zu Herausforderungen wie erhöhter Flexibilität, Agilität und Komplexität sowie Qualitätsansprüchen, Preis und Verfügbarkeit für produzierende Unternehmen (Mayrhofer, Kames & Schlund, 2019; Moser et al., 2020; Patsch et al., 2021; Spath et al., 2013; Wichmann et al., 2019). Die Arbeitsaufgaben der Beschäftigten verändern sich und beanspruchen unmittelbar höhere Leistungsanforderungen (Keller et al., 2019). Häufige Produktwechsel, kurzzyklische, flexiblere Wechsel der Arbeitsaufgaben, hochflexibler Einsatz der Mitarbeiter:innen, zyklusunabhängige Arbeitsaufgaben und der Anstieg der Problemlösungs- und Überwachungsaufgaben sind Folgen der Veränderung (Dombrowski et al., 2014; Hannola et al., 2016). In diesem volatilen Umfeld bleibt der Mensch ein wesentlicher Erfolgsfaktor, wobei der Fachkräftemangel ein zunehmendes Problem für Unternehmen darstellt (Mayrhofer, Kames & Schlund, 2019).

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden und die Komplexität der Produktionsprozesse beherrschbar zu machen, können kognitive, physische und individualisierbare Assistenzsysteme dabei helfen, die Herausforderungen wirtschaftlich, ergonomisch und menschenzentriert zu bewältigen (Mayrhofer, Rupprecht & Schlund, 2019; Pokorni et al., 2020; Zigart & Schlund, 2020b).

Bei der Einführung von Assistenzsystemen rückt die Frage der Vergleichbarkeit in der Anwendung für ein und denselben Prozess in den Fokus der Entscheidungstragenden. Dabei ist die umfassende Evaluierung der Prozesse und der eingesetzten Systeme wichtig, um die Konsequenzen zu analysieren. Oft wird nicht ausreichend bzw. systemübergreifend evaluiert, um eine umsichtige Basis für die Entscheidungsfindung zu erhalten (Keller et al., 2019). Die Herausforderung besteht darin, kognitive und physische Assistenzsysteme im selben Prozess zu vergleichen, beispielsweise eine Datenbrille mit einem Exoskelett (Zigart & Schlund, 2020b). In der bestehenden Literatur werden hauptsächlich Systeme einer Art miteinander verglichen, z. B. digitale Assistenzsysteme. Um zu einer vollständigen Betrachtung zu gelangen, ist es daher sinnvoll, unterschiedliche Systeme in einem Prozess einzusetzen und zu evaluieren. Assistenzsysteme sollen nicht nur auf den aktuellen Anwendungsbereich

eingeschränkt werden, sondern für strukturell und materiell unterschiedliche Systeme vergleichbar sein (Weidner, 2016).

Die zugrunde liegende Hypothese dieser Dissertation ist, dass keine multikriterielle Evaluierung für industrielle Assistenzsysteme verfügbar und anwendbar ist. Zur Bewertung und Evaluierung von Assistenzsystemen in der industriellen Produktion existieren bereits facheinschlägige Publikationen, z. B. Bewertungen von kognitiven Assistenzsystemen (Aschenbrenner et al., 2019; Funk, 2016; Hoedt et al., 2016; Keller et al., 2019; Kim et al., 2019; Terhoeven et al., 2018; Zhou et al., 2018) sowie physischen (Constantinescu et al., 2019; Dahmen & Constantinescu, 2020; Mateus et al., 2019; Rashedi et al., 2014; Schmidtler et al., 2017). Diese beschränken sich jedoch nur auf eine Art von Assistenzsystem (z. B. digitale Assistenzsysteme) oder auf eine Fertigungsart (z. B. eine Fertigungslinie) und evaluieren die Assistenzsysteme nicht systemübergreifend. Darüber hinaus existieren Modelle für allgemeine multikriterielle Bewertungen von technischen Systemen und technischen Lösungen im Bereich Industrie 4.0 (Abdel-Kader & Dugdale, 2001; Dengler et al., 2017; Liebrecht et al., 2017).

Um eine systemübergreifende, multikriterielle Evaluierung zu entwickeln, ist sowohl die Einbeziehung von prozessrelevanten als auch von menschenzentrierten Kriterien notwendig. Das Mensch-Technik-Organisation-Konzept (MTO-Konzept, siehe Kapitel 2.6) gilt daher als Leitstern für die ausgewogene Gestaltung von Assistenzsystemen (Reinhart, 2017; Ulich, 2013). Aus der Mensch-Technik-Interaktion ergeben sich neue Potenziale und Herausforderungen, wodurch eine menschenzentrierte Technikgestaltung notwendig ist. Durch die heterogenen Aufgaben und Qualifikationen für Produktionsmitarbeiter:innen entstehen neue Rahmenbedingungen für die Organisation. Gleichzeitig bieten sich neue Einsatzmöglichkeiten für cyberphysische Systeme (Reinhart, 2017).

In der bestehenden Literatur gibt es Beispiele, welche trotz Anwendung einer multikriteriellen Evaluierung den tatsächlichen Nutzen des Assistenzsystems nicht zeigen. Bosch et al. (2020) beschreiben fünf Augmented-Reality-Anwendungen durch Projektion von Informationen am Arbeitsplatz bei unterschiedlichen Unternehmen. Die Systeme wurden evaluiert und für gut befunden. Trotzdem führen zwei von fünf Unternehmen die Anwendung aufgrund der entstehenden Kosten nicht ein. Bei genauerer Betrachtung der Evaluierung wird ersichtlich, dass der Faktor Kosten nicht berücksichtigt wurde. Die verwendeten Kriterien sind Zeit, Einschulungsdauer, Produktqualität, Arbeitsbelastung, Akzeptanz und Arbeitsfähigkeit. Dieses Beispiel zeigt, dass trotz Evaluierung mehrerer Kriterien eine umfassende Bewertung nicht sichergestellt ist. Auf der anderen Seite zeigen Expert:inneninterviews, dass technische Systeme eingeführt und aufgrund von fehlender Usability oder Nutzer:innenakzeptanz sogenannte Workarounds gefunden werden, um die neuen

Prozesse zu umgehen. Das sind meist Assistenzsysteme, bei denen die Bewertung von Kostenreduktionen und Effizienzsteigerungen im Vordergrund standen (Expert:inneninterview siehe Anhang 8.10.3). Daher ist ein ausgewogener Kriterienatz notwendig.

## 1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Unter Assistenzsystemen werden alle Technologien zusammengefasst, die Menschen in der Produktion bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten unterstützen, ohne sie zu substituieren. Die Hoheit über die Ausführung und Bedienung des Systems bleibt beim Menschen, wobei vom System keine Gefahr für die bedienende Person oder für Dritte ausgehen darf (Weidner et al., 2015).

Assistenzsysteme haben sich in der industriellen Produktion etabliert. Die Auswahl eines geeigneten Assistenzsystems für den ausgewählten Prozess ist allerdings bei der Vielzahl an verfügbaren Assistenzsystemen aufwendig. Bisherige Evaluierungen zeigen eine Bewertung eines einzelnen Systems, ohne dieses mit anderen Assistenzsystemen zu vergleichen. Die Komplexität besteht darin, z. B. ein kognitives mit einem physischen Assistenzsystem zu vergleichen. Ein Modell zur multikriteriellen Evaluierung von Assistenzsystemen ist in der derzeitigen Literatur nicht bekannt und wird im Rahmen dieser Dissertation entwickelt.

Das Modell stützt sich hierzu auf die Methode der multikriteriellen Optimierung, welche Kompromisslösungen für Entscheidungsprobleme mit mehreren und gegenläufigen Zielen anstrebt (Geldermann, 2008). Für die Evaluierung von Assistenzsystemen werden nicht nur klassische Produktivitäts- und Qualitätskennzahlen in die Bewertung einbezogen, sondern auch Kriterien hinsichtlich Usability, Ergonomie, Qualifikation und Nutzer:innenakzeptanz. Darüber hinaus wird auch der Einfluss des Reifegrads der im Assistenzsystem eingesetzten Technologie bewertet.

Ausgehend von der Problemstellung ergeben sich für die vorliegende Dissertation die folgenden Forschungsfragen:

1. Wie lassen sich Assistenzsysteme in der Produktion multikriteriell und vergleichbar evaluieren?
2. Wie sind Kriterien auszulegen, um diese sowohl auf physische als auch auf kognitive Assistenzsysteme anzuwenden?
3. Wie kann eine Vergleichbarkeit der Unterkriterien geschaffen werden?
4. Wie kann das Evaluierungsmodell auf Produktionsprozesse, welche mit industriellen Assistenzsystemen unterstützt werden, erfolgreich angewendet und validiert werden?

Daraus lassen sich die folgenden Ziele für diese Forschungsarbeit ableiten: Im Rahmen dieser Dissertation wird ein Modell zur multikriteriellen Evaluierung von

industriellen Assistenzsystemen, das sowohl physische als auch kognitive Assistenzsysteme mit einer festgelegten Vorgehensweise durch einen quantitativen Soll-/Ist-Vergleich evaluiert, entwickelt. Die schnellere, einfachere und umfassendere Evaluierung gibt Industrial Engineers und Prozessplaner:innen ein Werkzeug für den Vergleich bei der Einführung von einem oder mehreren Assistenzsystemen an die Hand.

### 1.3 Aufbau und Struktur der Forschungsarbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Abschnitte unterteilt, siehe Abbildung 1. In der Einleitung werden das Forschungsvorhaben, die Problemstellung und die Forschungsfragen definiert und die ausgewählte Forschungsmethode beschrieben. In Kapitel 2 werden die Grundlagen zu industriellen Assistenzsystemen erläutert und die Assistenzsysteme, für die das Evaluierungsmodell gültig ist, vorgestellt. Zusätzlich werden Grundlagen zur Evaluierung und zur multikriteriellen Entscheidungsfindung erklärt. In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Forschung zur Evaluierung industrieller Assistenzsysteme gezeigt. Des Weiteren werden die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche dargestellt und diskutiert. In Kapitel 4 werden die Anforderungen an ein Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme festgelegt und die konkrete Vorgehensweise für die Entwicklung des Modells abgeleitet. Kapitel 5 zeigt das entwickelte Evaluierungsmodell und die verwendeten Methoden. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise zur Anwendung des Modells beschrieben. Um die Wirksamkeit des Modells zu zeigen, wird es anhand eines Fallbeispiels mit kognitiven und physischen Assistenzsystemen an einem Prozess in der TU Wien Pilotfabrik und in einem Industrieunternehmen evaluiert. Im letzten Kapitel werden das entwickelte Modell und die Validierungsergebnisse diskutiert, Limitationen des Modells aufgezeigt und weiterer Forschungsbedarf erläutert.



Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Forschungsarbeit

## 1.4 Forschungsdesign und Vorgehensweise

Das in dieser Dissertation entwickelte Modell wird zur Evaluierung industrieller Assistenzsysteme herangezogen und mittels eines Fallbeispiels auf Wirksamkeit bewertet. Hierbei werden unterschiedliche Assistenzsysteme und verschiedene Kombinationen dieser Systeme im selben Prozess angewendet und mit dem Ist-Prozess verglichen. Als Beispielprozess werden die industrielle Bestückung und Verkabelung eines industriellen Schaltschranks herangezogen. Als Forschungsmethode stellt sich die Design Science Research Methodology (DSRM) nach Peffers et al. (2007) als geeignet heraus (siehe Abbildung 2). Der Ansatz wurde ursprünglich in der Forschung von Informationssystemen und -technologie entwickelt, welche vier Arten von Artefakten berücksichtigt. Darunter ist neben der Entwicklung von Konstrukten, Methoden und Instanzen die Modellentwicklung als Artefakt beinhaltet. Die DSRM eignet sich zur Lösung praxisnaher Problemstellungen, darüber hinaus wird auch die Leistungsfähigkeit des Artefakts untersucht. Die Vorgehensweise nach Peffers unterteilt die Evaluierung in zwei Aktivitäten: die Demonstration und die Evaluation. Im Prozessschritt Demonstration wird das Modell erstmalig getestet und die Funktion geprüft. Im Schritt Evaluation wird die finale Evaluierung des Modells durchgeführt (Venable et al., 2012). Nach der DSRM gibt es mehrere mögliche Eintrittspunkte, welche je nach Forschungsvorhaben gewählt werden können. In dieser Forschungsarbeit wird von einer problemzentrierten Ausgangslage ausgegangen, da ausgehend von einem Problem aus der industriellen Praxis eine wissenschaftliche Problemstellung formuliert wird.

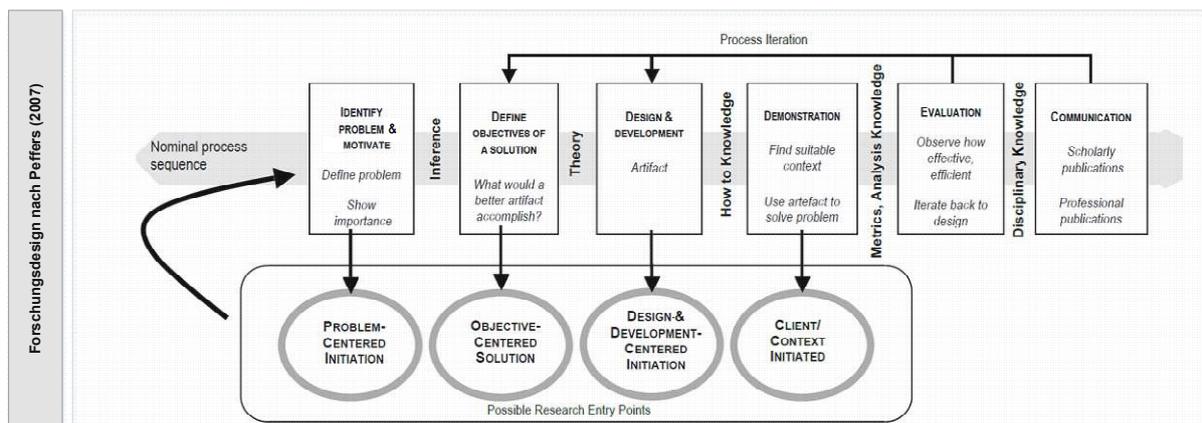


Abbildung 2: Design Science Research Methodology (DSRM) nach Peffers et al. (2007, S. 48)

Folgende Schritte zur Fertigstellung des Forschungsvorhabens werden laut DSRM nach Peffers et al. (2007) durchlaufen:

### Identify Problem and Motivate

1. *Definition Problemstellung*: Die Ausgangslage, die Motivation und die Vorgehensweise für das Forschungsvorhaben werden erklärt.

2. *Ermittlung der Forschungsfragen*: Die Forschungsfragen werden aus der Problemstellung abgeleitet.
3. *Ermittlung State of the Art durch Literaturrecherche*: Eine systematische Literaturrecherche zu den Themen Evaluierung industrieller Assistenzsysteme wird nach Okoli und Schabram (2010) durchgeführt und der State of the Art dargestellt.

### **Define Objectives of a Solution**

4. *Aufzeigen der Forschungslücke*: Auf Basis der Literaturrecherche werden die Forschungslücke und die Ziele in Bezug auf den bisherigen Stand der Forschung und Stand der Technik aufgezeigt.
5. *Verfeinerung der Forschungsfragen*: Die Forschungsfragen werden verfeinert und die Ziele definiert.

### **Design and Development**

6. *Konzeptentwicklung – Evaluierungsmodell*: Nach einer Anforderungsanalyse wird ein Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme entwickelt und die verwendeten Methoden und Kriterien werden spezifiziert und erläutert.

### **Demonstration**

7. *Evaluierung AR/VR-Use Cases*: Die Anwendung des Modells wird anhand von AR/VR-Use Cases mit Expert:inneninterviews und User:innen-Fragebögen getestet. Über eine iterative Schleife fließen die Ergebnisse der ersten Evaluierung im vorangegangenen Schritt der Konzeptentwicklung ein.
8. *Ausrollung auf weitere Assistenzsysteme*: Das entwickelte Evaluierungsmodell wird auf weitere Assistenzsysteme angewendet. Erkenntnisse dienen wiederum zur Weiterentwicklung des Evaluierungsmodells.

### **Evaluation**

9. *Test*: Die Evaluierung zeigt, wie wirksam das entwickelte Evaluierungsmodell hinsichtlich praktischer Problemlösung ist und ob die Forschungsziele erreicht werden. Hierfür wird ein Demonstrator in der TU Wien Pilotfabrik aufgebaut und in je 150 Durchläufen mit Studierenden und Fachkräften getestet und evaluiert. Ein passives Exoskelett, ein Cobot, ein digitales Assistenzsystem und ein Projektionsystem werden in demselben Prozess in unterschiedlichen Kombinationen verwendet. Hier kommt ebenfalls ein zirkulärer Prozess zur Anwendung, welcher die schrittweise Anpassung des Evaluierungsmodells ermöglicht. Ergänzend werden Fokusgruppeninterviews mit Expert:innen aus Industrie und Wissenschaft durchgeführt.

### **Communication**

10. *Ergebnisveröffentlichung*: Die Ergebnisse werden in Form dieser Dissertation veröffentlicht und für relevante Gruppen aus Forschung und Industrie zur Verfügung gestellt. Konzepte und Zwischenergebnisse werden vorab auf ausgewählten Fachkonferenzen präsentiert und in Journals publiziert.

Abbildung 3 zeigt das Forschungsdesign, die durchgeführten Zyklen sowie die angewendeten Methoden während der Entwicklung des Evaluierungsmodells.

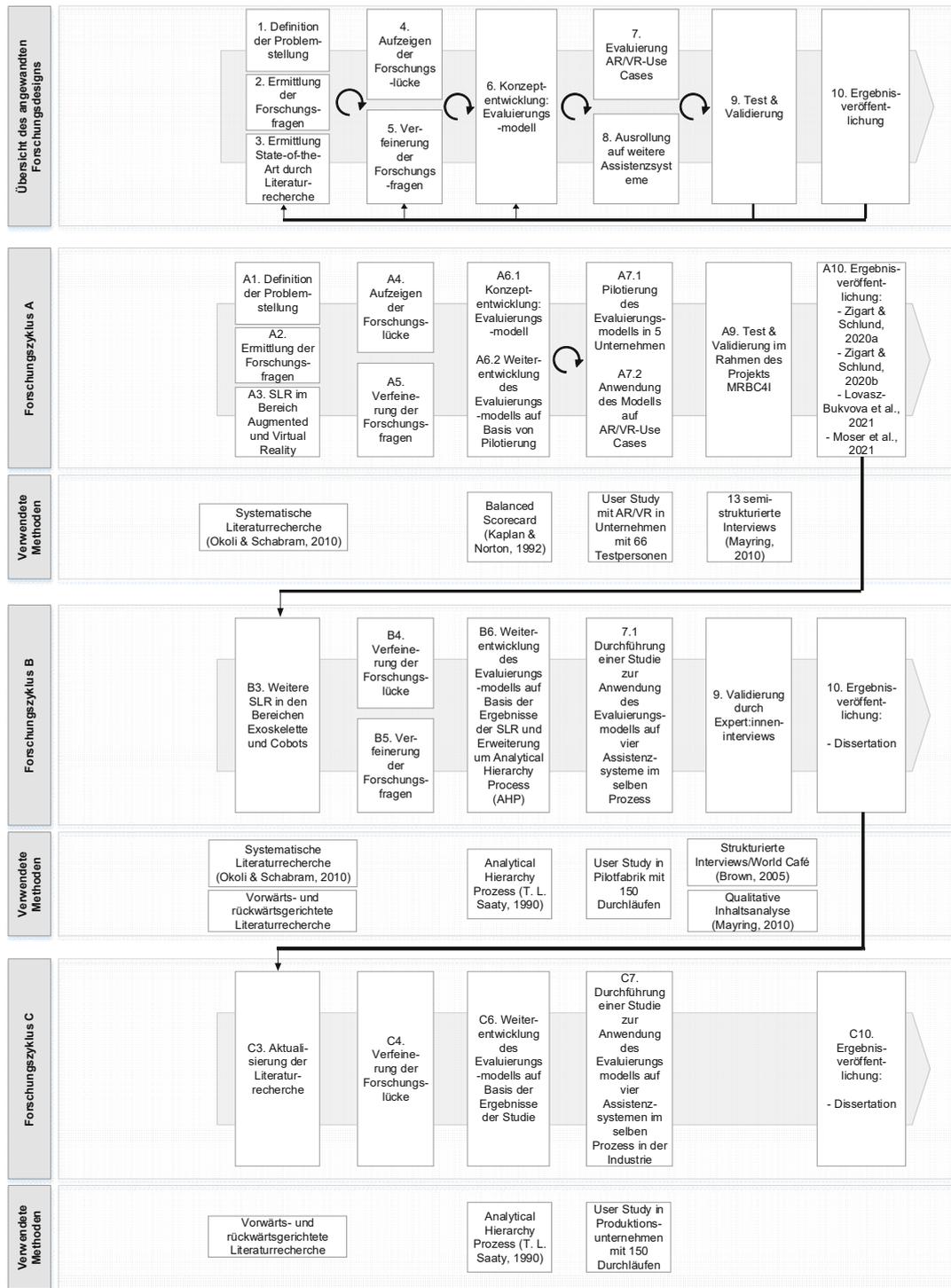


Abbildung 3: Forschungszyklen und verwendete Methoden im Rahmen der DSRM, eigene Darstellung

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wird im Vorfeld eine Literaturrecherche durchgeführt (Vorgehensweise siehe Abbildung 14). Der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf Evaluierungen von Assistenzsystemen wird anhand einschlägiger verfügbarer wissenschaftlicher Artikel und Fachbüchern betrachtet.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden industrielle Assistenzsysteme beschrieben. Kognitive und physische Assistenzsysteme, für welche das Evaluierungsmodell angewendet wird, werden erläutert und mögliche Einsatzgebiete dargelegt. Anschließend werden Grundlagen zur Evaluierung und zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden erklärt.

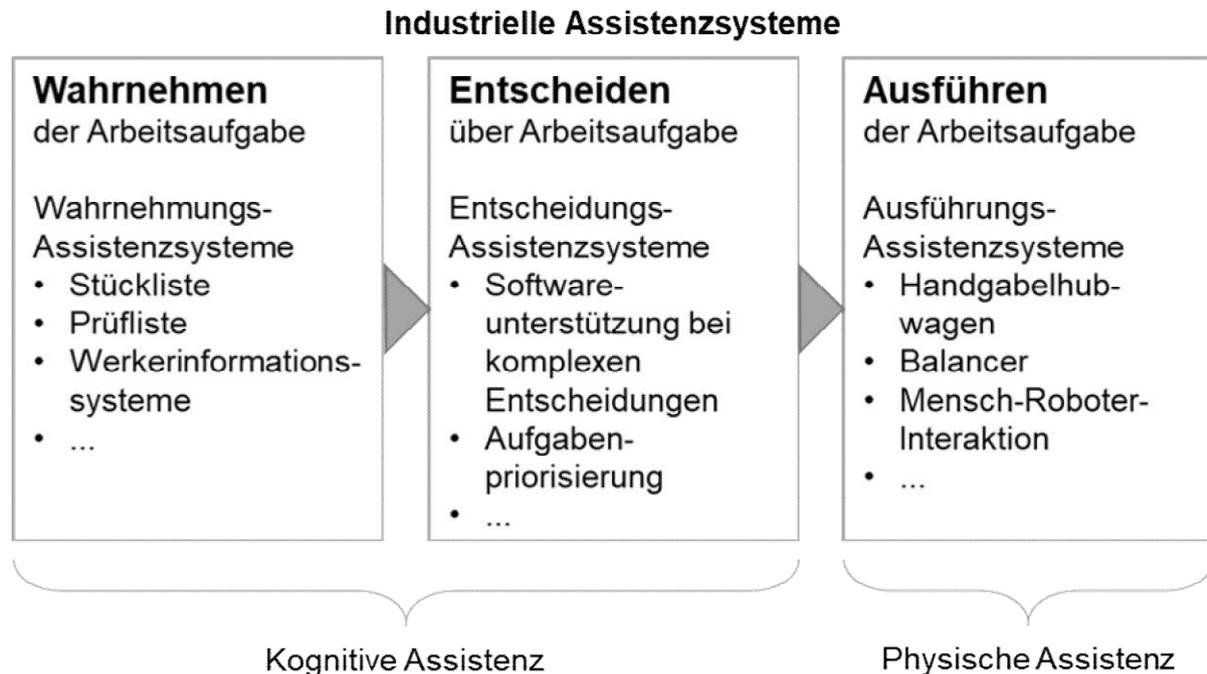
### 2.1 Industrielle Assistenzsysteme

Zukünftige Fabriken können die Flexibilität, Agilität und Wettbewerbsfähigkeit erhöhen, indem sie die Rolle der Arbeitnehmer:innen stärken, die ihre Fähigkeiten und Kompetenzen kontinuierlich weiterentwickeln. Neue Technologien tragen dazu bei, Fertigkeiten auf neue Generationen von Arbeitnehmer:innen zu übertragen, während leistungsgewandelte Arbeitnehmer:innen mit besseren Informationen unterstützt werden (Tolio et al., 2019). Assistenzsysteme in der Produktion helfen Menschen bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten, ohne sie zu substituieren. Die Hoheit über die Ausführung und Bedienung des Systems bleibt beim Menschen, wobei vom System keine Gefahr für die bedienende Person oder für Dritte ausgehen darf (Weidner et al., 2015). Mit dem Einsatz von Assistenzsystemen werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Beispiele sind die Verringerung von Produktions- und Montagefehlern, die Steigerung der Produktivität, die Verringerung der Durchlaufzeiten oder die Reduktion der Einschulungsdauer von Mitarbeiter:innen für neue Tätigkeiten. Andererseits können Assistenzsysteme bei der Reduzierung der kognitiven Belastung und des Stresslevels der Mitarbeiter:innen unterstützen, verschleißbedingte Erkrankungen durch ergonomische Arbeitsplätze vorbeugen und die Inklusion von leistungsgeminderten und -gewandelten Personen fördern (Wischmann & Hartmann, 2018).

Für die Klassifizierung von unterschiedlichen Assistenzsystemen finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze. Weidner (2016) zeigt ein „Periodensystem“ für Unterstützungssysteme, welches die horizontale Achse als räumliche Beziehung zwischen Körper und Unterstützungssystem heranzieht. An der vertikalen Achse wird die kommunikative Ebene zwischen Mensch und Technik abgebildet. Daraus ergibt sich eine Matrix, deren Felder einzelnen Unterstützungssystemen zugeordnet werden können.

Eine weitere Einordnung von Assistenzsystemen in der Industrie zeigt Reinhart (2017), welcher die Systeme anhand der Art der Unterstützung einteilt und zwischen kognitiver und physischer Assistenz unterscheidet (Abbildung 4). „Unter (Mitarbeiter-) Assistenzsystemen können jegliche Systeme verstanden werden, die den Mitarbeiter bei seinen Handlungen unterstützen. Dabei können sie die Informations-, Entscheidungs- und Ausführungsebene adressieren, wobei Wahrnehmungs- und Entscheidungsassistenzsysteme als kognitive Unterstützung und

Ausführungsassistenzsysteme als physische Unterstützung verstanden werden können“ (Reinhart, 2017, S. 57). Assistenzsysteme reichen von einfachen physischen Unterstützungssystemen, wie z. B. Werkzeugen, bis hin zu hochtechnischen Systemen wie kollaborationsfähigen Robotern oder Exoskeletten. Digitale Assistenzsysteme werden z. B. zum Anzeigen von Arbeitsanweisungen in der Montage oder zur Instandhaltung eingesetzt (Apt et al., 2018; Weidner et al., 2015).



**Abbildung 4: Kognitive und physische Assistenzsysteme, eigene Abbildung in Anlehnung an Reinhart (2017, S. 57)**

Eine weitere mögliche Klassifizierung von Assistenzsystemen stellen Romero et al. (2016) vor. Sie unterteilen die Systeme in kognitive, physische und sensorische Unterstützung. Dabei wird die Erfassung von Informationen über Sensoren sowie deren Verarbeitung und Aufbereitung zum leichteren Verständnis oder zur Entscheidungsfindung beschrieben (Romero et al., 2016). Sensorische Systeme unterstützen die fünf Sinne des Menschen. In Produktionsumgebungen sind vor allem die visuelle Assistenz (z. B. digitale Anzeigen, Laserprojektion, 2D- oder 3D-Kameras mit Bildauswertung), die auditive (z. B. Signaltöne, Sprache) und die taktile Assistenz (Vorrichtungen, Vibration, Druckpunkte) relevant (R. Müller et al., 2014).

In dieser Forschungsarbeit werden unterstützende Systeme nach der Definition von Weidner et al. (2015) und kognitive und physische Assistenzsysteme nach der Definition von Reinhart (2017) betrachtet. Die Schwierigkeit der Vergleichbarkeit liegt vor allem in den unterschiedlichen Arten der Unterstützung, wobei zwischen kognitiver und physischer Assistenz unterschieden wird. Sensorische Assistenzsysteme werden als Teil der kognitiven Assistenzsysteme betrachtet, da diese häufig in der Kombination in einem System auftreten, z. B. die kognitiv-sensorische Unterstützung

in Form einer Augmented-Reality-Brille durch adressierte visuelle und auditive Assistenz (Apt et al., 2018). In den folgenden Unterkapiteln werden die betrachteten Assistenzsysteme und deren Technologie beschrieben sowie näher auf deren Einsatzbereiche eingegangen.

## 2.2 Kognitive Assistenzsysteme

Durch kognitive Assistenzsysteme werden Informationen anwendungsgerecht und echtzeitnah zur Entscheidungsunterstützung von Beschäftigten bereitgestellt. Je nach Unterstützungsgrad unterstützt ein kognitives System die Reaktions-, Denk-, Merk- und Schlussfolgerungsfähigkeit des Menschen (Apt et al., 2018; R. Müller et al., 2014). In Abbildung 5 sind kognitive Assistenzsysteme kategorisiert.



**Abbildung 5: Einteilung von kognitiven Assistenzsystemen im Rahmen dieser Forschungsarbeit, eigene Darstellung**

In der vorliegenden Untersuchung werden die in Abbildung 5 gezeigten kognitiven Assistenzsysteme betrachtet. Im Folgenden werden diese Systeme sowie deren Einsatzgebiete beschrieben.

### 2.2.1 Digitale Werkerassistenzsysteme

Die Vielzahl und Komplexität an Varianten von zu produzierenden Bauteilen resultieren in einer hohen Varianz in der Produktion. Um Qualität und Produktivität sicherzustellen und um Personalwechsel und dem demografischen Wandel entgegenzuwirken, werden Prozesse mit digitalen Werkerassistenzsystemen unterstützt (Oestreich et al., 2019). An Montage- und Fertigungsarbeitsplätzen werden verschiedene Arten von Informationsbereitstellungssystemen eingesetzt (Rupprecht et

al., 2020), welche in Abbildung 5 dargestellt sind. Nach DIN EN ISO 635 ist das Arbeitssystem als Interaktion zwischen Mensch und Arbeitsequipment definiert, um eine Tätigkeit ordnungsgemäß auszuführen. Assistenzsysteme, als Teil von Arbeitssystemen, unterstützen die Mitarbeiter:innen bei der Ausführung ihrer Tätigkeit. (Keller et al., 2019; Stockinger et al., 2021) Durch digitale Werkerassistenzsysteme können sich Beschäftigte besser auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren, um die Fehlerhäufigkeit zu reduzieren (Mayrhofer, Kames & Schlund, 2019). Digitale Assistenzsysteme unterstützen Mitarbeiter:innen beim Erlernen neuer Tätigkeiten, beim Erweitern ihres Wissen, mit Hilfestellungen bei spezifischen Problemen und durch Information bei Änderungen (Oestreich et al., 2019). Beispiele für digitale Assistenzsysteme sind die Bereitstellung von Informationen wie Arbeitsanweisungen und Verfahrensschritte zur Qualitätskontrolle (Blumberg & Kauffeld, 2020). Des Weiteren unterstützen digitale (Lern-)Assistenzsysteme bei der Einschulung und Weiterbildung das arbeitsplatznahe Lernen. Idealerweise ist das digitale Assistenzsystem an das Qualifikationslevel der Mitarbeiter:innen angepasst und hilft individuell bei der Ausführung der Tätigkeiten (Oestreich et al., 2019).

Digitale Werkerassistenzsysteme lassen sich anhand der eingesetzten Technologie weiter unterteilen. In den folgenden Unterkapiteln werden Mixed Reality und die weitere Unterteilung in Augmented und Virtual Reality näher betrachtet.

### 2.2.2 Mixed Reality (MR)

Mixed Reality (MR) beschreibt im Reality-Virtuality-Kontinuum Technologien zwischen vollständig realer und vollständig virtueller Umgebung (Milgram & Kishino, 1994), siehe Abbildung 6. Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) sind die beiden bekanntesten Vertreter, welche in dieser Forschungsarbeit genauer betrachtet werden.

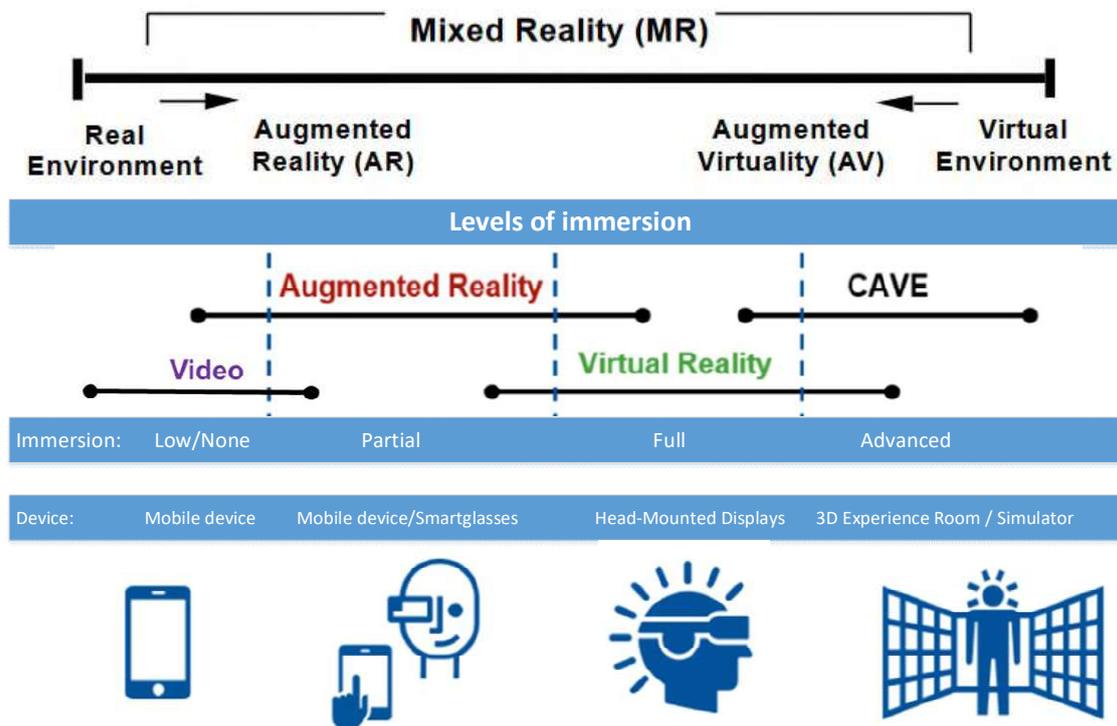


Abbildung 6: Mixed-Reality-Kontinuum mit den Levels der Immersion, aus Schlund und Zigart (2020) in Anlehnung an Milgram und Kishino (1994, S. 3)

Ein Beispiel für Mixed Reality in der Industrie ist der Einsatz von AR-Anwendungen in der Instandhaltung durch die Unterstützung aus der Ferne, welcher als sogenannter „Remote Support“ definiert wird. Diese Anwendungen sind sowohl mit mobilen Geräten als auch mit Datenbrillen üblich. Typische VR-Anwendungen sind der Einsatz bei Schulungen und Weiterbildungen oder zu Visualisierungszwecken von Neuentwicklungen (Damiani et al., 2018). Ein sogenannter „CAVE“ (Cave Automatic Virtual Environment), in der die Anwender:innen in einem Raum mit Projektionen in die virtuelle Realität eintauchen, wird ebenfalls zu Visualisierungs- und Trainingszwecken eingesetzt (Tian et al., 2015). In dieser Untersuchung wird diese Technologie nicht weiter betrachtet, da sie in der Produktion selbst größtenteils durch VR-Brillen abgelöst wurde.

In den folgenden Unterkapiteln werden die in dieser Forschungsarbeit betrachteten Technologien AR und VR sowie deren Ziele und Einsatzgebiete genauer erläutert.

### 2.2.3 Augmented Reality (AR)

Augmented Reality (AR) bietet die Möglichkeit, genau die Informationen dort einblenden zu lassen, wo und wann sie benötigt werden. Die Vision ist die Verschmelzung von realer Umwelt und digitaler Information. Augmented Reality (dt. erweiterte Realität) ist eine Form der Mensch-Technik-Interaktion, durch die computergenerierte Zusatzobjekte in der realen Welt eingeblendet werden (Ludwig & Reimann, 2005). User-Experience-Design und Ergonomie für den Menschen sind von

großer Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung in der Praxis (Peissner & Hipp, 2013). Im industriellen Einsatz bieten AR-Anwendungen erhebliches Potenzial z. B. für Effizienzsteigerungen, Kosteneinsparungen und effektivere Einschulungsprozesse.

Laut Azuma (1997) erfüllt AR drei Punkte: AR (1) verbindet die virtuelle und reale Welt (d. h. reale und virtuelle Komponenten müssen vorhanden sein), (2) ist interaktiv in Echtzeit (d. h. Computer und Displaytechnologie müssen eine Interaktion in Echtzeit ermöglichen) und (3) erfasst in 3-D (d. h. reale und virtuelle Objekte stehen in Beziehung zueinander).

Für die Verwendung von AR werden drei Arten von Geräten verwendet: mobile Geräte (z. B. Smartphones, Tablets), Datenbrillen, auch genannt „Head-Mounted Displays“ (HMD) und Projektoren. Je nach Einsatz wird das passende Gerät ausgewählt. Wenn beispielsweise beide Hände für die Ausführung der Tätigkeit benötigt werden, eignet sich eine Datenbrille oder ein Projektor (Rupprecht, 2022). Industrielle AR-Anwendungen werden seit Anfang der 1990er-Jahre beforscht (Billinghurst et al., 2015; Chatzopoulos et al., 2017; van Krevelen & Poelman, 2010). In den letzten Jahren nimmt der Einsatz vor allem durch die verbesserte Technologie zu (Lacueva-Pérez et al., 2018).

Beispiele für mögliche Anwendungsgebiete von Augmented Reality in der Produktion sind Service, Wartung und Instandhaltung von Maschinen (Remote Support, virtueller Helfer und Problemlöser; (Bottani & Vignali, 2019)), Anzeigen von Arbeitsinformationen, Warnungen, zusätzliche Informationen, Unterstützung bei der Qualitätssicherung, Anwendungen in der Logistik (z. B. Kommissionierung, Pick-by-Light/Vision, Routenplanung, Navigation im Lager). Die prozentuale Verteilung in der Praxis ist in Abbildung 7 dargestellt (Baroroh et al., 2021).

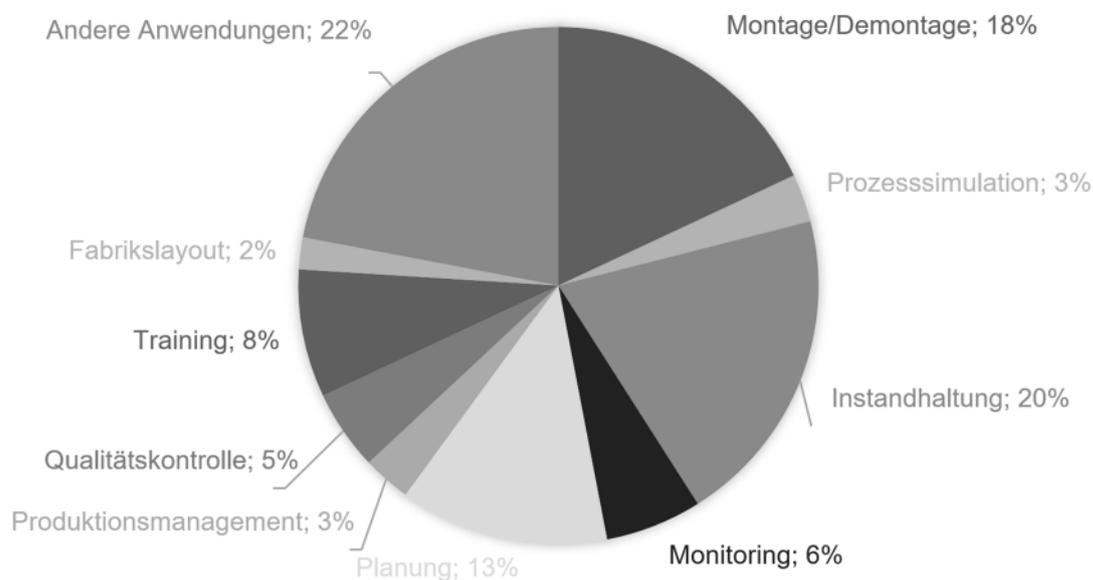


Abbildung 7: Industrielle Augmented-Reality-Anwendungen, eigene Abbildung und Übersetzung von Baroroh et al. (2021, S. 705)

In Anwendungsfeldern, in denen ein Training unter Realbedingungen zu gefährlich oder zu aufwendig ist und einen teuren Trainingsbereich erfordert, ermöglicht Augmented Reality eine Alternative zu herkömmlichen Trainingsmethoden wie Filmen, Seminaren oder Lehrbüchern, die häufig nur ein unzureichendes Abbild der Wirklichkeit bieten können (Damiani et al., 2018; Klöß, 2021; Ludwig & Reimann, 2005; Quandt et al., 2018).

Im Gegensatz zu Augmented Reality tauchen Nutzer:innen in der Virtual Reality in eine rein virtuelle Welt ein (Milgram & Kishino, 1994).

### 2.2.4 Virtual Reality (VR)

Mit zunehmender Produktkomplexität in der Fertigungsindustrie bietet Virtual Reality (VR) die Möglichkeit, Montageprozesse bereits in frühen Produktentwicklungsphasen immersiv zu bewerten oder ohne physisches Produkt zu schulen (Otto et al., 2019).

Technologisch gesehen gibt es für die Verwendung von VR kabelgebundene und kabellose VR-Brillen. Die Steuerung funktioniert entweder über Gestensteuerung oder über einen Handcontroller. Zusätzlich steht VR-Zubehör zur Verfügung, um zusätzliche Sinne anzuregen (z. B. durch die Simulation von Geruch), Bewegung im VR-Raum zu ermöglichen (z. B. durch geeignete Schuhe) und haptisches Feedback zu generieren (z. B. durch Handschuhe).

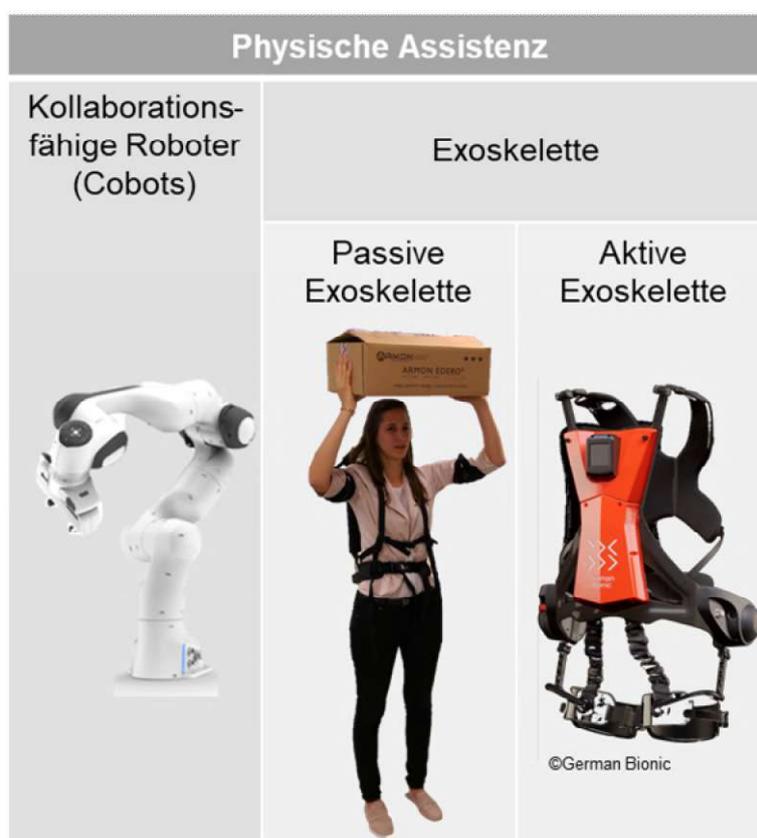
Der Einsatz von VR ist bereits in vielen Branchen verbreitet und wird häufig für immersive Schulungen eingesetzt. Beispiele für mögliche Anwendungsgebiete von Virtual Reality in der Produktion sind die Anwendung in Produktentwicklung und Design (z. B. virtueller Prototyp, Design-Studien), die Verwendung in Montage und Produktion bei der Planung von Produktions- und Montagelinien (z. B. Simulation von Roboterkollisionen, Zugänglichkeit) oder bei der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung. Ausbildung und Schulung (z. B. für Inbetriebnahme und Wartung, Simulation kritischer Betriebszustände) bieten uneingeschränkte Möglichkeiten des Wiederversuchens und das Lernen durch aktive Teilnahme (Damiani et al., 2018; Klöß, 2021).

Im folgenden Kapitel werden physische Assistenzsysteme und deren Einsatzgebiete näher beschrieben.

## 2.3 Physische Assistenzsysteme

Durch physische Assistenzsysteme werden Anwender:innen körperlich und ergonomisch bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten unterstützt. Je nach Technologie werden die Anwender:innen durch Tragen von Assistenzsystemen direkt am Körper, z. B. Exoskelette, oder durch die Verlagerung von repetitiven und unergonomischen Tätigkeiten auf eine Maschine oder einen Roboter, z. B. einen kollaborationsfähigen

Roboter, unterstützt (Bornmann et al., 2016; R. Müller et al., 2016). Durch physische Assistenzsysteme soll entweder die körperliche Belastung reduziert und die Ausführbarkeit einer Aufgabe ermöglicht werden oder die Ausführungsgeschwindigkeit, -präzision oder -qualität gesteigert werden (Reinhart et al., 2013). Überkopfarbeiten sowie repetitive, kurzzyklische Tätigkeiten und eng getaktete Arbeitsinhalte, z. B. in Fließlinien der Motoren- und Fahrzeugmontage, zählen zu Arbeitsplätzen mit der Möglichkeit zur Unterstützung mit physischen Assistenzsystemen (Schlund et al., 2018). Abbildung 8 zeigt eine Einteilung von physischen Assistenzsystemen.



**Abbildung 8: Einteilung von physischen Assistenzsystemen für diese Forschungsarbeit, eigene Darstellung**

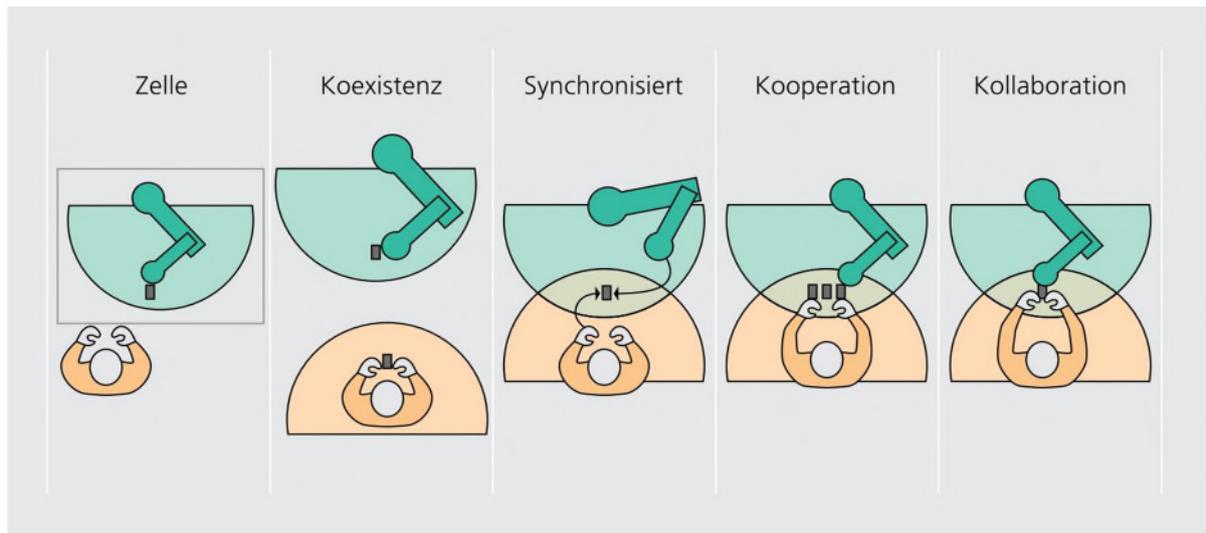
In dieser Forschungsarbeit werden physische Assistenzsysteme wie in Abbildung 8 eingeteilt und in den folgenden Unterkapiteln beschrieben und Anwendungen in der Praxis erläutert.

### 2.3.1 Kollaborationsfähige Roboter (Cobots)

Kollaborationsfähige Roboter, kurz Cobots, tragen zur körperlichen Belastungsreduktion bei, indem von ihnen repetitive Tätigkeiten übernommen werden oder ein Bauteil dem Menschen in ergonomisch geeigneter Position zur Verfügung gestellt wird (Reinhart et al., 2013; X. V. Wang et al., 2017). Cobots dienen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Robotern und ermöglichen den Einsatz von

Robotik bei gleichzeitigem Erhalt der Flexibilität des Menschen (M. P. de Looze et al., 2016). Die Maschine übernimmt jene Arbeit mit geringer Produktvarianz und hohem Wiederholungscharakter oder kraftraubenden Tätigkeiten. Der Mensch führt dabei Aufgaben aus, welche hohe Flexibilität, Adaptions- und Reaktionsfähigkeiten erfordern (Weidner et al., 2015). Mensch und Roboter arbeiten im kollaborativen Betrieb, wobei das Robotersystem einschließlich des Werkstücks und der Mensch im Kollaborationsraum zusammenarbeiten (DIN-Normenausschuss Maschinenbau, 2017).

Der Begriff Mensch-Roboter-Kooperation wird im Allgemeinen für eine schutzzaunlose Roboteranwendung verwendet. Die Trennung zwischen dem Arbeitsbereich des Roboters und des Menschen wird aufgehoben und ein gemeinsamer, überlappender Bereich dient zur Verrichtung der Arbeit, siehe Abbildung 9. Zusätzlich lässt sich in der Interaktionsart zwischen Kooperation und Kollaboration unterscheiden. In der Kooperation arbeiten Roboter und Mensch im gemeinsamen Arbeitsraum, allerdings an unterschiedlichen Bauteilen oder Produkten. Hingegen arbeiten bei der Kollaboration beide gleichzeitig am selben Bauteil oder Produkt. Richtwerte für maximale Geschwindigkeiten und biomechanische Grenzwerte für den Zusammenstoß von Cobot und Mensch sollen Verletzungen vermeiden (Bauer et al., 2016).



**Abbildung 9: Definition der Zusammenarbeitsgrade von Mensch und Roboter (Bauer et al., 2016, S. 9)**

Bei der Programmierung von Cobots werden keine Fachexpert:innen benötigt. Durch eine Handführung des Cobots können Bewegungsabläufe einfach vom Bedienpersonal, wie Arbeiter:innen in der Montage oder Fertigung, einprogrammiert werden. In der Studie von Hornung (2021) werden als Hauptgründe für den Einsatz von Cobots die Verbesserung der Ergonomie, (Teil-)Automatisierung mit geringem Investment und Entgegenwirken des Arbeitskräftemangels genannt.

Als weitere physische Assistenzsysteme können Exoskelette eingesetzt werden. Diese unterteilen sich in aktive und passive Exoskelette und werden im nächsten Unterkapitel beschrieben.

### 2.3.2 Aktive und passive Exoskelette

Exoskelette sind physische Assistenzsysteme, die am Körper getragen werden und mechanisch auf den Körper einwirken. Die Kombination von Flexibilität und Leistungssteigerung ist ein wesentlicher Vorteil von Exoskeletten. Sie tragen dazu bei, die Lücke zwischen rein manuellen Tätigkeiten und einer vollautomatisierten Produktion zu schließen. Wenn herkömmliche technische Lösungen aufgrund des Prozesses oder der Umgebungsbedingungen nicht anwendbar sind, können Exoskelette zum Einsatz kommen (Spada et al., 2017). Exoskelette sollen Ausführbarkeit, Schädigungslosigkeit, Beeinträchtigungsfreiheit bei Körperbewegungen und -haltungen erzielen (DGUV Fachbereich Handel und Logistik, 2018). Zusätzlich dienen sie der Prävention von Verletzungen am Muskel-Skelett-Systems (MSS). Langzeitstudien liegen bis dato allerdings nicht vor. Diese Art von Assistenzsystemen zielt nicht auf eine Produktivitätssteigerung im Sinne einer Erhöhung der Ausbringungsmenge ab. Langfristige Effekte wie Reduktion der Ausfallzeiten werden erzielt, indem die Menge und Arbeitslast bei Anwendung des Exoskeletts gleichbleiben (Hold et al., 2020). Geringere muskuläre und kardiale Belastung sowie eine bessere Haltung und dadurch weniger berufsbedingte Erkrankungen werden als Vorteile genannt. Die verbesserte Präzision bei repetitiven Tätigkeiten und die verbesserte Arbeitsplatzqualität und Leistungsfähigkeit sind sowohl für Mitarbeiter:innen als auch für das Unternehmen vorteilhaft. Als größter Vorteil gegenüber anderen physischen Assistenzsystemen wird die volle Flexibilität und Kreativität des Menschen in dynamischen Umgebungen genannt (M. P. de Looze et al., 2016).

Exoskelette werden in aktive und passive Exoskelette unterteilt. Eine Übersicht zu den Eigenschaften, der unterstützten Körperregion sowie zur Funktionsweise und Energiezufuhr von passiven und aktiven Exoskeletten ist in Tabelle 1 dargestellt. Passive Exoskelette funktionieren häufig über ein Feder-Seilzugsystem rein mechanisch. Potenzielle Energie wird in den Federn gespeichert und steht später als Unterstützung zur Verfügung. Im Gegensatz zu passiven Exoskeletten werden aktive mit mechatronischer Kraftunterstützung, z. B. mit Elektromotoren oder Pneumatik, angetrieben. Daraus resultieren ein höheres Gewicht und komplexere Systeme bei aktiven Exoskeletten. Je nach Tätigkeit und zu unterstützender Körperregion wird das passende Exoskelett ausgewählt (Hold et al., 2020).

**Tabelle 1: Einteilung von Exoskeletten, angepasst nach DGUV Fachbereich Handel und Logistik (2018, S. 3)**

Bauart	Passive Exoskelette	Aktive Exoskelette	
Eigenschaften	Passive (Teil-) Unterstützung der Körpersegmente bei bestimmten Haltungen und Bewegungen	Aktive (Teil-) Unterstützung der Körpersegmente bei bestimmten Haltungen und Lastenhandhabungen	Aktive (Voll-) Unterstützung der Körpersegmente bei Haltung und Bewegung inkl. Lastenhandhabungen
Unterstützte Körperregion	Beine/Rumpf/Arme/ Kombinationen/ Ganzkörper	Beine/Rumpf/Arme/ Kombinationen	Beine/Rumpf/Arme/ Kombinationen/ Ganzkörper
Funktionsweise	Mechanische Feder/ Gasdruckfeder/ggf. max. Beugewinkel-begrenzung (Stützfunktion), ggf. Funktion (an/aus)	Elektrischer/ pneumatischer Antrieb mit einfacher Regelungsfunktion, Stärke der Unterstützung einstellbar	Elektrischer/ pneumatischer Antrieb mit komplexer Regelungs-/ Steuerungsfunktion (Bewegungs-programme, neurophysiologische Sensorik)
Energiezufuhr	Keine Speicherung von Energie beim Beugen vorzugsweise durch die Schwerkraft und teilweise Rückgewinnung beim Aufrichten entgegen der Schwerkraft	Akku/Druckluft/ Stromnetz	Akku/Druckluft/ Stromnetz

Exoskelette werden in der Industrie häufig für gebückte Arbeitshaltungen, statisches Halten oder Tragen einer Last und für dynamisches Heben (und Senken) von Lasten eingesetzt (M. P. de Looze et al., 2016). Typische Anwendungsfelder von Exoskeletten sind in der Fertigung, Montage und bei intralogistischen Tätigkeiten oder Lagerarbeiten. Nichtstationäre Arbeitsplätze, die durch Trage-, Hebe- oder Überkopftätigkeiten oder durch Zwangshaltungen geprägt sind, können sich für ein Exoskelett eignen. Oftmals sind dies Arbeitsplätze, an denen andere technische Hilfsmittel wie ein Gabelstapler, Kran oder Vakuumheber nicht zum Einsatz kommen können (DGUV Fachbereich Handel und Logistik, 2018). Die physische Assistenz für den Rumpfbereich wird häufig im Logistik- und Lagerbereich eingesetzt, um bei Hebe- und Tragetätigkeiten zu unterstützen. Exoskelette zur Unterstützung von Überkopftätigkeiten kommen z. B. in der Automobilindustrie oder in der Produktion von Fertigteilhäusern zum Einsatz (Hoffmann et al., 2022; Hold et al., 2020; M. P. de Looze et al., 2016; Weidner et al., 2020). Exoskelette für Überkopfarbeit unterstützen bereits ab einem Winkel von 60°, wodurch deren Einsatz auch bei Lackiertätigkeiten mit Schutzanzug denkbar ist (Hold, 2020). Exoskelette sind unter anderem eine Ergänzung für Arbeitsplätze, die kaum standardisierte Prozesse haben, und unterstützen Mitarbeiter:innen, ohne sie in der Prozessflexibilität einzuschränken. Constantinescu et al. (2016) zeigen einen Einsatz von einem Exoskelett bei der Demontage von Autos. In diesem Fall ist eine Automatisierung oder der Einsatz von

Robotern nicht rentabel, daher werden Hebetätigkeiten von einem Exoskelett unterstützt (Constantinescu et al., 2016).

Abbildung 10 zeigt eine Zusammenfassung der betrachteten Assistenzsysteme sowie die Zuordnung zu kognitiver und physischer Assistenz.



Abbildung 10: Kognitive und physische Assistenzsysteme, eigene Darstellung

In dieser Arbeit wird die Evaluierung und Vergleichbarkeit der in den Kapiteln 2.2 und 2.3 beschriebenen Assistenzsysteme gezeigt. Im Speziellen werden von jeder Hauptkategorie (digitale Werkerassistenzsysteme, kollaborationsfähige Roboter und Exoskelette) ein bis zwei repräsentative Assistenzsysteme im praktischen Testfall (Kapitel 6) angewendet. Aufgrund der Vielfalt an verschiedenen digitalen Werkerassistenzsystemen werden ein System aus dem Bereich Mixed Reality (Spatial Augmented Reality) und eines als mobiles Gerät (Tablet) ausgewählt. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Evaluierung erläutert.

## 2.4 Grundlagen der Evaluierung

Evaluation bedeutet die sach- und fachgerechte Bewertung eines festgelegten Gegenstands. Synonym werden die Begriffe Beurteilung, Bewertung, Wertung und Evaluierung verwendet (Duden, 2021).

Eine Evaluation lässt sich in zwei Formen gliedern: die summative und formative Evaluation. Die summative Evaluation zeigt, ob ein System die festgelegten Ziele erreicht hat, die formative Evaluation liefert Informationen während des gesamten Implementierungsprozesses, um den Ablauf zu verbessern, die Ziele zu erreichen und die Interpretation der Ergebnisse der summativen Evaluation zu unterstützen. Summative Evaluationsansätze liefern Informationen über die Systemergebnisse, um Entscheidungen über die Fortsetzung, Einführung oder Beendigung des Systems zu unterstützen. Sowohl formative als auch summative Evaluationsansätze werden verwendet, um Informationen über die Effektivität eines Systems zu liefern (Hamilton & Chervany, 1981).

Es wird unterschieden, ob die Evaluierung nach einem oder mehreren Kriterien erfolgt. Für die multikriterielle Evaluierung industrieller Assistenzsysteme werden verschiedene Methoden zur Lösung eines Problems mit mehreren, teils konträren Zielgrößen betrachtet (Triantaphyllou, 2000), wobei für die weitere Vorgehensweise eine adäquate ausgewählt wird. Im folgenden Kapitel werden multikriterielle Entscheidungsunterstützungsmethoden vorgestellt und verglichen.

## 2.5 Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

In Entscheidungsprozessen werden häufig mehrere, teilweise konträre Ziele angestrebt, wodurch sich die Entscheidungsfindung oftmals schwierig und langwierig gestaltet. Multikriterielle Entscheidungsunterstützungsmethoden (Multi-Criteria Decision Analysis, kurz MCDA) können zur strukturierten Lösungsfindung eingesetzt werden und unterstützen die Entscheidungstragenden unter Berücksichtigung von mindestens zwei Kriterien, eine Entscheidung zu fällen (Triantaphyllou, 2000). Dabei werden Kompromisse eingegangen, um möglichst vielen im Vorhinein definierten Zielen gerecht zu werden. Durch die transparente Darstellung der relevanten Alternativen, der festgelegten Ziele und der abgeleiteten Kriterien wird die Informationsverarbeitung und die Problemstrukturierung unterstützt und somit eine fundierte Entscheidung ermöglicht. Dazu erfolgt im ersten Schritt die Festlegung der Art des erwarteten Ergebnisses, um das passende Verfahren auszuwählen. MCDA-Methoden berücksichtigen sowohl Aspekte quantitativer als auch qualitativer Natur, auch nichtmonetäre Größen können einbezogen werden. Die Methoden können für komplexe Problemstellungen, deren Zusammenhänge und Konsequenzen vielfältig sind, eingesetzt werden (Geldermann & Lerche, 2014). Die MCDA-Methoden werden in die Bereiche Multi-Objective Decision Making (MODM) und Multi-Attribute Decision Making (MADM) unterteilt. Die primäre Unterscheidung liegt in der Ausgestaltung der Alternativen und der resultierenden Ergebnisse. Für beide Bereiche gibt es unterschiedliche methodische Ansätze, siehe Tabelle 2.

**Tabelle 2: Schematische Einordnung von MCDA-Methoden, angepasst nach Geldermann und Lerche (2014, S. 11)**

MCDA Multi-Criteria Decision Analysis		
MODM Multi-Objective Decision Making	MADM Multi-Attribute Decision Making	
Alternativen beschränkt durch Nebenbedingungen (stetiger Lösungsraum)	Begrenzte Auswahl an Alternativen (diskreter Lösungsraum)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vektoroptimierung</li> <li>• Zielprogrammierung</li> <li>• Anspruchsniveaus</li> <li>• ...</li> </ul>	<b>Klassische Ansätze</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzwertanalyse</li> <li>• AHP</li> <li>• MAUT/MAVT</li> <li>• ...</li> </ul>	<b>Outranking-Ansätze</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ELECTRE</li> <li>• PROMETHEE</li> <li>• ORESTE</li> <li>• ...</li> </ul>

Mit MODM-Methoden wird aus einer stetigen (nichtabzählbaren) Menge an Alternativen mithilfe von mathematischen Verfahren eine optimale Lösung ermittelt. Beispiele hierfür sind Vektoroptimierungsmodelle oder die Zielprogrammierung. Ein Beispiel wäre die Auswahl eines Assistenzsystems unter vielen unbegrenzten Alternativen.

MADM-Methoden vergleichen bekannte Alternativen, welche diskret (abzählbar) und klar voneinander abgrenzbar sind. Dem Beispiel der Assistenzsysteme nach läge hier bereits eine gewisse Anzahl, z. B. drei konkrete Assistenzsysteme, zur Auswahl vor. Hier war erforderlich, dass die Alternativen bereits vor der Bewertung exakt definiert und anhand unterschiedlicher Kriterien verglichen worden sind. Das Ziel ist, aus den bereits existierenden Lösungen die am besten zu realisierende Alternative auszuwählen. Dies resultiert in den meisten Fällen in einer Kompromisslösung, wenn keine dominierende Alternative existiert. Eine Alternative muss gleichwertig und bei mindestens einem Kriterium besser bewertet sein, um als dominant zu gelten. Die Ermittlung einer optimalen Lösung ist nicht in allen Fällen zielführend, sinnvoller ist ein Vergleich der realisierbaren Alternativen. Bei MADM-Methoden lassen sich die festgelegten Kriterien auf unterschiedlichen Skalenniveaus berücksichtigen, dadurch müssen unterschiedliche Einheiten nicht in einer Einheit ausgedrückt oder umgerechnet werden, z. B. in Währungseinheiten.

Im Folgenden werden MADM-Methoden betrachtet, da diese für diese Dissertation relevant sind. Bei MADM-Methoden werden dabei zwei Ansätze unterschieden: der klassische und der Outranking-Ansatz (Geldermann & Lerche, 2014).

### 2.5.1 Multi-Attribute Decision Making (MADM)

Verschiedene diskrete Alternativen werden bei der Multi-Attribute Decision Making (MADM)-Methode mit mehreren Kriterien bewertet. Dabei wird unterschieden, welche Art und Qualität von Information verfügbar sein muss, um eine Entscheidung zu treffen (Geldermann, 2008). Für diese Arbeit wird eine kardinale Information benötigt, um zu wissen, um wie viel besser sich das eine Assistenzsystem gegenüber einem anderen erweist. Die Klassifikation der MADM-Verfahren ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Klassifikation von MADM-Verfahren, angepasst nach Geldermann (2008, S. 1)

Art der Information	Qualität der Information	Gruppen von Verfahren
Keine Information		Maximin-Strategie Maximax-Strategie
Information über die Attribute	Anspruchsniveau	Disjunktives Vorgehen Konjunktives Vorgehen
	Ordinale Information	Lexikografische Methode Lexikografische Methode mit Halbordnung Aspektweise Elimination Permutationsmethode OREST
	Kardinale Information	Lineare Zuordnungsmethode Einfache additive Gewichtung Nutzwertanalyse Analytischer Hierarchie-prozess (AHP) ELECTRE, TOPSIS PROMETHEE
	Substitutionsraten	MAUT Hierarchische Substitutionsraten- Methode
Information über die Alternativen	Information über Präferenzen	LINMAP Interaktive einfache additive Gewichtung
	Information über Entfernungen	Multidimensionale Skalierung mit Idealpunkt

Zusätzlich wird zwischen klassischen MADM- und Outranking-Methoden unterschieden. Die klassischen Methoden gehen davon aus, dass sich die Präferenzen von Entscheidungsträger:innen über die Aufstellung einer entsprechenden Nutzenfunktion darstellen lassen. Jeder Ausprägung wird ein entsprechender Nutzenwert zugeordnet. Dieser Wert soll die tatsächlichen Präferenzen der entscheidenden Person exakt abbilden. Die klassischen Verfahren beruhen daher auf der Annahme, dass die entscheidende Person die Präferenzen korrekt formulieren und unmissverständlich kommunizieren kann (Geldermann, 2008).

Bei den klassischen Bewertungsverfahren wird für jede festgelegte Alternative ein Gesamtnutzenwert ermittelt, der sich aus mehreren Teilnutzenwerten zusammensetzt. Der höchste Gesamtnutzenwert zeigt die beste Alternative und sollte gewählt werden. Das Ziel ist die Offenlegung der Präferenzen und deren korrekte Abbildung. Durch die Aggregation über mehrere Ebenen geht ein Informationsverlust einher. Beispiele für klassische Verfahren sind die Nutzwertanalyse, die Multi-Attribute Utility/Value Theory (MAUT/MAVT) und der Analytical Hierarchy Process/Network (AHP/AHN). Die klassischen Verfahren sind weit verbreitet, haben sich in der Praxis etabliert und sind vergleichsweise einfach einsetzbar. Bei der Bewertung des Einsatzes von industriellen Assistenzsystemen wird davon ausgegangen, dass die entscheidende Person die Prioritäten kennt und korrekt wiedergeben kann. Die Kriterien müssen voneinander

unabhängig sein, allerdings ist das in der Realität schwer umsetzbar. Zusätzlich wird hierfür ein Konsistenzindex verwendet, um die Ergebnisse auf Konsistenz zu überprüfen und gegebenenfalls nachzubessern (Geldermann & Lerche, 2014).

Die Outranking-Methoden sind aufgrund der Kritikpunkte der klassischen Verfahren entstanden. Dabei wird angenommen, dass die Entscheidungstragenden ihre Priorisierung nicht eindeutig kennen und daher nicht korrekt abbilden können. Outranking-Methoden können widersprüchliche Informationen verarbeiten. Das Ziel liegt in der Generierung von Informationen und der transparenten Strukturierung des Entscheidungsprozesses. Die entscheidende Person macht sich das Problem und die relevanten Aspekte bewusst, um mit besserem Verständnis eine fundierte Entscheidung treffen zu können. Die Konsequenzen der eigenen Annahmen, z. B. die subjektive Kriteriengewichtung, werden verdeutlicht. Komplexe Entscheidungsprobleme, die eigenen Prioritäten und deren Auswirkungen werden von der entscheidenden Person reflektiert. Als Ergebnis wird eine Rangfolge erstellt, welche mit den zusätzlich gewonnenen Informationen bewertet wird. Outranking-Methoden verwenden für die Präferenzfunktionen einen paarweisen Vergleich. Auf diese Weise werden auch schwache Präferenzen und Unvergleichbarkeiten abgebildet. Besonders bei einer hohen Anzahl an Kriterien ist das ein Vorteil gegenüber den klassischen Verfahren, bei denen mit der Angabe für alle Alternativen eine strikte Präferenz fraglich ist. Die am weitest verbreiteten Beispiele für Outranking-Methoden sind die Elimination Et Choix Tradusaint la Réalité (ELECTRE) und die Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE). Die Vorteile dieser Methoden sind der erweiterte Präferenzbegriff und das damit verbundene Aufzeigen von Unvergleichbarkeiten, der geringere Informationsbedarf der entscheidenden Personen und die Vermeidung einer möglichen vollständigen Kompensation bezüglich der Kriterienausprägungen (Geldermann & Lerche, 2014).

Wenn eine hohe Anzahl an Kriterien bewertet wird und eine strikte Präferenz fraglich ist, ist eine Outranking-Methode zielführender als eine klassische Methode. Die Vorteile der klassischen Verfahren überwiegen gegenüber dem Durchführungsaufwand der Outranking-Methoden, wobei das Bewusstsein über Prioritäten von der entscheidenden Person angenommen wird – daher wird in dieser Forschungsarbeit eine klassische Methode verwendet. Die AHP-Methode ist in der Wissenschaft weit verbreitet, relativ einfach anzuwenden und wird daher für die Gewichtung der Kriterien in der vorliegenden Untersuchung gewählt. Die AHP-Methode wird im nächsten Kapitel beschrieben und beispielhaft durchgeführt.

## 2.5.2 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Der Analytic Hierarchy Process (AHP) zählt zu den klassischen Verfahren der Multi-Attribute-Decision-Making-Methoden. Er ist ein etablierter, multikriterieller

Entscheidungsansatz, entwickelt von Thomas L. Saaty. Laut Saaty (1990) ist die kreativste Aufgabe bei einer Entscheidung die Auswahl der Faktoren, die für diese Entscheidung wichtig sind. Diese Faktoren werden in einer hierarchischen Struktur über mehrere Ebenen angeordnet, vom übergeordneten Ziel hin zu den Kriterien, Unterkriterien und Alternativen (siehe Abbildung 11). Die entscheidende Person kann Ebenen und Elemente ergänzen oder eliminieren, wenn dies notwendig ist, um auf einen oder mehrere Teile des Systems zu fokussieren. Elemente mit globalem Charakter werden auf der höheren Ebene dargestellt, spezifische Elemente werden tiefer angeordnet. Nachdem die Auswirkungen aller Elemente bewertet und die Prioritäten für die gesamte Hierarchie berechnet wurden, können die weniger wichtigen Elemente aufgrund ihrer relativ geringen Auswirkungen auf das Gesamtziel gegebenenfalls aus der weiteren Betrachtung gestrichen werden. Die Prioritäten werden in diesem Fall nochmals neu berechnet (T. L. Saaty, 1990).

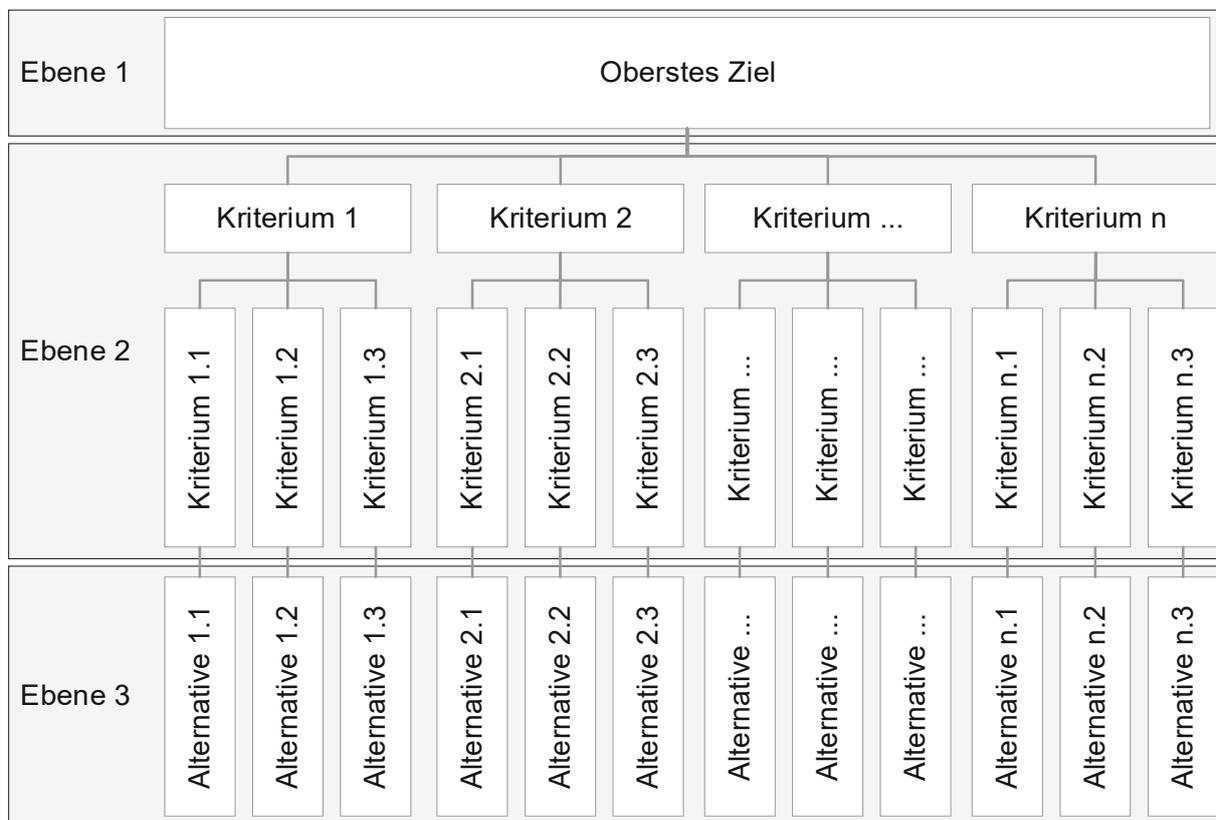


Abbildung 11: Aufbau der AHP-Ebenen, eigene Darstellung angelehnt an R. W. Saaty (1987, S. 162)

Die Bewertungsskala beruht auf der AHP-9-Punkte-Skala und wird in Tabelle 4 dargestellt. Die Wirksamkeit dieser Skala wurde in zahlreichen Anwendungen durch unterschiedliche Personen und durch theoretische Vergleiche mit vielen anderen Skalen validiert (T. L. Saaty, 1990). Daher wird im Praxisteil ebenfalls diese Skala verwendet.

**Tabelle 4: AHP 9-Punkte-Skala, eigene Übersetzung aus und angepasst nach R. W. Saaty (1987, S. 163)**

Intensität der Bedeutung auf einer absoluten Skala	Definition	Erläuterung
1	Gleiche Bedeutung	Zwei Kriterien tragen gleichermaßen zur Erreichung des Ziels bei.
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung zeigen eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung zeigen eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Ein Element wird stark bevorzugt und seine Dominanz wurde in der Praxis nachgewiesen.
9	Extremste Bedeutung	Der größtmögliche Unterschied zwischen zwei Elementen weist auf die beste Aussagekraft.
2, 4, 6, 8	Zwischenwert	Bei Bedarf eines Kompromisses
Kehrwert	Wenn der Tätigkeit i im Vergleich zur Tätigkeit j eine der oben genannten Zahlen zugeordnet ist, dann hat j im Vergleich zu i den reziproken Wert.	
Rationale	Verhältnisse, die sich aus der Skala ergeben.	Wenn die Konsistenz erzwungen werden soll, indem man n numerische Werte erhält, um die Matrix aufzuspannen.

Mithilfe von Vergleichspaaren werden unterschiedliche Kriterien einander gegenübergestellt. Die zu beantwortende Frage ist, welche der beiden zu vergleichenden Kriterien wichtiger ist, um das Gesamtziel zu erreichen. Die horizontale Spalte wird mit der vertikalen Spalte verglichen. In der Diagonalen wird der Wert 1 eingetragen, da die jeweiligen Kriterien miteinander verglichen werden. In den gespiegelten Feldern wird jeweils der Kehrwert eingetragen (Formel 1).

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$$

mit

$a_{ij}$  ... Wert der Bewertungsskala aus Tabelle 4

$a_{ji}$  ... Kehrwert

#### **Formel 1: Kehrwertberechnung, angelehnt an T. L. Saaty (1990)**

Der Prioritätsvektor ist der wichtigste Eigenvektor der Matrix. Er gibt die relative Priorität der Kriterien an, gemessen auf einer Verhältnisskala (T. L. Saaty, 1990). Ein Beispiel ist in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5: Beispiel einer Gewichtung von Kriterien mithilfe von Vergleichspaaren nach AHP, eigenes Beispiel**

Wichtigkeit	A	B	C
A	1,00	5,00	9,00
B	0,20	1,00	0,50
C	0,11	2,00	1,00
Summe	1,31	8,00	10,50

Um den Eigenvektor zu erhalten, wird jedes Feld durch die Summe der jeweiligen Spalte dividiert. Der Mittelwert aus der Zeile ergibt den Prioritätsvektor (siehe Tabelle 6). Umgerechnet in Prozent ist die Gewichtung der Kriterien ersichtlich (T. L. Saaty, 1990).

**Tabelle 6: Beispiel einer Gewichtung von Kriterien mithilfe von Vergleichspaaren nach AHP mit Prioritätsvektor, eigenes Beispiel**

Wichtigkeit	A	B	C	Prioritätsvektor	in Prozent
A	0,7627	0,63	0,86	<b>0,7483</b>	<b>75 %</b>
B	0,1525	0,13	0,05	<b>0,1084</b>	<b>11 %</b>
C	0,0847	0,25	0,10	<b>0,1433</b>	<b>14 %</b>
Summe	1,00	1,00	1,00	<b>1,0000</b>	<b>100 %</b>

Neben der relativen Gewichtung wird die Konsistenz der Antworten überprüft. Dazu wird der Haupteigenwert errechnet, welcher sich aus der Summe der Produkte zwischen jedem Element des Eigenvektors und der Summe der Spalten der reziproken Matrix ergibt (T. L. Saaty, 1990), siehe Formel 2.

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= \sum Summe_n * Prioritätsvektor_n \\ &= 1,31 * 0,7483 + 8,00 * 0,1084 + 10,50 * 0,1433 = 3,3531\end{aligned}$$

mit

$\lambda_{max}$  ... Eigenwert

#### Formel 2: Berechnung des Eigenwerts, angelehnt an T. L. Saaty (1990)

T. L. Saaty (1990) beweist, dass bei einer konsistenten reziproken Matrix der größte Eigenwert gleich der Größe der Vergleichsmatrix ist; oder  $\lambda_{max} = n$ . Das Maß für die Konsistenz, der sogenannte Konsistenzindex (CI), wird über die Abweichung oder den Grad der Konsistenz berechnet, siehe Formel 3. Im Beispiel von Tabelle 5 und Tabelle

6 ist die Größe der Vergleichsmatrix  $n = 3$  (T. L. Saaty, 1990). Daher ergibt sich die folgende Berechnung (Formel 3).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3,3531 - 3}{3 - 1} = 0,1766$$

mit

CI ... Consistency Index (Konsistenzindex)

#### Formel 3: Berechnung des Konsistenzindex, angelehnt an T. L. Saaty (1990)

Der errechnete Konsistenzindex wird mit dem passenden Konsistenzindex verglichen. T. L. Saaty (1990) erstellte eine zufällig erzeugte reziproke Matrix unter Verwendung der Skala. Der durchschnittliche zufällige Konsistenzindex der Stichprobengröße 500 Matrizen ist in Tabelle 7 dargestellt.

#### Tabelle 7: Werte für den Random Consistency Index (RI), angelehnt an R. W. Saaty (1987)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Das Konsistenzverhältnis ist ein Vergleich zwischen dem Konsistenzindex und dem zufälligen Konsistenzindex, siehe Formel 4. Wenn das Konsistenzverhältnis kleiner oder gleich 10 Prozent ist, ist die Inkonsistenz akzeptabel. Liegt die Inkonsistenz bei über 10 Prozent, wird die subjektive Bewertung nochmals überarbeitet.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,1766}{0,58} = 0,3044 \equiv 30,44 \% > 10\% \rightarrow \text{nicht akzeptabel}$$

mit

CR ... Consistency Ratio (Konsistenzverhältnis)

RI ... Random Consistency Index (zufälliger Konsistenzindex)

#### Formel 4: Berechnung des Konsistenzverhältnisses, angelehnt an T. L. Saaty (1990)

Das Konsistenzverhältnis in diesem Beispiel ist nicht akzeptabel, daher wird die Bewertung der Kriterien nochmals überarbeitet. Die wiederholten detaillierten Berechnungen werden an dieser Stelle übersprungen (siehe Formel 2 bis Formel 4). Die Ergebnisse der neuen Berechnungen sind  $\lambda_{max} = 3,0428$ ,  $CI = 0,0214$  und  $CR = 0,0369$ . Der Wert von CR liegt unter 10 Prozent und ist somit akzeptabel.

Wenn ein Kriterium so gering bewertet wird, dass es keine Relevanz für die Gesamtbewertung hat, kann es vernachlässigt werden. In diesem Fall müssen die übrigen Kriterien auf 100 Prozent angepasst werden. Kriterium B ist in dem oben genannten Beispiel das am geringsten bewertete Kriterium und wird beispielhaft vernachlässigt. Hierfür müssen die Werte der anderen beiden Kriterien angepasst werden, siehe Formel 5.

$$A = \frac{\text{Prioritätsvektor}_A}{\text{Prioritätsvektor}_A + \text{Prioritätsvektor}_C} = \frac{0,7483}{0,7483 + 0,1433} = 0,8392$$

$$C = \frac{\text{Prioritätsvektor}_C}{\text{Prioritätsvektor}_A + \text{Prioritätsvektor}_C} = \frac{0,1433}{0,7483 + 0,1433} = 0,1608$$

**Formel 5: Angepasste Prioritätsvektoren A und C, angelehnt an T. L. Saaty (1990)**

Ob und ab wann ein Wert klein genug zur Vernachlässigung ist, hängt von der Anzahl der Kriterien ab und wird von der bewertenden Person entschieden. Die praktische Anwendung der AHP-Methode im Evaluierungsmodell wird in Kapitel 6.5.2 gezeigt.

Im folgenden Kapitel folgt die Betrachtung des aktuellen Stands der Forschung. Die quantitative und qualitative Auswertung der systematischen Literaturrecherche wird dargestellt sowie die Forschungslücke beschrieben.

## 2.6 Mensch-Technik-Organisation-Konzept

Das Mensch-Technik-Organisation-Konzept (MTO-Konzept) bietet eine ganzheitliche Betriebsanalyse und berücksichtigt die Komponenten Mensch, Technik und Organisation. Arbeitssysteme werden als soziotechnische Systeme betrachtet, die sowohl aus sozialen als auch technischen Teilen bestehen, miteinander in Beziehung stehen und daher gemeinsam zu gestalten sind. Das MTO-Konzept geht als Basis von der Arbeitsaufgabe aus und verknüpft das soziale mit dem technischen Teilsystem und den Menschen mit den organisatorischen Strukturen, siehe Abbildung 11 (Strohm & Ulich, 1997; Ulich, 2005).



**Abbildung 12: Mensch-Technik-Organisation-Konzept, eigene Darstellung nach Ulich (2013)**

Ein primäres Arbeitssystem ist ein identifizierbares und abgrenzbares Subsystem in einer Organisation, beispielsweise eine Montageabteilung. Die Anwendung von neuen Technologien führt nur zum gewünschten Erfolg, wenn alle drei Komponenten und deren Wechselwirkungen betrachtet werden. Die Schnittmengen „Mensch und Technik“, „Mensch und Organisation“ und „Technik und Organisation“ werden im MTO-Konzept unterschieden. „Mensch und Technik“ adressiert die Schnittstelle zwischen

Mensch und Maschine und deren Interaktion. Die Schnittstelle „Mensch und Organisation“ zeigt die Rolle des Menschen im Arbeitssystem, z. B. in der Montage. „Technik und Organisation“ bezeichnet das soziotechnische System, somit die Organisation von Menschen und mit ihnen verknüpfte Technologien im Arbeitssystem der Montage, welche in einer bestimmten Weise strukturiert sind, um ein spezifisches Ergebnis zu produzieren (Strohm & Ulich, 1997).

## 3 Stand der Forschung

### 3.1 Methodologie der Literaturrecherche

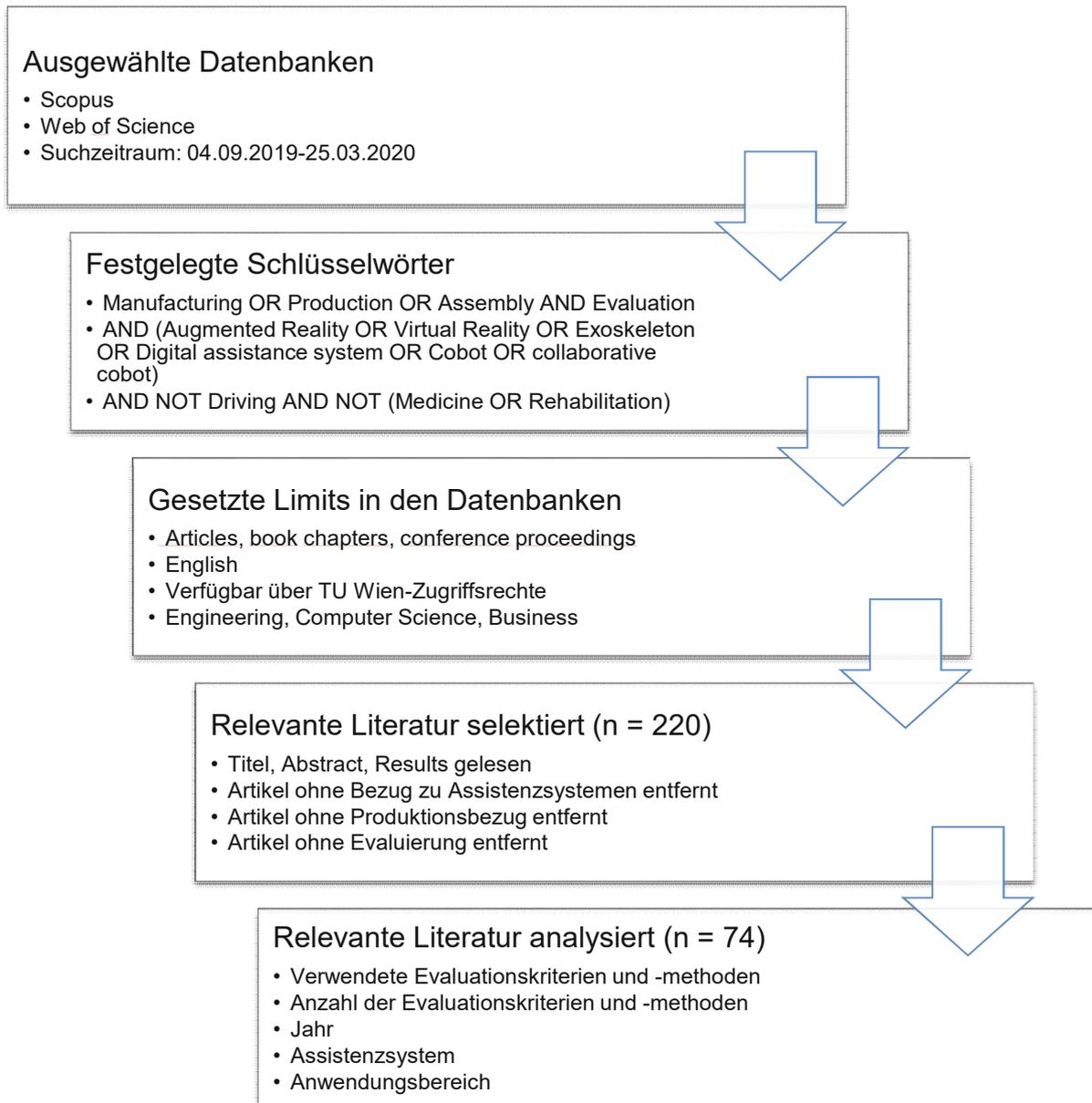
Die Literatur zu Evaluierung und zu Evaluierungsmodellen industrieller Assistenzsysteme ist stark fragmentiert. Es existiert eine Vielzahl verschiedener Bewertungskriterien und -methoden, welche als unterschiedlich relevant genannt werden. Dieser Umstand ist der Tatsache geschuldet, dass je nach Sichtweise der Fokus der Evaluation unternehmens- oder nutzer:innenzentriert ausgerichtet ist. Die nachstehende Literaturübersicht verfolgt das Ziel, die Forschung zur Evaluierung industrieller Assistenzsysteme zusammenzufassen, um eine Basis für das zu entwickelnde multikriterielle Evaluierungsmodell zu schaffen.

Dafür wird anfangs die Methodologie der systematischen Literaturrecherche beschrieben, welche im Anschluss für die Evaluierung industrieller Assistenzsysteme durchgeführt wird. Es folgt eine vorwärts- und rückwärtsgerichtete Literaturrecherche, um zusätzliche Quellen aus dem Bereich Evaluierung industrieller Assistenzsysteme zu erschließen. Diese Ergebnisse werden durch weitere Forschungspublikationen aus anderen Quellen ergänzt, um den Stand der Forschung für diese Forschungsarbeit zu erfassen. Die Erkenntnisse der Literaturrecherche werden quantitativ und qualitativ dargestellt, kritisch reflektiert und die Forschungslücke aufgezeigt.

### 3.2 Systematische Literaturrecherche (SLR)

#### 3.2.1 Methodologie der systematischen Literaturrecherche

Eine systematische Literaturrecherche (SLR) bildet eine fundamentale Disziplin in wissenschaftlichen Arbeiten. Die in dieser Dissertation durchgeführte systematische Literaturrecherche gliedert sich in zwei Phasen (Okoli & Schabram, 2010): den Screening-Prozess und den Review-Prozess. Abbildung 13 zeigt die methodische Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche der vorliegenden Forschungsarbeit.

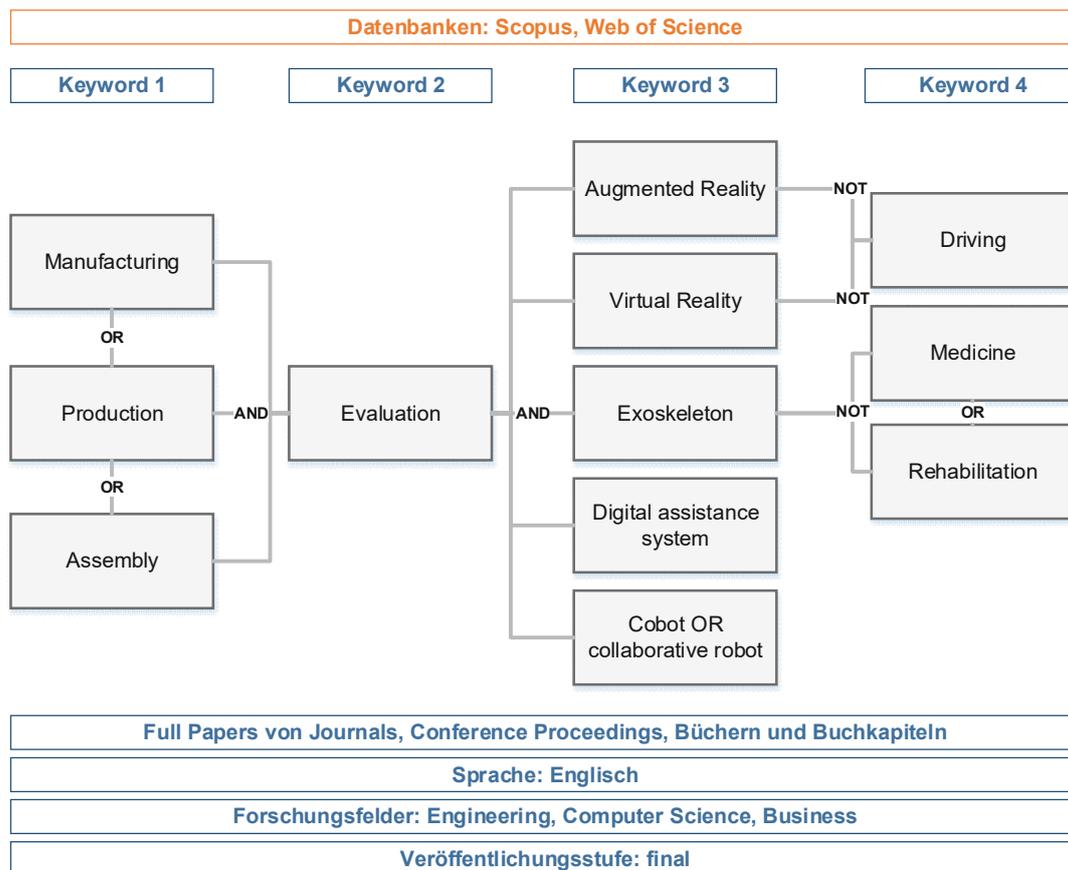


**Abbildung 13: Methodische Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche, eigene Darstellung**

Die Auswahl ist auf englischsprachige Artikel beschränkt. Berücksichtigt werden nur finale Beiträge aus Zeitschriften, Tagungsbänden, Büchern und Buchkapiteln aus den Bereichen „Engineering“, „Computer Science“ und „Business“. Eine zeitliche Begrenzung des Publikationsdatums wurde nicht festgelegt.

Im Review-Prozess wurden die verbliebenen Artikel nach den verwendeten Bewertungskriterien und -methoden sortiert. Die verwendeten Begriffe wurden in thematische Blöcke zusammengefasst und verallgemeinert, die Anzahl der Evaluationskriterien und -methoden ermittelt sowie das verwendete Assistenzsystem und der Anwendungsbereich notiert. Detaillierte Angaben zu den Suchergebnissen in den Datenbanken und die Forschungsfragen für die Literaturrecherche sind im Anhang 8.1 dargestellt.

Die Definition von Inklusions- und Exklusionskriterien ist notwendig, um einen Leitfaden für die Suche zu geben, die Suche nachvollziehbar und reproduzierbar zu machen und um eine vollumfassende Darstellung des Forschungsthemas zu bieten. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die systematische Literaturrecherche und zeigt die Schlüsselwörter für die detaillierte Suche. Keyword 1 und 2 sind für alle Suchen gleich, Keyword 3 beschreibt das gesuchte Assistenzsystem, Keyword 4 definiert Exklusionen für spezifische Assistenzsysteme.



**Abbildung 14: Schlüsselwörter, Inklusions- und Exklusionskriterien in der systematischen Literaturrecherche, eigene Darstellung**

Im nächsten Unterkapitel wird die Auswertung der quantitativen Ergebnisse (z. B. Anwendungshäufigkeiten von Kriterien und Methoden) dargestellt.

### 3.3 Quantitative Darstellung der Ergebnisse der Literaturrecherche

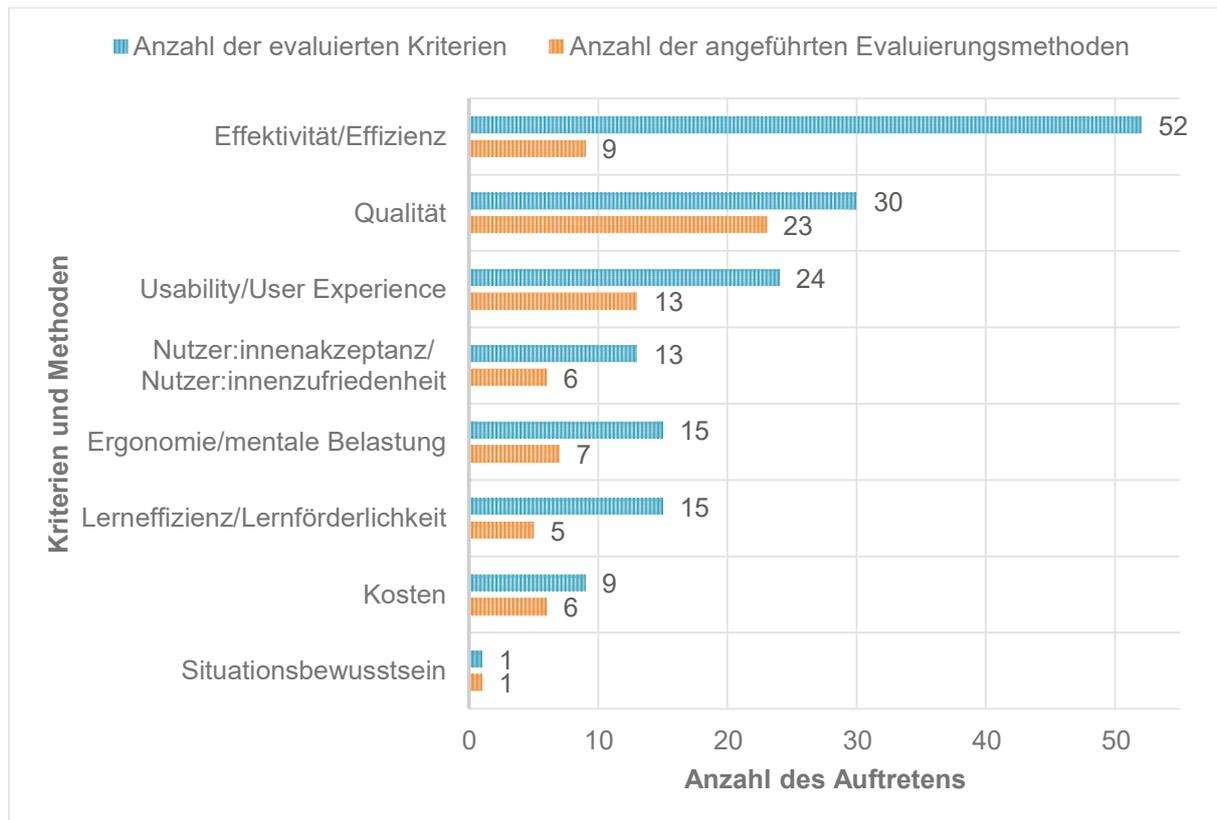
Für die systematische Literaturrecherche wurden die wissenschaftlichen Datenbanken Scopus und Web of Science verwendet. In der Suche wurden insgesamt 220 Ergebnisse gefunden, 194 Ergebnisse in Scopus und 26 in Web of Science, Details sind im Anhang in Tabelle 70 gelistet. Titel, Abstracts und Schlüsselwörter dieser 220 Publikationen wurden gesichtet und 74 als relevant definiert. Zusätzlich wurde bezüglich der relevanten Publikationen bei weiteren diversen Datenbanken, wie z. B.

IEEE und Google Scholar, eine vor- und rückwärtsgerichtete Recherche (Forward Backward Research, kurz: FBR) durchgeführt. Tabelle 8 zeigt die verwendeten Evaluationskriterien in den Publikationen und deren Verwendungshäufigkeiten (in Klammern). Diese Kriterien werden in den Publikationen unterschiedlich bezeichnet und daher in aussagekräftigen, verallgemeinerten Begriffen zusammengefasst. Hierbei fällt auf, dass Situationsbewusstsein nur in einer Publikation betrachtet wird. In anderen Forschungsbereichen, z. B. bei der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen (Fang Chen & Terken, 2023), ist dieses Thema ein häufig gemessenes Kriterium. Im Bereich Industrie 4.0 wird das Kriterium noch selten betrachtet und hat sich bis dato noch nicht durchgesetzt.

**Tabelle 8: Kriterien in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten, eigene Darstellung**

<b>Kriterien in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)</b>
<b>Effektivität/Effizienz</b>
Time (10), Efficiency (9), Effectiveness (7), Task completion time (4), Assembly time (3), Task performance (2), Task Duration (2), Operators' performance (2), Benefit (1), Easy to transport (1), Lead time (1), Operation time (1), Overall execution time (1), Reducing documentation (1), Setup time (1), Time for rework (1), Standard time of a work task (1), Labor productivity (1), Time for modeling the virtual factory (1), Standing time (1), Walking time (1), collaboration performance (1), First assembly time of real assembly (1), Assembly time for n iterations (1), Energy efficiency (1), Efficiency of machine, processing, and handling (1)
<b>Usability/User Experience</b>
Usability (15), User Experience (5), Perceived Usefulness (3), Ease of Use (2), Advantages and disadvantages of wearable AR devices (1), User Interaction (1), User rankings (1), Utility (1), User impression (1), Learning experience (1), Usability (1)
<b>Qualität</b>
Number of errors (7), Error rate (4), Product quality (4), Number of questions asked (3), Defect detection (2), Decreasing the human error probability (2), Error occurrences (1), Detecting and avoiding errors (1), Quality of learning (1), Reducing the probability of failure (1), Total quality (1), Number of accurate stages completed (1), Quality of instruction (1), Improved correction of errors (1), Work task/piece complexity (1)
<b>Nutzer:innenakzeptanz/Nutzer:innenzufriedenheit</b>
User acceptance (5), Satisfaction level (2), User satisfaction (2), Acceptability (1), Measurement of emotion-based impressions (1), Subjective assessment (1), Technology acceptance (1), User interaction satisfaction (1), Job satisfaction (1)
<b>Lerneffizienz/Lernförderlichkeit</b>
Speed of learning (2), Learning effectiveness (2), Effective learning experience (1), Improve knowledge (1), Learnability (1), Increase memorability (1), Learning progress for increased efficiency and shorter learning times (1), Quality of learning (1), Qualification requirements of the task (1), training period (1), Increase problem-solving and innovation skills (1), Learning performance (1), Learning curve (1), Forgetting rate (1)
<b>Ergonomie/mentale Belastung</b>
Ergonomics (3), Cognitive workload (2), Cognitive ergonomics (1), Dizziness (1), Mental workload (1), Mental effort (1), Physical comfort (1), Ratings (Effort, Frustration, mental demand, performance, physical demand, temporal demand) (1), Task load (1), User movement (1), Human workload (1), Physical load (1), Psychological load (1), Noise (1), Illumination (1)
<b>Kosten</b>
Costs (4), Total production and transportation cost (1), Required mandatory standard rate (1), Minimum attractive rate of return (MAAR) (1), Return on Investment (ROI) (1), Economic impact (1), Costs of component (1), Economic efficiency (1)
<b>Situationsbewusstsein</b>
Situation awareness (1)

In einigen Publikationen werden ausschließlich die evaluierten Kriterien angeführt. Bei 43 Prozent der gefundenen Kriterien werden die verwendeten Evaluierungsmethoden im Detail ausgeführt. Die Methoden ermöglichen eine Reproduzierbarkeit der Evaluierung von Publikationen. Eine Differenz der beiden Werte im blauen Balken (Anzahl der evaluierten Kriterien) und im orangenen Balken (Anzahl der angeführten Evaluierungsmethoden) ist in Abbildung 15 dargestellt.



**Abbildung 15: Auftrittshäufigkeiten von Kriterien und Methoden, eigene Darstellung**

Abbildung 16 zeigt die Anzahl der unterschiedlich evaluierten Assistenzsysteme über den Zeitverlauf. Vor 2012 wurde keine Evaluierung industrieller Assistenzsysteme gefunden. Die systematische Literaturrecherche wurde im März 2020 abgeschlossen, daher endet die zeitliche Darstellung mit 2019. In der Darstellung ist erkennbar, dass zur Evaluierung von Exoskeletten und Cobots durch die systematische Literaturrecherche keine passenden Publikationen gefunden wurden. Ein Großteil der gefundenen Literatur bezieht sich auf Augmented-Reality-Systeme. Diese werden in Abbildung 16 in „mobile device“, „HMD“ (Head-Mounted Device), „Projektor“ und „AR general“ unterteilt.

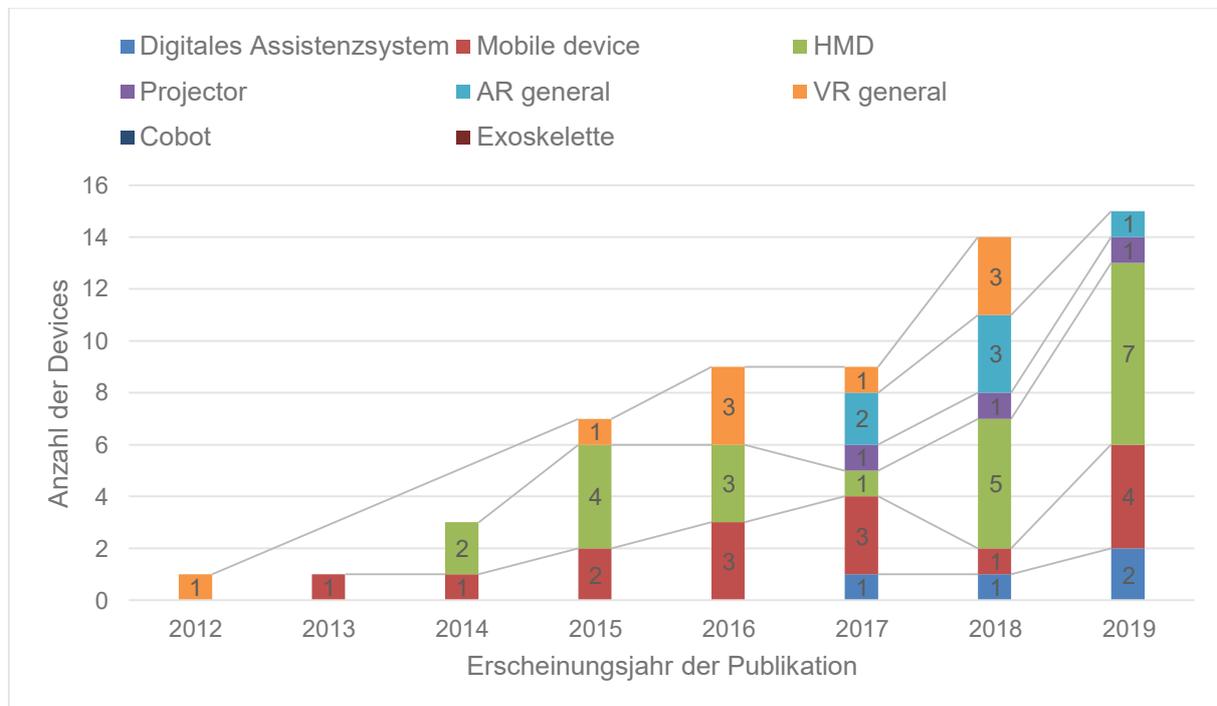


Abbildung 16: Evaluerte Literatur zu Assistenzsystemen über den Zeitverlauf, eigene Darstellung

Im nächsten Unterkapitel werden die relevanten Publikationen qualitativ beleuchtet, verglichen und diskutiert. Dabei werden die unterschiedlichen Assistenzsysteme sowie allgemeine Bewertungsmodelle für technische Systeme in der Produktion betrachtet.

### 3.4 Qualitative Auseinandersetzung mit der Literatur

Die Literatur zeigt, dass ein Großteil der Autor:innen die entwickelten Lösungen von Assistenzsystemen evaluieren und ein kleinerer Teil sich mit der Entwicklung von Modellen zur Evaluierung beschäftigt. Mark et al. (2021) zeigen, dass sich ein Großteil der (Konferenz-)Artikel mit kognitiven Assistenzsystemen beschäftigt. Das spiegelt sich auch in der Literaturrecherche dieser Dissertation wider.

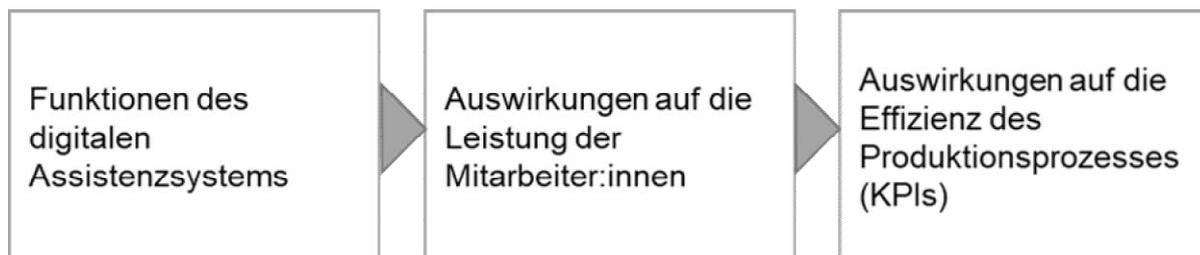
In den folgenden Unterkapiteln werden Evaluierungen für die in dieser Forschungsarbeit betrachteten Assistenzsysteme basierend auf aktueller Literatur vorgestellt. In Kapitel 3.4.6 werden Evaluierungsmodelle für technische Systeme in der Produktion präsentiert und für die Anwendung für Assistenzsysteme analysiert. Anschließend werden die relevanten Publikationen klassifiziert und mögliche Ansätze für die Verwendung im multikriteriellen Evaluierungsmodell diskutiert.

#### 3.4.1 Evaluierung digitaler Assistenzsysteme

In der Literatur finden sich vielfältige Veröffentlichungen zur Evaluierung digitaler Assistenzsysteme mit einem entsprechend breiten Spektrum an

Evaluierungsansätzen. In diesem Unterkapitel werden drei spezifische Vorgehensweisen zur Evaluierung digitaler Assistenzsysteme vorgestellt.

Keller et al. (2019) stellen einen Rahmen zur Analyse des Einflusses digitaler Assistenzsysteme auf wesentliche Zielgrößen in einem Produktionssystem vor. Dazu werden Funktionen des digitalen Assistenzsystems, Auswirkungen auf die Mitarbeiter:innen und KPIs definiert (siehe Abbildung 17).



**Abbildung 17: Evaluierung des Nutzens von digitalen Assistenzsystemen, eigene Abbildung in Anlehnung an Keller et al. (2019, S. 442)**

Des Weiteren werden Hypothesen abgeleitet, um die Wirkung digitaler Assistenzsysteme auf die Arbeitsleistung der Mitarbeiter:innen zu beschreiben. Der Ansatz erlaubt es, den Nutzen der digitalen Unterstützung in der Produktion zu quantifizieren. Dies unterstützt die Akzeptanz und ermöglicht es Entscheidungsträger:innen, digitale Technologien nutzenorientiert zu integrieren. Die Quantifizierung des Nutzens ist ein wichtiger Schritt hin zu den Key-Performance-Indikatoren (KPIs). Für die Definition des Zielsystems wird das Zieldreieck bestehend aus Qualität, Kosten und Zeit angewendet und um den Bereich Flexibilität erweitert (Keller et al., 2019).

Die Flexibilität wird durch das Qualifikationsniveau der Mitarbeiter:innen und die Qualifikationsanforderung der Aufgabe bewertet. Durch den Einsatz eines digitalen Assistenzsystems ist es möglich, ausgewählte Lerninhalte den Mitarbeiter:innen zur Verfügung zu stellen und damit das Qualifikationsniveau zu erhöhen. Effekte zur Kostensenkung werden nicht berücksichtigt, da die Kostenvorteile aus anderen Effekten resultieren. Separate kostenbezogene Effekte werden nicht identifiziert. Die Evaluierung unterteilt die Bewertung direkt am Arbeitsplatz und auf Unternehmensebene (Keller et al., 2019). Genannte KPIs zur Aufnahme direkt am Arbeitsplatz sind beispielsweise die Anzahl der Ausschussteile und nachbearbeiteten Teile, Gesamtzahl der produzierten Teile, Gesamtzeit, Zeit für die Arbeitsaufgabe und Nacharbeit, Einarbeitungszeit, Rüstzeit, Stillstandszeit und Know-how-Träger:innen-Quote.

Durch die Aggregation der Daten ist es möglich, KPIs auf Prozess- oder Unternehmensebene zu berechnen. Beispiele für die Bewertung der Qualität sind die Ausschussrate, die Nacharbeitsrate oder der First Pass Yield. Für eine ganzheitliche Bewertung des Nutzens der digitalen Unterstützung auf Prozess- oder

Unternehmensebene ist die Gesamtanlageneffektivität (OEE) geeignet. Die Gesamtanlageneffektivität fasst wesentliche zeitliche Effekte sowie die Qualität des Prozesses in einem KPI zusammen und kann als Indikator für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses verwendet werden. Zusammenfassend wird in Keller et al. (2019) der Nutzen digitaler Assistenzsysteme multikriteriell bewertet und bezieht sowohl die Unternehmens- als auch die Arbeitsplatzebene ein (Keller et al., 2019).

Eine weitere Evaluierung für digitale Assistenzsysteme stellen Schafler et al. (2018) vor, die darin das explizite Ziel, nutzer:innenzentrierte Assistenzsysteme für den Shopfloor zu entwickeln und zu evaluieren, verfolgen. Das „FACTS4WORKERS“ Evaluation Framework wurde als Kombination verschiedener Instrumente und Methoden entwickelt. Auf Grundlage von Instrumenten und Methoden aus der Literatur wurden das Framework an die Anwendungsfälle angepasst und neue Ansätze definiert. Durch die Impact-Analyse wird beurteilt, wie sich die Einführung digitaler Assistenzsysteme auf die individuellen Dimensionen (Autonomie der Arbeitnehmer:innen, Verbundenheit, Aufgabenvielfalt, Kompetenz und Schutz) sowie die organisatorischen Dimensionen (Effizienz und Qualität) auswirkt. Des Weiteren werden bei der Qualitätsvalidierung verschiedene Artefakte evaluiert, um festzustellen, ob die Qualität (in Bezug auf System, Information und Interaktion) den Erwartungen der Nutzer:innen entspricht. Die Ermittlung der Information wird durch eine quantitative Evaluierung von z. B. Zeitmessungen und Prozessaufnahmen durchgeführt. Eine qualitative Evaluierung erfolgt in Form von Interviews, um Feedback der Mitarbeiter:innen für den kontinuierlichen Verbesserungsprozess einzuholen (Schafler et al., 2018).

Ein Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme beschreibt Hold (2020). Dieses Vorgehensmodell basiert auf dem MTO-Modell, wobei sowohl menschenzentrierte als auch betriebswirtschaftliche Kriterien betrachtet werden. Das Modell verwendet das MTM-UAS (ein universelles Analysiersystem des Methods-Time-Measurement-Verfahrens) für die Analyse von Wirtschaftlichkeit und Produktivität. Zusätzlich werden die Wahrscheinlichkeiten von menschlichen Fehlern, Einlern- und Trainingszeiten und die Ausführungszeit in den Blick genommen. Die Vorgehensweise wurde an einem Labor- und einem industriellen Anwendungsfall validiert (Hold, 2020).

Teilweise unterscheiden die Vorgehensweisen nicht zwischen bildschirmbasierten Werkerassistenzsystemen und Augmented-Reality-Anwendungen. Weitere Beispiele und Vorgehensweisen zur Evaluierung von AR werden im folgenden Unterkapitel beschrieben und analysiert.

### 3.4.2 Evaluierung von Augmented-Reality-Anwendungen

Für Augmented-Reality-Anwendungen bewerten Autor:innen ihre entwickelten Prototypen oder Anwendungsfälle in Test- oder in realen Produktionsumgebungen.

Eine der ersten Publikationen mit einer Evaluierung zeigt die Veröffentlichung von Bellotti (2003), welche die Effektivität, die Fehlerrate und die mentale Belastung beurteilt. Funk et al. (2016), Kosch et al. (2016) und Funk (2016) vergleichen und bewerten in unterschiedlichen Studien AR-Anwendungen (HMD, In-situ-Projektionen) mit papierbasierten Arbeitsanweisungen. Das General Assembly Task Model von Funk (2016) stellt zwei standardisierte Grundaufgaben und eine Methode zur störungsfreien Analyse von Augmented-Reality-Anleitungen für Montagearbeiten bereit. Kim et al. (2019) evaluieren die Userinteraktion für AR-Brillen hinsichtlich visueller Kontexte und Gesteninteraktionen. Alle der oben genannten Veröffentlichungen führen zwei Arten von Studien durch: kontrollierte Laborstudien und Feldstudien in realen Produktionsumgebungen. Dabei können Industriemitarbeiter:innen die AR-Anwendungen in der tatsächlichen Fertigungsumgebung testen. Terhoeven et al. (2018) befassen sich mit der Entwicklung von Komponenten und Diensten für AR-Brillen als Arbeitsmittel. In diesem Zusammenhang werden zwei industrielle AR-Anwendungsbeispiele umgesetzt und aus Anwender:innensicht evaluiert. Havard et al. (2021) zeigen in einer Review die Auswirkungen von AR im Vergleich zu Tablet-basierten Anleitungen. In einer eigenen Studie schlagen sie eine Vorgehensweise zur Evaluierung unter der Verwendung der Methoden NASA-TLX, SUS und Performance-Messung vor (Havard et al., 2021).

Aschenbrenner et al. (2019) entwickeln aus einer Reihe von vergleichbaren Studien eine Anleitung für die Bewertung von AR in der Produktion. Die Ergebnisse stammen aus dem Feedback von 160 Teilnehmer:innen, die die gleiche Reparaturaufgabe an einem Schaltschrank eines Industrieroboters durchführten. Die Studien vergleichen mehrere AR-Instruktionsanwendungen auf verschiedenen Geräten (HMD, Tablet und projektionsbasierte AR) mit Grundbedingungen (Anweisungen in Papierform und telefonischer Support; (Aschenbrenner et al., 2019). Die Studie von Aschenbrenner et al. (2019) konzentriert sich auf quantitative Daten, erlaubt aber zusätzlich qualitative Rückmeldungen. Es werden objektive Daten (Zeitmessung der Aufgabendauer, Messung der Fehlermenge) und subjektive Daten mit standardisierten und validierten Fragebögen aufgenommen (Aschenbrenner et al., 2019). Quantitative Analysen werden auch von Funk (2016) für die Bewertung der Auswirkungen einer AR-Anwendung auf die Produktionsparameter verwendet, z. B. die Zeit zur Herstellung eines Teils, die gemachten Fehler und die wahrgenommene Arbeitsbelastung. Funk et al. (2015) errechnen die Bearbeitungszeit aus der Summe der gemessenen Teilzeiten für das Hinlangen zu einem Teil, das Greifen, das Positionieren und den Zusammenbau multipliziert mit der Anzahl der Vorgänge. Die kognitive Belastung wird

mit einem vereinfachten National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) bewertet. Wie Funk (2016) verwenden auch Kim et al. (2019), Aschenbrenner et al. (2019) und Bellotti (2003) den NASA-TLX. In allen Fällen kommen die Forscher:innen aufgrund der Fragebogenanalyse zum Ergebnis, dass die Proband:innen ihre Tätigkeiten mithilfe der AR-Brille, die die Aufgaben vorgab, mit weniger kognitiver Belastung ausführen konnten.

Terhoeven et al. (2018) führen eine Studie zur Evaluierung der Benutzer:innenfreundlichkeit nach DIN EN ISO 9241-210 und der Nutzer:innenakzeptanz mit dem Technology Acceptance Model (TAM) durch. Des Weiteren wird die Benutzer:innenerwartung mit der tatsächlichen Anwendung von AR-Brillen abgefragt. Aschenbrenner et al. (2019) evaluieren die Benutzer:innenfreundlichkeit in der ersten Studie mit dem Fragebogen „Questionnaire for Measuring the Subjective Consequences of Intuitive Use“ (QUESI) und verwenden in der zweiten und dritten Studie ebenfalls die DIN EN ISO 9241-210. Zusätzlich nutzen sie den Fragebogen „Situation Awareness Rating Technique“ (SART) zur Messung des Situationsbewusstseins. Hier in der Untersuchung wurde SART verwendet, da dieser Fragebogen im Vergleich zur Anwendung der „Situation Awareness Global Assessment Technique“ (SAGAT)-Methode das Pausieren der Tätigkeit während des Tests vermeidet, da SART erst nach dem Prozess abgefragt wird. Fast-Berglund et al. (2018) evaluieren sechs Use Cases in der Produktion und leiten daraus Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung von AR ab. Quandt und Freitag (2021) verweisen mit einer systematischen Literaturrecherche auf die Wichtigkeit der Nutzer:innenakzeptanz bei der Implementierung von AR-Anwendungen. Hierfür werden hauptsächlich TAM in unterschiedlichen Varianten und die „Unified theory of acceptance and use of technology“, kurz UTAUT, angewendet.

An einer Wellenvormontage in der Getriebefertigung vergleichen Hegenberg und Schmidt (2021) in zwei Studien die Einschulung mit AR-Anleitung mit einer Papier- und Videoanleitung. Dabei werden Gebrauchstauglichkeit, Beanspruchung und Montagezeiten verglichen. Für beide Anwendungsfälle wird eine MTM-UAS-Analyse durchgeführt, um den realen und den simulierten Einschulungsprozess zu vergleichen. Die Beanspruchung wird mit dem NASA-TLX und die Gebrauchstauglichkeit mit SUS gemessen, die Fehleranzahl und die Montagezeit pro Wellenvormontage werden erhoben. Zusätzlich zum Fragebogen wurde explorativ mit semistrukturierten Interviews gearbeitet (Hegenberg & Schmidt, 2021).

Qualitatives Feedback holen auch Kim et al. (2019) und Funk (2016) zur Verbesserung der Nutzbarkeit des Assistenzsystems durch ein semistrukturiertes Interview ein. Teilnehmer:innen werden nach dem Zufallsprinzip für ein Interview ausgewählt, in welchem sie nach Zufriedenheit, Motivation, Selbstständigkeit und den durch die

Nutzung des Systems verursachten Herausforderungen befragt werden (Funk et al., 2016; Funk, 2016; Kosch et al., 2016).

Funk (2016), Kim et al. (2019) und Terhoeven (2018) fokussieren auf die Bewertung ihrer entwickelten Systeme, nicht auf die Modellentwicklung. Aschenbrenner et al. (2019) leiten eine Vorgehensweise für die Bewertung von AR-Systemen ab und verwenden größtenteils quantitative Standardmethoden, ergänzt um qualitative Interviews. Es werden jeweils Kriterien aus der Anwender:innensicht und der Prozesssicht bewertet. Funk (2016) thematisiert den Bedarf einer standardisierten Evaluierungsmethode von Augmented-Reality-Anwendungen.

Neben AR-Anwendungen werden im nächsten Unterkapitel die Evaluierungen von VR-Anwendungen genauer betrachtet.

### 3.4.3 Evaluierung von Virtual-Reality-Anwendungen

Zur Evaluierung von Virtual-Reality-Anwendungen stellen Hoedt et al. (2016) ein Evaluation-Framework für den Vergleich von VR-Anwendungen für Schulungen und Trainings bereit (siehe Tabelle 9). Sie unterscheiden zwischen objektiver und subjektiver Evaluierung. Die objektive Evaluierung bewertet die Taktzeit und die Fehlerrate, während die subjektive Evaluierung die Gebrauchstauglichkeit (Usability) bewertet. Die Evaluierung der Usability wird nicht als quantitative Messung durchgeführt, sondern bezieht sich auf die individuelle Erfahrung und Wahrnehmung. Dafür wurde selbst ein Usability-Fragebogen erstellt, welcher sich auf die Natürlichkeit, Leichtigkeit und den Komfort des Gebrauchs konzentriert. In der Studie lernte eine Gruppe mit VR, die Referenzgruppe ohne VR. Der Vergleich von Ist- und Soll-Zustand ermöglicht es, eine Verbesserung oder Verschlechterung durch VR aufzuzeigen (Hoedt et al., 2016).

**Tabelle 9: Methoden zur Evaluierung von Trainings in VR, eigene Übersetzung aus Hoedt et al. (2016, S. 263)**

Nummer	Evaluierungsmethode	Kategorie
1	Erste Montagezeit der realen Montage	objektiv
2	Montagezeit für n Wiederholungen	objektiv
3	Aufnahme der Fehlerrate	objektiv
4	Fragebogen	subjektiv

Bei der Bewertung der Fehlerrate wurden drei Fehlerarten unterschieden: (1) Das Vergessen eines Schrittes aufgrund von mangelndem Wissen, (2) falsche Platzierung oder Ausrichtung des Bauteils aufgrund mangelnden Wissens und (3) die falsche Anbringung oder die falsche Art der Anbringung aufgrund mangelnder motorischer Fähigkeiten.

Das Evaluierungs-Framework von Hoedt et al. (2016) wurde für die Evaluierung von Schulungen und Trainings entwickelt und betrachtet objektive und subjektive Kriterien, die auch als Kriterien der Prozess- und Anwender:innensicht gesehen werden können.

Zhou et al. (2018) zeigen ebenfalls eine Evaluierung im VR-Trainingsbereich. Das entwickelte Lernmodell profitiert von den Aspekten der Mensch-Computer-Interaktion und pädagogischen Aspekten. Es berücksichtigt die Auswirkungen verschiedener Faktoren, einschließlich pädagogischer Kontexte, VR-Rollen und VR-Szenarien sowie Output-Spezifikationen, die kombiniert werden, um das Design zu beeinflussen und VR-Trainingsanwendungen zu realisieren. Um das Lernverhalten der Nutzer:innen zu analysieren und ihre Leistung und Erfahrung zu bewerten, wurde eine Evaluation mit 32 Studierenden durchgeführt. Mit Fragebögen wurden die Benutzer:innenfreundlichkeit, die Lernerfahrung und die emotionalen Zustände gemessen. Die Usability-Fragen basieren auf dem Technology Acceptance Model (TAM; einschließlich Perceived of Ease of Use, PEOU; Perceived Usefulness, PU; und Perceived Playfulness, PP), die Lernerfahrungs- und Emotionszustandsmessungen gründen auf dem „Game Experience Questionnaire“ (GEQ). Hier werden Likert-Items auf der Grundlage einer Fünf-Punkte-Skala mit Ankerpunkten von „1 – überhaupt nicht“ und „5 – sehr viel“ verwendet. Die Leistung wird mittels Zeitmessung erfasst und verglichen (Zhou et al., 2018).

Die Veröffentlichungen beziehen sich größtenteils auf die Evaluierung von VR-Trainingsszenarien. Sie betrachten einzelne Anwendungsfälle, die evaluiert werden, das Ziel der Erstellung eines Bewertungsmodells liegt nicht zugrunde. Im nächsten Unterkapitel werden Veröffentlichungen zur Evaluierung von Anwendungen mit Cobots beleuchtet.

### **3.4.4 Evaluierung von kollaborationsfähigen Robotern (Cobots)**

Die Evaluierung physischer Assistenzsysteme unterscheidet sich teils von der Evaluierung kognitiver Assistenzsysteme, da häufig die ergonomische Evaluierung in den Fokus gestellt oder zumindest intensiver betrachtet wird. Eine Veröffentlichung präsentiert ein Evaluierungskonzept physischer Assistenzsysteme, weitere Veröffentlichungen demonstrieren Beispiele von Mensch-Cobot-Anwendungen und deren Evaluierung.

Schmidtler et al. (2017) zeigen einen Fragebogen zur Bewertung von physischen Assistenzsystemen (Cobots, Exoskelette und andere unterstützende Geräte). Mithilfe des entwickelten Fragebogens „Questionnaire for the Evaluation of Physical Assistive Devices“ (QUEAD, siehe Anhang 8.2.5), welcher auf dem Technology Acceptance Model (TAM) und der DIN EN ISO 9241-11 basiert, werden die wahrgenommene Benutzer:innenfreundlichkeit und die Akzeptanz bewertet. Der QUEAD, der auf standardisierten Fragebögen aufbaut, ist für den Vergleich von mindestens zwei

Assistenzsystemen vorgesehen. Er bietet eine Möglichkeit, menschenzentrierte Kriterien von physischen Assistenzsystemen zu evaluieren und unterstützt bei der Auswahlentscheidung.

Eine weitere Publikation bewertet speziell Mensch-Cobot-Kollaborationen, ähnlich wie das eben vorgestellte QUEAD. Ender et al. (2019) evaluieren Mensch-Cobot-Kollaborationen in manuellen Produktions- und Instandhaltungsprozessen mit Fokus auf Akzeptanz, dem Stresslevel, der physischen und kognitiven Belastung, mit dem Ziel, die Produktivität zu steigern. Dafür wurde das Konzept Assisting-Industrial-Workplace-Systems (AIWS) entwickelt.

Während QUEAD nicht auf ergonomische Aspekte fokussiert, befassen sich Ender et al. (2019) zusätzlich mit der physischen und kognitiven Belastung. Die folgende Veröffentlichung beschäftigt sich ebenfalls mit ergonomischen Aspekten und zeigt ein Framework zur Evaluierung der Ergonomie und Bearbeitungszeiten. Mateus et al. (2019) stellen ein generisches Framework mit vier Blöcken für die Integration von Möglichkeiten zur Informationsextraktion und -verarbeitung sowie zur Generierung möglicher kollaborativer Montagesequenzen vor. Im dritten Block werden die möglichen kollaborativen Montagesequenzen evaluiert, wobei die menschenzentrierte Evaluierung auf Ergonomie und Bearbeitungszeiten fokussiert. Für die Evaluierung der Ergonomie wird das „Rapid Upper Limb Assessment“ (RULA) verwendet, wobei von Grün (geringes Risiko) bis Rot (hohes Risiko) bewertet wird, siehe Tabelle 10. Auf Seite der Cobots werden technische Kriterien wie z. B. die Funktionen des Manipulators, des Greifers oder der Sensoren betrachtet (Mateus et al., 2019).

**Tabelle 10: Auszug aus dem RULA, eigene Übersetzung aus Mateus et al. (2019, S. 2678)**

Limit	Bewertung
Last weniger als 2 kg (intermittierend)	0 (vernachlässigbares Risiko)
Last zwischen 2 und 10 kg (intermittierend)	1 (geringes Risiko)
Last zwischen 2 und 10 kg (statisch oder wiederholt)	2 (mittleres Risiko)
Last mehr als 10 kg oder wiederholend oder Stöße	3 (sehr hohes Risiko)

Das vorgestellte Framework zielt vor allem auf die Evaluierung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Cobot ab, wobei zwei Kriterien, Ergonomie und Bearbeitungszeiten, betrachtet werden.

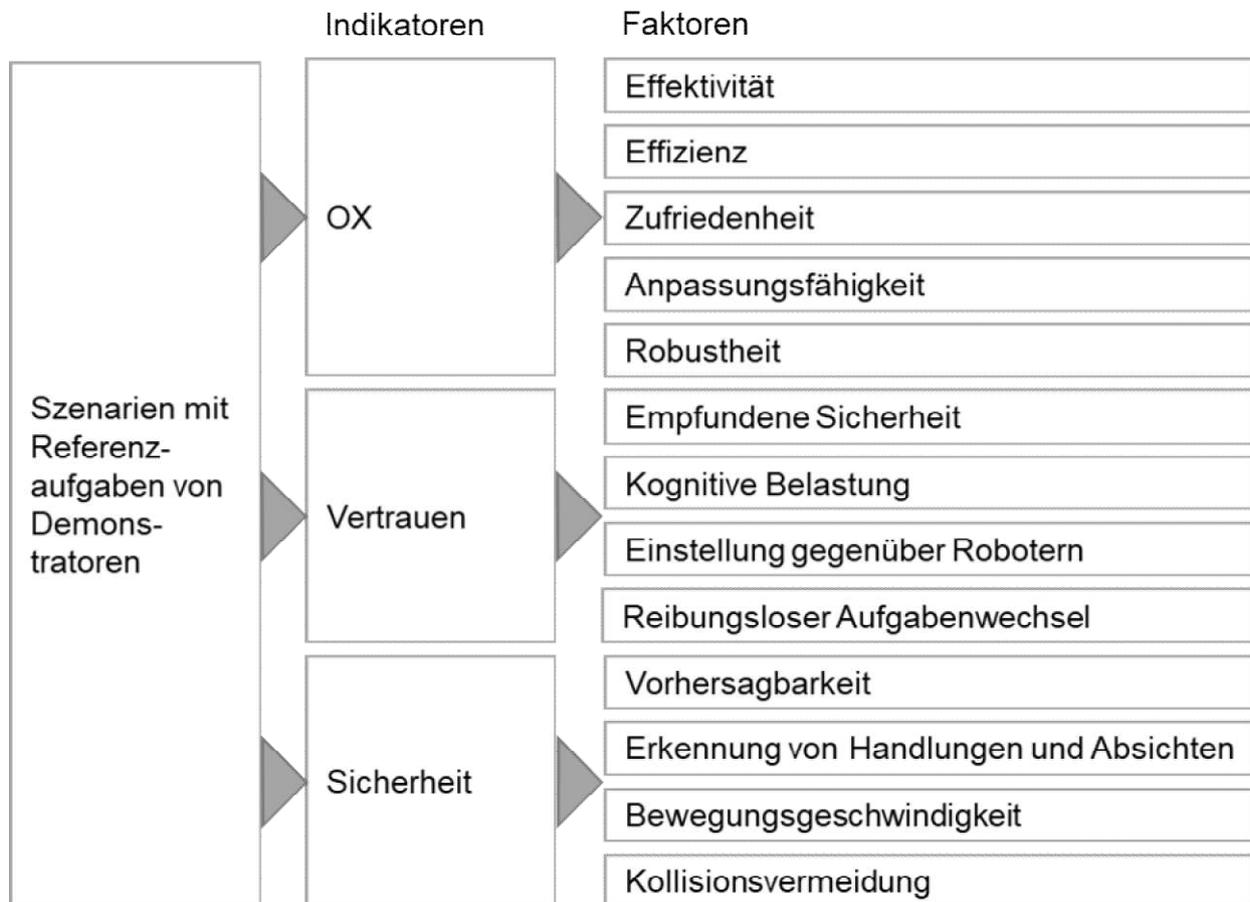
Chen et al. (2014) berechnen die Zeitkosten jeweils für Mensch und Roboter und die Gesamtzeitkosten für die ausgeführten Tätigkeiten. Zusätzlich berechnen sie durchschnittliche Personal-, Strom- und Anschaffungskosten in der Kostenrechnung. Die Ermüdung des Menschen bei der Durchführung einer Aufgabe wird ebenfalls gemessen, da dies zu einem Leistungsabfall führen kann, wie z. B. verlangsamte Reaktionsgeschwindigkeit, Schwierigkeiten, auf Veränderungen zu reagieren, und Konzentrationsschwierigkeiten beim Fällen vernünftiger Entscheidungen. Zur

quantitativen Beschreibung der Ermüdung rechnen die Autor:innen diese in Montagezeitkosten um.

Auch Hoffman (2019) beschäftigt sich mit der Analyse der unterschiedlichen Zeiten bei der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Cobot. Dafür analysiert er subjektive und objektive Metriken für die Fließfähigkeit (engl. fluency) zwischen Mensch und Cobot und stellt ein Modell mit vier objektiven Metriken vor: dem Prozentsatz der gleichzeitigen Aktivität, der Leerlaufzeit des Menschen, der Funktionsverzögerung des Cobots und der Leerlaufzeit des Cobots.

Schmidbauer et al. (2020) bewerten in einer Studie die Usability von drei Anwendungsbeispielen eines Cobots und vergleichen Vor- und Nachteile. Für die Bewertung wird die System Usability Scale (SUS) verwendet. In einer weiteren Studie evaluieren Schmidbauer et al. (2021) den Einsatz eines digitalen Assistenzsystems für Lai:innen zur Unterstützung einer adaptiven Aufgabenteilung mit einem Roboter. Bei Cobots wird häufig die Interaktion und Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter evaluiert, z. B. bei Gombolay et al. (2015) und Schmidbauer (2022). Diese werden für vorliegende Forschungsarbeit jedoch als weniger relevant eingestuft, da eine summative Evaluierung durchgeführt wird.

Holm et al. (2021) führen eine Evaluierung an drei Cobot-Demonstratoren durch, die sich auf menschenzentrierte Aspekte der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) in relevanten Montageszenarien konzentriert. Quantitative und qualitative Daten werden durch Beobachtung, Videoanalysen, Fragebögen und semistrukturierte Interviews erhoben und ausgewertet. Das verwendete Framework zur Evaluierung der MRK-Anwendungen (Abbildung 18), basierend auf Lindblom et al. (2020) sowie Lindblom und Wang (2018), gliedert die Indikatoren in Operator Experience (OX), Vertrauen und Sicherheit. Die Indikatoren sind weiter in Faktoren unterteilt, welche untersucht werden.



**Abbildung 18: Indikatoren für das Evaluierungs-Framework für MRK, eigene Übersetzung aus Holm et al. (2021, S. 426)**

Trotz unterschiedlicher Evaluierungsansätze für physische und kognitive Assistenzsysteme, werden häufig dieselben oder ähnliche Methoden zur Bewertung verwendet. Dies ermöglicht in einem einheitlichen Evaluierungsmodell Vergleichbarkeit zwischen Assistenzsystemen und wird im Evaluierungsmodell, das in dieser vorliegenden Untersuchung entwickelt wird, berücksichtigt. Im folgenden Unterkapitel wird die Evaluierung von Exoskeletten in der Literatur analysiert.

### 3.4.5 Evaluierung von Exoskeletten

Wie bereits in Kapitel 3.4.4 vorgestellt, zeigen Schmidler et al. (2017) den Fragebogen (QUEAD) zur Bewertung von physischen Assistenzsystemen (Cobots, Exoskelette und andere unterstützende Geräte). Dieser fokussiert auf die Evaluierung der Akzeptanz und der wahrgenommenen Benutzer:innenfreundlichkeit. Mit QUEAD werden menschenzentrierte Kriterien von physischen Assistenzsystemen evaluiert und baut auf standardisierten Fragebögen auf. Der Fragebogen vergleicht zwei oder mehrere Systeme und unterstützt bei der Auswahlentscheidung von physischen Assistenzsystemen.

Die Literatur speziell zur Evaluierung von Exoskeletten beschränkt sich größtenteils auf die Bewertung der ergonomischen Auswirkungen auf den Körper der Mitarbeiter:innen. In einer systematischen Literaturrecherche identifizieren Hoffmann et al. (2022) 74 Studien zu Ergonomiebewertungen von Exoskeletten, welche hauptsächlich in Laboren durchgeführt wurden. Sie zeigen auf, dass die Bewertungsmethoden nicht standardisiert sind und von den Forschungszielen, den Analysetyp und den angewandten Testverfahren abhängen.

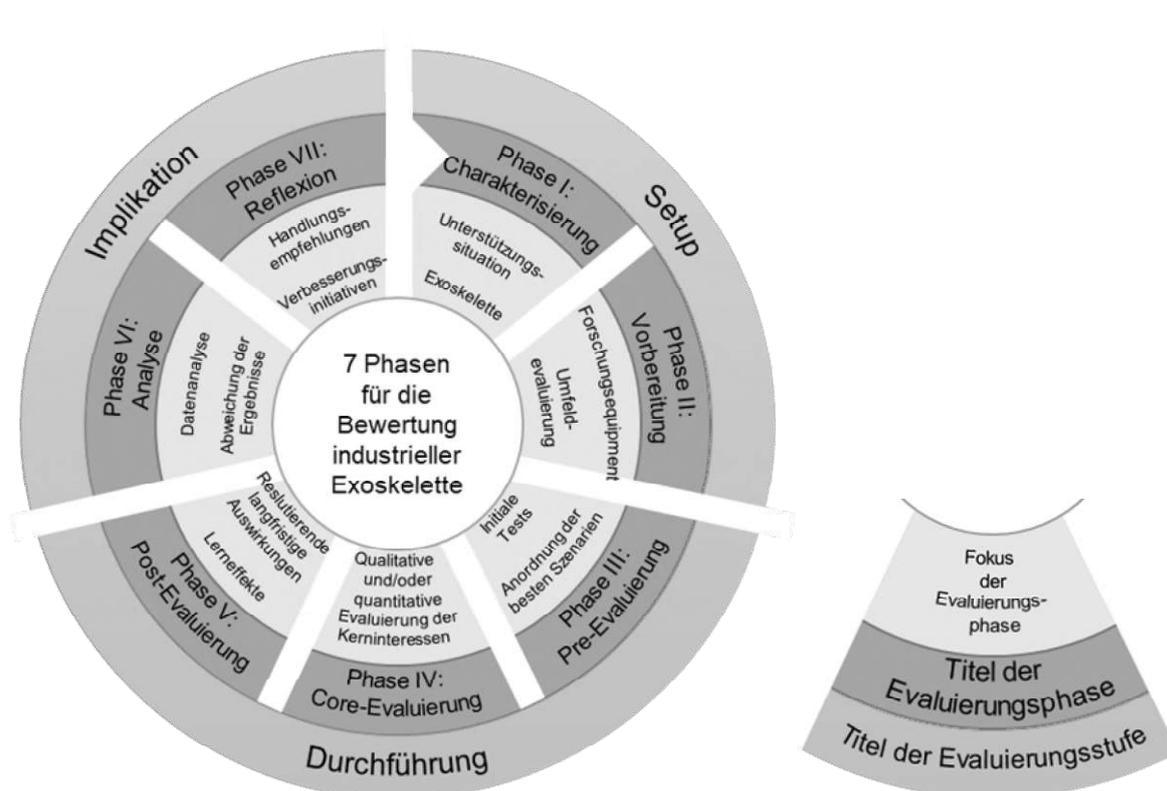
Constantinescu et al. (2019) zeigen einen breiteren Ansatz zur Evaluierung von Exoskeletten und identifizieren kritische Parameter für die Evaluierung von exoskelettzentrierten Arbeitsplätzen. Eine umfassende Modellierung, Simulation und Analyse von Ergonomie- und Prozessparametern stellen die Grundlagen der Methodik dar. Bei der Auswertung werden möglichst viele zielorientierte Parameter berücksichtigt. Kriterien wie Usability, Taktzeit, An- und Ausziehzeit des Exoskeletts, ergonomische Parameter, eine Belastungsanalyse, Produktqualität, Ausschussrate und weitere Kriterien werden in der Simulation bewertet. Die Taktzeit bietet einen guten Parameter zur Bewertung von Exoskeletten in Simulationen, bevor sie in einer realen Produktionsumgebung eingesetzt werden. In den Simulationen verkürzt sich die Zykluszeit an manchen Arbeitsstationen durch den Einsatz von Exoskeletten und verlängert sich bei anderen. Die Belastungsanalyse zeigt, dass die Mitarbeiter:innen nach ihrer Schicht aufgrund des Einsatzes von Exoskeletten weniger müde und erschöpft sind.

In einer weiteren Veröffentlichung stellen Dahmen und Constantinescu (2020) relevante Erkenntnisse, Methoden und Richtlinien zur optimierten Integration von Exoskeletten für menschenzentrierte Arbeitsplätze unter Berücksichtigung ergonomischer und prozessbezogener Einflüsse vor. Sie analysierten 36 Ergonomiebewertungsmethoden und deren Einsatzfähigkeit für Exoskelette. Fünf Methoden entsprechen dabei den Anforderungen: EAWS (Ergonomic Assessment Work Sheet) TB (total body), UB (upper body), KIM (Key indicator method), REBA (Rapid Entire Body Assessment) und RULA (Rapid Upper Limb Assessment). Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Bewertungsbögen.

**Tabelle 11: Vergleich verschiedener Methoden zur Ergonomiebewertung von Exoskeletten, eigene Übersetzung aus Dahmen und Constantinescu (2020, S. 7)**

Methoden	Ohne Exoskelett	Mit Exoskelett
EAWS TB	61: hohes Risiko – konstruktive Maßnahmen notwendig	66: hohes Risiko – konstruktive Maßnahmen notwendig
EAWS UB	78: hohes Risiko – konstruktive Maßnahmen notwendig	44,5: potenzielles Risiko – konstruktive Maßnahmen notwendig
KIM	72,5: sehr hohe Belastung - Maßnahmen notwendig	67,5: hohe Belastung – konstruktive Maßnahmen notwendig
REBA	4: mittleres Risiko – weitere Untersuchungen notwendig	3: niedriges Risiko – Änderung kann erforderlich sein
RULA	7: sehr hohes Risiko – Veränderung rasch umsetzen	6: mittleres Risiko – weitere Untersuchungen notwendig

Im Vergleich dazu analysieren Rashedi et al. (2014) die Effekte von Exoskeletten auf die Ergonomie durch die Bewertung von wahrgenommenem Unbehagen (engl. Ratings of perceived discomfort, RPDs) und Elektromyografie (EMG) für die Oberarme, Schultern und den unteren Rücken. Die Bewertung von Rashedi et al. (2014) ist detailliert und aufwendig, wodurch sie für die einfache Analyse in einem multikriteriellen Evaluierungsmodell eher ungeeignet ist. Ralfs et al. (2021) zeigen auf, dass es derzeit kein standardisiertes Verfahren zur Bewertung industrieller Exoskelette gibt. Ein Vergleich über Studien unterschiedlicher Autor:innen zwischen Exoskeletten und ihrer Anwendbarkeit am Arbeitsplatz erweist sich als schwierig. Ralfs et al. (2021) entwickeln das Sieben-Phasen-Modell (Abbildung 19) und einen modularen Testablauf für die Evaluierung industrieller Exoskelette.



**Abbildung 19: Sieben-Phasen-Methode, eigene Übersetzung aus Ralfs et al. (2021, S. 3)**

Zur Evaluierung von Exoskeletten ist meist die Bewertung der Ergonomie im Fokus, allerdings werden auch prozessbezogene und qualitative Parameter einbezogen. Im nächsten Unterkapitel werden Evaluierungsmodelle für technische Systeme vorgestellt, welche nicht auf spezifische Assistenzsysteme ausgerichtet sind.

### 3.4.6 Evaluierungsmodelle für technische Systeme in der Produktion

In diesem Unterkapitel werden Evaluierungsmodelle für technische Systeme in der Produktion vorgestellt und für die Anwendung für Assistenzsysteme analysiert.

Dengler et al. (2017) zeigen ein Modell zur allgemeinen Evaluierung technischer Systeme in der Produktion. In ihrer Veröffentlichung vergleichen sie unterschiedliche Bewertungskriterien, welche von anderen Autor:innen verwendet wurden und in Tabelle 12 gegenübergestellt sind.

**Tabelle 12: Übersicht verschiedener Evaluierungskriterien für Production Technology, eigene Übersetzung aus Dengler et al. (2017, S. 495)**

Swamidass 1987	Kleindorfer & Partovi 1990	Koho 2010	Reinhart et al. 2009, 2011	Friedrich 2014
Kosten	Kosten	Kosten	Wirtschaftlichkeit	Kosten
Flexibilität	Flexibilität	Mengenflexibilität	Wettbewerbspotenzial	Flexibilität
Qualität	Qualität	Qualität	Reife	Qualität
	Abhängigkeit	Zeit	Machbarkeit des Produkts	Machbarkeit des Produkts
		Produktflexibilität	Ressourceneffizienz	Ökologisch
		Zuverlässigkeit der Durchlauf-/Lieferzeit		Durchsatz
				Investment

Auf Basis der Übersicht wurden fünf Bewertungskriterien nach ihrer Nutzungshäufigkeit ausgewählt: Kosten, Qualität, Volumenflexibilität, Nachhaltigkeit und Durchführbarkeit des Produkts. Zusätzlich werden die Kriterien Interkonnektivität aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Datenübertragung und -austausch in der Produktion berücksichtigt. Die wirtschaftlichen Aspekte einer Technologie werden im Hinblick auf die Herstellungskosten pro Einheit (z. B. Materialkosten, Wartungskosten, Einrichtungskosten) berücksichtigt. Der Aspekt Qualität umfasst Kriterien zur Bewertung der Fähigkeit, Spezifikationen wie Design, Leistung oder Zuverlässigkeit zu erfüllen und die Erwartungen und Anforderungen der Kund:innen abzubilden. Volumenflexibilität beschreibt sowohl die Bandbreite des Volumens, das gewinnbringend produziert werden kann, als auch die Fähigkeit, das Produktionsvolumen entsprechend der Nachfrage gewinnbringend zu verändern. Die

Nachhaltigkeit umfasst die ökologische Bewertung einer Produktionstechnologie in Bezug auf Energie- und Materialeffizienz. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass die Technologie in Übereinstimmung mit aktuellen und zukünftigen gesetzlichen Anforderungen steht. Die Produktmachbarkeit enthält relevante Daten über das aktuelle Produkt und zukünftige Anpassungen (Dengler et al., 2017). Dieses Modell ist nicht speziell für Assistenzsysteme entwickelt worden, sondern für technische Systeme in der Produktion. Die Anforderungen sind ähnlich und daher teils anwendbar für die Evaluierung von Assistenzsystemen.

Auch Liebrecht et al. (2017) sowie Liebrecht (2020) beschreiben ein Modell zur multikriteriellen Bewertung von technischen Systemen im Bereich Industrie 4.0. Sie schreiben über die Entscheidungsunterstützung für den Einsatz von Methoden in einer Industrie 4.0 Umgebung. Das Zielsystem beinhaltet fünf Zielgrößen (Kosten, Zeit, Qualität, Mitarbeiter:in, Flexibilität) zur Evaluierung eines technischen Systems in der Produktion im Industrie-4.0-Kontext.

In der Zielgröße „Kosten“ werden Kennzahlen der Kostenrechnung herangezogen. Direkte Kosten wie Produktions-, Material- und Personalkosten, indirekte Kosten wie Mietkosten für Immobilien, Versicherungen und Kosten in Verbindung mit anderen Kennzahlen werden verwendet. Die Wirtschaftlichkeit als Kennzahl zeigt Soll-Ist-Kostenabweichungen und Erlös-Kosten-Relationen. Ziel ist eine Minimierung der Fertigungskosten (Liebrecht, 2020).

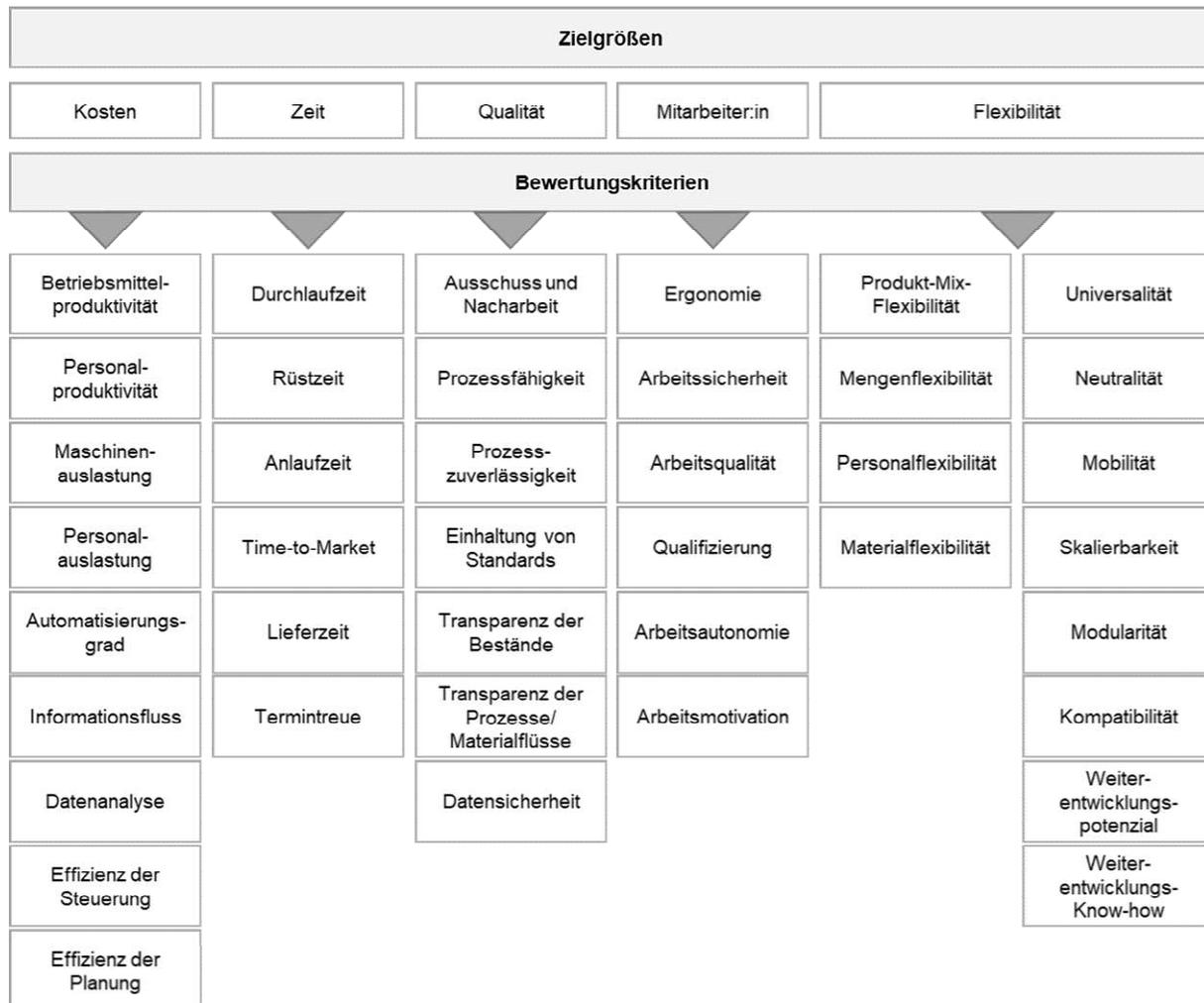
„Zeit“ erfasst die Durchlaufzeit (die Bearbeitungs-, Transport- und Wartezeiten), welche die Zeit zwischen dem ersten und letzten Arbeitsschritt eines Werkstücks definiert. Die Zielgröße ist relevant, da kürzere Lieferzeiten häufig zu höherer Kund:innenzufriedenheit führen. Ziel ist es, Verzögerungen im Produktionsprozess zu minimieren, Liefertermine zu halten und Wunschtermine zu realisieren (Liebrecht, 2020).

„Qualität“ als Zielgröße misst die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bzgl. ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen. Das Ziel ist es, die geforderte Prozessqualität einzuhalten und die Stabilität der Produktionsprozesse zu erhöhen (Liebrecht, 2020).

Die Zielgröße „Mitarbeiter:in“ beschäftigt sich mit der Veränderung der Anforderungen an die Mitarbeiter:innen durch den Einsatz eines technischen Systems in der Produktion. Kennzahlen aus dem Produktions- und Personalbereich werden für die Messung herangezogen. Ziel ist es, Anreize und Voraussetzungen zu schaffen, um Mitarbeiter:innen zu animieren und zu befähigen, langfristig im Unternehmen zu bleiben und die kognitive und physische Belastung zu reduzieren (Liebrecht, 2020).

„Flexibilität“ wird als die Fähigkeit in einem stetig wechselnden Umfeld mit geringem Aufwand auf eine Veränderung und kurzfristig auf sich ändernde Vorgaben zu

reagieren, um diese möglichst vollständig zu erfüllen. Ziel ist es, das Produktionssystem so zu gestalten, dass Produktionsprozesse wirtschaftlich flexibel an veränderte Gegebenheiten angepasst werden können (Liebrecht, 2020). Abbildung 20 zeigt die Bewertungskriterien der einzelnen Zielgrößen.



**Abbildung 20: Strategischer Kriterienkatalog, eigene Darstellung nach Liebrecht (2020, S. 99)**

Liebrecht (2020) validiert das Modell anhand der Umstellung in eine papierlose Fertigung und verwendet dabei den AHP und den Vergleich in Paaren für die Gewichtung der Kriterien. Das Zielsystem verwendet eine multikriterielle Vorgehensweise für die Bewertung von technischen Systemen im Bereich Industrie 4.0 und spricht in dem Zusammenhang von kognitiver und physischer Unterstützung.

Ein weiteres Modell, welches vor allem für Investmententscheidungen von Abdelkader und Dugdale (2001) entwickelt wurde, zeigt eine multikriterielle Evaluierung für technische Systeme. Das Modell „Advanced Manufacturing Technology“ (AMT) fasst mehrere Aspekte bestehender Modelle zusammen und bietet einen umfassenden Überblick über das Evaluierungsproblem. Das Modell unterscheidet zwischen Faktoren, die quantifiziert werden, und Faktoren, die nur subjektiv bewertet werden können. Es basiert auf einem empirisch fundierten Rahmen und baut auf mehreren

theoretischen Themen aus der AMT-Investitionsliteratur auf. Es kombiniert den AHP und die Fuzzy-set-Theory bei Investitionsentscheidungen (Abdel-Kader & Dugdale, 2001). Das Modell ist anhand eines dreidimensionalen Rahmens, der sich wie folgt zusammensetzt, aufgebaut:

1. finanzielle Rendite,
2. nichtfinanzielle Vorteile und
3. Risiko.

Die endgültige Entscheidung hängt von den Präferenzen der Entscheidungsträger:innen ab. Die Veröffentlichung von 2001 ist nicht speziell für Assistenzsysteme ausgelegt, die Gliederung und Unterteilung der Faktoren ist dennoch relevant (Abdel-Kader & Dugdale, 2001).

Die Modelle von Dengler et al. (2017), Liebrecht (2020) sowie Abdel-Kader und Dugdale (2001) zeigen multikriterielle Entscheidungs- und Evaluierungsmodelle mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Sie sind jedoch nicht speziell für die multikriterielle Evaluierung von Assistenzsystemen in der Produktion ausgelegt, sondern speziell für Investmententscheidungen (Abdel-Kader & Dugdale, 2001), für die Gesamtbewertung von technischen Systemen im Bereich Industrie 4.0 (Dengler et al., 2017; Liebrecht, 2020). Die Modelle von Liebrecht (2020) und Dengler (2017) sind sehr umfassend aufgestellt, speziell gedacht für die Unterstützung von Entscheidungsprozessen in der Gesamteinführung von technischen Systemen auf Werksebene. Für die Evaluierung von Assistenzsystemen auf Arbeitsebene sind die Modelle zu umfassend und in der Anwendung zu aufwendig.

### 3.4.7 Klassifizierung der Publikationen

In Tabelle 13 wird eine Auswahl der relevantesten Literatur für die Forschungsarbeit dargestellt. Neben der Nennung des Erscheinungsjahrs der Publikation und der Autor:innen wird die Tabelle in den Anwendungsbereich des Assistenzsystems, die Unterstützungsart, die Bewertungsmethodik und den Detaillierungsgrad unterteilt. In der Spalte „Anwendungsbereich“ wird der Einsatzbereich des Assistenzsystems der Publikation genannt. Dieser ist grob gegliedert in Produktion, Montage, Einschulungsprozesse für Montagetätigkeiten und Instandhaltung. Die Publikationen 20 bis 22 betrachten nicht ein konkretes Assistenzsystem, sondern Evaluierungsmodelle für spezifische Anwendungen, z. B. für die Industrie 4.0. Die Unterstützungsart wird auf Basis des Grundlagenkapitels zu Assistenzsystemen (Kapitel 2.1) in kognitive und physische Systeme unterteilt. Die verwendete Bewertungsmethodik in den Publikationen wird in quantitativ und qualitativ unterschieden. Im Detaillierungsgrad werden die Anzahl der genannten Kriterien und der verwendeten Methoden dargestellt.

Tabelle 13: Auswahl relevanter Literatur, eigene Darstellung

Jahr	Autor:innen	Anwendungsbereich	Unterstützungsart		Bewertungsmethodik		Detaillierungsgrad	
			Kognitiv	Physisch	Quantitativ	Qualitativ	Anzahl Kriterien	Anzahl Methoden
2019	Kim et al.	Produktion	x		x		3	2
2018	Terhoeven et al.	Montage	x		x		2	2
2016	Hoedt et al.	Montage	x		x		4	4
2018	Zhou et al.	Einschulungsprozess Montage	x		x		4	2
2021	Havard et al.	Instandhaltung	x		x		4	4
2019	Constantinescu et al.	Montage		x	x		5	0
2014	Rashedi et al.	Produktion		x	x		2	2
2020	Dahmen & Constantinescu	Produktion		x	x		2	2
2019	Aschenbrenner et al.	Instandhaltung	x		x		5	5
2019	Keller et al.	Montage	x		x		5	4
2018	Schafner et al.	Montage	x		x	x	5	0
2016	Funk	Montage	x		x	x	3	3
2016	Funk et al.	Montage	x		x		3	3
2020	Hold	Montage	x		x		3	3
2017	Schmidler et al.	Produktion		x	x		2	2
2019	Mateus et al.	Montage		x	x		2	2
2014	Chen et al.	Montage		x	x		3	3
2019	Ender et al.	Produktion		x	x		4	4
2019	Hoffman	Produktion		x	x		1	1
2021	Holm et al.	Montage		x	x		3	3
2001	Abdel-Kader & Dugdale	Advanced Manufacturing Technology	n. a.	n. a.	x	x	n. a.	n. a.

Jahr	Autor:innen	Anwendungsbereich	Unterstützungsart		Bewertungsmethodik		Detaillierungsgrad	
			Kognitiv	Physisch	Quantitativ	Qualitativ	Anzahl Kriterien	Anzahl Methoden
2017	Dengler et al.	Technische Systeme in der Produktion	n. a.	n. a.	x	x	n. a.	n. a.
2020	Liebrecht	Industrie 4.0	n. a.	n. a.	x	x	n. a.	n. a.

### 3.5 Diskussion der Literaturrecherche und Aufzeigen des Forschungsbedarfs

Modelle für multikriterielle Bewertungen sind bereits vielfach entwickelt, jedoch allgemein für technische Systeme bzw. für technische Lösungen im Bereich Industrie 4.0 Bereich (Abdel-Kader & Dugdale, 2001; Dengler et al., 2017; Liebrecht et al., 2017). Ein speziell zur Evaluierung und Vergleichbarkeit von unterschiedlichen industriellen Assistenzsystemen ausgelegtes Modell wurde im Rahmen der Literaturrecherche nicht gefunden und ist nicht bekannt. Die Recherche zeigt die Forschungslücke in der multikriteriellen Evaluation von industriellen Assistenzsystemen auf. Eine multikriterielle Evaluierung ist notwendig, um über eine Implementierung einer akzeptierten und wirtschaftlichen Anwendung eines industriellen Assistenzsystems zu entscheiden. Die Evaluierung ermöglicht eine Bewertung des tatsächlichen Nutzens, eine (iterative) Verbesserung der Anwendung und eine Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine verbesserte Entscheidungsfindung während der Konzeptions- und Implementierungsphase.

Die Literaturrecherche zeigt, dass bei der Evaluierung von Assistenzsystemen im Median zwei Kriterien bewertet werden. Bei 57 Prozent der Evaluierungen werden die Kriterien ohne eine reproduzierbare Methode genannt (del Amo et al., 2018; Mourtzis et al., 2016). Hauptsächlich werden Usability, Nutzer:innenakzeptanz und mentale Belastung mit standardisierten Methoden bewertet, Kosten werden nur selten berücksichtigt, lediglich in einer Arbeit wird der Return of Investment (ROI) bewertet (Suárez-Warden et al., 2015). Effizienz und Effektivität werden am häufigsten genannt, aber nur wenige Studien definieren, wie sie die Effekte messen. Sehr wenige Evaluierungen beziehen sowohl die Unternehmens- als auch die Nutzer:innensicht ein.

Kein Modell und keine Methode zur übergreifenden Evaluierung unterschiedlicher Assistenzsysteme mit einer einheitlichen Vorgehensweise, unter Berücksichtigung von prozesseitigen als auch menschenzentrierten Faktoren, adressiert eine quantifizierbare und vergleichbare Evaluierung von Assistenzsystemen in der Produktion.

Funk (2016) hat während der Durchführung der Studien den Bedarf einer standardisierten Evaluierungsmethode von AR-Anleitungen erkannt. Pokorni et al. (2020) beschreiben die Bedeutung und die Zunahme von Assistenzsystemen in Industrie-4.0-Umgebungen. In der Praxis führen viele Implementierungen zu einer geringen Akzeptanz bei der Belegschaft. Das führt häufig zu kostspieligen Anpassungen der Assistenzsysteme und hohen Aufwendungen für Schulungen. Unternehmen benötigen einen systematischen Ansatz, um die richtige Konfiguration des Assistenzsystems zu ermitteln. Sie müssen sowohl die Geschäftsanforderungen als auch die Bedürfnisse der Benutzer:innen und deren Wohlbefinden berücksichtigen, um eine hohe Nutzer:innenakzeptanz und einen schnellen Planungs- und Anpassungsprozess zu gewährleisten. Hier fehlt ein systematisches und konkretes Evaluierungsmodell für die Gestaltung von menschenzentrierten Assistenzsystemen in der Produktion.

Souza Cardoso et al. (2020) geben einen Überblick über die Entwicklungen und Anwendungen von AR in industriellen Umgebungen zwischen 2012 und 2018. Im Review analysieren sie Forschungsarbeiten und Patente, um Verbesserungen und Einschränkungen von AR aufzuzeigen und gleichzeitig einen Ansatz vorzuschlagen, der die Herausforderungen der Entwickler:innen angeht und die Bedürfnisse der Benutzer:innen erfüllt. Zukünftige Forschungen beschäftigen sich mit den Auswirkungen von AR auf die Umwelt, indem sie den Bedarf der Technologie messen und sie mit traditionellen Methoden vergleichen. Diese Analyse kann Investor:innen für die Technologie gewinnen, wenn die Ergebnisse besser sind als bei traditionellen Methoden oder sie kann zu Verbesserungsvorschlägen für Geräte führen. Auch ergonomische Aspekte werden weiter untersucht. Physische und psychische Auswirkungen der Benutzer:innen werden analysiert, wenn sie über einen längeren Zeitraum mit digitalen Assistenzsystemen arbeiten (Souza Cardoso et al., 2020).

Keller et al. (2019) zeigen auf, dass oft nicht ausreichend evaluiert wird, und unterstreichen die Wichtigkeit einer umsichtigen Evaluierung für die Entscheidungsfindung. Ein einheitliches Modell zur Evaluierung industrieller Assistenzsysteme wird daher in dieser Dissertation entwickelt.

Die entsprechende Literaturrecherche spiegelt den Stand der Forschung wider und bietet eine Grundlage für ein multikriterielles Evaluierungsmodell. Das auf Basis der Literaturrecherche erstellte Evaluierungsmodell wird anhand praktischer Anwendungen getestet. Ein Vergleich zwischen Ist- und Soll-Prozess zeigt Auswirkungen und Effekte von Assistenzsystemen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse und ermittelten Informationen wird das Evaluierungsmodell modifiziert und verfeinert. Diese zirkuläre Schleife wird wiederholt, bis das Evaluierungsmodell validiert ist.

## 4 Modellanforderungen

Auf Basis der umfassenden Analyse des Forschungsstandes in Kapitel 3 wurde der Forschungsbedarf bestärkt und Forschungslücken bestehender Ansätze analysiert. Der aufgezeigte Forschungsbedarf verdeutlicht, dass ein multikriterielles Evaluierungsmodell zur Bewertung unterschiedlicher industrieller Assistenzsysteme für ein und denselben Prozess in der Literatur nicht nachzuweisen ist, welches nach dem MTO-Modell verschiedene Aspekte berücksichtigt. Existierende Bewertungsmodelle beziehen sich teils auf allgemeine technische Systeme in einer Produktion oder Industrie 4.0, spezifisch für Assistenzsysteme wird das volle Potenzial jedoch noch nicht genützt. Basierend darauf werden die Anforderungen für das Evaluierungsmodell definiert. Nachdem der Begriff „Modell“ in der Wissenschaft vielfältig eingesetzt wird, wird dieser für die Verwendung in dieser Forschungsarbeit festgelegt.

### 4.1 Begriffsdefinition „Modell“

Definitionen für den Begriff „Modell“ werden in verschiedenen Forschungsdisziplinen unterschiedlich formuliert. In dieser Forschungsarbeit wird die Begriffsdefinition nach Töllner (2009) verwendet, demnach bezeichnet ein Modell „eine für einen bestimmten Zweck gebildete, vereinfachende Abbildung eines als System aufgefassten Realitätsausschnittes“ (Töllner, 2009). Laut Stachowiak (1973) kennzeichnet ein Modell zumindest die folgenden drei Merkmale:

1. **Abbildungsmerkmal:** „Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Realpräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können“ (Stachowiak, 1973, S. 131).
2. **Verkürzungsmerkmal:** „Modelle erfassen im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen“ (Stachowiak, 1973, S. 132).
3. **Pragmatisches Merkmal:** „Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktionen a) für bestimmte – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen“ (Stachowiak, 1973, S. 132–133).

Laut VDI-Richtlinien 3633 (2018) ist ein Modell eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Ein Modell wird genutzt, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung mittels direkter Operationen am Original nicht möglich oder zu aufwendig wäre.“ Die Modellierungsmethode beschreibt

„Modellierungskonstrukte, Vorgehensweisen und Regeln für deren Anwendung (Modellierungssprache)“ und „beinhaltet Hilfestellungen für den Anwender, wie Modelle mithilfe der Modellierungssprache sinnvoll erstellt werden können“ (VDI-Richtlinien 3633, 2018, S. 20).

## 4.2 Anforderungen an ein multikriterielles Evaluierungsmodell für Assistenzsysteme in der Produktion

Die Anforderungen an das zu entwickelnde Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme resultieren aus den Ergebnissen der Literaturrecherche. Es wurden fünf Anforderungen definiert, die im Folgenden beschrieben werden.

Hold (2020) und Keller et al. (2019) zeigen eine Evaluierung digitaler Assistenzsysteme, Schmidler et al. (2017) eine physischer Assistenzsysteme. Die systemübergreifende Evaluierung wird für technische Systeme in der Produktion von Dengler et al. (2017) betrachtet, für die Industrie 4.0 von Liebrecht (2020) und für Advanced Manufacturing Technology von Abdel-Kader und Dugdale (2001). Ein Evaluierungsmodell, das sowohl kognitive als auch physische Assistenzsysteme im selben Prozess evaluiert, ist ausständig, daraus definiert sich die erste Anforderung.

**Anforderung 1:** *Das Evaluierungsmodell lässt sich auf kognitive und physische Assistenzsysteme an ein und demselben Prozess anwenden. Die Bewertungsunterschiede von Assistenzsystemen werden am gleichen Prozess dargestellt.*

Zur Beschreibung des Evaluierungsmodells werden Methoden zur Prozessvisualisierung genutzt, um den Ablauf systematisch darzustellen, dabei wird ein Regelwerk zur Anwendung des multikriteriellen Evaluierungsmodells erstellt. Die Ablaufdarstellung ist für die Evaluierung kognitiver und physischer Assistenzsysteme in der Produktion gültig und branchenunabhängig anwendbar. Unternehmensspezifische Ziele, Restriktionen und Datenverfügbarkeit werden berücksichtigt.

**Anforderung 2:** *Eine prozessorientierte Ablaufdarstellung für die systematische Durchführung der multikriteriellen Evaluierung industrieller Assistenzsysteme wird bereitgestellt.*

Die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Assistenzsysteme wird quantitativ und qualitativ erfasst und über eine quantitative Skala verglichen. Eine einfache Darstellung des Ergebnisses hilft zur verständlichen Bewertung.

**Anforderung 3:** *Die Vergleichbarkeit der einzelnen Szenarien von industriellen Assistenzsystemen wird quantifiziert abgebildet.*

Um das Evaluierungsmodell in verschiedenen Produktionen branchenunabhängig einzusetzen, wird das Modell modular aufgebaut. Die relevanten Kriterien werden durch eine Analyse der Anwender:innen ermittelt und für den spezifischen Prozess angewendet.

**Anforderung 4:** *Das Modell wird modular aufgebaut und lässt sich an Prozesse und Branchen anpassen.*

Keller et al. (2019) weisen auf die Wichtigkeit einer umsichtigen Evaluierung für die Entscheidungsfindung hin und zeigen auf, dass oft nicht ausreichend bewertet wird. Daher werden sowohl unternehmerische Aspekte als auch arbeitswissenschaftliche Kriterien aus mehreren Blickwinkeln für den Einsatz von kognitiven und physischen Assistenzsystemen evaluiert.

**Anforderung 5:** *Das Modell wird sich am MTO-Konzept orientieren und ausgewogene soziotechnische Aspekte vorsehen.*

Auf Basis der definierten Anforderungen wird das Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme entwickelt und getestet. Damit können verschiedene Systeme an einem Prozess verglichen und die beste Kombination ausgewählt werden. Schwachstellen von einzelnen Systemen und Kombinationen werden quantitativ aufgezeigt und zeigen kriterienbezogene Verbesserungspotenziale.

## 5 Evaluierungsmodell für Assistenzsysteme

Das Evaluierungsmodell dient zur multikriteriellen Bewertung und zum Vergleich von industriellen Assistenzsystemen. Ziele sind die Begründbarkeit und Überprüfung der möglichen Lösungen sowie die Prozessoptimierung nach ausgewählten Kriterien. Bereits existierende Modelle, z. B. die Balanced Scorecard (Kaplan & Norton, 1992) oder das aus dem Qualitätsmanagement stammende EFQM-Modell für Excellence, zielen auf die Bewertung von unterschiedlichen Sichtweisen ab und vermeiden die Fokussierung auf rein finanzwirtschaftlich orientierte Evaluierungsgrößen (Schröder, 2010).

Das entwickelte Modell umfasst fünf Dimensionen, die in weitere Kriterien unterteilt sind (siehe Abbildung 21). Für die Messung der Kriterien werden Methoden definiert bzw. entwickelt. Hauptsächlich werden basierend auf der Literaturrecherche standardisierte Methoden verwendet. Für einige Kriterien wurden auf Basis vorhandener Methoden eigene Verfahren entwickelt, um die spezifischen Anforderungen für Assistenzsysteme zu bewerten. Sämtliche Kriterien werden auf eine Skala gebracht, um sie quantifizierbar und vergleichbar zu machen.

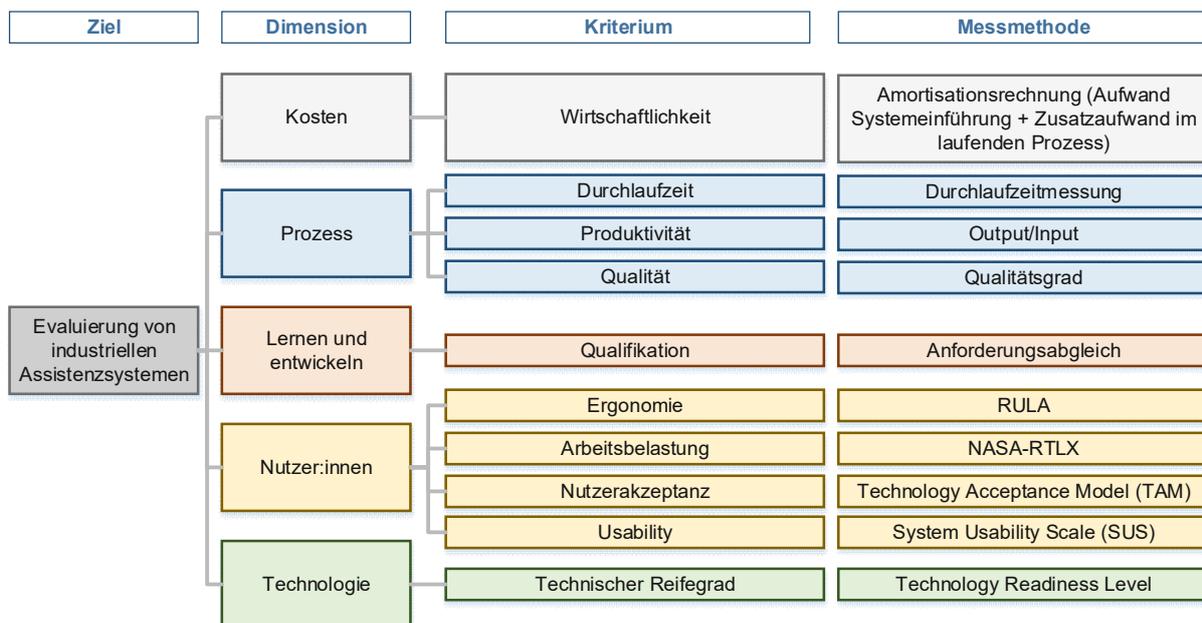


Abbildung 21: Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme, in Anlehnung an Zigart und Schlund (2020b, S. 4)

Für die Evaluierung werden die Kriterien nach Anwendungsfall ausgewählt und gewichtet. Auf diese Weise werden menschenzentrierte und gleichzeitig betriebswirtschaftliche Erfordernisse je Anwendungsfall individuell balanciert. Wichtig ist hierbei, dass alle zu vergleichenden Systeme mit den gleichen Kriterien bewertet werden, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

## 5.1 Dimension Kosten

Die Einführung von Assistenzsystemen ist mit Anschaffungs-, laufenden und Instandhaltungskosten verbunden. Daher stellt sich die Frage der Wirtschaftlichkeit, speziell der Amortisation der Investition in ein Assistenzsystem, weshalb sie im Evaluierungsmodell als eigene Dimension betrachtet wird. In der Literaturrecherche, siehe Tabelle 14, wird das Kriterium Kosten häufig genannt und ist eine wesentliche Entscheidungsgröße bei der Implementierung von Assistenzsystemen (Frizziero et al., 2019; Hold et al., 2017; Martinetti et al., 2017; Mourtzis et al., 2016; Suárez-Warden et al., 2015). Dabei werden oftmals die Kosten als wichtig genannt, jedoch kaum tatsächlich berechnet. Für die Berechnung der Kosten wird als Kriterium die Wirtschaftlichkeit herangezogen und dabei vor allem die Amortisation der investierten Kosten für die Anschaffung und Implementierung betrachtet.

**Tabelle 14: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Kosten, eigene Darstellung**

Kriterien in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)	Methoden in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)
Kosten	
Costs (4), Total production and transportation cost (1), Required mandatory standard rate (1), Minimum attractive rate of return (MAAR) (1), Return on Investment (ROI) (1), Economic impact (1), Costs of component (1), Economic efficiency (1)	Required mandatory standard rate (1), Minimum attractive rate of return (MAAR) (1), Return on Investment (ROI) (1), Unit costs (1), Cost of equipment (1), Costs for material processing and handling (1)

Für die Bewertung können unterschiedliche Methoden verwendet werden, je nachdem welche im Unternehmen bereits im Einsatz sind. Wichtig für die Vergleichbarkeit ist, dass alle Assistenzsysteme mit der gleichen Methode bewertet werden. Das Kriterium Wirtschaftlichkeit wird in dieser Arbeit mit der Berechnung der Amortisationszeit berechnet.

### 5.1.1 Wirtschaftlichkeit

Eine Investition ist wirtschaftlich, wenn aufgrund der angefallenen Investitionskosten gleich viel oder mehr eingespart bzw. dadurch mehr erwirtschaftet werden kann (D. Müller, 2006). Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Investitionsrechnungsmethoden, welche sich in den Zielgrößen und in der Berücksichtigung der Betrachtungsdauer unterscheiden (Daum et al., 2018). In der Produktion bezieht sich die Wirtschaftlichkeit im Wesentlichen auf die Produktivität. Die Mitarbeiter:innenproduktivität, die Maschinenauslastung und die Materialnutzung sind unmittelbar relevant für die Wirtschaftlichkeit (Erlach, 2010). Investitionen werden in Finanz- und Realinvestitionen unterschieden. Assistenzsysteme fallen in Realinvestitionen, daher werden hier nur Methoden für diese Art der Investitionen näher betrachtet. Realinvestitionen werden weiter in materielle (Neu- oder

Ersatzinvestitionen) und immaterielle Investitionen unterteilt. Bei einer Neuinvestition wird z. B. eine neue Maschine angeschafft, bei einer Ersatzinvestition wird eine bereits vorhandene Maschine ersetzt. Unter immaterielle Investitionen fallen Aufwände für Innovationen und Aus- und Weiterbildung. Die Implementierung eines Assistenzsystems ist eine Kombination aus materiellen und immateriellen Investitionen, wobei beide Teile daher gemeinsam betrachtet werden (D. Müller, 2006).

Des Weiteren wird bei der Investitionsrechnung zwischen Rechnung unter Sicherheit und Unsicherheit unterschieden. Statische Investitionsrechnungsmethoden sind im Vergleich zu dynamischen Methoden weniger aufwendig und einfacher durchführbar. Durch die Vernachlässigung der Zins- und Zinseszinsseffekte und zeitliche Unterschiede der Zahlungsströme sowie der daraus entstehenden Ungenauigkeit bei statischen Investitionsrechnungsmethoden kann es zu Fehlentscheidungen bei Investitionen kommen. Vor allem bei großen Investitionen sind dynamische Investitionsrechnungsmethoden besser geeignet.

Die im Evaluierungsmodell verwendete Investitionsrechnungsmethode soll für alle betrachteten Assistenzsysteme anwendbar sein und somit unterschiedliche Assistenzsysteme kostentechnisch vergleichbar machen. Die Anwendung von mehreren Investitionsrechnungsmethoden auf eine Investition ist sinnvoll, um unterschiedliche Blickwinkel zu bekommen und eine sinnvolle Investitionsentscheidung treffen zu können. Tabelle 15 zeigt einen Vergleich statischer Investitionsrechnungsmethoden basierend auf Daum et al. (2018) und D. Müller (2006), wobei die Eignung für Assistenzsysteme selbst abgeschätzt wurde.

**Tabelle 15: Vergleich statischer Investitionsrechnungsmethoden, basierend auf Daum et al. (2018) und D. Müller (2006)**

Investitionsrechnungsmethode	Beschreibung	Einsatz	Eignung für Assistenzsysteme
<b>Kostenvergleichsrechnung</b>	Vergleich der gesamten Kosten der Investition und Entscheidung für die Investition mit den geringsten Gesamtkosten.	Bei unumgänglichen Investitionen (z. B. Ersatzinvestitionen).	mäßig
<b>Gewinnvergleichsrechnung</b>	Kosten und Umsätze werden miteinbezogen.	Bei Investitionen, die sich direkt auf den Gewinn auswirken.	mäßig
<b>Rentabilitätsvergleichsrechnung</b>	Relative Gewinngröße wird ermittelt und verglichen.	Der ROI ist die relevante Entscheidungsgröße, nicht der Gewinn.	Hoch
<b>Statische Amortisationsrechnung</b>	Erwartete Ein- und Auszahlungen werden über mehrere Perioden dargestellt.	Als Ergänzung zu anderen Methoden, keine Aussage zur Rentabilität der Investition.	Mäßig

Die Rentabilitätsvergleichsrechnung, bei der der Return on Investment (ROI) als relevante Entscheidungsgröße herangezogen wird, wird als passend für Investitionen in Assistenzsysteme erachtet. Dabei wird die Amortisationszeit als Verhältnis der Anschaffungskosten zum durchschnittlichen Gewinn (nach Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen) definiert. Der ROI wird wie folgt berechnet:

$$ROI = \frac{\text{Investitionen}}{\text{Jährliche Einsparungen}}$$

#### Formel 6: Berechnung des Return on Investment (ROI)

Bei den Investitionskosten werden alle anfallenden Kosten für die Implementierung des Assistenzsystems betrachtet, wie z. B. die Kosten des Assistenzsystems, die Projektmanagementkosten, die Kosten für Systems Engineering (z. B. Programmierung und Installation) und Peripheriekosten (z. B. Sicherheitsausstattung). Die jährlichen Einsparungen errechnen sich z. B. aus Qualitätsverbesserungen, Einsparungen aus manuellen Bearbeitungszeiten und Reisekosteneinsparungen abzüglich Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen (Rally & Scholtz, 2020). Die Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen werden aus den Investitionen abgeleitet und von den jährlichen Einsparungen abgezogen. Die Amortisationszeit errechnet sich wie folgt:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Anschaffungskosten}}{\text{durchschnittlicher Gewinn}}$$

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionen}}{\text{Verringerte Montagekosten} - \text{Abschreibungen} - \text{kalkulierte Zinsen}}$$

#### Formel 7: Berechnung der Amortisationszeit (Rally & Scholtz, 2020)

Das Ergebnis zeigt einen Zeitraum, in welchem sich die Investition amortisiert. Die Größen können bereits in frühen Planungsphasen abgeschätzt werden, um das Potenzial eines Assistenzsystems zu berechnen (Rally & Scholtz, 2020). Ein Beispiel für die Berechnung des ROI und der Amortisationszeit für die Implementierung eines Cobots zeigen Rally und Scholtz 2020.

Die Quantifizierung von qualitativen Einflüssen wird in der Investitionsrechnung nicht betrachtet, sondern mit anderen Kriterien abgedeckt. Diese müssen meist über längere Zeiträume beobachtet werden und werden in der Praxis kaum durchgeführt. Anhand bereits durchgeführter Projekte können bei Bedarf Erfahrungswerte herangezogen werden (VDI-Richtlinien 3633, 2014).

Die Bewertung der Kosten kann ebenfalls mit anderen Methoden erfolgen, die im Unternehmen im Einsatz sind. Wichtig ist dabei, für die betrachteten Assistenzsysteme dieselben Werte miteinzubeziehen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

## 5.2 Dimension Prozess

Die Realisierung von Prozessverbesserungspotenzialen ist häufig Grund für die Einführung von Assistenzsystemen, weshalb „Prozess“ im Evaluierungsmodell als eigene Dimension abgebildet ist. Die Dimension Prozess wird mit mehreren Kriterien bewertet. In der Literaturrecherche, siehe Tabelle 16, wird das Kriterium Effektivität/Effizienz am häufigsten genannt und bildet eine wesentliche Zielgröße beim Einsatz von Assistenzsystemen. Hierbei werden einerseits direkte Bearbeitungszeiten und Durchlaufzeiten, andererseits auch spezifische Größen wie z. B. die Leistung oder Maschineneffizienz genannt. Um die unterschiedlichen Aspekte bestmöglich im Evaluierungsmodell abzubilden, werden die Durchlaufzeit und die Produktivität als eigene Kriterien betrachtet.

Des Weiteren wird die Steigerung von Qualität in der Literatur häufig als Grund für die Einführung eines Assistenzsystems genannt und mit unterschiedlichen Methoden bewertet. Beispielsweise werden entstandene Fehler gezählt, ins Verhältnis zur Gutmenge gesetzt und die Ausschuss- und Nacharbeitsraten berechnet (Zigart & Schlund, 2020a).

**Tabelle 16: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Prozess, eigene Darstellung**

Kriterien in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)	Methoden in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)
Effektivität/Effizienz	
Time (10), Efficiency (9), Effectiveness (7), Task completion time (4), Assembly time (3), Task performance (2), Task Duration (2), Operators' performance (2), Benefit (1), Easy to transport (1), Lead time (1), Operation time (1), Overall execution time (1), Reducing documentation (1), Setup time (1), Time for rework (1), Standard time of a work task (1), Labor productivity (1), Time for modeling the virtual factory (1), Standing time (1), Walking time (1), collaboration performance (1), First assembly time of real assembly (1), Assembly time for n iterations (1), Energy efficiency (1), Efficiency of machine, processing, and hemp handling (1)	MTM (2), Questionnaire (1), Semi-structured interviews based on questionnaire (1), OEE (1), MTM1 (1), MTM-UAS (1), Ratio of hemp production input and output (1)
Qualität	
Number of errors (7), Error rate (4), Product quality (4), Number of questions asked (3), Defect detection (2), Decreasing the human error probability (2), Error occurrences (1), Detecting and avoiding errors (1), Quality of learning (1), Reducing the probability of failure (1), Total quality (1), Number of accurate stages completed (1), Quality of instruction (1), Improved correction of errors (1), Work task/piece complexity (1)	Number of errors (7), Error rate (3), Number of questions asked by the subject that could not be answered with the digital guides (2), Error occurrences (1), Number of accurate stages completed (1), Number of scrap parts (1), Number of reworked parts (1), Reject rate (1), Rework rate (1), First pass yield (1), OEE (1), Quality Function Deployment (QFD) (1), Forgetting steps (1), Wrong placement (1), wrong attachment (1)

Die drei Kriterien (Produktions-)Durchlaufzeit, Produktivität und Qualität werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

### 5.2.1 (Produktions-) Durchlaufzeit

Kurze Durchlaufzeiten sind leichter plan- und steuerbar, da weniger Zeit für terminliche Verschiebungen des Fertigstellungstermins besteht (Erlach, 2010). Daher zielt die Einführung eines Assistenzsystems oftmals direkt oder indirekt auf die Verkürzung der Durchlaufzeit und die Steigerung der Flexibilität ab.

Bei der Durchlaufzeit wird von der gesamten Wertschöpfungskette gesprochen, von Bestelleingang bis zur Ankunft der Lieferung bei den Kund:innen. Davon unterschieden wird die innerbetriebliche Produktionsdurchlaufzeit, welche direkt mit den Beständen korreliert (Erlach, 2010). Die Produktionsdurchlaufzeit beschreibt die Zeit, die ein Produkt vom Start bis zum Ende eines Prozesses benötigt. Markiert man zu Beginn das Rohmaterial und misst die Zeit bis zur Fertigstellung des Produkts, erhält man die Produktionsdurchlaufzeit. Alle Bearbeitungs-, Prozess-, Transport- und Wartezeiten sowie auch zwischengelagerte Bestände werden durchlaufen und zählen somit zur Durchlaufzeit. Der Gesamtbestand gibt unmittelbar Auskunft über die Durchlaufzeit (Erlach, 2010). Das Verhältnis von Bearbeitungszeit zu Durchlaufzeit wird als Flussgrad bezeichnet und zeigt auf, wie träge eine Produktion ist. Die Stauungen lassen sich im Prozess an den Schritten mit hohen Beständen ableiten. Der Flussgrad stellt eine gute Prozesskennzahl dar und zeigt Verbesserungspotenziale im Prozess auf (Erlach, 2010).

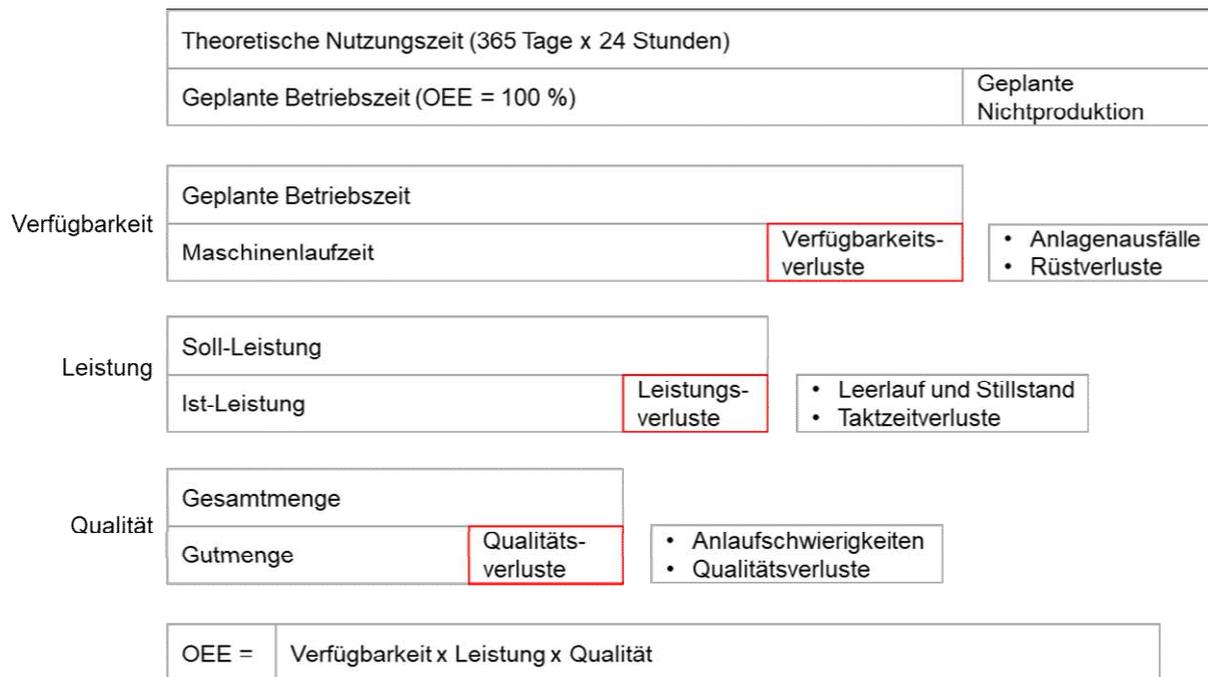
Die betrachteten Assistenzsysteme in der Produktion haben Einfluss auf die Produktionsdurchlaufzeit, die vorrangig betrachtet wird. In einzelnen Anwendungen von Assistenzsystemen haben sie Auswirkungen auf die Durchlaufzeit der gesamten Lieferkette. Beispielweise werden bei Remote-Support-Anwendungen durch das Zuschalten von Expert:innen Reisezeiten reduziert und somit die gesamte Durchlaufzeit beeinflusst.

Die Durchlaufzeit beinhaltet sowohl Liege- und Bearbeitungs- als auch Prozesszeiten. Für die Produktivität werden vor allem die Veränderung der Bearbeitungs- und Prozesszeiten sowie qualitative Aspekte berücksichtigt. Die Berechnung wird im folgenden Unterkapitel dargelegt.

### 5.2.2 Produktivität

Durch die steigenden Anforderungen des Marktes, aufgrund von Herausforderungen wie Individualisierung und kürzeren Lieferzeiten, müssen Unternehmen kontinuierlich ihre Produktivität verbessern, um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. Durch den gezielten Einsatz von Assistenzsystemen wird häufig eine Produktivitätssteigerung angestrebt. Eine aussagekräftige und wichtige Kennzahl in der Produktion stellt die Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Effectiveness, OEE) dar. Die Gesamtanlageneffektivität beinhaltet alle Verlustarten, die in einem Prozessschritt

auftreten können und ist ein Maß für den Wirkungsgrad und die Prozesssicherheit von Maschinen, Anlagen oder Montagearbeitsplätzen (Kletti & Schumacher, 2011). Abbildung 22 zeigt die Berechnung der OEE.



**Abbildung 22: Zusammensetzung der Overall Equipment Effectiveness (OEE), in Anlehnung an Kletti und Schumacher (2011, S. 80)**

Für Prozesse bildet die OEE einen guten Vergleichswert ab und lässt sich auf sämtliche Systeme und Prozesse anwenden. Daher eignet sich die OEE gut für die Evaluierung von Assistenzsystemen in der Produktion. Die OEE berechnet sich aus dem Produkt von Verfügbarkeitsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad, siehe Formel 8.

$$OEE = \text{Verfügbarkeitsgrad} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsgrad}$$

**Formel 8: Berechnung der Overall Equipment Effectiveness (OEE; Kletti & Schumacher, 2011)**

Dabei errechnet sich der Verfügbarkeitsgrad aus dem Verhältnis zwischen theoretischer Laufzeit der Maschine und tatsächlicher Produktionszeit. Der Leistungsgrad wird aus dem Verhältnis der Anzahl der produzierten Produkte und der theoretisch möglichen Anzahl berechnet. Der Qualitätsgrad stellt das Verhältnis von einwandfrei produzierten Produkten (Gutmenge) zu der Gesamtanzahl hergestellter Produkte dar (Kletti & Schumacher, 2011). In vereinfachter Form kann die Produktivität durch die Messung der Bearbeitungszeit eines Arbeitsschrittes im Ist- und im Soll-Prozess ermittelt und verglichen werden.

Die Qualität hat direkte Auswirkung auf die Produktivität, daher wird „Qualität“ als eigenes Kriterium abgebildet.

### 5.2.3 Qualität

Prozessqualität bezeichnet die „Erfüllung aller quantitativen Kundenanforderungen und das Erreichen einer reproduzierbaren, gleichmäßigen Prozessausführung“ (Becker, 2008, S. 14). Kund:innenbeschwerden zu mangelnder Termintreue und verzögerten Lieferterminen sind Hinweise auf Qualitätsverbesserungspotenziale in einem Prozess (Becker, 2008) und dienen als Qualitätsmerkmal der Produktion (Erlach, 2010).

In der Produktion wird „Qualität“ als Sammelbegriff für Produkt- und Prozessleistungen verwendet. Für die Messung der Qualität in der Produktion werden unterschiedliche Kennzahlen verwendet, beispielsweise der produzierte Ausschuss, die Gutteile des Produktionsprozesses, die Einhaltung der Toleranzgrenzen und die Zuverlässigkeit der Produktionsprozesse (Erlach, 2010). Für Assistenzsysteme im Schulungsbereich werden häufig die Anzahl der vom Probanden gestellten Fragen, die mit den digitalen Anleitungen nicht beantwortet werden konnten, und die Fehlerhäufigkeit im Schulungsprozess aufgenommen (Zigart & Schlund, 2020a).

Im kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) sorgt der Ansatz des PDCA-Zyklus (Plan – Do – Check – Act) für eine systematische Aufnahme und Lösung von Verbesserungspotenzialen. Er wird häufig für die Verbesserung der Qualität eingesetzt. Als Ausgangsbasis einer Verbesserung dient die Identifikation von Verbesserungspotenzialen. Eine saubere und solide Datenbasis unterstützt den KVP essenziell, da diese zur Identifikation von weiteren Verbesserungspotenzialen dient (Wappis & Jung, 2013).

Für die Bewertung der Qualitätsverbesserungen durch die Einführung eines Assistenzsystems wird im Evaluierungsmodell der Qualitätsgrad verwendet, der sich aus dem Verhältnis der Gutmenge zur Gesamtmenge errechnet (Formel 9). Durch Abweichungen der hergestellten Teile von der Spezifikation entstehen Ausschuss- oder Nacharbeitsteile, welche von der Gesamtmenge abgezogen werden. Der Qualitätsgrad ist Teil der OEE-Berechnung in Kapitel 5.2.2.

$$\text{Qualitätsgrad} = \frac{\text{Gutmenge}}{\text{Gesamtmenge}}$$

#### Formel 9: Berechnung des Qualitätsgrads (Kletti & Schumacher, 2011)

Der Ausschussgrad beschreibt das Verhältnis der Ausschussmenge zur Gesamtmenge (Formel 10). Er ist dem Qualitätsgrad sehr ähnlich, berücksichtigt allerdings nur die Ausschussteile anstatt der Gutmenge.

$$\text{Ausschussgrad} = \frac{\text{Ausschussmenge}}{\text{Gesamtmenge}}$$

#### Formel 10: Berechnung des Ausschussgrads (Kletti & Schumacher, 2011)

Der Nacharbeitsgrad berechnet das Verhältnis der Nacharbeitsmenge zur Gesamtmenge (Formel 11) und ist ebenfalls ähnlich zum Qualitätsgrad, betrachtet allerdings die Nacharbeitsmenge.

$$\text{Nacharbeitsgrad} = \frac{\text{Nacharbeitsmenge}}{\text{Gesamtmenge}}$$

**Formel 11: Berechnung des Nacharbeitsgrads (Kletti & Schumacher, 2011)**

Aufgrund der Änderungen in den Prozessabläufen, ändern sich zum Teil die Anforderungen an die Mitarbeiter:innen sowie ihre Tätigkeiten. Dies wird in der Dimension Lernen und entwickeln abgebildet.

### 5.3 Dimension Lernen und entwickeln

Veränderungen aufgrund von technologischen und organisatorischen Entwicklungen in Produktionsunternehmen beziehen sich zwar größtenteils auf die Technik, wirken sich aber auf die Arbeit der Mitarbeiter:innen aus (Reinhart, (2017). Trotz vermehrtem Einsatz technischer Systeme in der Produktion ist die exzellente Qualität der Mitarbeiter:innen entscheidend (Nardo et al., 2020). Die Evaluierung der Veränderung der Qualifikation der Mitarbeiter:innen sowie die benötigte Einschulungszeit bezüglich der veränderten Prozesse und neuen Technologien werden in der Dimension Lernen und entwickeln betrachtet. In der Literaturrecherche werden häufig die Themen Lerneffizienz und Lernförderlichkeit als Kriterium genannt (siehe Tabelle 17) und meist mittels Fragebogen oder Interviews ermittelt (Helin et al., 2018; Pace et al., 2019; Sonntag et al., 2019; Syberfeldt et al., 2016; Tian et al., 2015; Zhou et al., 2018).

**Tabelle 17: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Lernen und entwickeln, eigene Darstellung**

Kriterien in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)	Methoden in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)
Lerneffizienz/Lernförderlichkeit	
Speed of learning (2), Learning effectiveness (2), Effective learning experience (1), Improve knowledge (1), Learnability (1), Increase memorability (1), Learning progress for increased efficiency and shorter learning times (1), Quality of learning (1), Qualification requirements of the task (1), training period (1), Increase problem-solving and innovation skills (1), Learning performance (1), Learning curve (1), Forgetting rate (1)	Questionnaire (1), Semi-structured interviews based on questionnaire (1), System Usability Scale (SUS) (1), know-how carrier quota (employees with know-how carrier status for the examined workplace/total number of employees) (1), Learning cubic model (1)

Im Evaluierungsmodell wird das Kriterium Qualifikation betrachtet und im folgenden Unterkapitel beschrieben.

### 5.3.1 Qualifikation

Aufgrund des vermehrt auftretenden Einsatzes von Technologie ergibt sich ein verändertes Aufgabenspektrum der Mitarbeiter:innen, deren Rolle einem starken Wandel unterliegt. Die Anforderungen verändern sich – und in Folge die benötigten Kompetenzen, die individuellen Erwartungen und Befürchtungen. Hierbei entsteht ein Spannungsfeld zwischen individuellen Aspekten und durch Industrie 4.0 getriebene Veränderungen, welches nur durch Qualifizierung gelöst werden kann Reinhart, 2017. Produkte und Produktionsumgebungen werden aufgrund der erhöhten Variantenvielfalt durch Individualisierung weiter komplexer. Eine Möglichkeit ist, die Mitarbeiter:innen mit verfügbaren Assistenzsystemen zu unterstützen, um die zunehmende Vielfalt der Tätigkeiten und die Komplexität der neuen Produktionsrahmenbedingungen zu bewältigen. Kognitive Assistenzsysteme ermöglichen eine neue Art des ortsunabhängigen, individuellen oder arbeitsplatznahen Lernens während der Tätigkeitsausführung und unterstützen die Schließung der Qualifizierungslücke (Reinhart, 2017).

Gerade in Montageprozessen kommt es häufig zu sich wiederholenden Tätigkeiten, die im Laufe der Zeit auswendig gelernt werden. Daher profitieren oft erfahrene Mitarbeitende weniger von Assistenzsystemen. Studien zeigen, dass z. B. AR-Anwendungen am effizientesten bei schwierigen und komplexen Tätigkeiten sind (Syberfeldt et al., 2015). Der Fokus vieler Assistenzsysteme liegt daher auf unerfahrenen Nutzer:innen. Mark et al. (2020) verknüpfen die individuellen Kompetenzen von Mitarbeiter:innen mit den Anforderungen an die Tätigkeiten, um tätigkeits- und personenbezogen das ideale Assistenzsystem auszuwählen.

Eine genauere Erkennung von Kompetenzlücken bietet der Kompetenzatlas, welcher auf umfangreichen empirischen Untersuchungen beruht. Mithilfe des Kompetenzatlas lassen sich unterschiedliche Tätigkeiten einordnen und Veränderungen durch den Einsatz von Assistenzsystemen darstellen. Die Kompetenzen werden dabei in vier Grundkompetenzen – Personale Kompetenz (P), Aktivitäts- und Handlungskompetenz (A), Sozial-kommunikative Kompetenz (S) und Fach- und Methodenkompetenz (F) – unterteilt (Heyse & Erpenbeck, 2010). Jede Grundkompetenz wird in Schlüsselkompetenzen, welche sich aus ca. 300 Teilkompetenzen zusammensetzen, gegliedert, siehe Abbildung 43. Die Schlüsselkompetenzen werden aus der Kombination der Buchstaben der Grundkompetenzen abgekürzt. Selten kommt in der Realität eine einzelne Grundkompetenz zur Anwendung, meist ist es eine Mischform aus einigen Schlüsselkompetenzen unterschiedlicher Bereiche. Sie werden Querschnittskompetenzen genannt, können ebenfalls eingeordnet werden und setzen sich üblicherweise aus 12 bis 16 Schlüsselkompetenzen zusammen. Führungskompetenz kommt z. B. nicht als direkte Schlüsselkompetenz vor, sondern

ist eine Kombination aus mehreren Schlüsselkompetenzen (Heyse & Erpenbeck, 2010).

Kompetenz-Anforderungsprofile lassen sich auf Basis der Querschnittskompetenzen bilden. Zusammenhänge zwischen den Schlüssel- und Teilkompetenzen können logisch zugeordnet und verknüpft werden (Heyse & Erpenbeck, 2010). Daraus können die Eignung und eventuell notwendige Qualifizierungsschritte für Mitarbeiter:innen erkannt werden (Kodekonzept, 2019).

Mark et al. (2020; 2022) zeigen, welche Fähigkeiten durch welche Assistenzsysteme unterstützt werden. Die Zuordnung der einzelnen Assistenzsysteme ist im Anhang 8.2.1. dargestellt. Diese Zuordnung wird für die Bewertung des Kriteriums Qualifikation verwendet.

## 5.4 Dimension Nutzer:innen

Die Einführung eines Systems oder Produkts ist oftmals kosten- und zeitintensiv, Änderungen nach der Einführung sind teuer. Die Fokussierung auf Nutzer:innen und deren frühe Einbindung in die Auswahl und Implementierung ermöglicht eine sinnvolle Einführung unter Berücksichtigung der Interessen sämtlicher Stakeholder:innen und vermeidet unnötige Kosten. Aus der Literaturrecherche geht hervor, dass viele menschenzentrierte Kriterien mit unterschiedlichen Methoden evaluiert werden. Die genannten Schlüsselwörter lassen sich in die Kategorien „Usability/User Experience“, „Nutzer:innenakzeptanz/ Nutzer:innenzufriedenheit“, „Ergonomie/mentale Belastung“ und „Situationsbewusstsein“ unterteilen (Tabelle 18). Um die Sicht der Anwender:innen umfassend zu betrachten, werden im Evaluierungsmodell die Kriterien Ergonomie, Arbeitsbelastung, Gebrauchstauglichkeit und Nutzer:innenakzeptanz bewertet.

**Tabelle 18: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Nutzer:innen, eigene Darstellung**

Kriterien in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)	Methoden in Publikationen (Verwendungshäufigkeit)
Usability/User Experience	
Usability (15), User Experience (5), Perceived Usefulness (3), Ease of Use (2), Advantages and disadvantages of wearable AR devices (1), User Interaction (1), User rankings (1), Utility (1), User impression (1), Learning experience (1), Usability (1)	System Usability Scale (SUS) (4), Questionnaire (3), ISONORM 9241/10 (1), ISONORM 9241-210 (1), Post-study System Usability Questionnaire (PSSUQ) (1), Questionnaire for Intuitive Use (QUESI) (1), Semi-structured interviews based on questionnaire (1), Smart Glasses User Satisfaction (SGUS) (1), Game Experience Questionnaire (GEQ) by Ijsselsteijn et al. (1), TAM plus Perceived Playfulness (PP) (1)
Nutzer:innenakzeptanz/ Nutzer:innenzufriedenheit	
User acceptance (5), Satisfaction level (2), User satisfaction (2), Acceptability (1), Measurement of emotion-based impressions (1), Subjective assessment (1), Technology acceptance (1), User interaction satisfaction (1), Job satisfaction (1)	Interviews (1), Questionnaire (1), Questionnaire for User Interaction Satisfaction (QUIS) (1), Self-Assessment Manikin (SAM) (1), Technology Acceptance Model (TAM) (1)
Ergonomie/mentale Belastung	
Ergonomics (3), Cognitive workload (2), Cognitive ergonomics (1), Dizziness (1), Mental workload (1), Mental effort (1), Physical comfort (1), Ratings (Effort, Frustration, mental demand, performance, physical demand, temporal demand) (1), Task load (1), User movement (1), Human work load (1), Physical load (1), Psychological load (1), Noise (1), Illumination (1)	NASA Task Load Index (NASA-TLX) (4), NASA Raw Task Load Index (NASA-RTLX) (1), MTM (1), EAWS (EAWSDigital by MTM and Tecnomatix Process Simulate by Siemens) (1)
Situationsbewusstsein	
Situation Awareness (1)	Situation Awareness Rating Technique (SART) (1)

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Kriterien genauer erklärt und Methoden zur Evaluierung vorgestellt.

### 5.4.1 Ergonomie

Die Ergonomie spielt in der Produktion eine entscheidende Rolle. Werden unergonomische Bewegungen über Jahre hinweg ausgeübt, ist die Gesundheit der Mitarbeiter:innen gefährdet. Aus Firmensicht ist mit langen, kostspieligen Ausfallszeiten zu rechnen, welche mit einer Ungewissheit für Unternehmen verbunden sind.

Zur Bewertung der Ergonomie stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Die Bewertung der Ergonomie kann mittels Beobachtung am Arbeitsplatz, Simulationen oder mithilfe des Einsatzes von Sensoren am Arbeitsplatz ermittelt werden. Für die Evaluierung der Assistenzsysteme wird eine aussagekräftige und einfach anwendbare Methode ausgewählt. Tabelle 19 zeigt den Vergleich unterschiedlicher Methoden.

**Tabelle 19: Vergleich unterschiedlicher Ergonomie-Modelle, aufbauend auf Kugler (2010) sowie Dahmen und Constantinescu (2020, S. 7)**

		Belastungsarten						Anwendung Exoskelett (aus Tabelle 11)
		Manuelle Lastenhandhabungen			Körperhaltung <sup>1</sup>	Aktionskräfte <sup>2</sup>	Repetitive Tätigkeiten <sup>3</sup>	
		Heben, Halten, Tragen	Ziehen und Schieben	Kombiniert				
Grob-Screening-Verfahren	BGI 504-46/ BGI 7011	(X)	(X)		(X)	(X)	(X)	
	AWS light	(X)	(X)		(X)	(X)	(X)	
Screening-Verfahren	LMM-HHT (Heben, Halten, Tragen)	X						
	LMM-Z/S (Ziehen und Schieben)		X					
	LMM-MAP						X	
	RULA				X		(X)	X
	OCRA Check-liste						X	
	AAWS-upper-limbs						X	
	Multiple-Lasten-Tool	X	X	X				
	AAWS	X	X		X	X		
	IAD-BkB	X	X		X	X	X	
Detail-/Expert:innen-verfahren	EAWS/AAW S+	X	X		X	X	X	(X)
	Kraftbewertungsverfahren					X		
	NIOSH-Verfahren	X						
	OCRA-Verfahren						X	
Messverfahren	CUELA und andere Messverfahren	Kontinuierliche Messung von biomechanischen Belastungsgrößen und/oder physiologischen Messgrößen						

Die detaillierten Auswirkungen eines Exoskeletts auf die Ergonomie können derzeit nur mittels Laborstudien und Muskelmessungen dargestellt werden (z. B. Gams et al., 2013; Gillette und Stephenson, 2018). Für die einfache und rasche Anwendung des Evaluierungsmodells sind solche Untersuchungen zu aufwendig und daher nicht

<sup>1</sup> Definition: durch die Tätigkeit erzwungene Körperhaltungen mit geringem äußerem Kraftaufwand.

<sup>2</sup> Definition: erhöhte Kraftanstrengungen und/oder Krafteinwirkungen (Ganzkörper oder Hand – Arm).

<sup>3</sup> Definition: Finger-Hand-Arm-Belastungen durch repetitive Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen.

geeignet. Aufgrund der einfachen Anwendung durch ein Screeningverfahren und der Anwendbarkeit auf alle betrachteten Assistenzsysteme (inkl. Exoskelett) wird RULA (rapid upper limb assessment) ausgewählt.

RULA ist eine Methode für ergonomische Untersuchungen von Arbeitsplätzen der oberen Gliedmaßen (McAtamney & Corlett, 1993). RULA erfordert keine spezielle Ausrüstung und ermöglicht eine rasche Bewertung der Haltung des Nackens, des Rumpfes und der oberen Gliedmaßen zusammen mit der Muskelfunktion und den externen Belastungen, denen der Körper im Arbeitsprozess ausgesetzt ist (BGIA, 2007). Der Arbeitsbogen für die Bewertung mit RULA findet sich im Anhang 8.2.2. Tabelle 20 zeigt die möglichen Ergebnisse einer RULA-Auswertung.

**Tabelle 20: RULA-Bewertungsmethode (BGIA, 2007, S. 1)**

Gesamtpunktwert	Abgeleitetes Vorgehen
1 bis 2	Akzeptable Verhältnisse, keine Notwendigkeit für weitere Maßnahmen.
3 bis 4	In naher Zukunft sind weitere Maßnahmen einzuleiten.
5 bis 6	In Kürze sind weitere Maßnahmen einzuleiten.
7	Es sind sofort weitere Maßnahmen einzuleiten.

Zusätzlich zur Ergonomie ist die Arbeitsbelastung (engl. task load) eine Kenngröße zur Evaluierung kognitiver und physischer Belastungen, welche auf subjektiver Basis des Benutzers/der Benutzerin erhoben wird.

### 5.4.2 Arbeitsbelastung

Beim Einsatz neuer Systeme und Technologien kommt es häufig, vor allem zu Beginn, zu höherer Arbeitsbelastung. Die Bewertung der Arbeitsbelastung ist notwendig, um die Belastung durch Anforderungen einer gewissen Aufgabe zu messen. Das Kriterium beschreibt die Arbeitsbelastung, die einem Benutzer/einer Benutzerin im Zusammenhang mit der Ausführung einer bestimmten Aufgabe auferlegt wird (Hart, 2006; Hertzum, 2021). Zusätzlich ist die optimale Belastung entscheidend für die Sicherheit und Effizienz von Arbeitsabläufen. Hohe Arbeitsbelastung durch z. B. Multitasking oder Ablenkung führt zu einer schlechteren Leistung bei der eigentlichen Aufgabe und zu höheren Verletzungsraten am Arbeitsplatz (Biondi et al., 2022). In der Forschung zu Informations- und Kommunikationstechnologien wird die Aufgabenbelastung oft mit der mentalen Arbeitsbelastung gleichgesetzt (Galy et al., 2012; Liu & Wickens, 1994; Longo, 2018), dabei hat sie in einem breiteren Kontext auch physische Dimensionen (Hart, 2006). Da nicht nur physische, sondern auch digitale Assistenzsysteme, wie z. B. AR oder VR, eine physische Komponente beinhalten, beschränkt sich hier das Modell nicht nur auf die mentale Arbeitsbelastung.

Zur Messung gibt es einige Methoden, welche sich durch Selbsteinschätzung mittels Fragebogen oder durch technische Unterstützung anwenden lassen. Letzteres ist z. B.

durch Eye-Tracking möglich, da die Veränderung der Pupillengröße und der Lidschlagrate zur Messung von kognitiven Belastungen während komplexer Fertigungsaufgaben verwendet werden können (Biondi et al., 2022). Eine weitere Möglichkeit ist die Messung der Herz- und Atemfrequenz: Je höher die kognitiven Anforderungen der Aufgabe sind, desto höher die durchschnittliche Herzfrequenz, desto geringer die Herzfrequenzvariabilität und desto schneller die Atmung (Mehler et al., 2009). Der Vorteil von technisch unterstützten Methoden ist die kontinuierliche Verfolgung der Arbeitsbelastung, während die nachgelagerte Selbsteinschätzung auf die mit der Aufgabe verbundenen Gesamtbelastung bezogen ist. Die systematische Literaturrecherche zeigt, dass der NASA Task Load Index (NASA-TLX) ein häufig verwendeter Fragebogen zur Bewertung der Arbeitsbelastung von Assistenzsystemen ist. Der NASA-TLX ist ein weit verbreitetes, subjektives, mehrdimensionales Bewertungsinstrument, das die wahrgenommene Arbeitsbelastung bewertet, um die Effektivität einer Aufgabe, eines Systems, eines Teams oder andere Leistungsaspekte zu beurteilen (Hart, 2006). Der NASA-TLX wird breit eingesetzt, reagiert empfindlich auf Veränderungen in der Arbeitsbelastung und hat eine hohe diagnostische Aussagekraft (Hill et al., 1992). Sechs Dimensionen (geistige Beanspruchung, körperliche Beanspruchung, zeitliche Anforderung, Leistung, Anstrengung, Frustration) werden betrachtet (Hart, 2006).

Der NASA-TLX wird in zwei Schritten gemessen (Hart, 2006). Vor der Durchführung einer Aufgabe führen die Teilnehmer:innen einen paarweisen Vergleich der sechs Dimensionen durch und geben an, welches der Paare sie stärker mit ihrer Definition von Arbeitsbelastung assoziiert. Nach der Durchführung bewerten die Teilnehmer:innen jede Dimension auf einer Skala von 0 bis 100. Die Nummerierung der Skala wird typischerweise nicht vollständig angezeigt. Die Bewertungen der Dimensionen werden als Gewichtungen verwendet, um einen Gesamt-TLX-Score zu berechnen.

Die Durchführung und die Analyse des Tests ist arbeits- und zeitintensiv (Hill et al., 1992). In mehreren Studien wurde eine ungewichtete („rohe“) Version des TLX-Scores, der sogenannte NASA-Raw Task Load Index (NASA-RTLX), verwendet. Der NASA-RTLX verzichtet auf die Gewichtung und berechnet eine Punktezahl, indem er den Mittelwert der sechs Dimensionen berechnet (Georgsson, 2020). Diese neue Methode scheint mit dem TLX-Score zu korrelieren und wurde als Alternative akzeptiert, wobei die Sensitivität umstritten ist (Hart, 2006). Fast gleichwertig zur ursprünglichen TLX-Skala nimmt die Analyse wesentlich weniger Zeit in Anspruch (Hart, 2006; Miller, 2001). Ein Nachteil der TLX-Skala ist, wie bei jeder anderen subjektiven Skala, die Konsistenz (Hill et al., 1992).

Aufgrund der rascheren Durchführung bei fast gleichwertigen Ergebnissen fällt die Wahl in dieser Forschungsarbeit auf den NASA-RTLX. Im Anhang 8.2.3 wird der

Fragebogen mit Fragen zu den sechs Dimensionen gezeigt. Einfluss auf die Arbeitsbelastung hat auch die Gestaltung des Systems und die damit einhergehende Gebrauchstauglichkeit, die im folgenden Unterkapitel beschrieben wird.

### 5.4.3 Gebrauchstauglichkeit (Usability)

Als Gebrauchstauglichkeit wird das Ausmaß bezeichnet, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Nutzer:innen in einem gewissen Kontext genutzt werden kann, um gesetzte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen (Brooke, 2013).

Der internationale Standard ISO 9241 gilt als Richtlinie für die Mensch-Computer-Interaktion. Speziell in der DIN EN ISO 9241-11 wird die Gebrauchstauglichkeit (häufig auch als Benutzerfreundlichkeit oder Usability bezeichnet) beschrieben und eine Evaluierung für das System bereitgestellt. Für die Bewertung der Usability gibt es neben der DIN EN ISO 9241-11 auch andere Methoden, wie z. B. die System Usability Scale (SUS). Diese Methode bietet eine einfache und schnelle Art zu messen, wie Menschen die Gebrauchstauglichkeit von Systemen wahrnehmen. Die SUS erweist sich als äußerst zuverlässiges Werkzeug für die Durchführung von Usability-Bewertungen und ist eine etablierte Methode zur quantitativen Analyse. Die SUS misst die subjektiv wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit eines Systems (Brooke, 2013). Aufgrund der häufigen Verwendung der SUS gibt es Metastudien, die Vergleichswerte für die Interpretation von Usability-Scores liefern (Lewis & Sauro, 2017).

Die zehn Aussagen der SUS werden auf einer Likert-Skala von 1 bis 5 bewertet (stimme überhaupt nicht zu – stimme voll zu). Die Aussagen sind abwechselnd positiv und negativ formuliert, um Antwortverzerrungen zu vermeiden. Die Fragen sind im Anhang 8.2.4 gelistet.

Zur Auswertung werden die positiv formulierten Aussagen durch Subtraktion von 1 auf 0 bis 4 umskaliert ( $x - 1$ ). Die negativen Aussagen werden weiter umgeschichtet ( $5 - x$ ). Die 10 unidirektionalen Faktoren werden summiert und mit 2,5 multipliziert, um den SUS-Index auf einer Skala von 0 bis 100 zu erhalten (0 – nicht akzeptabel, 100 – bestmögliches Ergebnis). Ab einem Wert von 68 sind die entwickelten Lösungen akzeptabel, ab einem Wert von 73 wird die Gebrauchstauglichkeit mit „gut“ eingestuft (Brooke, 2013). Details zur Interpretation der Punkte sind in Anhang 8.2.4 dargestellt. Für die Einführung eines Assistenzsystems werden die Bereiche unter „POOR“ (entspricht einem Wert von 39) als schlechtester Wert auf der Skala zusammengefasst, da diese nicht akzeptabel sind.

Auch für die Bewertung von Assistenzsystemen erwies sich die SUS als geeignete Methode, da diese technologieunabhängig ist und trotz der Inhomogenität der betrachteten Assistenzsysteme vergleichbar ist. Die SUS gibt keinen Hinweis auf

mögliche Usability-Probleme. Sie müssen bei Bedarf extra abgefragt werden, z. B. durch Interviews oder andere Evaluierungsmethoden (Frijns & Schmidbauer, 2021). Zusätzlich zur Usability wird die Nutzer:innenakzeptanz erfragt, welche im nächsten Unterkapitel beschrieben wird.

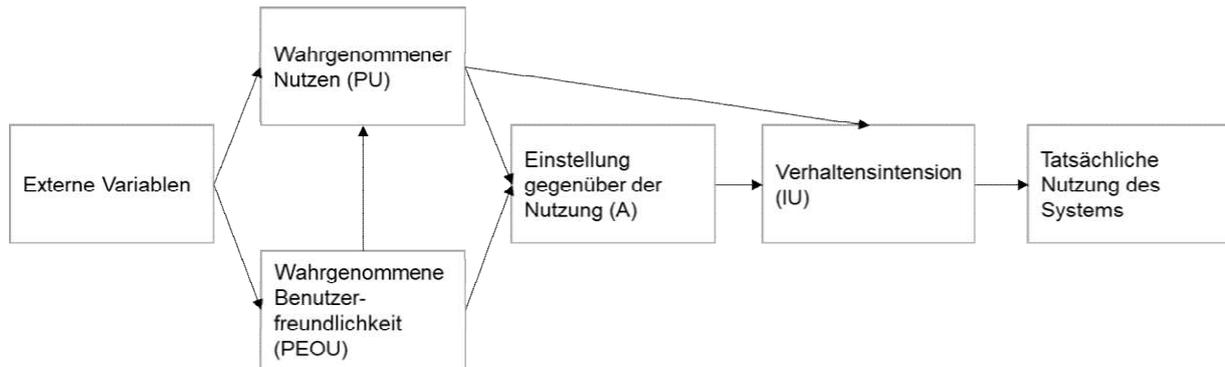
#### 5.4.4 Nutzer:innenakzeptanz

Um technische Innovationen erfolgreich umzusetzen, ist die Nutzer:innenakzeptanz für die tatsächliche Nutzung der Produkte relevant. In den letzten Jahrzehnten haben Forscher:innen mehrere Nutzer:innenakzeptanzmodelle entwickelt, um herauszufinden, ob und warum Menschen und Unternehmen eine Innovation akzeptieren oder ablehnen (Davis et al., 1989).

Die Theory of Reasoned Action (TRA) ist eines der grundlegenden Konzepte auf dem Gebiet der Akzeptanzforschung, das 1975 von Fishbein und Ajzen entwickelt wurde (Ajzen, 1991; Fishbein & Ajzen, 1975). Die TRA bildet die Grundlage für das Technology Acceptance Model (TAM), das 1989 von Davis eingeführt wurde, um vorherzusagen und zu erklären, warum ein System für den Benutzer/die Benutzerin möglicherweise nicht akzeptabel ist (Davis et al., 1989). Auf Grundlage der Ergebnisse können Forscher:innen und Praktiker:innen korrigierende Schritte einleiten. Insbesondere in einem frühen Stadium bestehen große Flexibilität und großes Einsparpotenzial von Ressourcen bei der Änderung eines Produkts oder einer Anwendung. Venkatesh et al. (2003) tragen dazu bei, die Einstellungen (A) der Individuen gegenüber einer Technologie, ihre (verhaltensbezogene) Absicht, sie zu nutzen (BI), und damit die daraus resultierende tatsächliche Nutzung (U) zu ermitteln (Davis, 1989).

TAM konzentriert sich auf den wahrgenommenen Nutzen (engl. perceived usefulness, PU) und die wahrgenommene Benutzer:innenfreundlichkeit (engl. perceived ease of use, PEOU) sowie auf zwei Hauptvariablen zur Messung der Nutzer:innenakzeptanz. Die PU ist als „die subjektive Wahrscheinlichkeit des/der zukünftigen Benutzers/Benutzerin, dass die Verwendung eines bestimmten Anwendungssystems seine oder ihre Arbeitsleistung in einem organisatorischen Kontext erhöht“, definiert (Davis et al., 1989, S. 320). PEOU bezieht sich auf „den Grad, in dem der/die potentielle Benutzer:in erwartet, dass das Zielsystem frei von Anstrengung ist“ (Davis et al., 1989, S. 320). TAM vermittelt dabei, dass die Nützlichkeit eines Systems eindeutig wichtiger ist als die Benutzer:innenfreundlichkeit, da ein System kein Maß an Benutzer:innenfreundlichkeit ausgleichen kann, das für eine bestimmte Aufgabe nicht sinnvoll ist. TAM ist dabei so angelegt, dass die tatsächliche Nutzung des Systems (engl. Actual System Use) von der Verhaltensintention (engl. Behavioral Intention to Use, IU) abhängt, die wiederum von der PU und der Einstellung zur Nutzung abhängt. Externe Variablen, z. B. demografische Daten wie Alter und

Geschlecht, beeinflussen die PU und den PEOU (Venkatesh et al., 2003). Für die Ermittlung des Einflusses externer Faktoren wird die Technologieaffinität nach Edison und Geissler (2003) abgefragt. Die gegenseitigen Einflüsse der Dimensionen sind in Abbildung 23 abgebildet.



**Abbildung 23: Technology Acceptance Model (TAM; (Davis et al., 1989, S. 985), eigene Übersetzung**

Die Fragen bei Davis (1989) für die Abfrage der Akzeptanz zur Einführung von E-Mails werden für die Evaluierung industrieller Assistenzsysteme durch Assistenzsysteme ersetzt bzw. teils neu formuliert. Die ersten sechs Fragen erfragen die Perceived Usefulness (PU\_1 bis 6), die Fragen sieben bis zwölf die Perceived Ease of Use (PEoU\_1 bis 6), dreizehn bis fünfzehn die Behavioral Intention to Use (BI\_1 bis 3) und 16 und 17 die Actual System Use (U\_1 und 2). Alle Fragen werden auf einer fünfstufigen Likert-Skala beantwortet. Die Fragen sind im Anhang unter 8.2.5 gelistet. Für die Auswertung kann das Tool „smart PLS“<sup>4</sup> verwendet werden. Das TAM geht davon aus, dass Personen die betriebliche Anwendung und den Ist-Zustand, d. h. den Prozess ohne das Assistenzsystem, kennen. Ist das nicht der Fall, kann statt dem TAM das multidimensionale Konzept der Technologiekompatibilität (engl. Technology compatibility) von Karahanna et al. (2006) verwendet werden. Die Technologiekompatibilität basiert auf TAM und bildet vier Konstrukte ab:

1. Kompatibilität mit bisheriger Technologieerfahrung (Compatibility with Experience)
2. Kompatibilität mit der aktuellen Arbeit (Compatibility with existing practices)
3. Kompatibilität mit den eigenen Werten (Compatibility with Values)
4. Kompatibilität mit bevorzugter Methode zur Arbeitsausführung (Compatibility with Preferred Practice)

Die Fragen sind im Anhang unter 8.2.5 gelistet. Während die bevorzugte Methode der Arbeitsausführung das Selbstkonzept einer Person hinsichtlich Art und Weise, wie sie gerne arbeitet, erfasst, beschreibt die Kompatibilität der aktuellen Arbeit die Realität, wie die Arbeit derzeit erlebt wird. Das kann in bestimmten Fällen gleich sein, muss

<sup>4</sup> <https://www.smartpls.com/> (abgerufen am 21.06.2021).

aber nicht immer der Fall sein. Karahanna et al. (2006) stellten fest, dass die Technologiekompatibilität einen positiven Einfluss auf die erwartete Nützlichkeit und die erwartete Nutzbarkeit aus TAM und somit wiederum auf die Nutzungsintention hat. Daher kann unabhängig vom Ist-Zustand davon ausgegangen werden, dass eine höhere Technologiekompatibilität eine potenzielle Akzeptanz der Technologie darstellt. Neben sämtlichen menschenzentrierten Kriterien spielt die verwendete Technologie eine Rolle für die Akzeptanz und Usability. Daher wird die Dimension Technologie im nächsten Unterkapitel separat betrachtet und bewertet.

## 5.5 Dimension Technologie

### 5.5.1 Technologischer Reifegrad

Der technologische Reifegrad (engl. Technology Readiness Level, TRL) dient zur Einschätzung des Reifegrades einer Technologie (Mankins, 2009). Der TRL soll bei der Risikominimierung in der Entwicklung unterstützen, realitätsnahe Tests und Iterationen fördern und „reality checks“ im Entwicklungsprozess fördern. Der TRL ist nicht gleichbedeutend mit der Marktreife. Je höher der TRL, desto teurer wird es, sie zu erreichen (Notander, 2020). Die neun Technologiereifegrade sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Ziffer 1 weist den niedrigsten Reifegrad auf und stellt die „Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips“ dar. Die Ziffer 9 hingegen beschreibt das ausgereifte System als „Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes“. Die Schritte dazwischen zeigen in aufsteigender Reihenfolge die Schritte von Grundlagen- über industrielle Forschung hin zur experimentellen Entwicklung und der Markteinführung auf.

Grundlagenforschung	Technologiereife	1 Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzip
		2 Beschreibung der Anwendung einer Technologie
Industrielle Forschung		3 Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Technologie
		4 Versuchsaufbau im Labor
Experimentelle Entwicklung		5 Versuchsaufbau in der Einsatzumgebung
		6 Funktionsmuster in der Einsatzumgebung
		7 Prototyp im Einsatz
Markt		8 Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
		9 Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Abbildung 24: Technologiereifegrade (TRL), in Anlehnung an Kind et al. (2018, S. 3)

Die Technologien in den eingesetzten Assistenzsystemen weisen teils unterschiedliche TRL auf. Tabelle 21 zeigt die Analyse der TRL der betrachteten Assistenzsysteme für den industriellen Einsatz und Anwendungsbarrieren.

**Tabelle 21: TRL von Assistenzsystemen, eigene Darstellung**

Assistenzsystem	Anwendungsbarrieren in der Industrie	TRL Industrie	Quelle
Augmented-Reality-Datenbrille	Zuverlässigkeit, Erfüllung der Arbeitssicherheit und Überlagerungsgenauigkeiten	5	Quandt et al. (2018)
	Displaytechnologie (Display)	7	Lacueva-Pérez et al. (2018)
	Verfolgungsmethode (Tracking), Interaktion und Benutzer:innenoberfläche	5	Lacueva-Pérez et al. (2018)
Passive Exoskelette	Unangenehmes Kontaktdruckgefühl, Wärmehaufbau am menschlichen Körper, Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit	8	M. de Looze et al. (2020)
Cobots	Sicherheitskonzept, komplizierte Arbeitsvorbereitung	8	Buxbaum (2020)

Der TRL wird als Kriterium im Evaluierungsmodell miteinbezogen. Die Höhe des TRL ist in industriellen Produktionsprozessen von Bedeutung, da Prozessstabilität und -sicherheit wichtige Einführungskriterien in der Serienfertigung sind. Im Gegenzug dazu steht die teils prototypische Entwicklung von Assistenzsystemen, vor allem in Kombinationsanwendungen. Die Gesamtevaluierung mit Einbezug des TRL zeigt Potenziale der Assistenzsysteme und treibt die Weiterentwicklung der Systeme an.

In diesem und den vorigen Unterkapiteln wurden alle Dimensionen und Kriterien des Evaluierungsmodells beschrieben. Das nächste Unterkapitel zeigt die Vorgehensweise zur Anwendung des Evaluierungsmodells.

## 5.6 Vorgehensweise der Anwendung des Evaluierungsmodells

Um das multikriterielle Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme anzuwenden, zeigt Abbildung 25 den Ablauf zur Anwendung des Evaluierungsmodells. Im ersten Schritt wird der Prozess für die Anwendung von Assistenzsystemen ausgewählt. Anschließend erfolgen die Auswahl und Gewichtung der Kriterien. Die Kriterien werden im Ist- und Soll-Zustand erfasst, die Assistenzsysteme miteinander verglichen und die Ergebnisse analysiert.

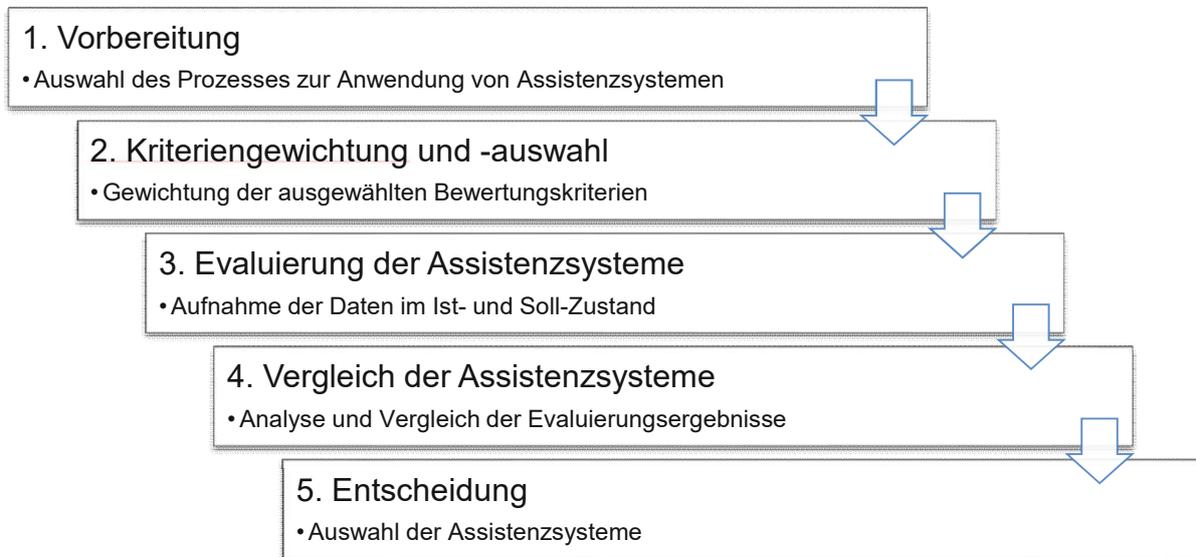


Abbildung 25: Ablauf für die Anwendung des Evaluierungsmodells, eigene Darstellung

Die Auswahl und Gewichtung der Evaluierungskriterien, die Prozessaufnahme sowie die Evaluierung, der Vergleich und die Analyse werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

### 5.6.1 Auswahl und Gewichtung der Evaluierungskriterien

Zu Beginn der Auswahl wird die Frage „Welche Ziele verbinden Sie mit dem Einsatz von Assistenzsystemen in der Produktion, Logistik und Instandhaltung?“ mit den Erwartungen an das Assistenzsystem in Tabelle 22 eingeschätzt. Die Tabelle zeigt eine Ersteinschätzung, welche Kriterien mithilfe von Vergleichspaaren und AHP weiterverwendet werden.

Tabelle 22: Erwartungen an das Assistenzsystem, eigene Darstellung

Ziel	Ja	Nein
Wirtschaftlichkeit verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durchlaufzeit verkürzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produktivität steigern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualität verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualifikationsanforderungen senken	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ergonomie verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Arbeitsbelastung reduzieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nutzer:innenakzeptanz erhöhen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Usability verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stabile, gut etablierte Technologie anwenden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Weitere:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Vor der Anwendung des Evaluierungsmodells wird die Gewichtung der einzelnen Kriterien festgelegt, die sich aufgrund der vielseitig einsetzbaren Assistenzsysteme und unterschiedlichen Zielen des Einsatzes von Prozess zu Prozess unterscheidet. Für die Durchführung des paarweisen Vergleichs ist es essenziell, die einzelnen Kriterien zu verstehen und die gesetzten Ziele bei der Einführung des Assistenzsystems zu kennen. Tabelle 23 zeigt die Bewertungsskala für den paarweisen Vergleich im AHP von 1 bis 9.

**Tabelle 23: AHP 9-Punkte-Skala, eigene Übersetzung aus T. L. Saaty (1990, S. 15)**

Intensität der Bedeutung auf einer absoluten Skala	Definition	Erläuterung
1	Gleiche Bedeutung	Zwei Kriterien tragen gleichermaßen zur Erreichung des Ziels bei.
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung zeigen eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung zeigen eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Ein Element wird stark bevorzugt und seine Dominanz wurde in der Praxis nachgewiesen.
9	Absolut dominierend	Der größtmögliche Unterscheid zwischen zwei Elementen weist auf die beste Aussagekraft hin.
2, 4, 6, 8	Zwischenwert	Bei Bedarf eines Kompromisses

Bei zu vielen Kriterien ist es schwierig, eine konsistente Gewichtung durchzuführen. Daher wird die Gewichtung in zwei Schritten durchgeführt:

1. Gewichtung der Dimensionen
2. Gewichtung der gewählten Kriterien in den Dimensionen

Tabelle 24 zeigt ein Beispiel für den paarweisen Vergleich der Evaluierungsdimensionen nach dem AHP.

**Tabelle 24: Gewichtung der Dimensionen mithilfe von Vergleichspaaren nach AHP, eigene Darstellung**

	Kosten	Prozess	Lernen und entwickeln	Nutzer:innen	Technologie	Prioritätsvektor	in Prozent
Kosten	0,26	0,22	0,33	0,37	0,24	<b>0,29</b>	<b>28,52 %</b>
Prozess	0,52	0,43	0,33	0,37	0,24	<b>0,38</b>	<b>38,09 %</b>
Lernen und entwickeln	0,05	0,09	0,07	0,05	0,24	<b>0,10</b>	<b>9,90 %</b>
Nutzer:innen	0,13	0,22	0,26	0,19	0,24	<b>0,21</b>	<b>20,84 %</b>
Technologie	0,03	0,05	0,01	0,02	0,03	<b>0,03</b>	<b>2,65 %</b>
Summe	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>	<b>100,00 %</b>

Anhand der gleichen Vorgehensweise werden die Kriterien innerhalb der Dimensionen gewichtet. Alle Kriterien werden mit der entsprechenden Gewichtung in die Evaluierung einbezogen. In der Praxis können sehr niedrig bewertete Kriterien bei der Evaluierung unberücksichtigt bleiben, da sie kaum Relevanz für das Ergebnis haben.

Wird keine Gewichtung vorgenommen, werden die Dimensionen gleichmäßig gewichtet, siehe Tabelle 25. Bei fünf Dimensionen ergibt sich eine Gewichtung von 20 Prozent pro Dimension. In diesem Fall ist die Gewichtung der einzelnen Kriterien abhängig von der Anzahl der bewerteten Kriterien pro Dimension. Diese Werte werden aus der Gewichtung der Dimension durch die Anzahl der Kriterien in den Dimensionen dividiert. Nach der Gewichtung der Dimensionen werden die Gewichtungen der Kriterien von der Person, welche die Kriterien gewichtet hat, auf Plausibilität gecheckt und bei Bedarf angepasst.

**Tabelle 25: Gleichmäßige Gewichtung der Dimensionen, eigene Darstellung**

Dimension	Kriterium	Gewichtung Kriterium ( $G_{\text{Krit}}$ )	Gewichtung Dimension ( $G_{\text{Dim}}$ ) ( $\sum G_{\text{Krit}}$ in einer Dimension)	Gewichtung Dimension in Prozent
Kosten	Wirtschaftlichkeit	0,200	0,2	20 %
Prozess	Durchlaufzeit	0,066	0,2	20 %
	Produktivität	0,066		20 %
	Qualität	0,066		20 %
Lernen und entwickeln	Qualifikation	0,02	0,2	20 %
Nutzer:innen	Ergonomie	0,050	0,2	20 %
	Arbeitsbelastung	0,050		20 %
	Gebrauchstauglichkeit	0,050		20 %
	Nutzer:innenakzeptanz	0,050		
Technologie	Reifegrad der Technologie	0,200	0,2	
Summe		1	1	

### 5.6.2 Bewertungsparameter und -skalen

Die Kriterien werden auf einer Ordinalskala von 1 bis 5 eingeordnet. Tabelle 26 zeigt die Kriterien mit den zugehörigen Abkürzungen, die Skalen und deren Bedeutung.

**Tabelle 26: Bewertungskriterien und -skalen, eigene Darstellung**

Kriterium	Abkürzung	Skala	Bedeutung
Wirtschaftlichkeit	WK	-2 bis +2	sehr gering – gering – mäßig – gut – sehr gut
Durchlaufzeit	DZ	-2 bis +2	sehr verlängert – verlängert – unverändert – verkürzt – sehr verkürzt
Produktivität	PR	-2 bis +2	sehr verschlechtert – verschlechtert – unverändert – verbessert – sehr verbessert
Qualität	QT	-2 bis +2	sehr verschlechtert – verschlechtert – unverändert – verbessert – sehr verbessert
Qualifikation	QK	-2 bis +2	viel mehr benötigt bis viel weniger benötigt
Ergonomie	ER	-2 bis +2	sehr verschlechtert – verschlechtert – unverändert – verbessert – sehr verbessert
Arbeitsbelastung	AB	-2 bis +2	sehr hoch – hoch – mittel – gering – sehr gering
Gebrauchstauglichkeit	GT	-2 bis +2	sehr schlecht – schlecht – mittel – gut – sehr gut
Nutzer:innenakzeptanz	NA	-2 bis +2	sehr schlecht – schlecht – mittel – gut – sehr gut
Reifegrad der Technologie	RG	-2 bis +2	TRL<6 – TRL 6 – TRL 7 TRL 8 – TRL 9

Die Skala ist für alle Kriterien von -2 bis +2 gleich, die dahinterliegenden Bewertungsbereiche sind auf das jeweilige Kriterium angepasst. In der Literatur finden sich für diese Darstellung Beispiele in der Instandhaltung, z. B. bei Kinz (2017), Schröder (2010) und Passath et al. (2020). Die Zahlen hinter den qualitativen Skalenbeschreibungen der einzelnen Kriterien werden prozess- und unternehmensabhängig festgelegt. Tabelle 27 zeigt die Standardfestlegung der Skalenwerte für jedes Kriterium. Diese können fallweise auf den Prozess angepasst werden.

**Tabelle 27: Quantitative Skalen der Kriterien, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Wirtschaftlichkeit – Amortisationszeit (Jahren)	sehr gering > 5 Jahre	gering > 2 und ≤ 5 Jahre	mäßig > 1 und ≤ 2 Jahre	gut > 0,25 und ≤ 1 Jahre	sehr gut ≤ 0,25 Jahre
Durchlaufzeit – Veränderung der DLZ (%)	sehr verlängert > +25%	verlängert ≤ +25% > +5%	unverändert ≤ 5% > -5%	verkürzt ≤ -5% > -25%	sehr verkürzt ≤ -25%
Produktivität – Veränderung der Produktivität (%)	sehr verschlechtert > +20%	verschlechtert ≤ +20% > +0%	unverändert ≤ 0%	verbessert < 0% > -20%	sehr verbessert ≤ -20%

	-2	-1	0	+1	+2
Qualität	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
– Qualitätsgrad (%)	< 50%	≥ 50% < 60%	≥ 60% < 80%	≥ 80% < 90%	≥ 90%
Qualifikation	erfüllt die Anforderungen nicht	erfüllt die Anforderungen kaum	erfüllt die Anforderungen teils	erfüllt die Anforderungen größtenteils	erfüllt die Anforderungen voll
	≤ 2	≥ 2 < 4	≥ 4 < 6	≥ 6 < 8	≥ 8
Ergonomie	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
– RULA (0 bis 7)	6 bis 7	5	3 bis 4	2	1
Arbeitsbelastung	sehr hoch	hoch	mittel	gering	sehr gering
– NASA-RTLX (0 bis 100)	≥ 80	≥ 60 < 80	≥ 40 < 60	≥ 20 < 40	< 20
Gebrauchstauglichkeit	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
– SUS Score (0 bis 100)	< 39	≥ 39 < 52	≥ 52 < 73	≥ 73 < 85	≥ 85
Nutzer:innenakzeptanz	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
– Technology Acceptance (0 bis 100)	< 20	≥ 20 < 40	≥ 40 < 60	≥ 60 < 80	≥ 80
Reifegrad der Technologie	sehr gering	gering	mittel	gut	sehr gut
– Technology Readiness Level (1 bis 9)	TRL<6	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9

### 5.6.3 Prozessfassung

Ein Prozess ist die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden“ (VDI-Richtlinien 3633, 2014). Für die Evaluierung wird der Ist- und Soll-Prozess erfasst und verglichen. Mittels einer Prozessanalyse und -beschreibung wird der Ist-Prozess aufgenommen und dokumentiert. Die Aufnahme des Ist-Prozesses wird im Prozessmanagement für viele Prozessverbesserungen als Ausgangspunkt herangezogen. Durch das Verständnis und die Dokumentation des Ist-Prozesses werden Verbesserungsvorschläge identifiziert. Für die visuelle Aufbereitung empfiehlt sich eine Prozessdarstellungsform. Beispiele sind die erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK), die Business Process Model and Notation (BPMN), ein Flussdiagramm und ein Prozessablaufdiagramm. Eine Prozessdarstellung kann bei komplexen Prozessen unübersichtlich werden, daher ist die richtige Auswahl der Prozessdarstellungsform und Granularität des Prozesses entscheidend. Übersichtsdarstellungen und Ausschnittsabbildungen können bei der übersichtlichen Darstellung unterstützen. Ein Prozess besteht aus Teilprozessen, welche im Prozessdiagramm abgebildet sind (Becker, 2008).

Jede Aktivität in der Prozessdarstellung beantwortet folgende Fragen (Becker, 2008):

- Woher kommen die formellen oder informellen Informationen?
- Auf welchem Weg kommt die Information?
- Welche Verarbeitung wird vorgenommen?
- Mit welchen Mitteln wird die Verarbeitung ausgeführt?
- Wollen die Kund:innen formelle und/oder informelle Information?
- Auf welchem Weg wird die Information weitergehen?

Neben dem logischen und zeitlichen Ablauf der Tätigkeiten, dem Prozessfluss, werden Kosten, Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten sowie die Anzahl der benötigten Mitarbeiter:innen im Informationsfluss ermittelt. Stundensätze für Ressourcen und Mitarbeiter:innen sind erforderlich, um die Kosten zu berechnen. Zusätzliche spezifische Prozesskosten, z. B. Lagerkosten oder Lizenzkosten, sind ebenfalls zu berücksichtigen. Eine Prozessdarstellung muss die folgenden Anforderungen erfüllen, um Optimierungspotenziale zeigen zu können (Becker, 2008): Der Prozess ist vollständig abgebildet und ist mit allen Teilprozessen, Schritten oder Aktivitäten von Prozessanfang bis zum Abschluss der Aktivität dargestellt. Prozesse sind mit einer einheitlichen Systematik beschrieben und in ausreichendem Detaillierungsgrad dargestellt. Die erforderlichen Ressourcen und Hilfsmittel sind dokumentiert und Prozesszeiten, Ausführungshäufigkeit und Prozesskosten aufgenommen. Denksätze für die Prozessoptimierung sind notiert sowie die Schnittstellen zu anderen Prozessen bei hierarchischem Aufbau oder bei parallelen Ketten dokumentiert.

Nach der Aufnahme des Ist-Prozesses wird der Soll-Prozess mit der gleichen Prozessdarstellungsmethode erfasst und mit dem Ist-Prozess verglichen. Änderungen in den Prozessen lassen sich visuell über die Prozessdarstellung einfach erkennen (Becker, 2008).

Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise des multikriteriellen Evaluierungsmodells anhand einer praktischen Anwendung gezeigt.

## 6 Praktische Anwendung des Modells

### 6.1 Vorgehensweise zur Evaluierung

In der Realisierung wird als Fallbeispiel die Bestückung und Verkabelung eines Elektroschaltschranks in der TU Wien Pilotfabrik für Industrie 4.0 aufgebaut und im Rahmen einer Studie mit 150 Teilnehmer:innen evaluiert. Das Anwendungsbeispiel wurde gewählt, um an einem Prozess mehrere Assistenzsysteme im Einsatz zu evaluieren. Darüber hinaus weist der manuelle Prozess einen geringen Automatisierungsgrad in der Praxis auf. Der Mensch steht in diesem Prozess im Fokus und führt die Anwendungsschritte mithilfe der gewählten Assistenzsysteme durch.

#### 6.1.1 Industrielle Relevanz

Der Prozess der Schaltschrankbestückung und -verkabelung bietet aufgrund der hohen Individualisierungsrate und des hohen manuellen Arbeitsaufwands Potenziale für physische und digitale Assistenzsysteme, wie die Literaturrecherche bestätigt: Nägele und Dörbaum (2021) weisen auf die Probleme vieler Unternehmen im Schaltschrankbau hin, wie die Bestückung von Schaltschränken mit Schienen, Komponenten und Drähten. Die Prozesse sind durch zahlreiche manuelle Arbeitsschritte geprägt und aufgrund der Vielfalt an Verbindungen für die Steuerungstechnik häufig zeitaufwendig, teuer und fehleranfällig. Ihre potenzielle Lösung zur automatisierten Schaltschrankbestückung zeigen sie in einer Testanwendung durch Leichtbauroboter. Für den industriellen Einsatz bedarf es noch weiterer Arbeiten, da sich Schaltkästen je nach Hersteller und Anforderung stark unterscheiden können (Nägele & Dörbaum, 2021). LAP Laser Applikationen (2019) zeigt eine Informationsbereitstellung in der Schaltschrankbestückung mit Laserprojektion, wobei die Position und zugehörige Informationen auf den Schaltschrank projiziert werden, siehe Abbildung 26.

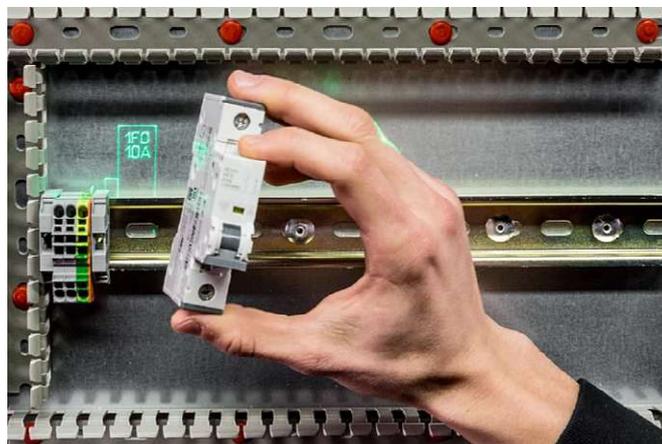


Abbildung 26: Schaltschrankbestückung mit Laserprojektion (LAP Laser Applikationen, 2019)

Abraham und Annunziata (2017) vergleichen die Bestückung und Verdrahtung eines Schaltschranks einer Windturbine mit dem aktuellen Verfahren eines Unternehmens mittels Papieranweisung und mithilfe eines Technikers, der dieselbe Aufgabe mit einer AR-Brille ausführt. Die Anwendung verbesserte die Leistung des Arbeiters bei der ersten Verwendung um 34 Prozent und zeigt eine deutliche Verbesserung durch die Anwendung des Assistenzsystems (Abraham & Annunziata, 2017).

## 6.2 Beschreibung des Fallbeispiels

### 6.2.1 Arbeitsplatzbeschreibung

In der TU Wien Pilotfabrik wird ein Elektroschaltschrank in Analogie zu einem Ausschnitt eines Industrieschaltschranks mit Bauteilen bestückt und verkabelt. Es gilt die Annahme der Serienproduktion. Der Arbeitsplatz inklusiver aller Assistenzsysteme ist in Abbildung 27 und 28 dargestellt. In der Abbildung links sind die Assistenzsysteme mit blauen Feldern beschriftet, allgemeine Bereiche mit weißen Feldern. Je nach Testszenario kommen unterschiedliche Systeme zum Einsatz. Der Schaltschrank ist auf einer Höhe zwischen 150 und 190 Zentimetern montiert. Auf Basis der DIN 33402-2 (2020) liegt die maximale Reichweite beim 50. Perzentil bei Männern bei 208, bei Frauen bei 195 Zentimetern. Das bedeutet, dass aufgrund der Reichweite ein Großteil der Personen den Use Case ohne Probleme durchführen kann. Der Schaltschrank wird unter Laborbedingungen montiert und ist aus Sicherheitsgründen nicht am Stromnetz angebunden.

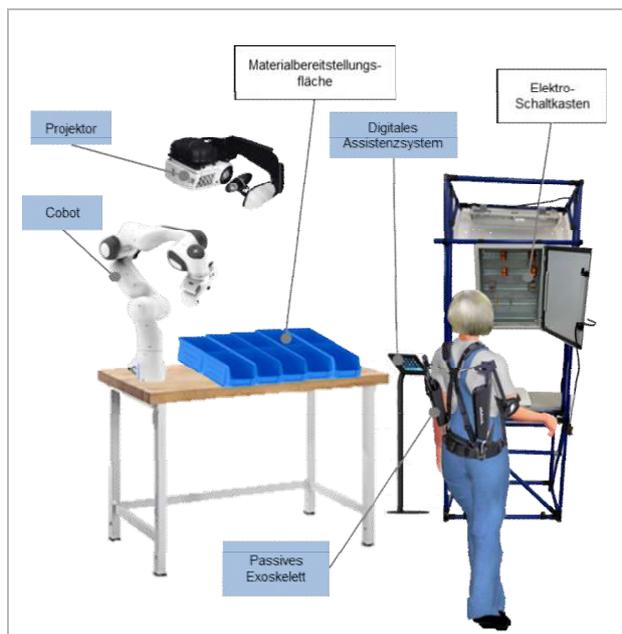


Abbildung 27: Arbeitsplatzgestaltung inkl. Assistenzsysteme, eigene Darstellung



Abbildung 28: Arbeitsplatz Schaltschrankmontage in der TU Wien Pilotfabrik, eigene Darstellung

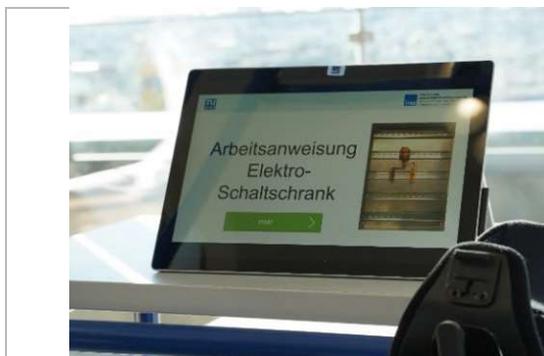
## 6.2.2 Eingesetzte Assistenzsysteme

Als kognitive Assistenzsysteme werden ein digitales Werkerführungssystem über ein Tablet und ein Projektionssystem, das direkt in den Blickbereich der Person projiziert, eingesetzt. Im ersten Evaluierungsszenario wird eine Person mithilfe eines digitalen Werkerführungssystem angeleitet, welches die richtige Reihenfolge der Reihenklammern an den Hutschienen anzeigt. Dabei werden sie mit unterschiedlich farbigen Kabeln verbunden. Bei Bedarf können detaillierte Montagevideos angesehen werden. Mit Touchscreen wird über die Buttons zum nächsten Schritt weitergeschaltet. Über einen Zurück-Button links oben kann bei Bedarf zum vorigen Arbeitsschritt zurückgesprungen werden (siehe Abbildung 29).

Eine andere Variante stellt die Informationsbereitstellung via Projektion dar. Die Position und Farbe des jeweiligen Bauteils und Kabels werden auf die zu bestückende Fläche projiziert. Mithilfe eines Schalters (links unten auf der Schaltschrankplatte in Abbildung 30) wird der nächste Arbeitsschritt angezeigt.

Für die physische Assistenz des Benutzers/der Benutzerin kommen ein passives Exoskelett und ein Cobot zum Einsatz. Aufgrund der Höhe des Elektroschaltschranks ist Arbeit in Kopfhöhe bzw. Überkopf notwendig. Hierbei unterstützt ein Exoskelett, um die Arme zu halten und die Schultern zu entlasten. Konkret wird das passive Exoskelett Paexo Shoulders der Firma Ottobock verwendet, welches für Überkopfarbeit geeignet ist (siehe Abbildung 31).

Als weiteres physisches Assistenzsystem wird ein kollaborationsfähiger Roboter eingesetzt. Cobots werden laut einer Studie (Hornung, 2021) am häufigsten für Handling- und Pick and Place-Tätigkeiten eingesetzt. Auch in dieser Anwendung stellt der Cobot das Material bereit. Mittels Magnetaufnahme nimmt der Cobot die Reihenklammern in der richtigen Reihenfolge auf und stellt diese links im Arbeitsbereich bereit. Als kollaborationsfähige Roboter wird Panda der Firma Franka Emika eingesetzt (siehe Abbildung 32).



**Abbildung 29: Digitales Werkerassistenzsystem „Arbeitsanweisung Elektroschaltschrank“ © Johann Li**



**Abbildung 30: Projektionssystem „Arbeitsanweisung Elektroschaltschrank“ © Johann Li**



### 6.2.3 Materialbereitstellung

Die Bauteile zur Bestückung des Schaltschranks unterscheiden sich in Farbe und Form. Die Reihenklemmen in Gelb, Orange und Rot unterscheiden sich in der Form von der grauen Reihenklemme. Alle Reihenklemmen werden auf die Hutschienen geklickt. Der Endanschlag in Grau fixiert die Reihenklemmen auf den Hutschienen und wird mit einem Schlitzschraubendreher (Größe 0,8 x 4,0 mm) verschraubt. Die Kabel werden zur Verbindung der Reihenklemmen eingeführt und mit einem Schlitzschraubendreher (Größe 0,5 x 3,0 mm) verschraubt. Die eingesetzten Materialien werden in Abbildung 33 dargestellt.



Die Materialbereitstellung erfolgt in beschrifteten Boxen links neben dem Schaltschrank auf einer Ablagefläche, siehe Abbildung 34. Bei Einsatz des Cobots werden die Reihenklemmen und der Endanschlag außer Reichweite der Testperson über den Cobot zur Verfügung gestellt. Die Kabel werden in allen Testfällen von der Testperson selbst ergriffen. Abbildung 35 zeigt den Elektroschaltschrank mit den fünf Hutschienen, auf denen die Reihenklemmen und Endanschläge bestückt werden.



**Abbildung 34: Materialbereitstellung am Arbeitsplatz, eigene Darstellung**

**Abbildung 35: Elektroschaltschrank inkl. Hutschienen, eigene Darstellung**

## 6.2.4 Prozessbeschreibung

Der Prozess zur Bestückung und Montage des Elektroschaltschranks besteht aus 17 Arbeitsschritten und dauert je nach Person und Fall in etwa 5 bis 25 Minuten. In Abbildung 36 ist der Prozess mittels der Prozessnotation erweiterter ereignisgesteuerter Prozesskette (eEPK) nach Scheer et al. (1997) abgebildet.

Im ersten Arbeitsschritt wird ein Endanschlag auf der Hutschiene fixiert. Anschließend werden im zweiten Arbeitsschritt fünf Reihenklemmen (2 x rot, gelb, orange, gelb) nach der Reihe von links nach rechts auf der zweiten Hutschiene angebracht. Die Reihenklemmen werden mit dem Füßchen an der Schienenunterseite eingehakt und an die Hutschiene gedrückt, bis der Befestigungsmechanismus einrastet. Im dritten Arbeitsschritt werden die fünf positionierten Reihenklemmen mit einem weiteren Endanschlag an der Hutschiene fixiert und gegen Verrutschen gesichert. Im vierten Arbeitsschritt werden auf der dritten Hutschiene zwei graue Reihenklemmen und mit Abstand drei Reihenklemmen (gelb, orange, gelb) angebracht.

Nach dem Bestücken aller Reihenklemmen, werden diese im fünften Arbeitsschritt verkabelt. Dabei werden die Reihenklemmen auf der zweiten Hutschiene von links nach rechts jeweils mit den Reihenklemmen der dritten Hutschiene verkabelt. Die Kabel haben unterschiedliche Farben. Zur Befestigung des Kabels an der Reihenklemme werden acht Drehungen mit einem Schlitzschraubendreher ausgeführt.

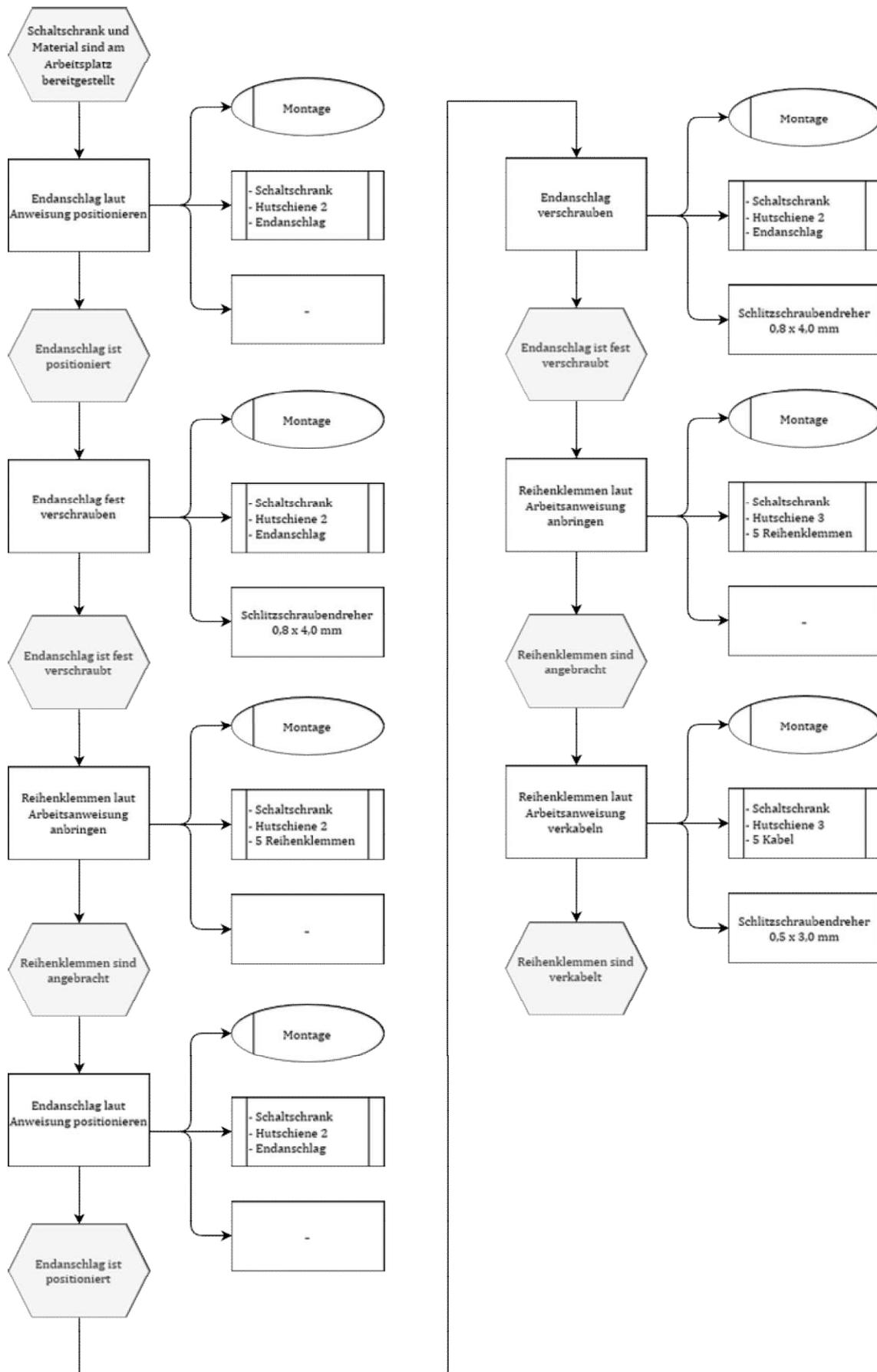


Abbildung 36: Prozessabbildung mittels erweiterter ereignisgesteuerter Prozesskette (eEPK), eigene Darstellung

Im ersten Evaluierungsszenario wird eine Person nur mithilfe eines digitalen Werkerführungssystems angeleitet, welches die richtige Reihenfolge der Reihenklammern an den Hutschienen anzeigt. Dabei werden sie mit unterschiedlich farbigen Kabeln verbunden. In den weiteren Szenarien werden unterschiedliche Kombinationen der Assistenzsysteme evaluiert (siehe Kapitel 6.3.3).

## 6.2.5 Montageanleitung

Die Montageanleitung wird mit dem digitalen Werkerführungssystem bereitgestellt. Die Anleitung beinhaltet allgemeine Informationen zum Montageprozess, Bauteilbezeichnungen, eingesetzte Werkzeuge und eine Beschreibung der Montageschritte 1 bis 17, mit Option auf detaillierte Montagevideos. Jeder Montageschritt ist textuell Punkt für Punkt beschrieben (siehe Anhang 8.7, links). Der Vorgang ist auf der rechten Seite bildlich dargestellt. Zur zusätzlichen Hilfestellung steht bei jedem Arbeitsschritt ein Video bei Bedarf zur Verfügung, welches durch einen Button links unten erreichbar ist. Nach dem fertig ausgeführten Arbeitsschritt wird durch Klicken auf den Button rechts unten der nächste Arbeitsschritt angezeigt.

## 6.3 Durchführung der Testszenarien

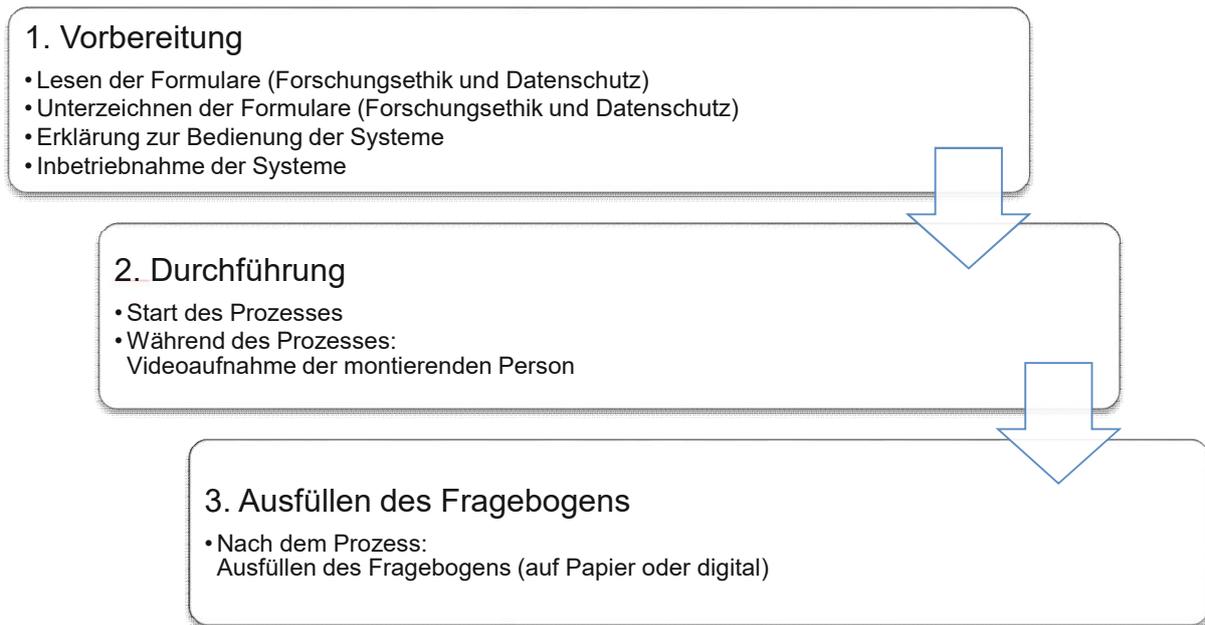
### 6.3.1 Forschungsethik und Datenschutz

Im Rahmen der durchgeführten Studie wurde von allen Teilnehmer:innen eine Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der Studie (siehe Anhang 8.5.1) und eine datenschutzrechtliche Einwilligungserklärung gemäß Art. 6 Abs 1 lit a DSGVO (siehe Anhang 8.5.2) unterzeichnet.

Den Teilnehmer:innen wurden Informationen zum Ablauf der Studie zur Verfügung gestellt, die Teilnahme erfolgte freiwillig. Für die Teilnahme an der Studie war keine Vorerfahrung notwendig, als Voraussetzung wurde ein Mindestalter von 18 Jahren und die Beachtung der Sicherheitsvorkehrungen angegeben. Alle benötigten Informationen für die Durchführung des Experiments standen dabei am Arbeitsplatz zur Verfügung, zusätzlich hatten die Teilnehmer:innen jederzeit die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Bei Unbehagen oder Schmerzen waren die Teilnehmer:innen angehalten, das Experiment abubrechen. Abgesehen davon hatten die Teilnehmer:innen zu jeder Zeit die Möglichkeit, das Experiment abubrechen und ihr Einverständnis zum Experiment zurückzuziehen, ohne Angabe von Gründen und ohne dass ihnen dadurch Nachteile entstanden.

### 6.3.2 Testablauf

Der Testablauf war für alle Testfälle ident und wurde standardisiert durchgeführt, um eine solide Datenbasis für die Auswertung zu erhalten. Der Ablauf wurde in drei Teile unterteilt, die Vorbereitung, die Durchführung und das Ausfüllen des Fragebogens, siehe Abbildung 37.



**Abbildung 37: Ablauf der Studie, eigene Darstellung**

Teil 1 benötigte in etwa 5 Minuten, Teil 2 ca. 5 bis 25 Minuten und Teil 3 ca. 5 Minuten. Die Gesamtzeit betrug je nach Vorerfahrung und Qualifikation zwischen 15 und 35 Minuten pro Testperson. Die Auswertung der Fragebögen und der Videoaufnahmen erfolgte separat im Anschluss an die Tests.

### 6.3.3 Evaluierte Assistenzsysteme

Für die Evaluierung wurden unterschiedliche Assistenzsysteme beim selben Prozess angewendet und evaluiert. Als Ist-Zustand wurde eine Anleitung per Tablet zur Verfügung gestellt. Bei den Fällen 1 bis 3 wurden die Assistenzsysteme einzeln eingesetzt, wobei bei den physischen Assistenzsystemen die Anleitung per Tablet zur Verfügung gestellt wurde. In Fall 4 bis 5 wurden Kombinationen aus mehreren Assistenzsystemen getestet. Die Fälle wurden evaluiert, ausgewertet und verglichen. In Tabelle 28 werden die Testszenarien und die darin verwendeten Assistenzsysteme dargestellt.

Tabelle 28: Testsznarien der Assistenzsysteme, eigene Darstellung

Assistenzsystem		Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Kognitive Assistenzsysteme	Digitales Assistenzsystem	X		X	X	X	
	Projektionssystem		X				X
Physische Assistenzsysteme	Exoskelett			X		X	X
	Cobot				X	X	X

Zusammenfassung der Testsznarien:

- Ist-Zustand: Digitales Assistenzsystem
- Fall 1: Projektionssystem
- Fall 2: Digitales Assistenzsystem und Exoskelett
- Fall 3: Digitales Assistenzsystem und Cobot
- Fall 4: Digitales Assistenzsystem, Exoskelett und Cobot
- Fall 5: Projektionssystem, Exoskelett und Cobot

Die Testung des Evaluierungsmodells stand im Fokus, nicht der Vergleich aller theoretisch möglichen Kombinationen. Daher wurden die Varianten des Projektors in der Kombination mit den einzelnen Assistenzsystemen (Exoskelett und Cobot) nicht separat betrachtet. Teils können diese bereits über Fall 5 aufgrund der aufgenommenen Daten getrennt ausgewertet werden.

### 6.3.4 Demografische Daten der Testpersonen

Die Testsznarien wurden in 150 Durchläufen (jeweils 25 Durchläufe pro Variante) getestet. Die Geschlechter-, Altersverteilung und Vorerfahrung mit Assistenzsystemen sind in Tabelle 29, Tabelle 30 und Tabelle 31 dargestellt. Die Technologieaffinität der Teilnehmer:innen wird mit einem Durchschnitt von 4,23 von 5 als hoch eingeschätzt.

Tabelle 29: Geschlechterverteilung der teilnehmenden Personen, eigene Darstellung

Geschlecht	Häufigkeit	Prozent [%]
Weiblich	36	24,00 %
Männlich	113	75,33 %
Divers	0	0,00 %
Keine Angabe	1	0,67 %
Gesamt	150	100,00 %

**Tabelle 30: Altersverteilung der teilnehmenden Personen, eigene Darstellung**

Alter	Häufigkeit	Prozent [%]
Unter 20	0	0,00 %
20 bis 29	100	66,67 %
30 bis 39	40	26,67 %
40 bis 49	8	5,33 %
50 bis 59	2	1,33 %
Über 59	0	0,00 %
Keine Angabe	0	0,00 %
Gesamt	150	100,00 %

**Tabelle 31: Aktuelle Tätigkeiten der teilnehmenden Personen (Mehrfachantworten möglich), eigene Darstellung**

Aktuelle Tätigkeit (Mehrfachantworten möglich)	Häufigkeit	Prozent [%]
Angestellt in einem Industrieunternehmen	21	9,77 %
Leitende:r Angestellte:r in einem Industrieunternehmen	8	3,72 %
Angestellt (in keinem Industrieunternehmen)	70	32,56 %
Leitende:r Angestellte:r (in keinem Industrieunternehmen)	4	1,86 %
Im Studium	95	44,19 %
Selbstständig	9	4,19 %
Ausbildung (Lehre)	6	2,79 %
Arbeitssuchend	2	0,93 %
Gesamt	215	100,00 %

## 6.4 Ergebnisse der durchgeführten Testszenarios

In diesem Kapitel werden die Dimensionen und Kriterien der einzelnen Fälle ausgewertet und miteinander verglichen.

### 6.4.1 Dimension Kosten

Die Wirtschaftlichkeit der Testfälle wird über die Amortisationszeit ermittelt. Die Kosten der verwendeten Assistenzsysteme werden in Tabelle 32 dargestellt. Die Opportunitätskosten, sogenannte entgangene Gewinne, werden in der Berechnung nicht berücksichtigt (Domschke & Klein, 2004), welche für mögliche Überstunden anfallen und aufgrund des Ausfalls von anderen Mitarbeiter:innen geleistet werden, werden ebenfalls in der Rechnung vernachlässigt.

Tabelle 32: Kosten der Assistenzsysteme, eigene Darstellung

Kostenart	Digitales Assistenzsystem	Projektion	Exoskelett	Cobot
Device	Tablett iPad Pro (Apple)	Panasonic Projektor (siehe Anhang 8.4)	Paexo Shoulder (Ottobock)	Panda (Franka Emika)
Device-Kosten	€ 1.000	€ 14.852	€ 4.900	€ 20.000
Erstellung der Inhalte (Stunden * Stundensatz)	20 h * € 60 = € 1.200	50 h * € 60 = € 3.000	n. a.	50 h * € 60 = € 3.000
Zertifizierungskosten	n. a.	n. a.	n. a.	€ 40.000
Einschulung für die Montage (Anzahl Mitarbeiter:innen * Stunden * Stundensatz)	2 * 0,5 h * € 60 = € 60	2 * 0,5 h * € 60 = € 60	2 * 0,5 h * € 60 = € 60	2 * 1 h * € 60 = € 120
Laufende Kosten pro Jahr (k <sub>LK</sub> )	€ 0	€ 0	€ 240/Jahr (Servicepakete)	€ 0
Wartung pro Jahr (Stunden * Stundensatz)	10 h * € 60 = € 600	20 h * € 60 = € 1.200	5h * € 60 = € 300	50h * € 60 = € 3.000
Gesamtkosten Initialkosten Laufende Kosten pro Jahr	€ 2.260 € 600/Jahr	€ 17.912 € 1.200/Jahr	€ 4.960 € 540/Jahr	€ 63.120 € 3.000/Jahr

Aus den Gesamtkosten für die Initialisierung und den jährlichen laufenden Kosten werden die Kosten für die einzelnen Testfälle berechnet und in Tabelle 33 dargestellt. Eine detaillierte Aufstellung der Gesamtkosten der Testfälle befindet sich im Anhang 8.4.

Tabelle 33: Gesamtkosten der Testfälle, eigene Darstellung

Kosten	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Initiale Gesamtkosten	€ 2 260	€ 17 912	€ 7 220	€ 65 380	€ 70 340	€ 85 992
Laufende jährliche Gesamtkosten	€ 600	€ 1 200	€ 1 140	€ 3 600	€ 4 140	€ 4 740

Für den finanziellen Nutzen ergeben sich je nach Assistenzsystem unterschiedliche Einflussfaktoren. Die Zeitersparnis wird über gemessene Daten aus der Studie mittels Videoaufnahmen ermittelt, Details siehe 6.4.2 (Produktivität). Die Senkung der Qualitätskosten wird über den Qualitätsgrad ermittelt, siehe 6.4.2 (Qualität) und als Verbesserung zum Ist-Zustand dargestellt. M. P. de Looze et al. (2017) stellten eine 10- bis 40-prozentige Verringerung der Rückenmuskelaktivität beim dynamischen Heben und statischen Halten bei der Anwendung eines Exoskeletts fest. Mit dem Mittelwert von 25 Prozent wird im Folgenden weiter gerechnet. Der Nutzen des

Exoskeletts wird mit der erwarteten Reduktion von Krankheitstagen berechnet. Im Jahr 2020 waren rund 21 Prozent aller Arbeitsunfähigkeitstage in Österreich aufgrund einer Muskel-Skelett-Erkrankung (MSE; (Statistik Austria, 2020a). Der Jahreslohn im „eisen- und metallverarbeitenden Gewerbe“ liegt laut österreichischen Kollektivvertrag für Facharbeiter bei 33.210,66 Euro brutto (WKO, 2022). Unter Berücksichtigung aller Lohnnebenkosten ergibt sich eine jährliche Belastung für den Arbeitgeber von rund 43.117,00 Euro pro Jahr und Mitarbeiter:in (karriere.at, 2021). Bei rund 252 Arbeitstagen (Ferienwiki, 2021) abzüglich 25 Urlaubstage (Arbeiterkammer, 2022) ergibt sich ein Tagessatz pro Mitarbeiter:in für den Arbeitgeber von:

$$\begin{aligned} \text{Personalkosten}_{\text{Tag}} &= \frac{\text{Lohnkosten Arbeitgeber pro Jahr}}{\text{Arbeitstage pro Jahr}} = \frac{43.117,00\text{€/Jahr}}{227 \text{ Tage/Jahr}} \\ &= 189,94 \frac{\text{€}}{\text{Tag}} \end{aligned}$$

#### Formel 12: Personalkosten pro Tag, eigene Darstellung

Bei einer Krankheitsdauer bei MSE von 16,9 Tagen (Statistik Austria, 2020a) kommt es jährlich zu durchschnittlichen Ausfallkosten ( $k_{\text{Ausfall}}$ ) von:

$$\begin{aligned} k_{\text{Ausfall}} &= \# \text{Ausfallstage} * \text{Personalkosten}_{\text{Tag}} = 16,9 \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}} * 189,94 \frac{\text{€}}{\text{Tag}} \\ &= 3\,210,03 \text{ €/Jahr} \end{aligned}$$

#### Formel 13: Durchschnittliche Ausfallkosten pro Mitarbeiter:in pro Jahr, eigene Darstellung

Auf 1.000 erwerbstätige Personen kommen 1.367 Krankenstandfälle in Österreich (Statistik Austria, 2020b). Somit erkranken Mitarbeiter:innen durchschnittlich rund 1,367 Mal pro Jahr. Daraus ergeben sich folgende Gesamtausfallkosten pro Jahr:

$$\text{Kosten}_{\text{ohne Exoskelett}} = \text{Kosten}_{\text{Ausfall}} * 1,367 = 3\,210,03 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} * 1,367 = 4\,388,11 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

#### Formel 14: Gesamtausfallkosten pro Jahr (ohne Exoskelett), eigene Darstellung

Zusätzlich müssten Opportunitätskosten und zusätzliche Personalkosten bei Ausfall erhoben werden. Diese werden in die Berechnung nicht miteinbezogen, da keine validen Daten zur Verfügung stehen. Mithilfe des Exoskeletts wird eine Reduktion von 25 Prozent angenommen, basierend auf einer 10-bis-40-Prozent-Verringerung der Rückenmuskelaktivität nach M. P. de Looze et al. (2017). Daraus errechnet sich ein Hilfsfaktor für die Ausfallreduktion  $h_{\text{Ausfall}}$  aufgrund einer MSE von:

$$h_{\text{Ausfall}} = 1,367 * 0,75 = 1,025 = 102,5 \%$$

#### Formel 15: Hilfsfaktor für die Ausfallreduktion, eigene Darstellung

Die jährlichen Ausfallkosten mit passivem Exoskelett errechnen sich aus:

$$\begin{aligned} \text{Kosten}_{\text{mit Exoskelett}} &= k_{\text{Ausfall}} * h_{\text{Ausfall}} + k_{\text{LK}} = 3.210,03 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} * 1,025 + 240 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \\ &= 3.530,28 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

**Formel 16: Gesamtausfallkosten pro Jahr (mit Exoskelett), eigene Darstellung**

Die Differenz der Gesamtausfallkosten mit und ohne Exoskelett zeigt die jährliche durchschnittliche Ersparnis bei Einsatz des Exoskeletts:

$$\begin{aligned} \text{Einsparung} &= \text{Kosten}_{\text{ohne Exoskelett}} - \text{Kosten}_{\text{mit Exoskelett}} \\ &= 4.388,11 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} - 3.530,28 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} = 857,83 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

**Formel 17: Jährliche Einsparung durch das Exoskelett, eigene Darstellung**

Der Einsatz des Exoskeletts wird durch die Kostenreduktion aufgrund der Reduzierung von Krankentagen beziffert, siehe Formel 17. In jedem Fall, in dem das Exoskelett zum Einsatz kommt, wird die gleiche Kostenreduktion angenommen, siehe Tabelle 34.

**Tabelle 34: Berechnung der Kostenreduktion durch die Reduzierung von Krankentagen, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Kostenreduktion durch durchschnittliche Reduktion der Krankheitstage	€ 0	€ 0	- € 857,83	€ 0	- € 857,83	- € 857,83

Die Zeitersparnis durch den Einsatz von Assistenzsystemen wird mit der Produktivitätskennzahl (Details zur Erhebung und Berechnung in Kapitel 6.4.2) ermittelt. Für die Kostenberechnung wird im Vergleich zum Ist-Zustand die Veränderung der Produktivität ermittelt und auf die Veränderung der Jahreslohnkosten umgerechnet, siehe Tabelle 35. Im Vergleich zum Ist-Zustand sind alle Fälle langsamer, wodurch es zu einer Verschlechterung der Produktivität und somit zu einer Erhöhung der Jahreslohnkosten kommt. Eine Limitation dieser Berechnung ist, dass die Jahreslohnkosten in der Realität nicht prozentuell um die Verschlechterung der Produktivität steigen würden, sondern erst, sobald Überstunden bzw. eine zusätzliche Person notwendig sind.

**Tabelle 35: Berechnung der Kostensenkung durch die Verbesserung der Produktivität im Vergleich zum Ist-Zustand, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Veränderung Produktivität	0	-4,19 %	-29,27 %	-26,73 %	-7,90 %	-5,05 %
Veränderung der Lohnkosten des Arbeitgebers pro Jahr durch Produktivitätssteigerung/-senkung	€ 0	€ 1 806,60	€ 12 620,35	€ 11 525,17	€ 3 406,24	€ 2 177,41
Lohnkosten des Arbeitgebers pro Jahr mit Assistenzsystemen	€ 43 117,00	€ 44 923,60	€ 55 737,35	€ 54 642,17	€ 46 523,24	€ 45 294,41

Für die Messung der Qualität wird der Qualitätsgrad berechnet (Details zur Erhebung und Berechnung in Kapitel 6.4.2). Die Veränderung zum Ist-Zustand wird als Basis für die Kostenberechnung herangezogen. Für die Berechnung wird eine theoretische Jahresstückzahl benötigt. Diese wird über die Arbeitsplatzauslastung errechnet. 227 Arbeitstage zu je 7,7 Stunden ergeben die Arbeitsstunden pro Jahr:

$$\begin{aligned} \text{Arbeitsstunden pro Jahr} &= \text{Arbeitstage pro Jahr} * \text{Stunden pro Tag} \\ &= 227 \frac{\text{Arbeitstage}}{\text{Jahr}} * 7,7 \frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} = 1747,9 \frac{\text{Stunden}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

**Formel 18: Arbeitsstunden pro Jahr**

Als Stückzahl wird ein Einzelarbeitsplatz mit einer Jahreskapazität von 95 Prozent berechnet:

$$\begin{aligned} \text{Einzelarbeitsplatzauslastung} &= \text{Arbeitsstunden pro Jahr} * \text{Kapazitätsauslastung} (\%) \\ &= 1747,9 \frac{\text{Stunden}}{\text{Jahr}} * 0,95 = 1 660,51 \frac{\text{Stunden}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

**Formel 19: Einzelarbeitsplatzauslastung (Stunden/Jahr)**

Laut Tabelle 40 beträgt die durchschnittliche Montagezeit 7,88 Minuten pro Stück (= 0,13 Stunden pro Stück) im Ist-Zustand. Daraus wird eine theoretische Jahresstückzahl für das Anwendungsbeispiel errechnet:

$$\begin{aligned} \text{Jahresstückzahl} &= \frac{\text{Einzelarbeitsplatzauslastung}}{\text{Stunden pro Stück}} = \frac{1 660,51 \frac{\text{Stunden}}{\text{Jahr}}}{0,13 \text{ Stunden pro Stück}} \\ &= 12 643,47 \frac{\text{Stück}}{\text{Jahr}} \sim 12 643 \frac{\text{Stück}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

**Formel 20: Jahresstückzahl**

Mit der Jahresstückzahl werden die jährlichen Qualitätskosten auf dem Einzelarbeitsplatz und die Veränderung der Qualitätskosten im Vergleich zum Ist-Zustand errechnet und in Tabelle 36 dargestellt. Die entstehenden Nacharbeitskosten mit 10 Euro pro Stück angenommen.

**Tabelle 36: Berechnung der Veränderung der Qualitätskosten durch Veränderung des Qualitätsgrads im Vergleich zum Ist-Zustand, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Qualitätsgrad	64,71 %	76,00 %	93,75 %	73,68 %	88,89 %	83,33 %
Verbesserung zu Ist-Zustand	0,00 %	11,29 %	29,04 %	8,98 %	24,18 %	18,63 %
Stückzahl	12 643					
Nacharbeitskosten	€ 10,00					
Qualitätskosten	€ 44 622,35	€ 30 343,20	€ 7 901,88	€ 33 271,05	€ 14 047,78	€ 21 071,67
Veränderung der Qualitätskosten durch Veränderung des Qualitätsgrads zum Ist-Zustand	€ 0	- € 14 279,15	- € 36 720,48	- € 11 351,30	- € 30 574,58	- € 23 550,69

Die Kosten-Nutzen-Betrachtung der einzelnen Testfälle wird in Tabelle 37 gegenübergestellt. Hierfür werden die Gesamtkosten für ein Jahr berechnet (initiale Gesamtkosten plus laufende jährliche Gesamtkosten) und die Kosten für Veränderungen durch Produktivität, Qualität und Krankheitstage dargestellt. Gesamtkosten werden dem Gesamtnutzen gegenübergestellt und die Amortisationszeit in Jahren (Gesamtkosten für Jahr 1/Gesamtnutzen für Jahr 1) ermittelt. Die Berechnung erfolgte nur auf Jahr 1, da sich alle Fälle aufgrund der hohen Einsparungen der Qualitätskosten bereits im ersten Jahr amortisieren.

**Tabelle 37: Kosten-Nutzen-Betrachtung und Errechnung der Amortisationszeit, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Initiale Gesamtkosten	€ 2 260,00	€ 17 912,00	€ 7 220,00	€ 65 380,00	€ 70 340,00	€ 85 992,00
Laufende jährliche Gesamtkosten	€ 600,00	€ 200,00	€ 1 140,00	€ 3 600,00	€ 4 140,00	€ 4 740,00
Gesamtkosten für Jahr 1	€ 2 860,00	€ 19 112,00	€ 8 360,00	€ 68 980,00	€ 74 480,00	€ 90 732,00
Veränderung der Lohnkosten des Arbeitgebers pro Jahr durch Produktivitätssteigerung/-senkung	€ -	€ 1 806,60	€ 12 620,35	€ 11 525,17	€ 3 406,24	€ 2 177,41

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Veränderung der Qualitätskosten durch Veränderung des Qualitätsgrads zum Ist-Zustand	€ 0	- € 14 279,15	- € 36 720,48	- € 11 351,30	- € 30 574,58	- € 23 550,69
Kostenreduktion durch durchschnittliche Reduktion der Krankheitstage	€ 0	€ 0	- € 857,83	€ 0	- € 857,83	- € 857,83
Gesamtnutzen für Jahr 1	€ -	- € 12 472,55	- € 24 957,96	€ 173,87	- € 28 026,17	- € 22 231,11
Amortisationszeit (Jahren)		1,53	0,33	396,72	2,66	4,08

Die Testfälle werden auf Basis der errechneten Amortisationszeit im Evaluierungsmodell in Tabelle 38 zugeordnet. Der Ist-Zustand wird im Evaluierungsmodell mit 0 bewertet, da kein Nutzen errechnet werden kann.

**Tabelle 38: Amortisationszeit (Jahren) – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Wirtschaftlichkeit – Amortisationszeit (Jahren)	sehr gering	gering	mäßig	gut	sehr gut
	> 5 Jahre	> 2 und ≤ 5 Jahre	> 1 und ≤ 2 Jahre	> 0,25 und ≤ 1 Jahre	≤ 0,25 Jahre
Zuordnung im Evaluierungsmodell	Fall 3	Fall 4, Fall 5	Fall 1	Fall 2	

## 6.4.2 Dimension Prozess

### Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit beschreibt die Bearbeitungszeit addiert mit der Lagerzeit. Bei dem Fallbeispiel in der Pilotfabrik ist aufgrund der zu montierenden Losgröße von 1 keine Lagerzeit vorhanden, daher entspricht die Durchlaufzeit der Bearbeitungszeit. Eine separate Auswertung der Durchlaufzeit kann entfallen und alle Fälle werden in Tabelle 39 mit 0 bewertet.

**Tabelle 39: Durchlaufzeitveränderung – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Durchlaufzeit	sehr verlängert	verlängert	unverändert	verkürzt	sehr verkürzt
– Veränderung der DLZ (%)	> +25 %	≤ +25 % > +5 %	≤ 5 % > -5 %	≤ -5 % > -25 %	≤ -25 %

Im realen Setting mit einer Produktionszahl von 100.000 Stück pro Jahr werden die Lagerzeiten – je nach Flussgrad – nur minimal von der Produktivität beeinflusst, jedoch mehr von der Reichweite zwischen den einzelnen Montagestationen. Die in diesem Fallbeispiel verwendeten Assistenzsysteme haben keinen direkten Einfluss auf die

Optimierung der Reichweiten oder den Materialpuffer. Daher kann auch im realen Setting die Durchlaufzeit für dieses Fallbeispiel vernachlässigt werden.

## Produktivität

Für die Auswertung der Produktivität werden die Zeiten im Hinblick auf eine schnelle, industrietaugliche Bewertung zwischen dem Start der Bestückung vom ersten Bauteil bis zur letzten Verkabelung ausgewertet. Unterbrechungen durch grobe technische Probleme der Assistenzsysteme, Pausen oder Ablenkungen der Studienteilnehmer:innen werden von der Gesamtzeit subtrahiert. Diese Unterbrechungen mindern die Aussagekraft der Produktivität der einzelnen Fälle, da diese durch nicht beeinflussbare Faktoren entstanden sind (z. B. Unterbrechungen durch Ausfall des Projektors, Akkuausfall oder durch andere Personen in der Pilotfabrik, z. B. Führungen). Um diese Zeiten ermitteln zu können, wurden alle Testpersonen während der Durchführung des Experiments gefilmt. Die Auswertung fand über den VLC Player und in MS Excel statt.

Die Auswertung ist in Tabelle 40 dargestellt und wird in Abbildung 38 grafisch abgebildet. Auf Basis der Daten wurden statistische Parameter wie Mittelwert, Median, oberes und unteres Quartil (Q1, Q3) und Interquartilsabstand (IQA) ausgewertet. Statistische Ausreißer wurden nach der Formel obere Ausreißer  $OA = Q3 + IQA * 1,5$  und untere Ausreißer  $UA = Q1 - IQA * 1,5$  aus dem Datensatz entfernt. Statistische Fehler wurden im 95-Prozent-Konfidenzintervall dargestellt.

**Tabelle 40: Auswertung der Produktivität, eigene Darstellung**

Produktivität	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Mittelwert	7,88	8,19	10,59	10,48	9,10	9,06
Median	7,57	7,88	10,18	9,98	8,50	8,28
Minimum	3,80	4,78	7,38	5,87	5,38	5,33
Q1	6,07	6,51	8,66	8,36	6,97	7,98
Q3	8,78	9,52	12,65	12,87	11,27	10,96
Maximum	15,90	12,50	14,43	16,48	16,07	15,17
IQA	2,72	3,01	3,99	4,51	4,30	2,98
OA	12,86	14,03	18,64	19,63	17,72	15,43
UA	1,99	2,00	2,67	1,60	0,52	3,50
Standardabweichung	2,63	2,07	2,28	2,91	2,56	2,18
Konfidenzintervall/ z-Wert	95 % / ± 1,96					
$X_u$	6,63	7,38	9,48	9,09	8,14	8,19
$X_o$	9,13	9,00	11,71	11,87	10,07	9,93
Veränderung Median zum Ist-Zustand	0	+4,19 %	+29,27 %	+26,73 %	+7,90 %	+5,05 %

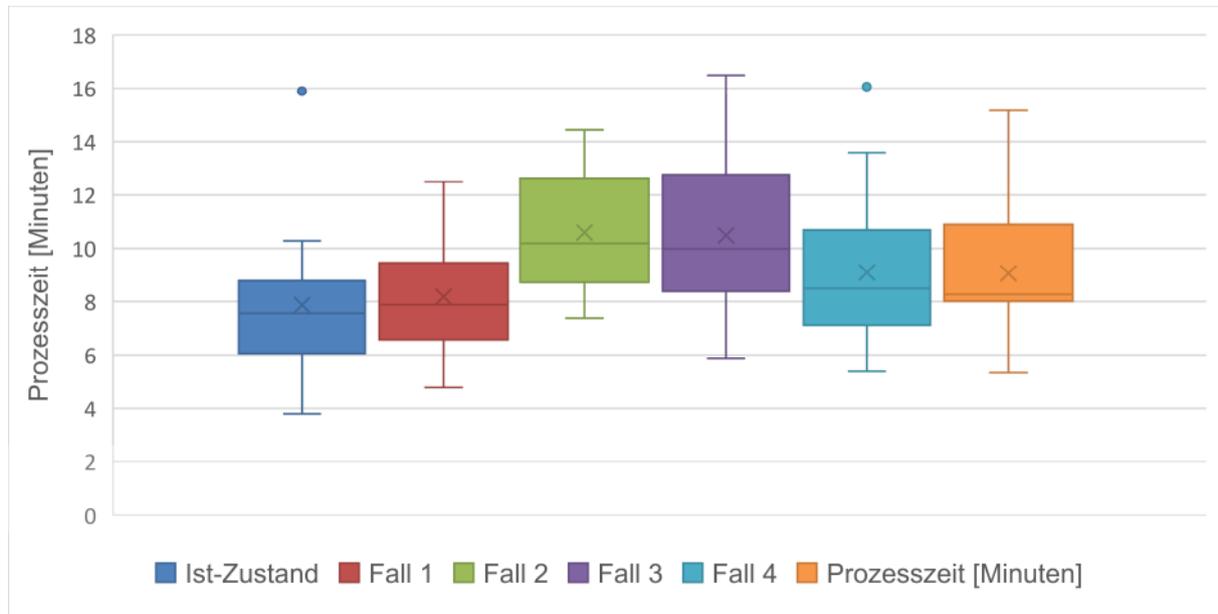


Abbildung 38: Prozesszeiten der Testfälle mit Mittelwert (X), Median, Minimum, Maximum und Ausreißer, eigene Darstellung

Die Auswertung zeigt, dass der Ist-Zustand die kürzeste Prozesszeit aufweist. Das kann dadurch erklärt werden, dass der Umgang mit den Assistenzsystemen Exoskelett, Cobot und Projektion für den Großteil der Teilnehmer:innen neu war und daher eine längere Eingewöhnungsphase benötigt wurde. Speziell bei Use Cases mit dem Einsatz von Cobots kommt es zusätzlich zu einer Verzögerung, da das Holen und Bereitstellen der Bauteile mehr Zeit benötigt als die direkte Entnahme aus der Materialbox durch die Person. Das trifft im Fallbeispiel unter Laborbedingungen zu, da nur fünf Bauteile zur Auswahl standen. Im realen Setting sind mehrere hundert Bauteile im Einsatz, wodurch für die Person eine Suchzeit anfällt. Der Cobot ist in diesem spezifischen Fall im Vorteil. Andererseits müssten weitere Systeme wie z. B. ein Pick-by-Light-System dem Cobot gegenübergestellt werden, um eine valide Aussage treffen zu können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einen zweiten Cobot asynchron zum bereits eingesetzten Cobot für die Materialbereitstellung zur Verfügung zu stellen, um Wartezeiten zu reduzieren. Die Testfälle werden in Tabelle 41 dem Evaluierungsmodell zugeordnet.

Tabelle 41: Produktivitätsveränderung – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung

	-2	-1	0	+1	+2
Produktivität – Veränderung der Produktivität (%)	sehr verschlechtert	verschlechtert	unverändert	verbessert	sehr verbessert
	> +20 %	≤ +20 % > +0 %	≤ 0 %	< 0 % > -20 %	≤ -20 %
Zuordnung im Evaluierungsmodell	Fall 2, Fall 3	Fall 1, Fall 4, Fall 5	Ist-Zustand		

Für eine detailliertere Bewertung können die einzelnen Tätigkeiten aufgeteilt werden und z. B. mithilfe des General Assembly Task Model (GATM) die Task Completion

Time (TCT) von Funk et al. (2015) ermitteln. Das GATM basiert auf der Methods Time Measurement (MTM) mit den fünf Grundbewegungen „Hinlangen“, „Greifen“, „Bringen“, „Fügen“, „Loslassen“ (Bokranz & Landau, 2006). Die ausgeführten Tätigkeiten (Tasks) werden in vier standardisierte Phasen unterteilt und die jeweiligen Zeiten ermittelt. Die vier Phasen sind: (1) Lokalisieren des Bauteils (locate part), (2) Aufnehmen (pick), (3) Lokalisieren der Montageposition (locate position) und (4) Montieren (assemble x).

Aus der Auswertung der einzelnen Phasen können Rückschlüsse auf Verständlichkeit und Qualität der Arbeitsanweisungen gezogen und gezielte Prozessverbesserungen angestoßen werden. Daher eignet sich diese Methode besser für eine formative Evaluierung. Für eine abschließende Evaluierung von Systemen ist die Methode aufwendig und wird daher nicht im Detail angewendet. Für die Auswertung kann das Open-Source-Video-Annotation-Programm „ANVIL2“ verwendet werden (Pimminger et al., 2020).

### Qualität

Die Qualität wird über den Qualitätsgrad ( $G_{Qual}$ ) laut Formel 9 (*Qualitätsgrad* =  $\frac{Gutmenge}{Gesamtmenge}$ ) aus der durchgeführten Studie und der darin ausgewerteten Daten ermittelt. Der fertig bestückte und verkabelte Schaltschrank wird nach den Qualitätskriterien (1) Ausrichtung der Bauteile, (2) Anordnung der Bauteile und Kabel, (3) fest verschraubt/verkabelt und (4) Vollständigkeit auf Qualität geprüft. Die Studienergebnisse werden in Tabelle 42 und grafisch in Abbildung 39 dargestellt.

**Tabelle 42: Auswertung des Qualitätsgrads, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Gutmenge ( $M_{Gut}$ )	11	19	15	14	24	20
Ausschussmenge ( $M_{Ausschuss}$ )	6	6	1	5	3	4
Gesamtmenge ( $M_{Gesamt}$ )	17	25	16	19	27	24
<b><math>G_{Qual}</math> (<math>M_{Gut}/M_{Gesamt}</math>)</b>	<b>65 %</b>	<b>76 %</b>	<b>94 %</b>	<b>74 %</b>	<b>89 %</b>	<b>83 %</b>

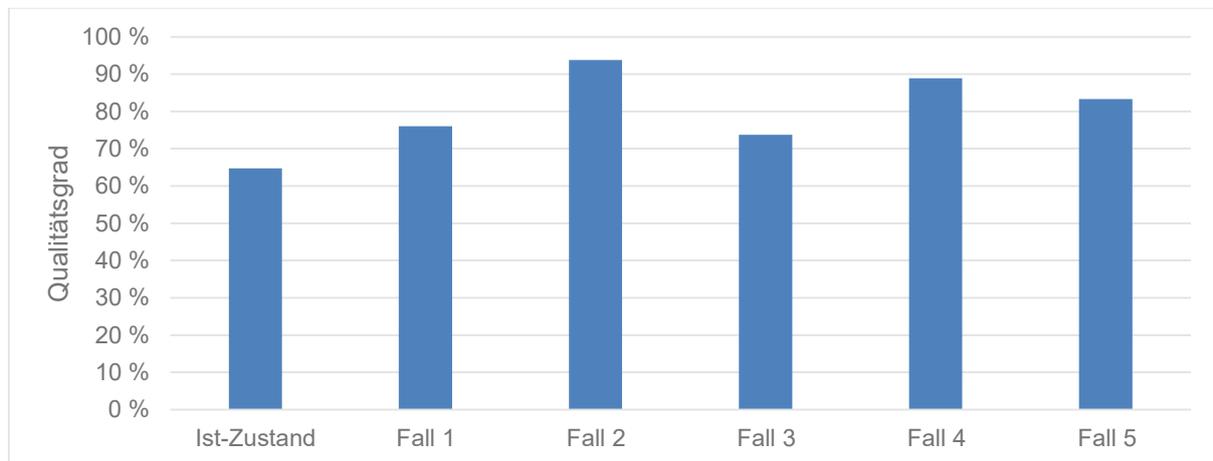


Abbildung 39: Grafische Darstellung des Qualitätsgrads, eigene Darstellung

Fall 2 weist die höchste, der Ist-Zustand die schlechteste Qualität auf. Die Testfälle werden in Tabelle 43 in das Evaluierungsmodell eingeordnet.

Tabelle 43: Qualitätsgrad – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung

	-2	-1	0	+1	+2
Qualität	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
– Qualitätsgrad (%)	< 50 %	≥ 50 % < 60 %	≥ 60 % < 80 %	≥ 80 % < 90 %	≥ 90 %
Zuordnung im Evaluierungsmodell		Ist-Zustand	Fall 1, Fall 3	Fall 4, Fall 5	Fall 2

### 6.4.3 Dimension Lernen und entwickeln

Für die Bewertung der Qualifikation wird die Einteilung nach Mark et al. (2020) verwendet. Je nach System werden unterschiedliche Fähigkeiten und Fertigkeiten unterstützt. Ein Abgleich mit den Anforderungen an den Arbeitsplatz, inwiefern das System die jeweiligen Anforderungen unterstützt, wird durchgeführt. Zur Bewertung werden die Zeilen 13 (Exoskelett), 23 (Cobot), 27 (Tablet) und 33 (In-situ-Projektion) von Tabelle 71 in Kapitel 5.3.1 verwendet. In Tabelle 44 werden die verwendeten Assistenzsysteme und die unterstützten Fertigkeiten und Fähigkeiten durch das System mit „+“ markiert. Die Zuteilung erfolgt auf Basis der Zuordnung für industrielle Assistenzsysteme von Mark et al. (2020). Die Anforderung an die Fähigkeit oder Fertigkeit verringert sich durch den Einsatz von Assistenzsystemen, beispielsweise:

- Ein passives Exoskelett und ein Cobot unterstützen die Kraft und Ausdauer der Person im Prozess, daher ist eine geringere Kraft und Ausdauer für die Ausübung der Tätigkeit notwendig.
- Durch den Einsatz eines digitalen Werkerführungssystems oder eines Projektionssystems wird die Anforderung an das Hörvermögen reduziert, da die Informationen visuell vermittelt werden können.

Die entlastenden Fertigkeiten und Fähigkeiten werden den verwendeten Assistenzsystemen nach Mark et al. (2020) in Tabelle 44 zugeordnet. Die

Anforderungen an den Prozess werden von der evaluierenden Person festgelegt. Als Beispiel werden im praktischen Anwendungsfall zehn Anforderungen ausgewählt und in Tabelle 44 dargestellt. Die nicht zu entlastenden Fertigkeiten und Fähigkeiten sind ausgegraut und werden in die Summe nicht eingerechnet.

**Tabelle 44: Zuordnung der entlasteten Fertigkeiten und Fähigkeiten, angelehnt an Mark et al. (2020)**

	Digitales Werkerführungssystem (Tablet)	In-situ-Projektion	Passives Exoskelett	Cobot
Kraft und Ausdauer			1	1
Hörvermögen	(1)	(1)		
Beweglichkeit/Ergonomie			1	1
Sehvermögen	1			
Lernfähigkeit	1	1		
Merkfähigkeit		(1)		
Reaktionsfähigkeit		(1)		
Unabhängigkeit	1	1		
Kommunikationsfähigkeit	(1)			
Logisches Denken		(1)		
Mathematisches Wissen	(1)			
Aufmerksamkeit	1	1		
Flexibilität	(1)			
Kreativität	(1)	(1)		(1)
Genauigkeit	1			
Physisch sichere Arbeit			1	1
Physische Leistungsfähigkeit			1	1
Arbeitsgeschwindigkeit			1	
<b>Summe</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>4</b>

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse aus Tabelle 44 für alle Testfälle in Tabelle 45 übertragen. Unterstützen zwei oder mehrere Assistenzsysteme die gleiche Entlastung, wird sie in der Tabelle mit „X“ markiert, um eine Doppelzählung zu vermeiden.

**Tabelle 45: Anzahl der unterstützenden Qualifikation nach Fällen, eigene Darstellung**

Assistenzsystem	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Digitales Assistenzsystem	5		5	5	5	
Projektionssystem		3				3
Exoskelett			5		5	5
Cobot				4	X	X
<b>Gesamt</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>8</b>

Legende: X... Anforderung wird von einem anderen System abgedeckt und nicht doppelt gezählt

Die Einordnung erfolgt auf einer Skala von 0 bis 10, wobei der höchste Wert abhängig von der Anzahl der Anforderungen ist. Die Anzahl der Anforderungen dividiert durch fünf (= Anzahl der Ordinalskala des Evaluierungsmodells) ergibt die Verteilung auf der Skala in Tabelle 46. Die Ergebnisse von Tabelle 45 werden in Tabelle 46 in das Evaluierungsmodell eingeordnet.

Die beiden Fälle ohne physische Entlastungssysteme (Ist-Zustand und Fall 1) schneiden in diesem Kriterium schlechter ab, da nur Fertigkeiten und Fähigkeiten im kognitiven Bereich unterstützt werden. Speziell die Unterstützung für Kraft, Ausdauer, physische Leistungsfähigkeit und Beweglichkeit wird von physischen Assistenzsystemen ermöglicht. Da in allen Fällen kognitive Systeme im Einsatz sind und in Fall 2 bis 5 zusätzlich physische Assistenzsysteme, sind diese im Kriterium Qualifikation besser bewertet.

**Tabelle 46: Qualifikations-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Qualifikation (0 bis 10)	Erfüllt die Anforderungen nicht	Erfüllt die Anforderungen kaum	Erfüllt die Anforderungen teils	Erfüllt die Anforderungen größtenteils	Erfüllt die Anforderungen voll
	≤ 2	≥ 2 < 4	≥ 4 < 6	≥ 6 < 8	≥ 8
Zuordnung im Evaluierungsmodell		Fall 1	Ist-Zustand		Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5

## 6.4.4 Dimension Nutzer:innen

### Ergonomie

Die Ergonomie der einzelnen Fälle wird mit der RULA-Methode bewertet und über die aufgenommenen Videos ausgewertet. Der RULA-Arbeitsbogen (BGIA, 2007) findet sich im Anhang 8.2.1. Die Auswertung wird in Tabelle 47 bis Tabelle 50 dargestellt.

**Tabelle 47: RULA-Score A – Analyse der Arm- und Handgelenkhaltung, eigene Darstellung**

A. Analyse der Arm- und Handgelenkhaltung	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Notizen
1	4	4	3	4	3	3	Exoskelett Anwendung reduziert um -1 (1a Punkt 3)
2	1	1	1	1	1	1	Haltung des Unterarms bei allen Fällen unverändert
3	2	2	2	2	2	2	Handgelenke bei allen Fällen unverändert
4	1	1	1	1	1	1	Umwendungswert bei allen Fällen unverändert

A. Analyse der Arm- und Handgelenkhaltung	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Notizen
5 Haltungswert für Arm und Handgelenk	4	4	4	4	4	4	
Wert für Muskularbeit Arme	1	1	0	1	0	0	Statische Haltung der Arme für länger als 1 Min. ohne Exoskelett
Wert für Last	0	0	0	0	0	0	Last bei allen Fällen kleiner als 2 kg
<b>A. Gesamtwert für Arm und Handgelenk</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	

Tabelle 48: RULA-Score B – Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung, eigene Darstellung

B. Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Notizen
6 Halswert	4	3	4	3	2	3	Bei Tableteinsatz Neigung nach unten, bei Projektion gerade stehend
7 Oberkörperwert	2	1	2	2	1	2	Cobot gibt Bauteile auf Projektionshöhe
8 Beinwert	1	1	1	1	1	1	Stand unverändert
9 Haltungswert für Hals, Oberkörper, Beine	5	3	5	3	2	3	
Wert für Muskularbeit Hals/Oberkörper	0	0	0	0	0	0	Keine statischen Körperhaltungen >1 Min.
Wert für Last	0	0	0	0	0	0	Last bei allen Fällen kleiner als 2 kg
<b>B. Gesamtwert für Hals, Oberkörper, Beine</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	

Tabelle 49: RULA-Tabelle zur Ermittlung der Gesamtpunktzahl (BGIA, 2007)

C. Gesamtpunktzahl A/B	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

**Tabelle 50: RULA-Score C – Gesamtpunktzahl der Testfälle, eigene Darstellung**

C. Gesamtpunktzahl	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
RULA Score	6	4	5	4	3	3

Aufgrund der Überkopfarbeit und der Drehbewegung ist die Ergonomie aller Fälle zwischen sehr schlecht und mittel bewertet. Die Fälle mit Anwendung von Exoskeletten verringern den RULA-Score durch die Unterstützung der Überkopftätigkeiten. Bei Anwendung des Projektors wird die Drehbewegung reduziert, daher sind diese Fälle besser bewertet. Dennoch ist die Ergonomie in der Gesamtbewertung mittel und wird in Tabelle 51 im Evaluierungsmodell eingeordnet.

Da die Auswirkungen von Exoskeletten in standardisierten Bewertungsmethoden kaum abgebildet sind, wurde zusätzlich zur RULA-Bewertung eine subjektive Einschätzung der Proband:innen abgefragt. Die Frage dazu lautete: „Wie viele Minuten können Sie sich vorstellen, in dem Prozess zu arbeiten?“ (1 – unter 5 Minuten, 2 – zwischen 5 und 15 Minuten, 3 – zwischen 15 und 30 Minuten, 4 – zwischen 30 und 60 Minuten, 5 – über 60 Minuten)

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Durchgehend ohne Pause – Subjektive Einschätzung (1 bis 5)	3,04	3,46	3,97	3,74	4,16	3,68
Pro Tag mit Pausen – Subjektive Einschätzung (1 bis 5)	4,00	4,75	4,74	4,74	4,96	4,44

Die subjektive Einschätzung bestätigt den am schlechtesten bewerteten Fall, den Ist-Zustand. Fall 5 wird etwas schlechter als Fall 1 bis 4 bewertet. Die übrigen Fälle liegen nahe beieinander.

**Tabelle 51: RULA-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Ergonomie – RULA (7 bis 1)	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
	6 bis 7	5	3 bis 4	2	1
Zuordnung im Evaluierungsmodell	Ist-Zustand	Fall 2	Fall 1, Fall 3, Fall 4, Fall 5		

## Arbeitsbelastung

Die Arbeitsbelastung wird mittels Fragebogen mit dem NASA-RTLX abgefragt. Die Auswertung ist in Tabelle 52 ersichtlich. Je niedriger der Wert, desto geringer die Arbeitsbelastung.

**Tabelle 52: NASA-RTLX-Score der Testfälle, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
NASA-RTLX Score	26,17	25,17	25,36	21,39	22,83	24,85

Im Fall 3 (Digitales Assistenzsystem und Cobot) wird die Arbeitsbelastung am geringsten eingeschätzt, wobei die Unterschiede eher gering sind. Die NASA-RTLX-Score-Einordnung in das Evaluierungsmodell wird in Tabelle 53 gezeigt.

**Tabelle 53: NASA-RTLX-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Arbeitsbelastung – NASA-RTLX (0 bis 100)	sehr hoch ≥ 80	hoch ≥ 60 < 80	mittel ≥ 40 < 60	gering ≥ 20 < 40	sehr gering < 20
Zuordnung im Evaluierungsmodell				Ist-Zustand, Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5	

### Gebrauchstauglichkeit (Usability)

Die Usability wurde mithilfe der System Usability Scale (SUS) gemessen. Die Auswertung der einzelnen Assistenzsysteme zeigt Tabelle 54. Dabei schneidet das digitale Assistenzsystem am besten ab, der Cobot am schlechtesten. Die Spanne zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert ist allerdings gering.

**Tabelle 54: SUS-Score der einzelnen Assistenzsysteme, eigene Darstellung**

Assistenzsystem	SUS-Score
Digitales Assistenzsystem (Tablet)	84,8
Projektionssystem	82,9
Passives Exoskelett	82,3
Cobot	81,8

Die Auswertung der Testfälle ist in Tabelle 55 und grafisch in Abbildung 40 ersichtlich. In diesem Fall wird der Ist-Zustand besser bewertet. Die Standardabweichung beträgt bei allen Fällen zwischen 11 und 19 Prozent. Daraus ergibt sich eine relativ hohe Streuung der Antworten, was auf unterschiedliche Einschätzungen der Testpersonen zurückzuführen ist.

Tabelle 55: SUS-Score der Testfälle, eigene Darstellung

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
<b>SUS-Score</b>	<b>86,9</b>	<b>83,1</b>	<b>83,4</b>	<b>82,8</b>	<b>82,5</b>	<b>80,4</b>
Standardabweichung	9,7	14,7	13,6	14,3	12,9	15,0
95-Prozent-Konfidenzintervall	3,8	5,8	3,2	5,1	2,9	3,2
Obere Grenze Konfidenzintervall	88,8	86,0	85,0	85,4	84,0	82,0
Untere Grenze Konfidenzintervall	85,0	80,2	81,8	80,3	81,1	78,8

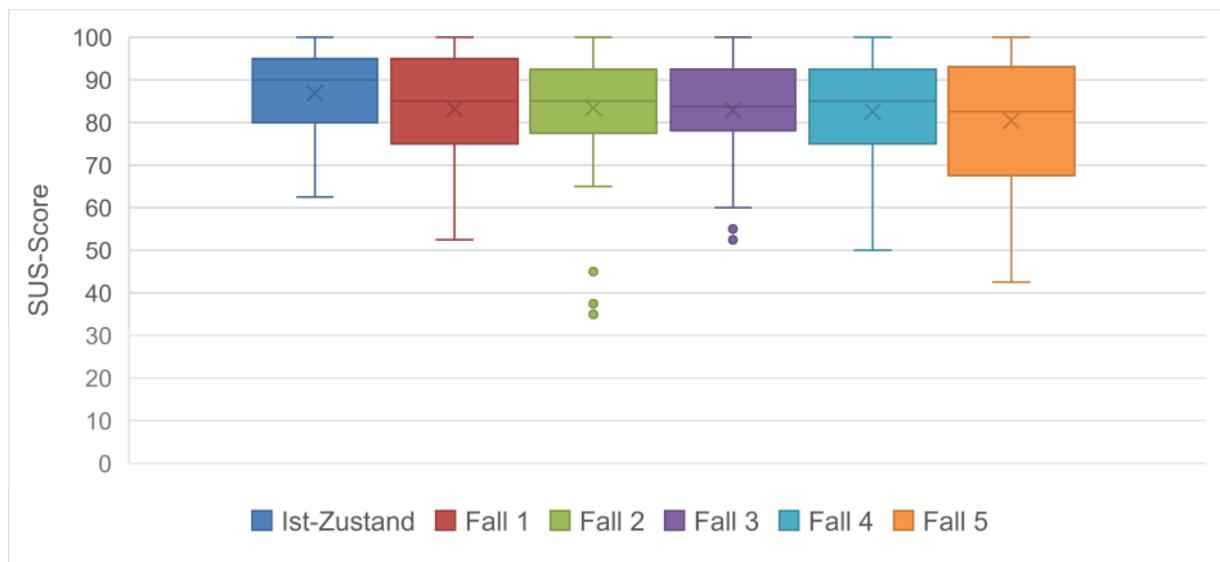


Abbildung 40: SUS-Score im Boxplot Diagramm, eigene Darstellung

Die SUS-Score-Einordnung in das Evaluierungsmodell wird in Tabelle 56 gezeigt. Dabei ist einzig der Ist-Zustand im besten bewerteten Feld, alle anderen Fälle sind mit einer guten Usability-Score bewertet.

Tabelle 56: SUS-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung

	-2	-1	0	+1	+2
Gebrauchstauglichkeit	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
– SUS-Score (0 bis 100)	< 39	≥ 39 < 52	≥ 52 < 73	≥ 73 < 85	≥ 85
Zuordnung im Evaluierungsmodell				Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5	Ist-Zustand

## Nutzer:innenakzeptanz

Für die Bewertung der Nutzer:innenakzeptanz wird das multidimensionale Konzept der Technologiekompatibilität von Karahanna et al. (2006) verwendet. Die Technologiekompatibilität basiert auf TAM. Folgende Konstrukte werden in dieser Studie betrachtet: Kompatibilität mit bisheriger Technologieerfahrung, mit den eigenen

Werten sowie mit der bevorzugten Methode zur Arbeitsausführung. Die Ergebnisse der Auswertung der Nutzer:innenakzeptanz sind in Tabelle 57 eingetragen. Die Ergebnisse der einzelnen Fälle zeigen nur sehr geringe Unterschiede in der Nutzer:innenakzeptanz.

**Tabelle 57: Nutzer:innenakzeptanz-Score der Testfälle, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Nutzer:innenakzeptanz-Score	72	68	60	70	67	62

Die Ergebnisse der Nutzer:innenakzeptanz liegen bei allen Fällen nahe beieinander und fallen somit im Evaluierungsmodell alle in Spalte „+1“. Ein Grund dafür ist, dass der Prozess der tatsächlichen Messung der Nutzer:innenakzeptanz sehr kurz ausfällt. Hierbei kommt es zu keinen großen Unterschieden in der Wahrnehmung des Prozesses. Vor allem in Hinblick auf Werte und Technologiekompatibilität unterscheiden sich die Ergebnisse in den Prozessen kaum. Die wahrgenommene Nutzbarkeit und wahrgenommene Einfachheit der Anwendung unterscheiden sich in den einzelnen Fällen ebenfalls kaum. Da keine tatsächlichen Anwender:innen im Fallbeispiel befragt werden, sind die Ergebnisse der Nutzer:innenakzeptanz als Tendenzen interpretierbar. Die Ergebnisse werden in Tabelle 58 dem Evaluierungsmodell zugeordnet.

**Tabelle 58: Nutzer:innenakzeptanz-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Nutzer:innenakzeptanz – Technology Acceptance (0 bis 100)	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
	< 20	≥ 20 < 40	≥ 40 < 60	≥ 60 < 80	≥ 80
Zuordnung im Evaluierungsmodell				Ist-Zustand, Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5	

## 6.4.5 Dimension Technologie

### Technology Readiness Level (TRL)

Für die Auswertung nach dem Technology Readiness Level (TRL) wurden Daten aus der Literatur (vgl. Tabelle 21) in Kombination mit einer eigenen Einschätzung verwendet und die unterschiedlichen Systeme in Tabelle 59 bewertet.

**Tabelle 59: Technology Readiness Level (TRL) der eingesetzten Assistenzsysteme, eigene Darstellung**

	Technology Readiness Level (TRL)
Digitales Assistenzsystem (Tablet)	9
Projektionssystem	7
Passives Exoskelett	8
Cobot	8

Die einzelnen Fälle werden jeweils mit dem am schlechtesten vorhandenen TRL der verwendeten Assistenzsysteme bewertet. Daraus ergibt sich die beste Bewertung des Ist-Zustands, da in diesem Fall nur ein Tablet zur Anwendung kommt, welches den höchsten TRL aufweist.

**Tabelle 60: Auswertung TRL der Testfälle, eigene Darstellung**

	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Digitales Assistenzsystem	X		X	X	X	
Projektionssystem		X				X
Passives Exoskelett			X		X	X
Cobot				X	X	X
TRL	9	7	8	8	8	7

Der festgelegte TRL ist in Tabelle 61 im Evaluierungsmodell zugeordnet.

**Tabelle 61: TRL Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung**

	-2	-1	0	+1	+2
Reifegrad der Technologie	sehr gering	gering	mittel	gut	sehr gut
– Technology Readiness Level (1 bis 9)	TRL < 6	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
Zuordnung im Evaluierungsmodell			Fall 1, Fall 5	Fall 2, Fall 3, Fall 4	Ist-Zustand

## 6.5 Zusammenführung der Ergebnisse und Vergleich der Testfälle

### 6.5.1 Einordnung aller Fälle in das Evaluierungsmodell

Die Ergebnisse der Fälle werden in Tabelle 62 in das Evaluierungsmodell eingeordnet.

Tabelle 62: Einordnung aller Fälle in das Evaluierungsmodell, eigene Darstellung

	-2	-1	0	+1	+2
Wirtschaftlichkeit – Amortisationszeit (Jahren)	sehr gering	gering	mäßig	gut	sehr gut
	> 5 Jahre	> 2 und ≤ 5 Jahre	> 1 und ≤ 2 Jahre	> 0,25 und ≤ 1 Jahre	≤ 0,25 Jahre
				Fall 3, Fall 4, Fall 5	Fall 1, Fall 2
Durchlaufzeit – Veränderung der DLZ (%)	sehr verlängert	verlängert	unverändert	verkürzt	sehr verkürzt
	> +25 %	≤ +25 % > +5 %	≤ 5 % > -5 %	≤ -5 % > -25 %	≤ -25 %
			Ist-Zustand, Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5		
Produktivität – Veränderung der Produktivität (%)	sehr verschlechtert	verschlechtert	unverändert	verbessert	sehr verbessert
	> +20 %	≤ +20 % > 0 %	≤ 0 %	< 0 % > -20 %	≤ -20 %
	Fall 2, Fall 3	Fall 1, Fall 4, Fall 5	Ist-Zustand		
Qualität – Qualitätsgrad (%)	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
	< 50 %	≥ 50 % < 60 %	≥ 60 % < 80 %	≥ 80 % < 90 %	≥ 90 %
		Ist-Zustand	Fall 1, Fall 3	Fall 4, Fall 5	Fall 2
Qualifikation (0 bis 10)	Erfüllt die Anforderun- gen nicht	Erfüllt die Anforderun- gen kaum	Erfüllt die Anforderun- gen teils	Erfüllt die Anforderun- gen größtenteils	Erfüllt die Anforderun- gen voll
	≤ 2	≥ 2 < 4	≥ 4 < 6	≥ 6 < 8	≥ 8
		Fall 1	Ist-Zustand		Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5
Ergonomie – RULA (0 bis 7)	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
	6 bis 7	5	3 bis 4	2	1
	Ist-Zustand	Fall 2	Fall 1, Fall 3, Fall 4, Fall 5		
Arbeitsbelastung – NASA-RTLX (0 bis 100)	sehr hoch	hoch	mittel	gering	sehr gering
	≥ 80	≥ 60 < 80	≥ 40 < 60	≥ 20 < 40	< 20
				Ist-Zustand, Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5	

	-2	-1	0	+1	+2
Gebrauchstauglichkeit – SUS Score (0 bis 100)	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
	< 39	≥ 39 < 52	≥ 52 < 73	≥ 73 < 85	≥ 85
				Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5	Ist-Zustand
Nutzer:innenakzeptanz – Technology Acceptance (0 bis 100)	sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut
	< 20	≥ 20 < 40	≥ 40 < 60	≥ 60 < 80	≥ 80
				Ist-Zustand, Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 4, Fall 5	
Reifegrad der Technologie – Technology Readiness Level (1 bis 9)	sehr gering	gering	mittel	gut	sehr gut
	TRL < 6	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
			Fall 1, Fall 5	Fall 2, Fall 3, Fall 4	Ist-Zustand

## 6.5.2 Gewichtung der Dimensionen und Kriterien

Aufgrund unterschiedlicher Ziele, die mit der Einführung von Assistenzsystemen abgedeckt werden, erfolgt die Gewichtung der Dimensionen und Kriterien (Tabelle 63). Die Gewichtung wird individuell festgelegt und erfolgt zu Beginn jeder Evaluierung. Wird keine Gewichtung gewählt, folgt eine ausgewogene Gewichtung der Dimensionen, wie in Kapitel 5.6.1 beschrieben. Tabelle 63 zeigt die von der Forscherin festgelegte Gewichtung für das Fallbeispiel.

**Tabelle 63: Gewichtung der Dimensionen und der Kriterien für das Fallbeispiel, eigene Darstellung**

Dimension	Gewichtung Dimension	Kriterien	Gewichtung Kriterium
Kosten	19,20 %	Wirtschaftlichkeit	19,20 %
Prozess	40,05 %	Durchlaufzeit	2,66 %
		Produktivität	13,96 %
		Qualität	23,43 %
Lernen und entwickeln	6,89 %	Qualifikation	6,89 %
Nutzer:innen	30,94 %	Ergonomie	10,52 %
		Arbeitsbelastung	5,61 %
		Nutzer:innenakzeptanz	11,92 %
		Usability	2,89 %
Technologie	2,92 %	Readiness der Technologie	2,92 %

### 6.5.3 Gewichtete Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in Tabelle 64 den einzelnen Kriterien (Kr) mit der festgelegten Gewichtung (G) zugeordnet. Für jeden Testfall wird der absolute Wert auf der Skala ( $S_n$ ) von  $-2$  bis  $+2$  und der gewichtete Wert ( $G_n$ ) angegeben. Die detaillierte Gewichtung findet sich im Anhang 8.6. Die einzelnen Fälle werden relativ zueinander verglichen. Die Farblogik zeigt in den Spalten  $S_n$  von  $+2$  in Grün über  $0$  in Gelb bis hin zu  $-2$  in Rot an. Die Abstufungen hellgrün, gelb und orange zeigen die dazwischenliegenden Fälle an. Analog ist die Farblogik in den Spalten  $G_n$ .

**Tabelle 64: Gewichtete Auswertung der Ergebnisse, eigene Darstellung**

Kr	G	S <sub>Ist</sub>	G <sub>Ist</sub>	S <sub>Fall1</sub>	G <sub>Fall1</sub>	S <sub>Fall2</sub>	G <sub>Fall2</sub>	S <sub>Fall3</sub>	G <sub>Fall3</sub>	S <sub>Fall4</sub>	G <sub>Fall4</sub>	S <sub>Fall5</sub>	G <sub>Fall5</sub>
WK	19,20 %	0	0,00	0	0,00	1	0,19	-2	-0,38	-1	-0,19	-1	-0,19
DZ	2,66 %	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
PR	13,96 %	0	0,00	-1	-0,14	-2	-0,28	-2	-0,28	-1	-0,14	-1	-0,14
QT	23,43 %	-1	-0,23	0	0,00	2	0,47	0	0,00	1	0,23	1	0,23
QK	6,89 %	0	0,00	-1	-0,07	2	0,14	2	0,14	2	0,14	2	0,14
ER	10,52 %	-2	-0,21	0	0,00	-1	-0,11	0	0,00	0	0,00	0	0,00
AB	5,61 %	1	0,06	1	0,06	1	0,06	1	0,06	1	0,06	1	0,06
GT	11,92 %	2	0,24	1	0,12	1	0,12	1	0,12	1	0,12	1	0,12
NA	2,89 %	1	0,03	1	0,03	1	0,03	1	0,03	1	0,03	1	0,03
RG	2,92 %	2	0,06	0	0,00	1	0,03	1	0,03	1	0,03	0	0,00
	<b>100 %</b>	<b>3</b>	<b>-0,06</b>	<b>1</b>	<b>0,00</b>	<b>6</b>	<b>0,65</b>	<b>2</b>	<b>-0,29</b>	<b>5</b>	<b>0,27</b>	<b>4</b>	<b>0,24</b>

Die gewichteten Ergebnisse sind in den Dimensionen zusammengefasst und in den Spinnennetzdiagrammen in Abbildung 41 einzeln dargestellt.

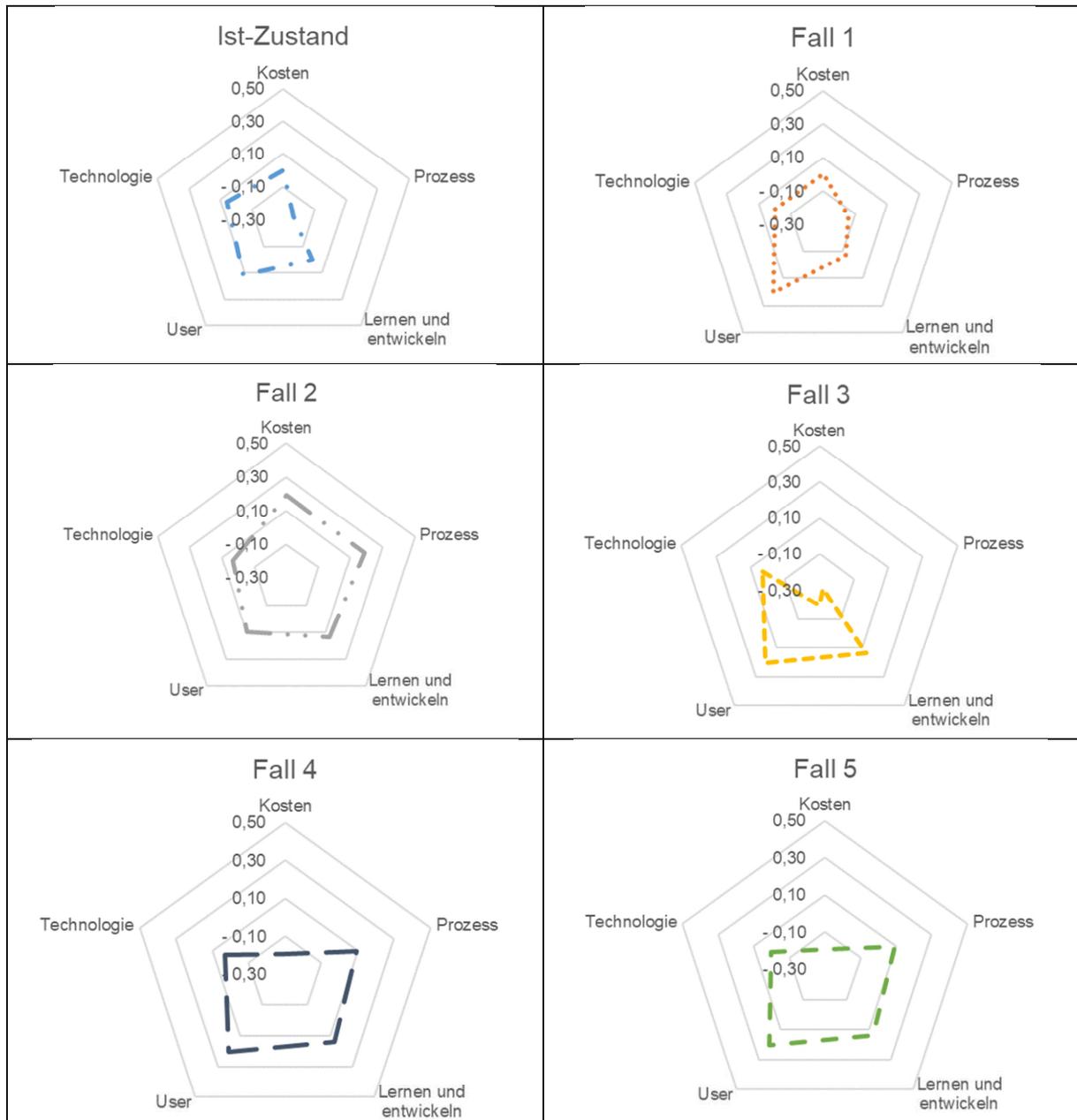


Abbildung 41: Einzelauswertungen der Dimensionen mit Gewichtung der einzelnen Testfälle, eigene Darstellung

Die Bewertungen im Vergleich aller Fälle ist in Abbildung 42 in einem Spinnennetzdiagramm dargestellt.

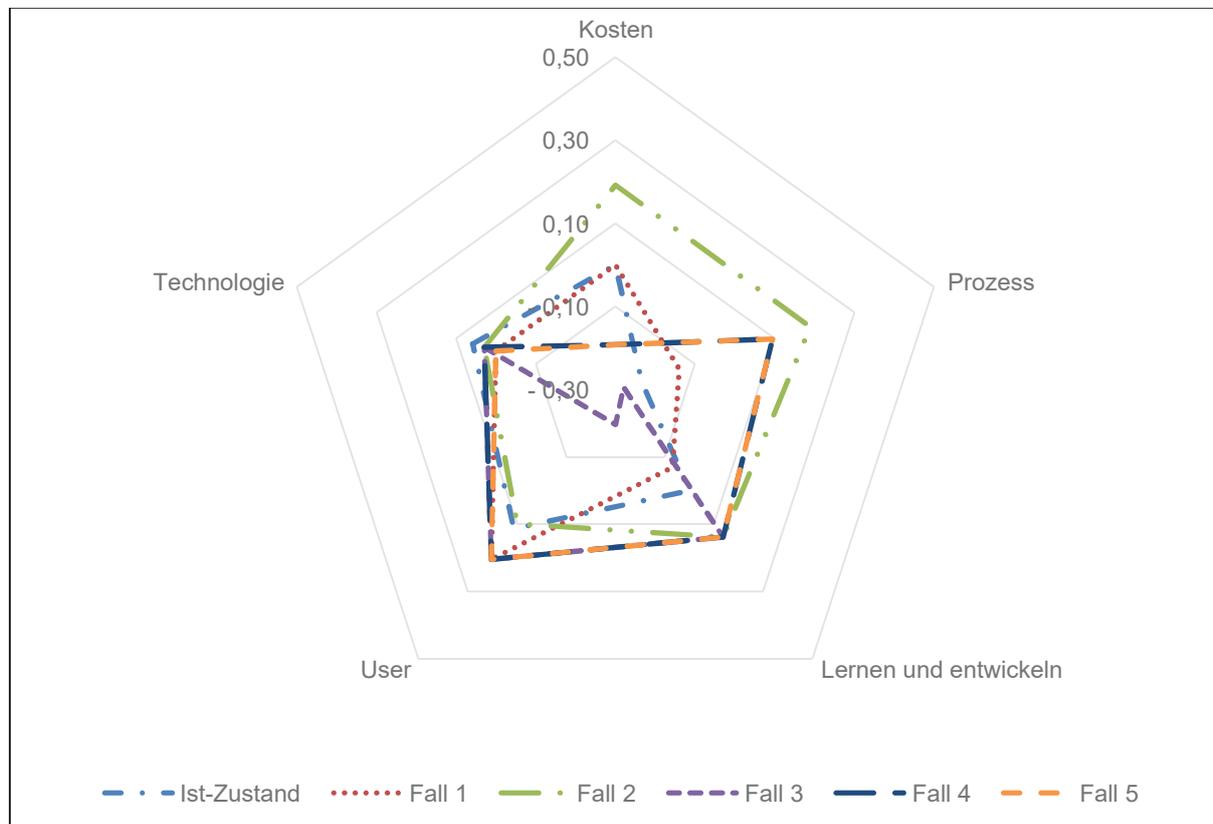


Abbildung 42: Vergleich der Dimensionen aller Fälle mit Gewichtung, eigene Darstellung

### 6.5.4 Interpretation der Ergebnisse aus der Fallstudie

Auf Basis der multikriteriellen Evaluierung wird Fall 2 (digitales Assistenzsystem, Exoskelett) als beste Variante erachtet. Der Ist-Zustand wird vor allem bei der Qualität, Qualifikation und Ergonomie schlechter bewertet als die Fälle mit Einsatz der physischen Assistenzsysteme. In der Gebrauchstauglichkeit wird der Ist-Zustand sehr gut bewertet, da nur das Tablet eingesetzt wird, welches (wie im TRL ersichtlich) eine ausgereifte Technologie besitzt und bereits anwendungsfreundlich gestaltet ist. Die Prozesse mit dem Exoskelett, der Projektion und dem Cobot wurden in der Gebrauchstauglichkeit etwas weniger gut als der Ist-Zustand bewertet. In der Nutzer:innenakzeptanz und Arbeitsbelastung gibt es zwischen den betrachteten Fällen kaum Unterschiede. Daraus lässt sich schließen, dass die Gestaltung des Arbeitsplatzes aus Anwender:innensicht für alle Fälle gleichermaßen in Ordnung und akzeptabel ist, was in der kurzen Anwendungsdauer von ca. 5 bis 25 Minuten begründet ist. Die Überkopfarbeit bei einmaliger Anwendung ist für diese Dauer allgemein annehmbar und die Gebrauchstauglichkeit der Assistenzsysteme wird grob eingeschätzt. Die Ergonomie schneidet in den Fällen 1, 3, 4 und 5 besser ab als im Ist-Zustand und in Fall 2. Das lässt sich durch den Einsatz des Exoskeletts und des Cobots bzw. durch die verminderte Drehung bei der Projektion direkt ins Sichtfeld begründen. Aufgrund der Überkopfarbeit zeigen sich die Fälle mit Exoskelett ergonomisch besser geeignet für den Prozess als ohne deren Einsatz. Bei der

Prozessgestaltung sollte dennoch Überkopfarbeit vermieden werden, wenn dies prozesstechnisch möglich ist.

Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Fälle begründet sich hauptsächlich in den Investitionskosten und den Einsparungen durch Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen. Dabei werden Opportunitätskosten vernachlässigt und Kosten auf Basis von Statistiken errechnet, da es sich um ein Fallbeispiel in einer Laborumgebung handelt. Die Produktivität ist im Ist-Zustand am höchsten. Ein möglicher Grund dafür ist die zufällige Zuteilung der Testpersonen beim Ist-Zustand, die teilweise bereits einen anderen Fall probiert haben und daher schneller in der Bestückung waren. Um diese Fehlerquelle zu verringern, muss die Stichprobe erhöht werden. Für die Anwendung des Evaluierungsmodells ist das allerdings nebensächlich, da der Vergleich der Fälle dennoch durchgeführt werden kann.

## 6.6 Validierung der Evaluierung

### 6.6.1 Limitationen der Anwendbarkeit des Evaluierungsmodells

Das Fallbeispiel zeigt die Anwendbarkeit des Evaluierungsmodells auf einen Prozess mit physischen und kognitiven Assistenzsystemen. Ein Vergleich der Limitationen in der Anwendung der einzelnen Kriterien sowie notwendige Änderungen für die Anwendung in der Industrie sind in Tabelle 65 dargestellt.

**Tabelle 65: Limitationen in der Anwendung der Kriterien und notwendige Änderungen für die Anwendung in der Industrie, eigene Darstellung**

Kriterium	Limitationen in der Anwendung	Änderungen für die Anwendung in der Praxis
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Annahmen unter Laborbedingungen</li> <li>Vernachlässigung von Opportunitätskosten und indirekten Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit tatsächlich anfallenden Kosten kalkulieren</li> </ul>
Durchlaufzeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nur relevant, wenn das Assistenzsystem die Durchlaufzeit beeinflusst</li> </ul>	/
Produktivität	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mehr Personen für eine bessere statistische Aussagekraft</li> <li>Ungeübte Personen/Studierende</li> <li>Unterschiedliche Vorerfahrung der Testpersonen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tatsächliche Nutzer:innen mit notwendiger Vorerfahrung in die Tests einbeziehen</li> </ul>
Qualität	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mehr Personen für eine bessere statistische Aussagekraft</li> <li>Ungeübte Personen/Studierende</li> <li>Unterschiedliche Vorerfahrung der Testpersonen</li> <li>Festlegung und Kategorisierung von Fehlern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tatsächliche Nutzer:innen mit notwendiger Vorerfahrung in die Tests einbeziehen</li> </ul>
Qualifikation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abgleich mit Anforderungen und sich veränderten Qualifikationen</li> <li>Theoretische Anwendung auf der Basis von Literaturlauswertungen</li> <li>Unter Laborbedingungen ist die Qualifikation kaum realistisch bewertbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abgleich mit Anforderungen im Anforderungsprofil der Nutzer:innen</li> </ul>

Kriterium	Limitationen in der Anwendung	Änderungen für die Anwendung in der Praxis
Ergonomie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ergonomiebewertungsmethode wird auf den gesamten Prozess angewendet. Dadurch sind keine Spitzenlasten bei einzelnen Prozessschritten erkennbar und müssen separat analysiert werden.</li> <li>Exoskelette sind in den Standardmethoden kaum bis gar nicht abgebildet.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erstellung von Simulationen, speziell mit Exoskeletten</li> </ul>
Arbeitsbelastung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr kurzer Prozess für die Messung der Arbeitsbelastung</li> <li>Subjektive Einschätzung aufgrund der eingesetzten Methode</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusätzlicher Einsatz von objektiven Bewertungsmethoden, z. B. die Messung von Herz- und Atemfrequenz oder Blinzelrate</li> </ul>
Gebrauchstauglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausfüllen des gleichen Fragebogens für jedes Assistenzsystem, somit teilweise bis zu drei Mal in Folge. Daraus entstehen Unachtsamkeiten und Ungenauigkeiten bei den Ausfüllenden.</li> <li>Eingeschränkte Aussagekraft durch mehrmaliges Ausfüllen</li> </ul>	/
Nutzer:innenakzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr kurzer Prozess für die Messung der Nutzer:innenakzeptanz</li> <li>Keine tatsächlichen Anwender:innen des Prozesses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durchführung mit tatsächlichen Arbeiter:innen im Schaltschrankbau</li> </ul>
Reifegrad der Technologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Theoretische Anwendung auf Basis von Literaturlauswertungen, nicht direkt bezogen auf die eingesetzten Assistenzsysteme</li> <li>Rasche Veränderung der Technologie</li> </ul>	/

Für eine bessere statistische Aussagekraft sollte eine größere Stichprobe an Personen, die an der Studie teilnehmen, genommen werden. Der Fragebogen ist mit sieben Seiten relativ lang und intensiv. Dabei können Ungenauigkeiten durch Unachtsamkeit beim Ausfüllen entstehen (Theis et al., 2016). Die Testpersonen arbeiten größtenteils im technischen Umfeld, allerdings nicht konkret an der Montage von Schaltschränken. Daraus resultieren Annahmen aufgrund von Laborbedingungen.

Studien zeigen die Unterschiede zwischen den Ergebnissen bei tatsächlichen Anwender:innen und Studierenden. Lovasz-Bukvova et al. (2021) und Terhoeven et al. (2018) führten Studien mit Studierenden und Fachkräften durch, um die Gebrauchstauglichkeit und Arbeitsbelastung von Anwendungen in der AR und VR zu messen. Sie fanden signifikante Unterschiede zwischen Studierenden und Anwender:innen (Lovasz-Bukvova et al., 2021; Terhoeven et al., 2018). Aschenbrenner et al. (2019) vergleichen in einer Studie mit Studierenden und technischen Auszubildenden AR-, papier- und projektionsbasierte Assistenz und berichten von einem Wissensdefizit zwischen Studierenden und Beschäftigten bezüglich valider Evaluationsergebnisse von AR-Anwendungen in der Industrie. Außerdem sind Laborstudien mit einem Spielzeug wie Lego® nur schwer mit realen Anwendungen wie dem Zusammenbau eines Flugzeugflügels zu vergleichen (Pringle et al., 2019). Daher sollten reale Anwendungen für Studien ausgewählt werden (Aschenbrenner et al., 2019).

Aus diesem Grund wird in weiterer Forschung die Studie mit dem identischen Use Case bei einem Unternehmen in der industriellen Schaltschrankmontage durchgeführt (Zigart & Schlund, 2022).

### 6.6.2 Vergleich der Ergebnisse mit Evaluierungsergebnissen im Feldtest

Um die Aussagekraft der Anwendung des Evaluierungsmodells zu erhöhen, wurde zusätzlich zur Studie unter Laborbedingungen mit Studierenden ein Feldtest mit dem Siemens Werk für Kombinationstechnik Chemnitz (WKC) ausgeführt. Weitere 150 Durchläufe wurden mit Facharbeiter:innen anhand des gleichen Use Cases und Evaluierungsmethoden durchgeführt. Wie bereits bei den Studierenden, wurde Fall 2 (digitales Werkerassistenzsystem und Exoskelett) in Summe ebenfalls am besten bewertet. Allerdings zeigen die Evaluierungsergebnisse der einzelnen Kriterien Unterschiede.

Die durchschnittlich benötigten Zeiten waren bei den Facharbeiter:innen um 35 Prozent schneller als bei den Studierenden. Das Qualitätskriterium zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Testgruppen. Die Gebrauchstauglichkeit aller Assistenzsysteme wurde von den Studierenden höher bewertet. Die Wahrnehmung der Ergonomieaspekte durch die Studierenden war bei fünf von sechs Szenarien positiver als bei den Facharbeiter:innen. Die Ergebnisse hinsichtlich der Kompatibilität mit eigenen Werten und Erfahrungen deuten darauf hin, dass alle untersuchten Kombinationen besser zu den Bedürfnissen von Facharbeiter:innen passen als zu denen von Studierenden.

Zusätzlich zu den quantitativen Ergebnissen gaben die Facharbeiter:innen qualitatives Feedback zur Anwendung der Assistenzsysteme. Dieses Feedback wird in Tabelle 66 mit der Anzahl der Nennungen zusammengefasst.

**Tabelle 66: Qualitative Feedback der Facharbeiter:innen, eigene Darstellung**

Assistenzsystem	Qualitatives Feedback				
	Digitales Assistenzsystem	Schlechte Übersicht	Positionierung des Tablets gegenüber der Arbeitsstation		
Anzahl der Nennungen	7	6			
Projektionssystem	Projektion zu langsam	Positioniergenauigkeit	Positionierung des Knopfes zur Interaktion mit der Projektion	Schlechte Sichtbarkeit	Schlechte Übersicht
Anzahl der Nennungen	1	8	4	5	4

Assistenzsystem	Qualitatives Feedback				
Cobot	Cobot-geschwindigkeit zu langsam	Cobot-Integration in Verbindung mit anderen Systemen (einzelnen Weiterklicken jedes Systems)	Cobot-Interaktion nicht feinfühlig genug		
Anzahl der Nennungen	4	8	5		
Exoskelett	Anziehdauer zu lange	Rückenschmerzen	Gegendruck bei der Absenkung der Arme/ Unnatürliche Positionierung der Arme	Abschnürung Blut/ Taubheitsgefühl in den Armen / Reibung an Armen	
Anzahl der Nennungen	1	2	11	4	

Die Studien zeigen die Anwendbarkeit des Evaluierungsmodells und der Kriterien auf kognitive und physische Assistenzsysteme. Zusätzlich wurden Expert:innen aus Industrie und Wissenschaft zur Validierung des Modells befragt. Die Methodik und die Ergebnisse sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

### 6.6.3 Validierung durch Expert:innen – Methodik

Die Arbeit mit Fokusgruppen ist eine qualitative Forschungsmethode, bei der durch die Diskussion und Interaktion von Expert:innen (Hintergrund-)Informationen gegeben werden. Fokusgruppen werden zur Theoriebildung bei neuen Themen, bei denen es kaum empirische Untersuchungen gibt, zur Erforschung von Teams und zur Evaluierung von neu erschaffenen Artefakten eingesetzt. Letztere Methode findet in dieser Dissertation Anwendung. Konkret wird nach dem Prinzip „World Café“ (Brown, 2005) mit strukturierten Fokusgruppen gearbeitet. Das heißt, alle Befragten bekommen die gleichen Fragen in halbstrukturierter Form, die Ergebnisse der Vorpersonen und -gruppen werden jeweils den anderen sichtbar gemacht. Somit entsteht eine gemeinsame Validierungslösung. Die halbstrukturierte Form ermöglicht es, auf die Antworten der einzelnen Personen einzugehen (Kallio et al., 2016; Qu & Dumay, 2011). Das Evaluierungsmodell wird mit Expert:innen aus der Industrie und der Wissenschaft diskutiert. Die Durchläufe werden mittels Audio aufgezeichnet, um die Begründungen für die einzelnen Argumente besser herauszuarbeiten und um die beiden Fokusgruppen besser vergleichen zu können. Die Fokusgruppendifkussion wird mit folgenden Schritten umgesetzt:

#### 1. Auswahl geeigneter Personen

Bei der Auswahl der Personen muss darauf geachtet werden, dass jede Person möglichst viel zum Thema beitragen kann. In Kombination der ausgewählten Personen

wird ein breites Spektrum an Wissen und Perspektiven abgedeckt, sogenanntes „purposeful sampling“ (Hennink, 2014; Krueger & Casey, 2001).

Die Auswahlkriterien für die Personen aus der Industrie in dieser Dissertation waren:

- Die Person arbeitet seit mindestens einem Jahr in einem produzierenden Unternehmen im Bereich Produktion oder einem produktionsnahen Bereich, z. B. Instandhaltung, Logistik, Industrial Engineering, o. Ä.
- Die Person ist in ihrer Position für die Auswahl und Einführung von unterstützenden Systemen in der Produktion zuständig, z. B. als Entscheidungsträger:in, in einer Leitungsfunktion, als Key User, o. Ä.

Für die Personen aus der Wissenschaft galten folgende Kriterien:

- Die Person arbeitet seit mindestens einem Jahr Vollzeit in einer Forschungseinrichtung als Forscher:in.
- Die Person ist in einem produktionsnahen Forschungsbereich tätig, z. B. Industrial Engineering, Wirtschaftsingenieurswesen, Betriebstechnik, o. Ä.

Insgesamt wurden sieben Personen aus unterschiedlichen Unternehmen und Forschungseinrichtungen interviewt: vier Personen aus Industrieunternehmen und drei Personen aus Forschungseinrichtungen wurden befragt.

## 2. Vorbereitung der Moderation

Mit den Fokusgruppen wurde nach der Methode „World Café“ (Brown, 2005) physisch gearbeitet. Vor Beginn wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Dieser ist im Anhang 8.9 dargestellt. Folgende Schritte wurden in der Fokusgruppe durchgeführt:

- a) Einführung in das Thema und den Kontext
- b) Dank für die Teilnahme und Fragen nach Zustimmung zur Audioaufnahme
- c) Kurze Vorstellung aller Teilnehmer:innen und Abfrage der Expertise sowie zu den Berührungspunkten zum Thema
- d) Stellen der Kernfragen und Diskussion
- e) Ausleitende Fragen stellen und zusammenfassen

Die Moderation aller Interviews wurde von der gleichen Person ausgeführt.

## 3. Durchführung und Audioaufnahme

Nach der Vorbereitung fand die Durchführung der Fokusgruppendifkussion statt. Die Teilnehmer:innen wurden vorab über die Datenverwendung informiert, zudem wurde das Einverständnis zur Audioaufnahme und Verarbeitung der Daten im Rahmen der Dissertation eingeholt (siehe Transkripte im Anhang 8.10).

#### 4. Transkription

Nach der Fokusgruppendifkussion wurde der gesprochene Wortlaut abgetippt. Hierfür wurde die inhaltlich-semantische Transkription angewendet, bei der wörtlich, aber nicht lautsprachlich, transkribiert wird. Dabei wurden Dialekte ins Hochdeutsche übersetzt und für eine bessere Lesbarkeit die Interpunktion gesetzt. Satzabbrüche, Füllwörter (z. B. ähm, hm) wurden nicht aufgenommen (Dresing & Pehl, 2018). Die Transkripte sind im Anhang 8.10 zu finden. Zusätzlich bilden Poster und Mitschriften während der Fokusgruppendifkussion eine verwendbare Datenbasis, siehe Abbildung 53 und Abbildung 54.

#### 5. Auswertung

Die Auswertung erfolgte mit der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2010), bei der menschliche Kommunikation strukturiert und analysiert wird. Die Fragen aus dem Leitfaden wurden einzeln ausgewertet. Anschließend erfolgten eine Zusammenfassung und eine Diskussion der Ergebnisse.

### 6.6.4 Validierung durch Expert:innen – Auswertung

Im Rahmen der Validierung wurden Interviews mit Personen aus der produzierenden Industrie (n = 4) und Forschungseinrichtungen im Bereich Industrial Management (n = 3) durchgeführt. Für die Validierung mit Expert:innen wurde das Evaluierungsmodell in einer Präsentation vorab vorgestellt. Das Ziel des Modells, die Dimensionen und die zugehörigen Kriterien wurden erklärt, um in den Interviews auf einem gemeinsamen Wissensstand aufzubauen. Die interviewten Personen werden mit „I#U“ (Interview, Nummerierung, Unternehmen) und „I#W“ (Interview, Nummerierung, Wissenschaft) zitiert. Im Anhang 8.10 finden sich die Transkripte.

In Frage 1 und 2 wurden das Einverständnis für die Audioaufnahme und die Position und Branche der Person erfragt. Die erste inhaltliche Frage (Frage 3) bezog sich auf den Entscheidungsprozess in Unternehmen, wann ein Assistenzsystem für die Prozessverbesserung eingesetzt wird. Die Unternehmen erläuterten ähnliche Prozesse. Es entsteht ein Bedarf für eine Verbesserung aus dem Team heraus (I1U), z. B. durch wöchentliche Gemba-Walks<sup>5</sup> (I5U, I6U) oder durch externes Einwirken, etwa durch neue Technologien (I1U), Konzernvorgaben oder Zieleprozess (I2U, I5U). Alle befragten Unternehmen nannten den Kosten-Nutzen-Faktor für den Entscheidungsprozess, ob das System überhaupt in Betracht bezogen wird, an erster Stelle: „Es ist immer die Frage, was bringt mir das ganze System“ (I2U). Je nach Investitionshöhe wird eine qualitative Analyse oder quantitative Berechnung durchgeführt (I6U). Als Entscheidungs-KPI für die Wirtschaftlichkeitsrechnung werden Arbeitseffizienz (I5U), Durchlaufzeitverbesserung (I1U, I5U), Supply Chain Modeling

<sup>5</sup> Bei einem Gemba-Walk geht man direkt an den Ort, an dem die tatsächliche Arbeit stattfindet, um Probleme direkt zu beobachten und Optimierungsansätze abzuleiten. (Imai (1997))

(I5U), Liefertermintreue (I5U) und Lieferfähigkeit (I5U) einbezogen und als ausschlaggebender Grund herangezogen (I5U). Qualität wurde von zwei Unternehmen (I1U, I6U) als einer der Hauptpunkte genannt: „Mit der [Qualität] steht und fällt alles“ (I1U).

In Bezug auf das Evaluierungsmodell wurde nach der (Un-)Vollständigkeit der relevanten Kriterien gefragt (Frage 4 und 5). Alle Unternehmensvertreter:innen sehen die Kriterien als sinnvoll und keines als überflüssig (I1U, I4U, I5U, I6U): „Also aus Produktionssicht würde ich sagen, es ist alles relevant für mich“ (I5U). Die Akzeptanz wurde häufig als essenzieller Faktor genannt (I1U, I4U, I5U, I6U), da die Systeme ansonsten „in der Schublade laden“ (I1U). Wobei die menschenzentrierten Faktoren teilweise erst relativ spät im Entscheidungsprozess betrachtet werden, obwohl die Relevanz sehr hoch ist (I4U). Die Ergonomie ist ebenfalls wichtig und ein ausschlaggebender Faktor in der Akzeptanz (I1U, I5U, I6U). Usability (v. a. einfache Bedienbarkeit und Implementierung) wurde als wichtiges Kriterium genannt (I1U, I6U). Unterschiedliche Meinungen zu zusätzlichen Kriterien wurden ergänzt. I1U und I4U sahen keinen Bedarf für weitere relevante Kriterien (I1U: „Mir würde so nichts einfallen, was ich sonst noch hinzufügen würde.“; I4U: „Ich finde, da sind sicher die relevanten Kriterien angeführt. Wenn man sich mit denen intensiv auseinandersetzt, deckt man mit Sicherheit alles ab.“). I5U ergänzte das Thema Umweltbewusstsein (z. B. der globale Footprint, CO<sub>2</sub>-Verbrauch), das in die Akzeptanz einfließen kann. I6U bestätigte die Notwendigkeit der Einbeziehung des Umweltaspekts. Wissenschaftsexpert:innen merken an, dass Kriterien wie „Unternehmenskultur“ bzw. generell „organisatorische Rahmenbedingungen“ in die Bewertung miteinbezogen werden sollen (I2W), z. B. Innovationsfähigkeit, Unternehmenskultur sowie Employer Branding (für interne und externe Mitarbeiter:innen, v. a. in Hinblick auf den Fachkräftemangel; I3W). Bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit sollen auch indirekte Kosten betrachtet werden, z. B. „die internen Kapazitäten, [...], um den Betriebsrat mit ins Boot zu holen, um das ganze überhaupt zum Laufen zu bringen“, z. B. wenn eine Betriebsvereinbarung benötigt wird. Des Weiteren soll die Einschulungsdauer auf die Systeme mitbetrachtet werden (I2W, I3W). I7W sah alle relevanten Kriterien abgedeckt.

Bezüglich der Anwendbarkeit in der Praxis (Frage 6) waren sich die Interviewten einig. Alle Unternehmensexpert:innen finden das Modell anwendbar (I1U, I4U, I5U, I6U). I4U merkte an, dass ein schrittweiser Prozess, bei dem alle Kriterien abgedeckt sind, ideal wäre. Die Wissenschaftsexpert:innen sahen ebenfalls die Anwendbarkeit in der Praxis (I2W, I3W, I7W), allerdings bestehen Zweifel an den notwendigen Ressourcen, ob diese von Unternehmen dafür tatsächlich zur Verfügung gestellt werden. Vorhandene Kennzahlen, wie z. B. Produktivität oder Durchlaufzeit, werden einfacher messbar sein als menschenzentrierte Kriterien (I2W, I3W), bei denen oftmals das notwendige Methodenwissen und die Ressourcen nicht zur Verfügung stehen (I2W, I3W, I7W).

Für die Anwendung des Modells in verschiedenen Prozessen und Branchen sehen die Befragten keinen bis kaum einen Unterschied (Frage 7). I1U sieht vor allem in der Gewichtung der Kriterien Unterschiede bezüglich der Anwendung in verschiedenen Unternehmensbereichen. Je nach Prioritäten sind die Kriterien unterschiedlich zu gewichten. I4U sieht individuelle Unterschiede zwischen den Branchen und sprach sich für ein modulares Modell aus, bei dem die benötigten Kriterien für den konkreten Anwendungsfall ausgewählt werden. I5U und I6U fanden das Evaluierungsmodell für jeden Bereich passend. Die Meinungen der Wissenschaftsexpert:innen waren ähnlich. I2W sah wenig Unterschiede in den Branchen und Bereichen, je nach Bereich müssen die Kriterien eventuell moderat geändert werden. I7W sah zwischen produzierenden Unternehmen relativ wenig Unterschied, eventuell werden nicht immer alle Kriterien benötigt.

Weitere Rückmeldungen oder Anmerkungen zum Modell wurden kaum genannt (Frage 8). I4U betonte nochmals die Sinnhaftigkeit des Modells und, dass ein Tool vielen Unternehmen weiterhelfen kann, weil das umfassende Know-how bei den Entscheidungsträger:innen oft nicht ausreichend vorhanden ist. Ein:e Wissenschaftsexpert:in sprach von einem modularen System, bei dem eventuell noch mehrere Kriterien zur Auswahl stehen und situationsabhängig evaluiert werden (I2W). Zusätzlich können unterschiedliche Messmethoden im Modell verwendet werden, abhängig vom betrachteten Prozess. Die wichtigsten Punkte der inhaltlichen Fragen werden in der Tabelle 67 zusammengefasst.

**Tabelle 67: Zusammenfassung der Expert:inneninterviews**

Wie treffen Sie derzeit die Entscheidung, einen Prozess zu verbessern und Unterstützungssysteme anzuschaffen?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aus einem Verbesserungsbedarf (intern, extern, Zieleprozess) werden Unterstützungssysteme in Betracht gezogen.</li> <li>• Kosten-Nutzen-Faktor wird erörtert, wobei Kennzahlen wie Arbeitseffizienz, Durchlaufzeitverbesserung und Qualitätssteigerungen betrachtet werden.</li> </ul>
Sind Ihrer Meinung nach alle relevante Kriterien im Evaluierungsmodell enthalten, um eine Entscheidung für den Einsatz von einem Assistenzsystem zu treffen? Fehlen Ihrer Meinung nach Kriterien oder sind welche überflüssig?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Kriterien werden als sinnvoll und keines als überflüssig bewertet.</li> <li>• Zusätzlich genannte Kriterien sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Umweltbewusstsein, Unternehmenskultur und organisatorische Rahmenbedingungen,</li> <li>○ indirekte Kosten bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit und</li> <li>○ die Einschulungsdauer auf die neue Systeme.</li> </ul> </li> </ul>
Denken Sie, dass dieses Modell in der Praxis anwendbar ist? Falls nein: Warum nicht? Was müsste man verändern, damit es anwendbar ist?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Unternehmensexpert:innen bewerten das Modell als anwendbar.</li> <li>• Ein schrittweiser Prozess würde die korrekte Anwendung unterstützen.</li> <li>• Zweifel an der Ausrollung werden aufgrund hohen zeitlichen Aufwands für die Unternehmen geäußert.</li> </ul>

Sehen Sie Unterschiede in der Anwendung abhängig von Prozessen und Branchen?

- Die Unterschiede der Anwendung abhängig von Prozessen und Branchen werden als gering eingeschätzt.
- Die Gewichtung der Kriterien für die prozessspezifischen Eigenschaften wird als wichtig eingestuft.
- Ein modulares Modell, bei dem die benötigten Kriterien fallweise ausgewählt werden, unterstützt bei der unternehmens- und prozessspezifischen Anwendung.

In der Gesamtheit beschrieben die Expert:innen das Evaluierungsmodell als sinnvoll und in der Praxis anwendbar. Alle Kriterien wurden als wichtig erachtet und zusätzliche wurden vorgeschlagen. Die modulare Anwendbarkeit des Modells, abhängig von Prozess und Branche, wurde als Voraussetzung für die praktische Anwendbarkeit genannt. Im nächsten Unterkapitel werden die Validierungsergebnisse der qualitativ durchgeführten Interviews diskutiert.

### 6.6.5 Diskussion der Validierungsergebnisse

Sieben Expert:innen aus Industrie und Wissenschaft wurden im Rahmen eines „World Cafés“ zum entwickelten Evaluierungsmodell befragt. Die Interviews wurden mittels Audioaufnahme aufgezeichnet, inhaltlich-semantic transkribiert und ausgewertet. Die Ergebnisse der Interviews von Expert:innen decken sich größtenteils mit dem entwickelten Evaluierungsmodell. Zusammenfassend bestätigen die befragten Expert:innen die grundsätzliche Anwendbarkeit des Modells in der Industrie. Eine konkrete Vorgehensweise mit einem schrittweisen Prozess würde die Anwendbarkeit erleichtern und zum Teil fehlendes Methodenwissen ausgleichen.

Von den interviewten Personen wurde kein Kriterium als überflüssig bewertet, zugleich wurden Vorschläge für zusätzliche Kriterien genannt. Dabei wird „Umweltbewusstsein“ im Zuge der Akzeptanz erwähnt und kann bei der Messung der Akzeptanz ergänzt werden. Indirekte Kosten können im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden. Hierbei ist anzumerken, dass die Errechnung von indirekten Kosten, z. B. für die Erstellung einer Betriebsvereinbarung, durchaus schwierig abschätzbar und messbar ist. Falls dies vom Unternehmen gewünscht ist, ist dies in der Wirtschaftlichkeitsberechnung möglich. Die „Einschulungsdauer auf das neue System“ kann in der Produktivität mit abgebildet oder als eigenes Kriterium ergänzt werden. Das Kriterium der organisatorischen Rahmenbedingungen (z. B. Innovationsfähigkeit, Unternehmenskultur, Employer Branding) erfordert weitere Forschungsarbeit, um es in das bestehende Evaluierungsmodell zu integrieren, und ist damit ein möglicher Weiterentwicklungsansatz für das Modell. Die vorgeschlagenen Kriterien passen in das MTO und Responsible Research and Innovation (RRI)-Konzept. Dieses zielt darauf ab, technologische Innovation mit breiteren gesellschaftlichen Werten in Einklang zu bringen und die institutionellen Entscheidungen über die Ziele von Forschung und Innovation unter Bedingungen der

Unsicherheit und Mehrdeutigkeit zu unterstützen. Mit der Einbeziehung von Themen wie Nachhaltigkeit und Innovationsfähigkeit kann über den festgelegten Forschungsrahmen sinnstiftender Nutzen erbracht werden (RRI-Practice, 2016). Zusätzlich entsprechen die vorgeschlagenen Kriterien dem ganzheitlichen Ansatz des Evaluierungsmodells.

Die mehrmals angesprochene Modularität ist im entwickelten Evaluierungsmodell bereits durch die Gewichtung der Kriterien gegeben und individuell auf Prozess und Branche anpassbar.

## 7 Zusammenfassung, Diskussion, Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und auf Basis der festgelegten Forschungsfragen und Anforderungen diskutiert. Des Weiteren werden auftretende Limitationen der Forschungsarbeit erläutert. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere mögliche Entwicklungsschritte gegeben und fortführender Forschungsbedarf abgeleitet.

### 7.1 Zusammenfassung

Das Evaluierungsmodell wird nach dem beschriebenen Verlauf in Kapitel 5 an einem Fallbeispiel in der TU Wien Pilotfabrik und in einem Industrieunternehmen an der Bestückung eines Schaltschranks angewendet. Auf Basis der durchgeführten Evaluierung zeigt das Modell eine – gemäß gewählten und gewichteten Kriterien favorisierte – Lösung auf. Das Modell zur multikriteriellen Evaluierung industrieller Assistenzsysteme zeigt auf Basis von aufgenommenen Daten aus dem Prozess den tatsächlichen Nutzen der Assistenzsysteme und ermöglicht eine Vergleichbarkeit an ein und demselben Prozess. Das Evaluierungsmodell und die Vorgehensweise sind systematisiert formuliert. Die Evaluierungskriterien werden über eine systematische Literaturrecherche identifiziert und beschrieben. Die Kriterien werden auf Ordinalskalen von  $-2$  bis  $+2$  quantifiziert dargestellt und mittels der AHP-Methode gewichtet und ausgewertet. Die Ergebnisse werden in einem Spinnennetzdiagramm dargestellt und ermöglichen eine multikriterielle Betrachtungsweise.

### 7.2 Diskussion der Forschungsergebnisse

Aus den dargestellten Ergebnissen (vgl. Kapitel 6.5 und 6.6) können die Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Wie lassen sich Assistenzsysteme in der Produktion multikriteriell und vergleichbar evaluieren?
2. Wie sind Kriterien auszulegen, um diese sowohl auf physische als auch auf kognitive Assistenzsysteme anzuwenden?
3. Wie kann eine Vergleichbarkeit der Unterkriterien geschaffen werden?
4. Wie kann das Evaluierungsmodell auf Produktionsprozesse, welche mit industriellen Assistenzsystemen unterstützt werden, erfolgreich angewendet und validiert werden?

Das multikriterielle Evaluierungsmodell für den Vergleich von physischen und kognitiven Assistenzsystemen wird anhand der iterativen Design Science Research-Methode (Peppers et al., 2007) gestaltet und angewendet (vgl. Kapitel 5 und 6). Das Evaluierungsmodell ist auf fünf Dimensionen und zehn Kriterien ausgelegt, um nach dem MTO-Konzept ausgewogen bewerten und die für den Prozess geeignetste

Variante ermitteln zu können. Durch den modularen Aufbau und die Anwendung der AHP-Methode werden die Kriterien nach Bedarf gewählt und gewichtet. Der Mehrwert für Industrie und Wissenschaft wird über Expert:inneninterviews gezeigt und die Anwendbarkeit bestätigt. Auf Basis der Forschungsfragen wird das Evaluierungsmodell mittels der definierten Anforderungen (vgl. Kapitel 4.2) verifiziert.

**Tabelle 68: Abgleich mit den Anforderungen**

<p>✓ <b>Anforderung 1:</b> Das Evaluierungsmodell lässt sich auf kognitive und physische Assistenzsysteme an ein und demselben Prozess anwenden. Die Bewertungsunterschiede von Assistenzsystemen werden am gleichen Prozess dargestellt.</p>
<p>Der praktische Anwendungsfall zeigt den Einsatz des Evaluierungsmodells für kognitive und physische Assistenzsysteme im selben Prozess. Sowohl einzelne Assistenzsysteme als auch Kombinationen von unterschiedlichen Assistenzsystemen lassen sich mit dem vorliegenden Modell evaluieren. Die Unterschiede werden quantitativ für die gesamte Anwendung pro Kriterium dargestellt und macht die Systeme untereinander an einem Prozess vergleichbar.</p>
<p>✓ <b>Anforderung 2:</b> Eine prozessorientierte Ablaufdarstellung für die systematische Durchführung der multikriteriellen Evaluierung industrieller Assistenzsysteme wird bereitgestellt.</p>
<p>Die prozessorientierte Ablaufdarstellung gibt einen Leitfaden für die Anwendung des Evaluierungsmodells vor und ist in Abbildung 25 systematisch abgebildet.</p>
<p>✓ <b>Anforderung 3:</b> Die Vergleichbarkeit der einzelnen Szenarien von industriellen Assistenzsystemen wird quantifiziert abgebildet.</p>
<p>Das Evaluierungsmodell bewertet den Prozess sowohl mit dem Einsatz von Assistenzsystemen als auch mit alternativen Assistenzsystemen bzw. deren Kombinationen. Die Vergleichbarkeit ist untereinander relativ gegeben und für jeden Prozess neu zu bewerten.</p>
<p>✓ <b>Anforderung 4:</b> Das Modell wird modular aufgebaut und lässt sich an Prozesse und Branchen anpassen.</p>
<p>Über die Gewichtung werden Kriterien und Dimensionen individuell ausgewählt und priorisiert. Die ausgewählten Kriterien werden bewertet und die unterschiedlichen Anwendungsfälle miteinander verglichen. Die Modularität ist unabhängig von Prozessen und Branchen und wird prozessspezifisch festgelegt.</p>
<p>✓ <b>Anforderung 5:</b> Das Modell wird sich am MTO-Konzept orientieren und ausgewogene soziotechnische Aspekte vorsehen.</p>
<p>Das Evaluierungsmodell bildet das MTO-Konzept über die Dimensionen ausgewogen ab. Menschenzentrierte, technologische sowie organisatorische Kriterien werden bewertet und berücksichtigt. In Abhängigkeit von der individuellen Gewichtung können soziotechnische Aspekte unterschiedlich stark betrachtet werden.</p>

Die Zielsetzung dieser Dissertation (vgl. Kapitel 1.2) ist somit erreicht, die Forschungsfragen sind beantwortet, die gesetzten Anforderungen erfüllt und ein konkreter wissenschaftlicher Beitrag geleistet. Limitationen hinsichtlich der Anwendung des Evaluierungsmodells werden im nächsten Unterkapitel beschrieben.

### 7.3 Limitationen der Anwendung des Evaluierungsmodells

Bei der Anwendung des Evaluierungsmodells ergeben sich Limitationen. Um eine aussagekräftige Evaluierung von Kriterien zu erhalten, wird eine Mindestanzahl an Testpersonen benötigt. Dies zeigt sich vor allem beim Kriterium der Nutzer:innenakzeptanz. Je nach Kriterium kann dies den Aufwand für die Evaluierung erhöhen. Des Weiteren werden einzelne Kriterien subjektiv in Abhängigkeit von Unternehmen und Testpersonen erhoben (z. B. Nutzer:innenakzeptanz und Usability).

Daher können Evaluierungen nicht ohne detaillierte Betrachtung der Kriterien unternehmens- oder branchenübergreifend miteinander verglichen werden. In dieser Dissertation steht die Überblicksevaluierung im Vordergrund, daher findet an dieser Stelle keine detaillierte Evaluierung statt, wie z. B. eine Ergonomie-Evaluierung von Exoskeletten wie in Ralfs et al. (2021).

Die Anwendung des Modells ist stark von der Datenverfügbarkeit und -qualität abhängig. Der Aufwand für die Datenerhebung kann, je nach Verfügbarkeit der Daten, sehr hoch sein. Für Nutzer:innentests wird beispielsweise eine bestimmte Mindestanzahl an Personen benötigt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, z. B. für die Evaluierung der Nutzer:innenakzeptanz oder Arbeitsbelastung. Für Produktivitäts- und Qualitätskennzahlen müssen Daten in der Montage aufgenommen oder, wenn verfügbar, aus bestehenden Systemen ausgewertet werden. Aufgrund der oftmals nur prototypischen Umsetzung bzw. Einsatzes der Assistenzsysteme in den Prozessen zum Zeitpunkt der Evaluierung können bei der Abschätzung der Soll-Prozess-Daten Ungenauigkeiten entstehen.

Das Fallbeispiel wird unter Laborbedingungen durchgeführt, daher werden Annahmen für die Kostenberechnung getroffen. Die Testpersonen haben teilweise eine technische Ausbildung, arbeiten jedoch nicht operativ in der Montage von Schaltschränken. Darüber hinaus ist die Prozesszeit mit 5 bis 25 Minuten beschränkt. Die Studie zeigt Unterschiede zwischen im Schaltschrankbau tätigen Personen und Studierenden. Die unterschiedlichen Vorerfahrungen der Testpersonen beeinflussen die Dauer und die Qualität der Durchführung des Fallbeispiels.

Das Kriterium Ergonomie ist nicht unmittelbar auf kognitive und physische Assistenzsysteme anwendbar. Um die Ergonomie anhand einer Methode zu bewerten, wird der gesamte Prozess betrachtet. Exoskelette sind derzeit kaum in den standardisierten Verfahren für die Bewertung von Ergonomie berücksichtigt. RULA ist eine Bewertungsmethode, welche in erster Linie der Abschätzung dient, ob weitere detaillierte Untersuchungen notwendig sind. Diese berücksichtigt das Exoskelett indirekt durch die Angabe der „Unterstützung der Arme“. Im nächsten Schritt sind weitere Betrachtungen für eine detaillierte Aussage notwendig.

Die Länge des Fragebogens kann zu Unachtsamkeit der Testpersonen führen, daher sind daraus resultierende Ungenauigkeiten in den Ergebnissen anzunehmen. Vor allem Fragen, die am Ende des Fragebogens gestellt werden, werden tendenziell weniger detailliert behandelt als zu Beginn (Theis et al., 2016).

## 7.4 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Der letzte Abschnitt gibt einen Einblick in mögliche zukünftige Forschungsarbeiten. Die folgenden, kurz beschriebenen Punkte können Teil der weiteren Entwicklung des

multikriteriellen Evaluierungsmodells für industrielle Assistenzsysteme sein, um die Vergleichbarkeit von kognitiven und physischen Systemen am gleichen Prozess zu vereinfachen:

#### 1. Durchführung weiterer Studien in der Industrie

Um die Limitationen bei der Anwendung des Evaluierungsmodells zu reduzieren, sind praktische Durchführungen von Studien in der Industrie sinnvoll. Die Einbeziehung von Personen mit Vorerfahrung ermöglicht einen Vergleich mit den Teilnehmenden ohne Vorerfahrung und einen Abgleich mit dem Anforderungsprofil für eine präzisere Bewertung der Auswirkungen auf die Qualifikation. Langzeitstudien in industriellen Montageprozessen bieten zusätzlich detaillierte Daten.

#### 2. Technische Erweiterung des Anwendungsbeispiels

Der technische Ausbau des praktischen Anwendungsfalls in der Pilotfabrik ermöglicht ein verbessertes Zusammenspiel der einzelnen Assistenzsysteme – nach der automatischen Erkennung der Fertigstellung eines Arbeitsschrittes schalten alle Systeme beispielsweise zur nächsten Tätigkeit weiter. Dadurch werden unnötige Verzögerungen durch die Systeme vermieden und die Gebrauchstauglichkeit für die Anwender:innen verbessert. Diese und eine Erweiterung um multimodale Interaktionsmöglichkeiten (z. B. Gesten, Sprache) ermöglicht, das Potenzial von Mensch-System-Symbiosen zu erschließen, bei denen Maschinen den Menschen in Arbeitssystemen unterstützen, seine Fähigkeiten und Fertigkeiten optimal zu nutzen (Romero et al., 2016).

#### 3. Diversität und Individualisierung

Weitere Evaluierungen mit diverseren Personengruppen und die Untersuchung der Auswirkungen (z. B. Größe, Geschlecht, Sprachen) auf die Auswahl von Assistenzsystemen ist in weiteren Forschungen denkbar.

#### 4. Operator 4.0

Unterschiedliche Qualifikationsniveaus und Vorerfahrungen mit individualisierter Anpassung der angezeigten Inhalte auf die jeweilige Person kann in weiteren Studien untersucht werden. Dabei können verschiedene Darstellungsformen von Arbeitsanweisungen integriert und evaluiert werden.

#### 5. Datenaufnahme mit Sensorik, Kameras, Motion Tracking, Eye-Tracking, Gestenerkennung

Während des Prozesses werden über Sensorik, Kameraaufnahmen, Motion Tracking oder Gestenerkennung Daten aufgenommen, wobei Machine-Learning-Algorithmen helfen, die Daten zu verarbeiten und die Evaluierung zu verbessern, z. B. für die

Erfassung von Ergonomie oder Tätigkeiten (Altieri et al., 2021; Parsa & Banerjee, 2021; J. Wang et al., 2021) oder für die kontinuierliche Aufnahme der Arbeitsbelastung mittels technischer Unterstützung (Eye-Tracking, Herz- und Atemfrequenzmessung) (Biondi et al., 2022; Mehler et al., 2009). Diese Daten werden in ein geeignetes Programm (siehe Punkt 6) gespielt und verarbeitet. Dadurch verringert sich der Aufwand für die Datenaufnahme, die Datenqualität wird verbessert.

#### 6. Erstellung eines Evaluierungstools

Für die schnellere und anwendungsfreundliche Anwendung des Evaluierungsmodells kann die Aufnahme und Auswertung der Ergebnisse zum Teil über ein Tool automatisiert werden (Holly et al., 2022). Eine selbstständige Durchführung der Evaluierung der Anwender:innen in Unternehmen, z. B. Industrial Engineers oder Prozessmanager:innen, wird dadurch erleichtert. Im ersten Ansatz gilt es zu prüfen, welche Input-Daten für eine automatisierte Anwendung notwendig sind, wie diese unter Anleitung aufgenommen und ausgewertet werden. Durch die Schaffung einer Schnittstelle zu bestehenden Planungs- und Steuerungsprogrammen in Unternehmen wird die Auswertung von Kriterien, wie z. B. Produktivität und Qualität, ermöglicht. Das Evaluierungstool kann als Open-Source-Lösung zur Verfügung gestellt werden.

#### 7. Erweiterung um zusätzliche Kriterien und alternative Methoden

Das Modell kann zukünftig um zusätzliche Kriterien erweitert werden. Beispiele dazu werden in den Expert:inneninterviews genannt, z. B. die Innovationsfähigkeit eines Unternehmens, Unternehmenskultur, Einschulungsdauer oder Umweltbewusstsein. Das Evaluierungsmodell bietet demnach die Möglichkeit, statt den festgelegten auch alternative Methoden zu verwenden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Methoden in Anwendung und deren Auswirkungen bietet weiteres Potenzial für zukünftige Forschung.

#### 8. Erstellung von Benchmarks

Durch die kontinuierliche praktische Anwendung des Evaluierungsmodells in Unternehmen werden Benchmarks für unternehmensübergreifende Vergleiche definiert. Zusätzliche Analysen in unterschiedlichen Unternehmen und Anwendungsfällen helfen dabei, weitere empirisch gesicherte Ergebnisse zu gewinnen. In weiterer Forschung fließen die Erkenntnisse in die Weiterentwicklung des Modells ein.

#### 9. Ableitung von Gestaltungsrichtlinien zur Auswahlunterstützung

Die erhobenen Daten dienen der Weiterentwicklung einer Auswahlhilfe für Assistenzsysteme in der Produktion. Aus den durchgeführten Evaluierungen lässt sich ein Leitfaden für die Planung und Implementierung von Assistenzsystemen ableiten.

Darüber hinaus können Gestaltungsrichtlinien erfahrungsbasiert erstellt werden, um bei der Implementierung von Assistenzsystemen detailliertere Ergebnisse zu erzielen.

#### 10. Simulationsbasierte Evaluierung und frühzeitige Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten

Auf Basis von großen Datenmengen werden Kriterien während der Simulation eines Montageprozesses bereits berücksichtigt und liefern frühzeitig Rückmeldung zur Arbeitsplatzgestaltung und den Einsatz von Assistenzsystemen. Zusätzlich werden Arbeits- und Datensicherheit in der Planung und Simulation berücksichtigt.

#### 11. Untersuchung von multimodalen Anwendungen von Assistenzsystemen

Mithilfe des Modells können Prozesse mit einer multimodalen Anwendung von Assistenzsystemen evaluiert und die Einflussfaktoren beim Zusammenspiel mehrerer Systeme für die Kriterien näher untersucht werden. Multimodale Assistenzsysteme als Kombination einzelner assistiver Technologien bieten das Potenzial, die Fähigkeiten und die Leistung der Arbeiter:innen in Richtung Operator 4.0 zu steigern und gleichzeitig den Menschen in den Mittelpunkt zu stellen. Sie stellen einen Schritt in Richtung adaptive Automatisierung und Mensch-Maschine-Symbiose (L. Wang et al., 2019) als Voraussetzung für Industrie 5.0 (European Commission, 2020) dar.

Der weitere Forschungsbedarf zeigt ein vorhandenes Potenzial zur Weiterentwicklung des multikriteriellen Evaluierungsmodells, um die Vergleichbarkeit und Einführung von Assistenzsystemen zu unterstützen.

## 8 Anhang

### 8.1 Systematische Literaturrecherche

**Tabelle 69: Forschungsfragen der Literaturrecherche, eigene Darstellung**

<b>RQ1</b>	Welche Kriterien werden zur Bewertung von Assistenzsystemen in der Produktion verwendet?
<b>RQ2</b>	Welche Methoden werden für die Bewertung der Kriterien verwendet?
<b>RQ3</b>	Ist die Evaluierung mit den angegebenen Kriterien und der Methode reproduzierbar?
<b>RQ4</b>	Wie viele Kriterien werden pro Veröffentlichung bewertet?

**Tabelle 70: Suchergebnisse in den Datenbanken, eigene Darstellung**

Assistenzsystem	Datum	Datenbank	Anzahl Publikationen SLR	Von SLR relevant	FBR	Summe	Anmerkung
<b>Digitales Assistenzsystem</b>	25.03.2020	Scopus	3	3			
	25.03.2020	Web of Science	4	3			davon bereits 2 auf Scopus
	-	divers	-	-	7		
<b>Summe</b>						<b>13</b>	
<b>Augmented Reality</b>	04.09.2019	Scopus	136	42			
	22.01.2020	Web of Science	19	0			
	-	divers	-	-	70		
<b>Summe</b>						<b>122</b>	
<b>Virtual Reality</b>	25.03.2020	Scopus	44	18			
	25.03.2020	Web of Science	0	0			
	-	divers	-	-	10		
<b>Summe</b>						<b>28</b>	
<b>Exoskelette</b>	03.03.2020	Scopus	5	1			
	03.03.2020	Web of Science	3	1			gleich wie in Scopus
	-	divers	-	-	25		
<b>Summe</b>						<b>27</b>	

	25.03.2020	Scopus	6	6	
<b>Cobot</b>	25.03.2020	Web of Science	0	0	
	-	divers	-	-	31
<b>Summe</b>					37
<b>Summe</b>			<b>220</b>	<b>74</b>	<b>143</b>
					<b>217</b>

## 8.2 Methodensammlung

### 8.2.1 Qualifikation

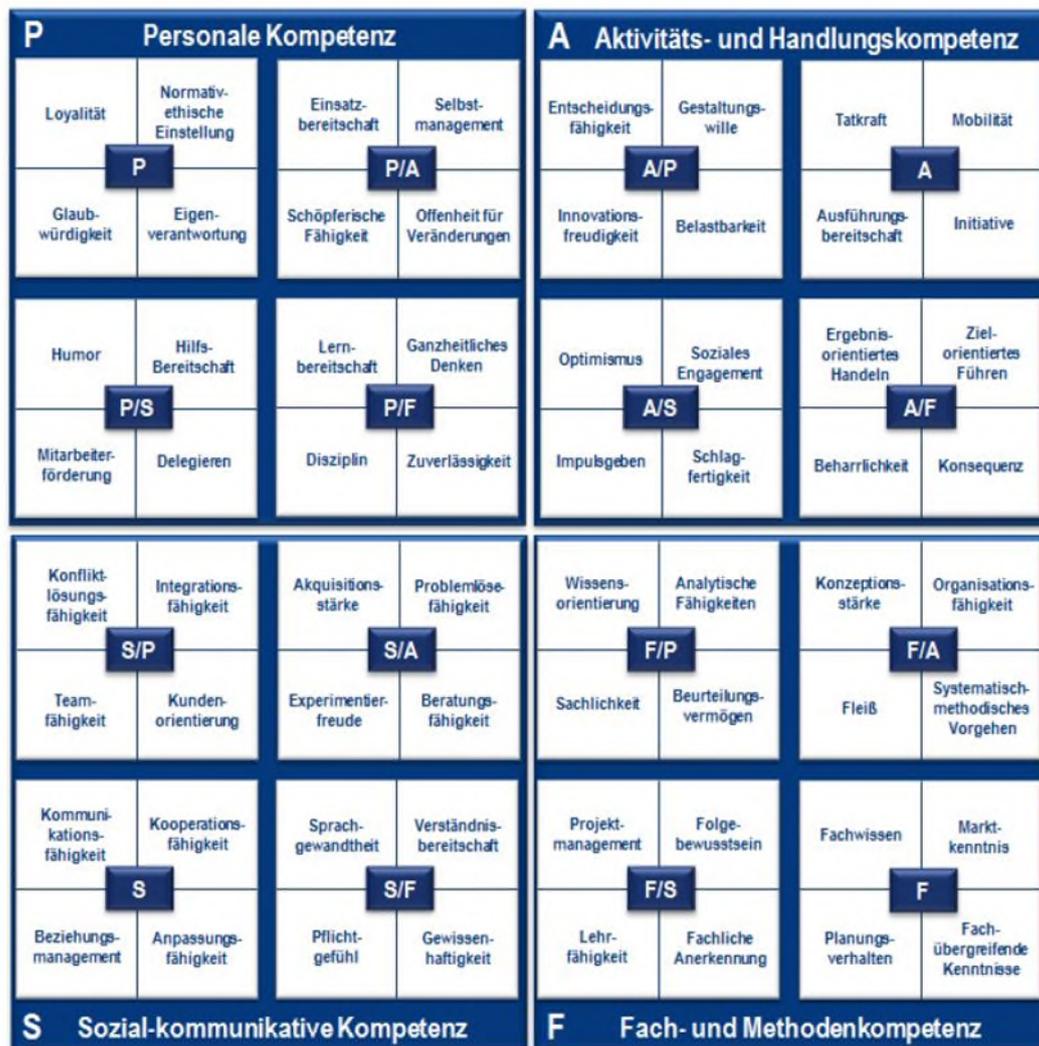


Abbildung 43: Kompetenzatlas (Heyse & Erpenbeck, 2010)

Tabelle 71: Zuordnung von funktionalen Anforderungen und industriellen Assistenzsystemen (Mark et al., 2020, S. 282)

ASSISTANCE SYSTEM	Strength and endurance	Dexterity	Ability to hear	Movability/Ergonomics	Ability to see	Sense of smell	Learning ability	Retentiveness	Spatial imagination	Responsiveness	Power of concentration	Independence	Communication skills	Logical thinking	Technical understanding	Technical knowledge	Mathematical skills	Attention	Flexibility	Creativity	Correctness	Physical safe working	Physical capacity	Working velocity	Physical health (control)
1					•		•				•	•						•		•	•	•	•	•	•
2																									•
3																									
4		•		•			•				•	•						•			•	•	•	•	•
5		•		•			•				•	•						•			•	•	•	•	•
6		•		•			•				•	•						•			•	•	•	•	•
7			•		•		•											•	•			•	•	•	•
8				•								•						•	•			•	•	•	•
9		•										•						•	•						
10					•				•			•										•	•	•	•
11			•		•							•						•							•
12				•								•							•						•
13	•			•																			•	•	•
14	•			•																			•	•	•
15	•			•																			•	•	•
16	•			•																			•	•	•
17	•			•																			•	•	•
18	•	•		•								•										•	•	•	•
19	•			•																			•	•	•
20	•			•																			•	•	•
21				•																•			•	•	•
22												•								•				•	•
23	•			•																	•		•	•	•
24			•				•			•		•			•				•			•	•	•	•
25							•			•		•			•				•			•	•	•	•
26							•					•		•					•			•	•	•	•
27			•		•		•					•	•				•		•	•		•	•	•	•
28							•					•										•	•	•	•
29			•				•				•	•										•	•	•	•
30			•				•			•		•										•	•	•	•
31							•					•										•	•	•	•
32			•				•					•										•	•	•	•
33			•				•			•		•										•	•	•	•
34				•			•			•		•										•	•	•	•
35			•		•		•					•						•				•	•	•	•
36							•				•											•	•	•	•
37							•											•				•	•	•	•
38							•											•				•	•	•	•
39													•												•
40			•										•												•
41													•												•

Tabelle 72: Legende der Assistenzsysteme in Tabelle 71 (Mark et al., 2020, S. 279)

<i>Type</i>	<i>Assistance System</i>	<i>Index</i>
<i>Sensorial</i> (extend sensing capabilities)	Eye Tracking	(1)
	Galvanic Skin Response (GSR)	(2)
	Physiological Sensor - Heart Rate (HR)	(3)
	Intelligent Hand Tracking	(4)
	RGB Camera	(5)
	Motion Tracking and Gesture Recognition	(6)
	Device	
	Smart Watch	(7)
	Wearable Tracker	(8)
	Haptic Glove	(9)
	Infrared Camera	(10)
	Portable Vibration Device	(11)
Position Tracking System	(12)	
<i>Physical</i> (extend physical capabilities)	Exoskeleton	(13)
	Arm Support	(14)
	Leg Support	(15)
	Back Support	(16)
	Flexible Assembly Assist Robot	(17)
	Robots/Automats	(18)
	Telemanipulator/ Balancer/ Lifting Aid	(19)
	Wearable Lifting/Holding Aid	(20)
	Ergonomic Manual Workplaces	(21)
	Robot Assistance System with ToF Camera	(22)
	Collaborative Robot	(23)
<i>Cognitive</i> (extend cognitive capabilities like "orient" or "decide"	Augmented Reality (AR)	(24)
	Virtual Reality (VR)	(25)
	Mixed Reality (MR)	(26)
	Tablet	(27)
	Visual Computing System	(28)
	Projection-Based Assistance System	(29)
	Head Mounted Display (HMD)	(30)
	Smart Scan Glove	(31)
	Smart Phone	(32)
	In-situ Projection	(33)
	Laser Projection System	(34)
	Portable computer	(35)
	Computer Assisted Instructions (CAI)	(36)
	Projector	(37)
	Monitor	(38)
	Pictorial Instruction	(39)
	Voice Control	(40)
	AI Based Intelligent Personal Assistant	(41)

### 8.2.2 Ergonomie

**Arbeitsbogen zur Bewertung von Belastungen der oberen Gliedmaßen  
RULA (Rapid Upper Limb Assessment) Teil 1**

Füllen Sie den Arbeitsbogen nach dem u. a. Schema für den rechten und linken Arm getrennt aus!

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

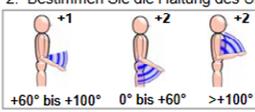
1. Bestimmen Sie die Haltung des Oberarms



+20° bis +20°    > -20°    +20° bis +45°    +45° bis +90°    >+90°

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

2. Bestimmen Sie die Haltung des Unterarms



+60° bis +100°    0° bis +60°    >+100°

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

3. Bestimmen Sie die Haltung des Handgelenks



0°    +1    >+15°    +3    0° bis -15°    +2    >+15°    +3    0° bis +15°    +2

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

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

Umwendungen im Neutralbereich = 1  
Umwendung im endgradigen Bewegungsbereich = 2

5. Lesen Sie den Wert für Arm und Handgelenkhaltung unter Verwendung der oben ermittelten Werte aus der Tabelle ab!

**Tabelle A:  
Wert der  
Arm- und Handgelenkhaltung**

Oberarm Unterrarm	Handgelenk							
	1	2	3	4				
1	1	2	2	2	3	3	3	3
2	2	2	2	2	3	3	3	3
3	2	3	3	3	3	3	4	4
4	1	2	3	3	3	3	4	4
5	2	3	3	3	3	3	4	4
6	3	4	4	4	4	4	5	5
7	3	4	4	4	4	4	5	5
8	4	4	4	4	4	4	5	5
9	4	4	4	4	4	4	5	5
10	5	5	5	5	5	5	6	6
11	2	5	6	6	6	6	7	7
12	3	6	6	6	7	7	7	8
13	1	7	7	7	7	7	8	8
14	2	8	8	8	8	8	9	9
15	3	9	9	9	9	9	9	9

Σ  
Haltungswert für Arm und Handgelenk

Abbildung 44: RULA Arbeitsbogen: Analyse der Arm- und Handgelenkhaltung (BGIA, 2007, S. 5)

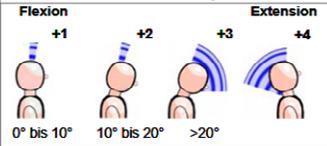
**Arbeitsbogen zur Bewertung von Belastungen der oberen Gliedmaßen  
RULA (Rapid Upper Limb Assessment) Teil 2**

Füllen Sie den Arbeitsbogen nach dem u. a. Schema aus!

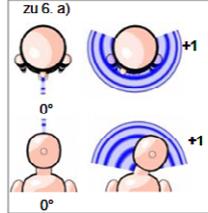
**B. Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung**

6. Bestimmen Sie die Haltung des Halses

**Flexion**    **Extension**



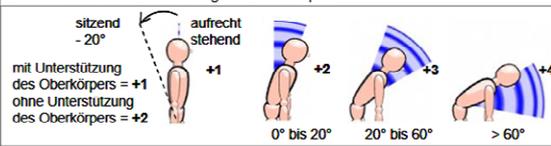
0° bis 10°    10° bis 20°    >20°

zu 6.a) 

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

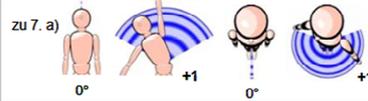
7. Bestimmen Sie die Haltung des Oberkörpers

sitzend -20°    aufrecht stehend



mit Unterstützung des Oberkörpers = +1  
ohne Unterstützung des Oberkörpers = +2

0° bis 20°    20° bis 60°    >60°

zu 7.a) 

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

8. Bestimmen Sie die Haltung der Beine



beidseitig unterstützt, ausgewogen belastet = 1  
einbeinig, einseitig belastet = 2

8. Lesen Sie den Haltungswert für Hals-, Oberkörper und Beine unter Verwendung der oben ermittelten Werte aus der Tabelle ab!

**Tabelle B:  
Wert der Oberkörper- und Beinhaltung**

	Oberkörper										
	1	2	3	4	5	6					
	Beine										
	1	2	1	2	1	2					
1	1	3	2	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9

Σ  
Haltungswert für Hals, Oberkörper und Beine

Abbildung 45: RULA Arbeitsbogen: Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung (BGIA, 2007, S. 6)

**Arbeitsbogen zur Bewertung von Belastungen der oberen Gliedmaßen  
RULA (Rapid Upper Limb Assessment) Teil 3**

Füllen Sie den Arbeitsbogen nach dem u. a. Schema aus.

?

Haltungswert für Arm und Handgelenk

+

Wert für Muskelarbeit

+

Wert für Kraft/Last

=

?

Gesamtwert (A) für Arm und Handgelenk

?

Haltungswert für Hals, Oberkörper und Beine

+

Wert für Muskelarbeit

+

Wert für Kraft/Last

=

?

Gesamtwert (B) für Hals, Oberkörper und Beine

10. Addieren Sie für die Muskelarbeit bei statischer Körperhaltung (langer als eine Minute) oder bei Repetition (4 x oder mehr/Minute) \_\_\_\_\_ +1

11. Addieren Sie für Kraft/Last Last < 2 kg (zeitweilig) \_\_\_\_\_ +0  
Last 2 kg – 10 kg (zeitweilig) \_\_\_\_\_ +1  
Last 2 kg – 10 kg (statisch o. wiederholt) \_\_\_\_\_ +2  
> 10 kg o. wiederholt o. plötzlich \_\_\_\_\_ +3

**Tabelle C: Gesamtpunktzahl**

B \ A	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

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

Abbildung 46: : RULA Arbeitsbogen: Gesamtpunktzahl (BGIA, 2007, S. 7)

## 8.2.3 Arbeitsbelastung

### Fragen des NASA-RTLX aus Kapitel 5.4.2:

1. Wie stark wurden Sie während des Prozesses geistig beansprucht?
2. Wie sehr wurden Sie während des Prozesses körperlich beansprucht?
3. Wie stark war der Zeitdruck während der Ausführung der Aufgabe?
4. Wie schätzen Sie Ihre Leistung der ausgeführten Aufgabe ein?
5. Wie stark mussten Sie sich geistig und körperlich anstrengen, um Ihr Arbeitspensum zu bewältigen?
6. Wie frustriert waren Sie während des Prozesses?

## 8.2.4 Usability

### Fragen des SUS Fragebogen (Brooke, 1996) aus Kapitel 5.4.3:

1. Ich denke, dass ich das System gerne häufig benutzen würde.
2. Ich fand das System unnötig komplex.
3. Ich fand das System einfach zu benutzen.
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um das System benutzen zu können.
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in diesem System waren gut integriert.

6. Ich denke, das System enthielt zu viele Inkonsistenzen.
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem System sehr schnell lernen.
8. Ich fand das System sehr umständlich zu nutzen.
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte das System zu verwenden.

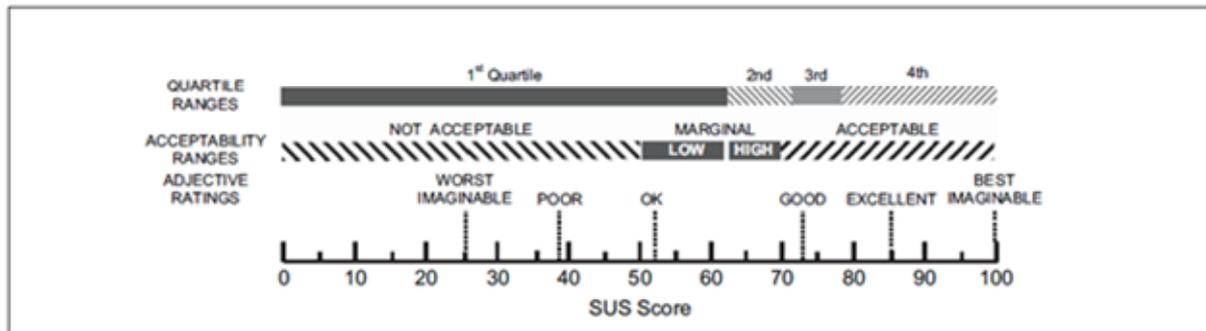


Abbildung 47: System Usability Scale (SUS) von 0 bis 100 (Brooke, 2013, S. 36)

## 8.2.5 Nutzer:innenakzeptanz

### Fragen zum TAM aus Kapitel 5.4.4:

#### Perceived Usefulness (PU):

- PU\_1: Durch die Verwendung des Assistenzsystems können Aufgaben schneller erledigt werden.
- PU\_2: Der Einsatz des Assistenzsystems hilft Aufgaben besser zu erledigen.
- PU\_3: Der Einsatz des Assistenzsystems in der Praxis verbessert die Produktivität.
- PU\_4: Der Einsatz des Assistenzsystems in der Praxis verbessert die Effektivität.
- PU\_5: Der Einsatz des Assistenzsystems macht es leichter, Aufgaben zu erledigen.
- PU\_6: Ich finde die Verwendung des Assistenzsystems in der Praxis nützlich.

#### Perceived Ease of Use (PEOU):

- PEoU\_1: Die Bedienung des Assistenzsystems ist für mich leicht zu erlernen.
- PEoU\_2: Ich finde es einfach das Assistenzsystem dazu zu bringen, das zu tun, was ich will.
- PEoU\_3: Die Interaktion mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich.
- PEoU\_4: Das Assistenzsystem ist im Umgang und in der Bedienung flexibel.
- PEoU\_5: Es ist für mich einfach, mir einen gekonnten Umgang mit dem Assistenzsystem anzueignen.

- PEOU\_6: Ich finde, dass das Assistenzsystem einfach zu benutzen ist.

#### Behavioral Intention to Use (BloU):

- BloU\_1: Ich glaube, dass die Verwendung des Assistenzsystems eine gute Idee ist.
- BloU\_2: Ich glaube, dass die Verwendung des Assistenzsystems für mich von Vorteil ist.
- BloU\_3: Ich habe eine positive Einstellung gegenüber der Verwendung des Assistenzsystems.

#### Actual System Use (U):

- U\_1: Ich kann mir vorstellen das Assistenzsystem zu verwenden.
- U\_2: Ich kann mir vorstellen das Assistenzsystem anstelle der traditionellen Vorgehensweise zu verwenden.

#### Fragen zur Technologiekompatibilität aus Kapitel 5.4.4:

##### Kompatibilität mit bisheriger Technologieerfahrung (CEXP):

- CEXP1: Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist eine neue Erfahrung für mich.
- CEXP2: Die Verwendung des Assistenzsystems ist mit nichts vergleichbar, was ich vorher gemacht habe.
- CEXP3: Die Nutzung des Assistenzsystems ist anders als andere Erfahrungen, die ich gemacht habe.
- CEXP4: Using the assistance system is a new work experience for me.

##### Kompatibilität mit den eigenen Werten (CVALnR):

- CVAL2R: Der Einsatz des Assistenzsystems in der Praxis würde meinen eigenen Werten widersprechen.
- CVAL3R: Using the assistance system does not fit the way I view the world.
- CVAL4R: Die Verwendung des Assistenzsystems widerspricht dem, wofür Computer meiner Meinung nach verwendet werden sollten.
- CVAL5R: Die Verwendung des Assistenzsystems ist für eine Person mit meinen Werten bezüglich der Rolle von Computern nicht angemessen.
- CVAL6R: Die Nutzung des Assistenzsystems widerspricht meinen Wertvorstellungen darüber, wie die Arbeit erledigt werden sollte.

##### Kompatibilität mit den eigenen Präferenzen (CPREF):

- CPREF1: Der Einsatz eines solchen Assistenzsystems würde zu meinem bevorzugten Arbeitsablauf passen.
- CPREF2: Das Assistenzsystem würde es mir ermöglichen, so zu arbeiten, wie ich es bevorzuge.

- CPREF3: Die Verwendung des Assistenzsystems würde gut zu meiner Arbeitsweise passen.
- CPREF4: Die Verwendung des Assistenzsystems würde meiner bevorzugten Arbeitsweise entsprechen.

Kompatibilität mit der aktuellen Arbeit (CEXIST):

- CEXIST4: Um das System zu nutzen, muss ich nichts an meiner derzeitigen Arbeitsweise ändern.
- CEXIST5: Die Nutzung des Systems erfordert keine wesentlichen Änderungen meiner bisherigen Arbeitsabläufe.

## 8.3 Statistiken für Kostenabschätzung

### Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 nach Geschlecht und Diagnose

Hauptdiagnose (ICD-10-Kapitel <sup>1</sup> )	Krankenstandsfälle absolut			Durchschnittliche Dauer eines Krankenstandes in Tagen			Durchschnittliche Zahl an Krankenstandstagen pro erwerbstätiger Person		
	Insgesamt	Männer	Frauen	Insgesamt	Männer	Frauen	Insgesamt	Männer	Frauen
<b>Insgesamt</b>	<b>3.696.219</b>	<b>1.927.720</b>	<b>1.768.499</b>	<b>11,7</b>	<b>11,7</b>	<b>11,7</b>	<b>12,7</b>	<b>12,1</b>	<b>13,4</b>
I Bestimmte infektiöse und parasitäre Krankheiten	541.776	296.550	245.226	5,2	5,1	5,4	0,8	0,8	0,9
II Neubildungen	34.563	14.439	20.124	53,3	53,0	53,4	0,5	0,4	0,7
III Krankheiten des Blutes und Störungen mit Beteiligung des Immunsystems	2.803	1.031	1.772	20,7	25,1	18,2	0,0	0,0	0,0
IV Endokrine, Ernährungs- und Stoffwechselkrankheiten	13.848	6.392	7.456	22,0	20,2	23,5	0,1	0,1	0,1
V Psychische und Verhaltensstörungen	109.881	41.951	67.930	42,1	42,2	42,0	1,4	1,0	1,9
VI Krankheiten des Nervensystems	93.339	36.245	57.094	9,6	10,9	8,7	0,3	0,2	0,3
VII Krankheiten des Auges und der Augenanhangsgebilde	39.217	21.276	17.941	8,7	8,7	8,7	0,1	0,1	0,1
VIII Krankheiten des Ohres und des Warzenfortsatzes	34.531	17.583	16.948	8,8	8,8	8,9	0,1	0,1	0,1
IX Krankheiten des Kreislaufsystems	66.257	35.883	30.374	24,5	29,8	18,2	0,5	0,6	0,4
X Krankheiten des Atmungssystems	1.189.063	604.858	584.205	6,6	6,5	6,8	2,3	2,1	2,6
XI Krankheiten des Verdauungssystems	181.892	98.862	83.030	8,6	9,2	7,9	0,5	0,5	0,4
XII Krankheiten der Haut und der Unterhaut	41.599	25.245	16.354	11,7	12,0	11,3	0,1	0,2	0,1
XIII Krankheiten des Muskel-Skelett-Systems und des Bindegewebes	550.369	325.490	224.879	16,9	15,7	18,7	2,7	2,8	2,7
XIV Krankheiten des Urogenitalsystems	91.338	20.228	71.110	9,8	12,4	9,0	0,3	0,1	0,4
XV Schwangerschaft, Geburt, Wochenbett	43.124	.	43.124	12,0	.	12,0	0,2	.	0,3
XVI Bestimmte Zustände die ihren Ursprung in der Perinatalperiode haben	220	92	128	14,0	13,1	14,6	0,0	0,0	0,0
XVII Angeborene Fehlbildungen, Deformitäten und Chromosomenanomalien	2.699	1.320	1.379	22,2	20,4	23,8	0,0	0,0	0,0
XVIII Symptome und abnorme klinische und Laborbefunde	253.872	122.556	131.316	7,2	7,2	7,3	0,5	0,5	0,6
XIX Verletzungen, Vergiftungen und bestimmte andere Folgen äußerer Ursachen	313.472	209.012	104.460	22,2	22,1	22,3	2,0	2,5	1,5
Andere Diagnosen	75.159	39.785	35.374	8,4	7,6	9,2	0,2	0,2	0,2
Diagnose nicht feststellbar	17.197	8.922	8.275	12,0	13,5	10,4	0,1	0,1	0,1

Q: Dachverband der Sozialversicherungsträger. Erstellt am 20.08.2021. 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. - 1) Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme.

Abbildung 48: Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 (Statistik Austria, 2020a)

**Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 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
<b>Insgesamt</b>	<b>3.696.219</b>	<b>1.927.720</b>	<b>1.768.499</b>	<b>11,7</b>	<b>11,7</b>	<b>11,7</b>	<b>12,7</b>	<b>12,1</b>	<b>13,4</b>
<b>Alter</b>									
Bis 19 Jahre	269.475	165.546	103.929	5,5	5,7	5,3	11,8	12,0	11,4
20 bis 34 Jahre	1.355.387	726.174	629.213	8,0	8,0	8,0	10,1	9,5	10,9
35 bis 49 Jahre	1.165.000	584.120	580.880	11,9	11,8	12,0	11,1	10,4	11,8
50 bis 64 Jahre	898.545	446.426	452.119	18,6	19,3	18,0	18,2	17,8	18,6
65 Jahre und älter	7.812	5.454	2.358	28,1	29,5	24,9	16,1	18,6	11,8
<b>Wirtschaftsabschnitt</b>									
Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	13.226	7.594	5.632	16,2	17,6	14,2	8,6	8,5	8,9
Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	5.037	4.503	534	14,6	14,8	12,9	12,4	13,0	8,9
Herstellung von Waren	748.474	549.559	198.915	10,9	10,8	11,0	13,2	12,9	14,1
Energieversorgung	23.556	18.384	5.172	11,4	11,8	9,8	10,9	11,0	10,7
Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen	19.674	15.432	4.242	13,6	13,7	13,1	15,0	15,2	14,2
Bau	287.528	259.689	27.839	12,5	12,7	10,9	13,3	13,9	9,0
Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen	629.636	274.818	354.818	11,3	10,9	11,6	13,0	11,9	13,9
Verkehr und Lagerei	181.994	133.275	48.719	12,8	13,5	11,1	13,5	13,5	13,5
Beherbergung und Gastronomie	143.071	54.749	88.322	14,2	14,0	14,4	11,4	9,8	12,7
Information und Kommunikation	75.657	46.175	29.482	9,8	9,6	10,0	7,0	6,3	8,4
Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	95.731	40.722	55.009	11,4	11,6	11,1	9,7	8,6	10,7
Grundstücks- und Wohnungswesen	32.497	12.156	20.341	14,2	14,9	13,8	10,9	10,3	11,3
Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen	136.389	57.098	79.291	10,0	10,4	9,7	7,3	6,8	7,7
Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen	277.075	157.295	119.780	12,2	11,9	12,6	16,5	16,1	16,9
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung; Sozialversicherung	401.748	120.118	281.630	12,9	13,7	12,6	14,1	12,9	14,7
Erziehung und Unterricht	109.817	39.049	70.768	8,5	7,8	8,9	8,9	7,2	10,1
Gesundheits- und Sozialwesen	381.496	92.599	288.897	11,4	9,8	11,9	15,7	13,6	16,4
Kunst, Unterhaltung und Erholung	26.410	12.961	13.449	13,6	14,5	12,7	9,9	9,6	10,2
Erbringung von sonstigen Private Haushalte mit Hauspersonal; Herstellung von Waren und Erbringung von Dienstleistungen durch private Haushalte für den Eigenbedarf ohne ausgeprägten Schwerpunkt	1.912	303	1.609	17,8	20,0	17,3	12,4	11,0	12,7
Exterritoriale Organisationen und Körperschaften	593	205	388	11,4	12,8	10,7	8,4	7,5	9,1
Wirtschaftsabschnitt unbekannt	3.584	1.169	2.415	20,2	25,6	17,6	.	.	.

Q: Dachverband der Sozialversicherungsträger. Erstellt am 20.08.2021. Bezugnahme auf alle im Berichtsjahr abgeschlossenen, mit Arbeitsunfähigkeit verbundenen ärztlich bestätigten Krankenstandsfälle (ohne normal verlaufene Entbindungen) von Arbeiterinnen/Arbeitern und Angestellten (ohne pragmatisierte Bedienstete, Präsenzdienstler und Kinderbetreuungsgeldbeziehende). - Krankenstandstage sind Kalendertage.

Abbildung 49: Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 (Statistik Austria, 2020b)

**Nettomonatseinkommen unselbständig Erwerbstätiger nach sozioökonomischen Merkmalen - Jahresdurchschnitt 2020**

	Unselbständig Erwerbstätige in 1.000	arithmetisches Mittel	10%	Quartile			90%
				25%	50% (Median)	75%	
verdienen weniger oder gleichviel als ... EUR							
<b>Insgesamt</b>							
<b>Insgesamt<sup>1)</sup></b>	<b>3.665,5</b>	<b>2.393</b>	<b>954</b>	<b>1.574</b>	<b>2.182</b>	<b>2.913</b>	<b>3.877</b>
<b>Alter (in Jahren)</b>							
15-19 Jahre	128,9	1.091	536	772	1.002	1.380	1.750
20-29 Jahre	723,5	1.900	750	1.421	1.931	2.354	2.784
30-39 Jahre	869,4	2.348	1.059	1.634	2.228	2.885	3.590
40-49 Jahre	870,2	2.579	1.174	1.714	2.337	3.127	4.113
50-59 Jahre	925,1	2.744	1.191	1.778	2.436	3.384	4.540
60+ Jahre	148,4	2.897	491	1.418	2.533	3.888	5.545
<b>Staatsangehörigkeit</b>							
Österreich	3.027,7	2.464	992	1.631	2.259	2.995	3.982
Nicht-Österreich	637,8	2.053	816	1.367	1.884	2.444	3.221
<b>Geburtsland</b>							
Österreich	2.854,4	2.466	982	1.625	2.262	3.004	4.001
Nicht-Österreich	811,1	2.136	886	1.441	1.950	2.539	3.339
<b>Höchste abgeschlossene Schulbildung</b>							
Pflichtschule	455,1	1.574	668	975	1.498	2.011	2.505
Lehre	1.335,8	2.274	1.161	1.696	2.177	2.698	3.411
BMS	436,8	2.278	1.050	1.590	2.163	2.811	3.534
Höhere Schule	692,6	2.405	772	1.535	2.178	3.045	4.089
Universität <sup>2)</sup>	745,2	3.161	1.300	2.022	2.832	3.829	5.362
<b>Vollzeit/Teilzeit (Selbstzuordnung)</b>							
Vollzeit	2.645,2	2.752	1.529	1.948	2.452	3.207	4.240
Teilzeit	1.020,3	1.461	494	886	1.361	1.873	2.471
<b>Berufliche Stellung</b>							
Lehrlinge	112,9	1.120	710	809	1.021	1.342	1.629
Angestellte	2.198,8	2.537	995	1.609	2.252	3.116	4.266
Arbeiterinnen und Arbeiter	974,6	1.980	882	1.498	2.007	2.429	2.855
Öffentliche Bedienstete <sup>3)</sup>	379,3	2.993	1.789	2.280	2.827	3.528	4.318
<b>Wirtschaftsbereiche</b>							
Land- und Forstwirtschaft	37,0	1.751	(605)	1.108	1.636	2.041	2.812
Industrie und Gewerbe	1.000,5	2.597	1.296	1.921	2.382	3.006	3.982
Dienstleistungen	2.628,0	2.324	869	1.469	2.087	2.870	3.854
<b>ÖNACE 2008<sup>4)</sup></b>							
Herstellung von Waren	635,9	2.678	1.388	1.962	2.447	3.126	4.094
Bau	310,0	2.348	1.126	1.822	2.215	2.699	3.539
Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kfz	546,0	2.075	833	1.326	1.844	2.439	3.452
Verkehr und Lagerei	200,0	2.401	1.045	1.744	2.254	2.839	3.683
Beherbergung und Gastronomie	186,7	1.491	531	908	1.463	1.835	2.396
Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	129,7	3.324	1.348	2.149	2.983	4.031	5.440
Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen	130,9	1.806	605	1.119	1.649	2.216	2.979
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	283,3	2.752	1.380	1.979	2.593	3.318	4.135
Erziehung und Unterricht	262,7	2.497	1.019	1.646	2.359	3.188	3.969
Gesundheits- und Sozialwesen	408,0	2.242	1.011	1.533	2.043	2.674	3.454

**Abbildung 50: Nettjahresgehalt nach Gewerbe 2020 (Statistik Austria, 2020c)**

## 8.4 Kostenaufstellung der Assistenzsysteme

**Tabelle 73: Kostenaufstellung Projektionssystem, eigene Darstellung**

Komponenten des Projektionssystems	Kosten
Projektor Panasonic	€ 9.299,60
Spiegelkopfsystem	€ 2.295,00
Deckenhalterung für Projektor	€ 187,00
Medien- und Projektorsteuerung (Desktop-PC inkl. Lizenzen)	€ 2.370,50
Monitor und Kleinteile	€ 500
MQTT Schalter	€ 200
Gesamtanschaffungskosten Projektionssystem	€ 14.852,10

Tabelle 74: Kosten der Testfälle, eigene Darstellung

Kosten	Ist-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Initiale Gesamtkosten digitales Assistenzsystem	€ 2 260	€ -	€ 2 260	€ 2 260	€ 2 260	€ -
Laufende jährliche Gesamtkosten digitales Assistenzsystem	€ 600	€ -	€ 600	€ 600	€ 600	€ -
Initiale Gesamtkosten Projektionssystem	€ -	€ 17 912	€ -	€ -	€ -	€ 17 912
Laufende jährliche Gesamtkosten Projektionssystem	€ -	€ 1 200	€ -	€ -	€ -	€ 1 200
Initiale Gesamtkosten Exoskelett	€ -	€ -	€ 4 960	€ -	€ 4 960	€ 4 960
Laufende jährliche Gesamtkosten Exoskelett	€ -	€ -	€ 540	€ -	€ 540	€ 540
Initiale Gesamtkosten Cobot	€ -	€ -	€ -	€ 63 120	€ 63 120	€ 63 120
Laufende jährliche Gesamtkosten Cobot	€ -	€ -	€ -	€ 3 000	€ 3 000	€ 3 000
<b>Initiale Gesamtkosten</b>	<b>€ 2 260</b>	<b>€ 17 912</b>	<b>€ 7 220</b>	<b>€ 65 380</b>	<b>€ 70 340</b>	<b>€ 85 992</b>
<b>Laufende jährliche Gesamtkosten</b>	<b>€ 600</b>	<b>€ 1 200</b>	<b>€ 1 140</b>	<b>€ 3 600</b>	<b>€ 4 140</b>	<b>€ 4 740</b>

## 8.5 Forschungsethik und Datenschutz

### 8.5.1 Forschungsethnisches Dokument

#### Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der Studie in der TU Wien Pilotfabrik

Forschungsprojekt: Studie in der TU Wien Pilotfabrik  
 Durchführende Institution: Institut für Managementwissenschaften, TU  
 Wien Projektleitung: Tanja Zigart  
 Kontakt: [tanja.zigart@tuwien.ac.at](mailto:tanja.zigart@tuwien.ac.at)

Liebe Teilnehmende,

im Rahmen meiner Dissertation führe ich eine Studie zur Evaluierung von industriellen Assistenzsystemen in der TU Wien Pilotfabrik durch. Ziel ist es das entwickelte Evaluierungsmodell zu testen. Dafür wird ein Schaltschrank mit Unterstützung eines kollaborationsfähigen Roboters, eines passiven Exoskeletts und unterschiedlicher Informationsbereitstellungssysteme, z. B. per Tablet oder Augmented Reality, bestückt. Der Schaltschrank ist rein für Testzwecke und hängt nicht am Stromnetz. Die nebenstehende Abbildung zeigt den Aufbau des Arbeitsplatzes.



Je nach Gruppenzuordnung, testen Sie unterschiedliche Assistenzsysteme. Für die Teilnahme ist keine Vorerfahrung notwendig. Alle Informationen stehen am Arbeitsplatz zur Verfügung, Sie haben zusätzlich jederzeit die Möglichkeit Fragen an die betreuende Person zu stellen. Die Durchführung des Experiments dauert ca. 15 Minuten. Nach der Durchführung des Experiments wird ein Fragebogen zu Nutzer:innenakzeptanz, Gebrauchstauglichkeit, Arbeitsbelastung, Ergonomie und demografischen Daten anonym ausgefüllt.

Folgende Punkte sind vor und während des Experiments zu beachten:

- Personen mit Schulterproblemen, Schmerzen im Schulter- und Nackenbereich sollten nicht an der Studie teilnehmen bzw. das Exoskelett nicht verwenden
- Sollten während der Verwendung des Exoskeletts oder während dem Experiment Schmerzen oder unangenehme Belastungen auftreten, sollten Sie das Experiment abbrechen
- Aus Sicherheitsgründen müssen lange Haare zusammengebunden, lange Ketten, Armbänder, Ohringe, Schals, Tücher, o.Ä. abgelegt werden

Die Teilnahme am Experiment ist freiwillig. Sie haben zu jeder Zeit die Möglichkeit, das Experiment abzubrechen und Ihr Einverständnis zum Experiment zurückzuziehen, ohne Angabe von Gründen und ohne dass Ihnen dadurch Nachteile entstehen.

Ich habe die Informationen gelesen und verstanden.  ja  nein

Ich hatte die Möglichkeit Fragen zu stellen und diese wurden beantwortet.

ja  nein

Ich bin damit einverstanden, im Rahmen des Dissertationsvorhabens am beschriebenen Experiment freiwillig teilzunehmen.  ja  nein

\_\_\_\_\_  
Vorname, Nachname in Druckschrift

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum/Unterschrift

Vielen Dank für die Teilnahme an der Studie und Ihren Beitrag zu meiner Dissertation.

## 8.5.2 Datenschutzrechtliche Einwilligungserklärung

### Datenschutzinformation gemäß Art. 13 DSGVO zur Studie in der TU Wien Pilotfabrik

Der Datenschutz und dessen Sicherstellung sind wichtige Anliegen der TU Wien. Die Verarbeitung personenbezogener Daten erfolgt unter strikter Wahrung der Grundsätze und Anforderungen, die in der DSGVO<sup>6</sup> und dem österreichischen DSG<sup>7</sup> und FOG<sup>8</sup> festgelegt sind. Die TU Wien verarbeitet ausschließlich jene Daten, die für die Erreichung der angestrebten Zwecke erforderlich sind, und ist stets bestrebt, die Sicherheit und Richtigkeit der Daten zu gewährleisten.

Das Projekt in der TU Wien Pilotfabrik verfolgt das übergeordnete Ziel, das Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme zu testen und zu verbessern. Zur Bewertung der Qualität und Anwendbarkeit ist eine hochwertige Datenbasis erforderlich. Die Teilnehmer:innen werden im Rahmen des Projekts Arbeitsschritte mit Unterstützung eines kollaborationsfähigen Roboters, eines passiven Exoskeletts und unterschiedlicher Informationsbereitstellungssysteme, z. B. per Tablet oder Augmented-Reality-Brille durchführen.

Ihre Teilnahme an der Studie ermöglicht es, eine umfassende Evaluierung aus Mensch- und Unternehmenssicht durchzuführen.

Als Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften, leiten wir die Studie mit einem Erhebungsraum der TU Wien Pilotfabrik.

#### Verantwortliche:r:

Rektorat der Technischen Universität Wien  
Karlsplatz 13  
1040 Wien

#### Datenschutzbeauftragte:

Mag. Christina Thirsfeld  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/018, 1040 Wien  
datenschutz@tuwien.ac.at

Folgende Datenkategorien werden bei dieser Datenverarbeitung verarbeitet.

- Soziodemografische Informationen (Alter, Geschlecht, derzeitige Beschäftigung, Erfahrung mit industriellen Assistenzsystemen)
- Fragen zu Usability, mentaler Belastung, Ergonomie, Nutzer:innenakzeptanz im Testverlauf
- Dauer und Qualität der Durchführung einzelner Arbeitsschritte

<sup>6</sup> Datenschutz-Grundverordnung

<sup>7</sup> Datenschutzgesetz

<sup>8</sup> Forschungsorganisationsgesetz

- Aufnahme von Ton und Bild im Rahmen von Videoaufnahmen zur Analyse der Prozessschritte

Die Daten werden in der TU Wien Pilotfabrik unmittelbar bei Ihnen erhoben durch Beobachtung, Fragebögen, Interviews und Videoaufnahmen.

### **Zweck der Datenverarbeitung**

Die Verarbeitung dieser Daten erfolgt auf Grundlage der Teilnahme an der Studie in der TU Wien Pilotfabrik zum Zweck der wissenschaftlichen Forschung. Im Detail hat die Datenverarbeitung folgende Zwecke:

- Erfassung der Usability, Nutzer:innenakzeptanz, mentalen Belastung, Ergonomie, Prozesszeiten und Qualität für mit Assistenzsystemen unterstützen Montageprozessen
- Evaluierung der Anwendbarkeit des Evaluierungsmodells auf industrielle Assistenzsysteme

Darüber hinaus behält sich die Technische Universität Wien vor, die anonymisierten Daten für weitere Forschungszwecke zu nutzen. Die über den Fragebogen erhobenen Daten werden anonymisiert erhoben, die Videoaufnahmen werden anonymisiert ausgewertet und ab diesem Zeitpunkt anonym weiterverwendet.

### **Übermittlung**

Alle Auswertungen und Darstellungen von Ergebnissen, die veröffentlicht oder an Dritte weitergegeben werden, erfolgen in anonymisierter und aggregierter (zusammengefasster) Form. Sie erlauben daher keine Rückschlüsse auf Ihre Person.

### **Übermittlung an Drittstaaten und/oder internationale Organisationen:**

- Ja
- **Nein**

### **Rechtsgrundlage für die Datenverarbeitung**

Die Verarbeitung und Verwendung Ihrer personenbezogenen Daten erfolgt auf der Grundlage von Art. 6 Abs 1 (a) DSGVO (Einwilligung) und beschränkt sich auf die oben genannten Zwecke.

### **Speicherdauer/Löschungsfrist**

Ihre Daten werden 10 Jahre ab dem Datum der Einwilligungserklärung gespeichert.

### **Rechtsbehelfsbelehrung**

Im Zusammenhang mit der Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten stehen Ihnen die Rechte auf

- Auskunft,
- Berichtigung,
- Löschung,
- Einschränkung der Verarbeitung,
- Datenübertragbarkeit und
- Widerruf

zu.

### Die Rechte auf

- Auskunft,
- Berichtigung und
- Einschränkung der Verarbeitung

können beschränkt werden, sofern durch die Ausübung dieser Rechte die Erreichung des Forschungszwecks voraussichtlich unmöglich gemacht oder ernsthaft beeinträchtigt wird (Art. 89 Abs 2 DSGVO).

Wenn Sie glauben, dass die Verarbeitung Ihrer Daten gegen das Datenschutzrecht verstößt oder Ihre datenschutzrechtlichen Ansprüche sonst auf eine Weise verletzt worden sind, können Sie sich bei der zuständigen Aufsichtsbehörde beschweren: Österreichische Datenschutzbehörde (DSB), Barichgasse 40-42, 1030 Wien.

### Kontakt

Sollten Sie weitere Fragen oder Anliegen zur Verarbeitung Ihrer Daten haben, wenden Sie sich bitte an:

#### Fachliche Ansprechperson an der TU Wien

Proj. Ass. Dipl.-Ing. Tanja Zigart

Institut für Managementwissenschaften, Forschungsbereich Mensch-Maschine-Interaktion

Theresianumgasse 27, 1040-Wien, Österreich

Tel: +43 (1) 58801 - 330 59

[tanja.zigart@tuwien.ac.at](mailto:tanja.zigart@tuwien.ac.at)

Allgemeine Informationen zum Datenschutz finden Sie bei der österreichischen Datenschutzbehörde unter <https://www.dsb.gv.at/>. Datenschutzinformationen der TU Wien finden Sie unter <https://www.tuwien.at/tu-wien/organisation/zentrale-services/datenschutz-und-dokumentenmanagement/datenschutz/>

### Datenschutzrechtliche Einwilligungserklärung gemäß Art. 6 Abs 1 lit a DSGVO zur Studie in der TU Wien Pilotfabrik

Ich, \_\_\_\_\_ (Name und Geburtsdatum der/des Teilnehmenden), bin damit einverstanden, dass die Technische Universität Wien (in der Folge „TU-Wien“) folgende personenbezogene Daten zum Zweck der Studie in der TU Wien Pilotfabrik verarbeiten darf:

- Soziodemografische Informationen (Alter, Geschlecht, derzeitige Beschäftigung, Erfahrung mit industriellen Assistenzsystemen)
- Fragen zu Usability, mentaler Belastung, Ergonomie, Nutzer:innenakzeptanz im Testverlauf
- Dauer und Qualität der Durchführung einzelner Arbeitsschritte
- Aufnahmen von Ton und Bild im Rahmen von Videoaufnahmen zur Analyse der Prozessschritte

Die Daten werden 10 Jahre ab dem Datum der Einwilligungserklärung gespeichert. Es besteht jedoch die Möglichkeit einer Widerrufserklärung, damit die Daten früher gelöscht werden.

Ich erkläre hiermit, dass ich über die Informationspflichten (Recht auf Auskunft/Berichtigung/Löschung etc.) gemäß Art. 12–21 DSGVO aufgeklärt wurde und diese zur Kenntnis genommen habe.

Ich erkläre hiermit, dass diese Einwilligungserklärung auf freiwilliger Basis erfolgt. Auch wird mir mitgeteilt, dass ich meine Einwilligung ohne nachteilige Folgen jederzeit formlos mit Wirkung für die Zukunft widerrufen kann.

Meine Widerrufserklärung kann ich

- postalisch richten an: Tanja Zigart, Theresianumgasse 27, 1040 Wien, Österreich
- per E-Mail richten an: [tanja.zigart@tuwien.ac.at](mailto:tanja.zigart@tuwien.ac.at)

Im Fall des Widerrufs löscht die TU Wien mit Zugang meiner Widerrufserklärung die von der TU Wien und allfälligen Auftragsverarbeiter:innen gespeicherten Daten. Durch den Widerruf wird die Rechtmäßigkeit der bis dahin erfolgten Verarbeitung nicht berührt.

Ich habe die Möglichkeit, die Datenschutzinformation und die von mir unterzeichnete datenschutzrechtliche Einwilligungserklärung in Kopie zu erhalten. Das Original verbleibt bei der Projektleitung.

(Ort/Datum)

(Unterschrift der/des Teilnehmenden)

## 8.6 Gewichtung mit AHP

	Welches der beiden Kriterien ist wichtiger? (mit x markieren)				Wie viel wichtiger ist das gewählte Kriterium gegenüber dem anderen?								Konsistenzindex
	linkes wichtiger	gleich wichtig	rechtes wichtiger		sehr viel wichtiger	ein bisschen wichtiger							
Dimension 1	linkes wichtiger	gleich wichtig	rechtes wichtiger	Dimension 2	9	8	7	6	5	4	3	2	7,8%
Kosten			x	Prozess								x	
Kosten	x			Lernen & Entwickeln						x			
Kosten			x	User							x		
Kosten	x			Technologie		x							
Prozess	x			Lernen & Entwickeln			x						
Prozess	x			User								x	
Prozess	x			Technologie	x								
Lernen & Entwickeln			x	User					x				
Lernen & Entwickeln	x			Technologie						x			
User	x			Technologie	x								
													1,4%
Dimension Prozess	linkes wichtiger	gleich wichtig	rechtes wichtiger	Kriterium 2	9	8	7	6	5	4	3	2	
Durchlaufzeit			x	Produktivität		x							
Produktivität			x	Qualität							x		
Durchlaufzeit			x	Qualität			x						
													1,0%
Dimension User	linkes wichtiger	gleich wichtig	rechtes wichtiger	Kriterium 2	9	8	7	6	5	4	3	2	
Ergonomie	x			Arbeitsbelastung								x	
Ergonomie		x		Nutzerakzeptanz									
Ergonomie	x			Usability							x		
Arbeitsbelastung			x	Nutzerakzeptanz								x	
Arbeitsbelastung	x			Usability								x	
Nutzerakzeptanz	x			Usability					x				

Abbildung 51: AHP Gewichtung Fallbeispiel, eigene Darstellung

## Gewichtung der Dimensionen

Wichtigkeit der Dimensionen	Kosten	Prozess	Lernen und entwickeln	Nutzer:innen	Technologie
Kosten	1,00	0,50	4,00	0,33	8,00
Prozess	2,00	1,00	7,00	2,00	9,00
Lernen und entwickeln	0,25	0,14	1,00	0,20	4,00
Nutzer:innen	3,00	0,50	5,00	1,00	9,00
Technologie	0,13	0,11	0,25	0,11	1,00
Summe	6,38	2,25	17,25	3,64	31,00

Wichtigkeit der Dimensionen	Kosten	Prozess	Lernen und entwickeln	Nutzer:innen	Technologie	Prioritätsvektor	in Prozent
Kosten	0,16	0,22	0,23	0,09	0,26	<b>0,19</b>	<b>19 %</b>
Prozess	0,31	0,44	0,41	0,55	0,29	<b>0,40</b>	<b>40 %</b>
Lernen und entwickeln	0,04	0,06	0,06	0,05	0,13	<b>0,07</b>	<b>7 %</b>
Nutzer:innen	0,47	0,22	0,29	0,27	0,29	<b>0,31</b>	<b>31 %</b>
Technologie	0,02	0,05	0,01	0,03	0,03	<b>0,03</b>	<b>3 %</b>
Summe	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>	<b>31 %</b>

<b>Anzahl Kriterien</b>	<b>5</b>	<b>RI=</b>	<b>1,12</b>
	Lamda_max=	5,348863607	
	CI	0,087215902	
	CR	7,8 %	kleiner als 10 % → akzeptabel

## Gewichtung der Kriterien

Wichtigkeit der Kriterien	Durchlaufzeit	Produktivität	Qualität
Durchlaufzeit	1,00	0,13	0,14
Produktivität	8,00	1,00	0,33
Qualität	7,00	2,00	1,00
Summe	16,00	3,13	1,48

Wichtigkeit der Kriterien	Durchlaufzeit	Produktivität	Qualität	Prioritätsvektor	in Prozent
Durchlaufzeit	0,0625	0,04	0,10	<b>0,0664</b>	<b>7 %</b>
Produktivität	0,5000	0,32	0,23	<b>0,3486</b>	<b>35 %</b>
Qualität	0,4375	0,64	0,68	<b>0,5850</b>	<b>58 %</b>
Summe	1,00	1,00	1,00	<b>1,0000</b>	<b>100 %</b>

<b>Anzahl Kriterien</b>	<b>3</b>	<b>RI=</b>	<b>0,9</b>
Lamda_max=	3,015709165		
CI	0,007854583		
CR	1,4 %	kleiner als 10 % → akzeptabel	

Wichtigkeit der Dimensionen	Ergonomie	Arbeitsbelastung	Akzeptanz	Usability
Ergonomie	1,00	2,00	1,00	3,00
Arbeitsbelastung	0,50	1,00	0,50	2,00
Akzeptanz	1,00	2,00	1,00	5,00
Usability	0,33	0,50	0,20	1,00
Summe	2,83	5,50	2,70	11,00

Wichtigkeit der Dimensionen	Ergonomie	Arbeitsbelastung	Akzeptanz	Usability	Prioritätsvektor	in Prozent
Ergonomie	0,35	0,36	0,37	0,27	<b>0,34</b>	<b>33,99 %</b>
Arbeitsbelastung	0,18	0,18	0,19	0,18	<b>0,18</b>	<b>18,13 %</b>
Akzeptanz	0,35	0,36	0,37	0,45	<b>0,39</b>	<b>38,54 %</b>
Usability	0,12	0,09	0,07	0,09	<b>0,09</b>	<b>9,34 %</b>
Summe	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>	<b>100,00 %</b>

<b>Anzahl Kriterien</b>	<b>4</b>		
Lamda_max=	4,02812108		
CI	0,009373693		
CR	1,0%	kleiner als 10% → akzeptabel	

## 8.7 Montageanleitung

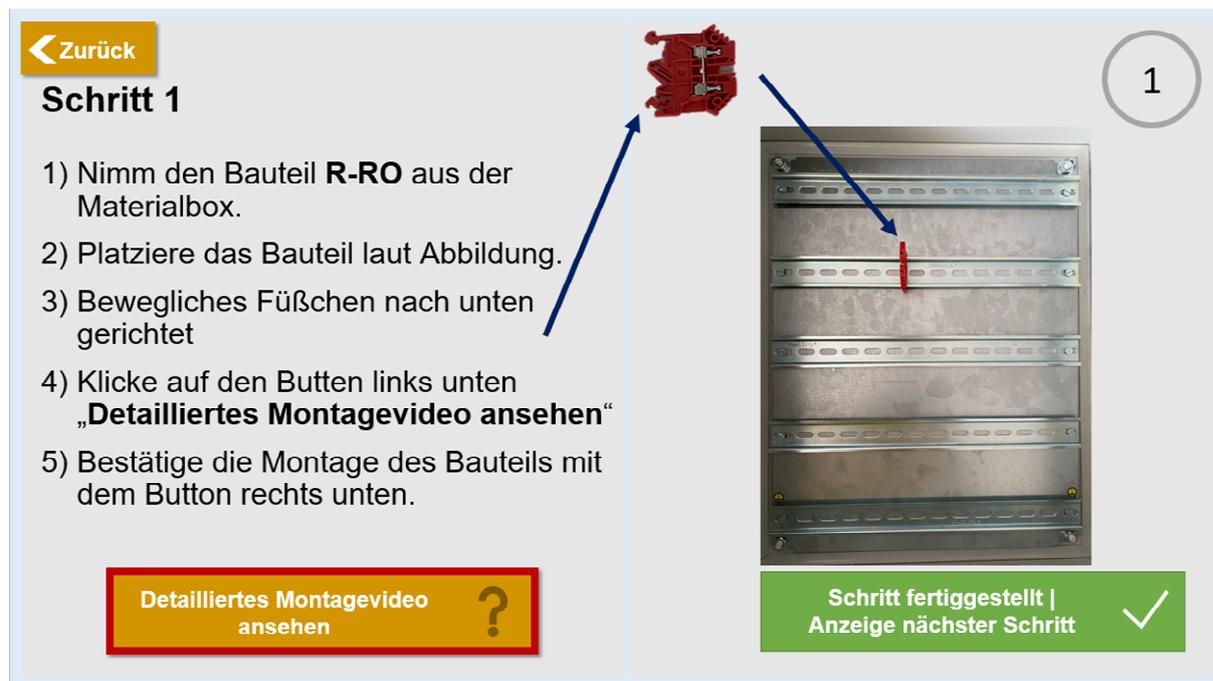


Abbildung 52: Montageanleitung Beispiel, eigene Darstellung

## 8.8 Anwendung in anderen Fallbeispielen

Das Evaluierungsmodell wurde in weiteren Evaluierungsszenarien eingesetzt, welche bereits in Publikationen veröffentlicht wurden. In Mayrhofer et al. (2021) wird ein Lernassistenzsystem im Rahmen der Projekte RoboNugget und UN.I.CO bewertet. In Zigart et al. (2022) und Lovasz-Bukvova et al. (2021) werden Mixed-Reality-Anwendungen multikriteriell bewertet. In Nowak (2021) werden ein Exoskelett und ein fahrerloses Transportsystem mit dem Evaluierungsmodell bewertet. In Zigart und Schlund (2022) und Zigart, Zafari et al. (2022) wird ein Vergleich zwischen Studierenden und Arbeitenden in einem Unternehmen durchgeführt.

## 8.9 Interviewleitfaden

Tabelle 75: Interviewleitfaden zur Validierung des Evaluierungsmodells, eigene Darstellung

Interviews zur Validierung des Evaluierungsmodells
Datum:
Teilnehmer:innen:
Branche:
<b>Einleitung</b>
In der Präsentation haben Sie bereits das entwickelte Evaluierungsmodell gesehen. Dabei geht es um die ausgewogene Evaluierung unternehmens- und menschenbezogener Kriterien. Ziel ist es, das Modell mit Expert:innen aus der Industrie zu validieren, d. h. die Sinnhaftigkeit und Anwendbarkeit in der Industrie rauszufinden sowie Weiterentwicklungsmöglichkeiten zu eruieren. (Modell am Flipchart zeigen + dort für alle sichtbar dokumentieren)

Fragen	
1.	Ist es ok, wenn ich unser Gespräch aufzeichne, um es später zu transkribieren? Darf ich Sie als Experte/Expertin in Position XX in der Branche YY nennen?
2.	Bitte stellen Sie sich kurz vor, Name, Position, Unternehmen und Branche.
3.	Wie treffen Sie derzeit die Entscheidung, einen Prozess zu verbessern und Unterstützungssysteme anzuschaffen?
4.	Vorhin habe ich das Evaluierungsmodell vorgestellt. Sind Ihrer Meinung nach alle relevante Kriterien im Evaluierungsmodell enthalten, um eine Entscheidung für den Einsatz von einem Assistenzsystem zu treffen?
5.	Fehlen Ihrer Meinung nach Kriterien oder sind welche überflüssig?
6.	Denken Sie, dass dieses Modell in der Praxis anwendbar ist? Falls nein: warum nicht? Was müsste man verändern, damit es anwendbar ist?
7.	Sehen Sie Unterschiede in der Anwendung abhängig von Prozessen und Branchen?
8.	Haben Sie noch weitere Rückmeldungen oder Anmerkungen zum Modell?

## 8.10 Transkripte der Interviews

In diesem Abschnitt finden sich die Transkripte der Interviews, welche in Kapitel 6.6.4 ausgewertet wurden. Die Transkripte wurden anonymisiert, die Position und Branche sind angegeben. In den Transkripten der Interviews werden folgende Abkürzungen verwendet.

- TZ: Tanja Zigart, Leiterin der Interviews
- I#U: Interviewte Person, Nummerierung, Unternehmen
- I#W: Interviewte Person, Nummerierung, Wissenschaft

### 8.10.1 Interview 1

Datum: 27.04.2022

Interviewpartner:in:

- I1U: Position: Gruppenleiter technisches Service, Branche: Medizintechnik

TZ: Ist es ok für dich, wenn ich das aufnehme?

I1U: Ja.

TZ: Bitte kurz Name, Position, Firma und Branche mitteilen. Ist es ok, wenn ich dich in der Dissertation zitiere, nicht namentlich, sondern mit Position und Branche?

I1U: Ja natürlich. XX, Gruppenleiter Service, YY, Medizintechnik

TZ: Formale Sachen sind jetzt abgehakt. Wie kommst du zu der Entscheidung, wenn es darum geht ein neues technisches System, z. B. Augmented Reality, im Service einzuführen? Wie ist dieser Prozess, um eine Unterstützungssystem einzuführen?

I1U: Bei uns ist es immer so, dass der Kosten-Nutzen-Faktor eine große Rolle spielt, aber in erster Instanz einmal ist der Bedarf da. Da ist es immer sehr wichtig, dass man versucht über den Tellerrand hinauszuschauen und nicht in festgefahrenen Strukturen festsitzt. Das haben uns auch die letzten 2 bis 2 ½ Jahren gezeigt, dass das immer wichtiger wird. Und der Leidensdruck wird immer größer und wir müssen immer effizienter werden und dabei muss man sich nach Tools umsehen.

TZ: Du hast nun angesprochen den Bedarf und den Kosten-Nutzen-Faktor. Gibt es noch weitere Kriterien, die ihr euch bei der Einführung solcher Systeme anseht?

I1U: Großer Punkt, einer der Hauptpunkte, der sich auf alles Weitere niederschlägt, ist die Qualität. Mit der steht und fällt alles. Und aus der ergeben sich weiteren Faktoren für uns im technischen Service, was jetzt nicht so weit von der Produktion entfernt ist. Durchlaufzeiten.

TZ: Vorhin habe ich das Evaluierungsmodell vorgestellt. Bei dem ist es so, dass wir uns nicht nur die klassischen Produktionskennzahlen ansehen, Kosten, Produktivität, Durchlaufzeit oder Qualität, sondern auch die menschenzentrierten Kriterien, wie z. B. wie akzeptieren das die Leute, wie ist die Usability von den Systemen.

I1U: Das ist auf jeden Fall sehr sinnvoll, weil es zeigt sich immer mehr, also für mich jetzt persönlich aus meiner Position heraus, die ich jetzt zwar noch nicht so lang bekleide, wie wichtig das ist und ja, man kann die besten Systeme implementieren, wenn keine Akzeptanz da ist, dann landen sie in der Schublade.

TZ: Ok, d. h. gehen wir es vielleicht einmal kurz durch [anhand vom ausgedruckten Evaluierungsmodell werden Kriterien besprochen und Notizen gemacht]. Also es ist im Prinzip die Frage, ob deiner Meinung nach alle relevanten Kriterien drauf sind, ob irgendwas überflüssig ist, also irgendwas was du nicht anschauen würdest? Heißt jetzt nicht, dass alles so systematisch sein muss, wie es hier ist, aber, wenn du sagst du betrachtest das natürlich mit z. B. Nutzerakzeptanz bzw. der Akzeptanz, dann ist das damit abgedeckt. Dass das jetzt da sehr systematisch ist, ist klar. Ob dir was fehlt oder das ist jetzt für euch nicht sonderlich wichtig für euch im Prozess, das wäre jetzt die Frage. Und es geht hauptsächlich um die Kriterien [mittlere Spalte], das [rechte Spalte] sind beispielhafte Messmethoden. Das kann auch anders sein, falls ihr das anders messt, ist das auch kein Thema. Nur von der Idee her von den Kriterien her. Wir können da auch gleich mitschreiben. Wenn ich das richtig verstanden hab ist Wirtschaftlichkeit jedenfalls ein großes Thema.

I1U: Ja, ohne der wird man es nicht umsetzen können.

TZ: Qualität ist auch wichtig.

I1U: Ja, Durchlaufzeit, und dann Produktivität.

TZ: Es muss keine Reihenfolge sein.

I1U: Ich sag's nur von meiner Position. Dann ist Qualität das wichtigste. Weglassen oder als nicht wichtig würde ich jetzt nicht sagen. Weglassen oder als nicht wichtig zu beurteilen, würde ich mich jetzt nicht trauen.

TZ: Ok.

I1U: Nutzerinnen, da spielt halt eines ins andere. Kann man arbeiten, Ergonomie muss meiner Meinung nach von Anfang an passen. Ergonomie und Arbeitsbelastung, wie ist da die Arbeitsbelastung jetzt ausgelegt?

TZ: Ist ähnlich, Ergonomie ist auf der körperlichen Ebene, Arbeitsbelastung mehr auf der mentalen Ebene, mehr auf der subjektiv wahrgenommenen Ebene.

I1U: Ok, also wie komplex ist die Arbeit und das spielt hier zusammen.

TZ: Ergonomie ist etwas was man von außen objektiv betrachtet und Arbeitsbelastung ist subjektiv auf die Person bezogen.

I1U: Das ist das erste was nach 20 Minuten auffällt, steifer Nacken und Arbeitsbelastung und wenn man nach 2 Stunden geschlaucht ist und gar nicht weiß warum.

TZ: Ja genau, so kann man es gut erklären.

I1U: Unsere Tests jetzt, die wir gestartet haben, wenn wir mit den Systemen gearbeitet haben, ist der Punkt Ergonomie häufig gekommen. Vor allem, weil es sehr schnell und für jeden einfach zu erheben ist, oft gekommen. Mich schmerzt es und es macht keinen Spaß. Einfach von der Belastung und von der Trageform her.

TZ: Ok.

I1U: Usability, zweit wichtigste Sache. Wenn wir so ein System zur Verfügung stellen, denken wir vor allem an unsere Niederlassungen weltweit, z. B. in Bulgarien. Eine HoloLens in ein Paket zu geben und hin zu schicken ist leider nur die halbe Sache. Was wir gesehen haben, ist alles aufzusetzen, auch wenn es schon out of the box ist, aber trotzdem braucht man vor Ort Infrastruktur und IT – schwierig. Das muss immer mit beachtet werden, weil sonst hat man Termine, die dann wegen der Technik nicht funktionieren und gecancelt werden müssen.

TZ: Ok.

I1U: Und aus dem Ganzen ergibt sich dann die Nutzerakzeptanz.

TZ: Ok. Also aus diesem beiden ergibt sich die Nutzerakzeptanz. Ich schau mal kurz auf meinen Fragebogen. Fehlen deiner Meinung nach Kriterien oder findest es wichtig, weitere aufzunehmen?

I1U: Bei der Readiness der Technologie ist meiner Meinung die wichtigste Sache out of the box, dass nicht bei jedem 2. Mal ein Update ist. Und wenn müssen die halt von jedem easy und einfach durchgeführt werden können. Ich kenn nämlich Kollegen, die dann in das ganze Ding reinfallen, die zertifiziert werden müssen, die geschult werden müssen. auf Smartphone Level muss es funktionieren. Ich muss den Leuten auf jeden Fall zutrauen können, dass sie ein Smartphone bedienen können müssen und gegebenenfalls updaten können, aber viel weiter drüber wird es dann schwierig. Also jemanden zu sagen, dass ich seinen E-Mail-Account mit dem Konto verbinden muss mit dem und dem Parameter, dann wird's da schon meistens schwierig. Und dann ist relativ schnell der Frust da, weil ich vorneweg schon kein Erfolgserlebnis habe.

TZ: Ok, alles klar.

I1U: Aber mir würde so nichts einfallen, was ich sonst noch hinzufügen würde.

TZ: Ok, das ist ja grundsätzlich positiv. Glaubst du das ist in der Form so, wenn man das hernimmt, diese ganzen Kriterien hernimmt und in der Praxis anwendet, bei euch zum Beispiel bei der Evaluierung vom Einsatz von AR, dass man das durchführt und sagt man gewichtet vorher welche Kriterien wichtiger welche unwichtiger ...

I1U: ... auf jeden Fall ...

TZ: ... und dann geht man alle durch und schaut, dass man alle Kriterien rausfindet?

I1U: Auf jeden Fall, ganz bestimmt. Vorher beim Gespräch, da kommen die ganzen Schlagwörter in den Kopf, und jetzt wo man davorsteht, also ich finde mich da überall wieder. Wie gesagt und mir fällt jetzt nichts ein, was ich noch hinzufügen würde. Also ja, wäre auf jeden Fall anzuwenden.

TZ: Ok, super. Dann wäre noch die letzte Frage generell, gibt es deiner Meinung nach Unterschiede in Prozessen, wo vielleicht Unterschiede sind in der Anwendung, unterschiedlicher Fokus oder Branchen bei der Anwendung des Modells?

I1U: Allein bei uns sind natürlich die Unterschiede von der Produktion zum Service. In Linie, Lean zu sein, in der Produktion ist das, ich sag es jetzt mal in Anführungszeichen, ist das natürlich einfacher umzusetzen, oder mehr gewichtet, und bei uns wird dann aber der Faktor jeder muss die Zertifizierungen haben, es ist auch schon mehr geclustert in einzelne Pakete. Aber es ist trotzdem nicht so einfach so kleine Tortenstücke zu kreieren wie in der Produktion, wo ich eben sagen kann, der Prozess, der Produktionsprozess von A bis C die Person muss dann und kann ich dann aussteuern und einen anderen dorthin geben, ist bei uns im Service nicht so

einfach. Deswegen sind wir hier mehr gewichtet auf den Leuten das Knowledge näher zu bringen, das ist eben der größere Faktor als bei den anderen mehr Produktivität zu schaffen. Da ist eben die Gewichtung in beiden Fällen wichtig, jeder muss wissen was er tut, jeder muss produktiv sein, aber wir haben eben da die Aufteilung eben Service und Produktion.

TZ: Das heißt zum Beispiel in der Qualifikation würde man das dann sehr merken.

I1U: Bei der Qualifikation wäre das Pfeilchen beim Service nach oben und wahrscheinlich bei der Linienproduktion nach unten. Dafür halt die Produktivität höher.

TZ: Ok.

I1U: Genau bei der Produktivität ist es Pfeilchen beim Service eher nach unten. Und Qualität bei allen immer hoch.

TZ: Ok, super vielen Dank letzte Frage gibt es noch weitere Rückmeldungen oder Anmerkungen zum Modell? Oder irgendetwas was du loswerden möchtest?

I1U: Nein, so nichts, mich würde nur interessieren wie die Arbeitsbelastung bei der NASA gemessen wird.

TZ: Ja, das kann ich dir gern gleich erklären. Aber dann schließen wir das mal ab. Vielen Dank.

## 8.10.2 Interview 2

Datum: 27.04.2022

Interviewpartner:in:

- I2W: Position: Dozentin im Bereich Industriewirtschaft, Branche: Wissenschaft/Forschung, Fokus: Strategie- und Changeprozess im Digitalisierungsbereich
- I3W: Position: Researcher im Bereich Industrial Management, Branche: Wissenschaft/Forschung, Fokus: Strategie- und Changeprozess im Digitalisierungsbereich

TZ: Ist es ok für euch, wenn ich das Gespräch aufnehmen?

I2W: Ja.

I3W: Ja, ist ok für mich.

TZ: Ok super. Könnt ihr mir bitte einmal Name, Position und Unternehmen, nicht Unternehmen, FH sagen. Also quasi einmal kurz vorstellen, in ganz kurz.

I2W: XX, YY, Industriewirtschaft, Dozentin.

I3W: XX, YY, Industrial Management, Researcher.

TZ: Ok perfekt, Dankeschön. Wie gesagt, es ist dann so, dass ich euch in der Dissertation nicht namentlich, aber eben mit Position und Branche, also Wissenschaft. Genau. Gut. Das ist das Evaluierungsmodell, das habe ich vorher schon vorgestellt wie es geht, vor allem um die Einführung von Assistenzsystemen in der Produktion. Und auf welche Kriterien man dabei achten sollte beziehungsweise evaluieren sollte, wenn man das einführt. Die Idee dahinter, also für diesen Bereich ist es entwickelt worden. Und die Frage ist jetzt einerseits eure Meinung dazu, ob alle Kriterien berücksichtigt sind, wenn man im System integriert oder implementiert und wenn ja oder nein, welche zu viel oder zu wenig sind.

I2W: Dann würde ich mal anfangen. Aus meiner Sicht fehlt der Bereich der Unternehmenskultur beziehungsweise generell die organisatorischen oder organisationalen Rahmenbedingungen ein bisschen. Das heißt, überall wo wir unterwegs sind in Richtung in Innovationsfähigkeit, Unternehmenskultur, ist die offen oder nicht, das sind noch so Themen, die glaube ich, maßgeblich noch wichtig sind.

TZ: Okay.

I3W: Ich würde die Innovationsfähigkeit aufgreifen, zumindest das Wort Innovation, weil eigentlich mehr Richtung Employer Branding, das kann das Unternehmen eigentlich auch nutzen, um sich ein bisschen am Markt zu etablieren, um zu sagen wir sind innovativ, wir haben neue Technologien, gerade Richtung Fachkräftemangel, wär das ein zusätzlicher Punkt zur Bewerbung.

TZ: Also da geht es mehr um die Außendarstellung, oder, wenn ich das richtig verstanden hab?

I3W: Ja, auch für Mitarbeiter die bereits im Unternehmen sind

TZ: Ah ok, also dass man gerne da arbeitet ...

I3W: Genau, dass man sieht, dass da ein Fortschritt vorhanden ist und dass es das Unternehmen vielleicht in den nächsten 10 Jahren auch noch gibt und nicht von irgendeinem chinesischem Konzern aufgekauft wird oder Investor halt.

TZ: Okay.

I2W: Bei Qualität noch eine kurze Frage: Qualität bedeutet Qualität des unterstützten Prozesses oder?

TZ: Ja, also Qualität kann Prozess- aber auch Produktqualität sein. In dem Fall ist es tatsächlich die Produktqualität, dass man schaut wie viele Fehler entstehen im Ist-

Prozess, also ohne dem System und gibt es einen Unterschied, also hat es Einfluss auf die Qualität auf den neuen Prozess mit dem System.

I3W: Kann man die Wirtschaftlichkeit nicht noch anders auch berechnen als nur über die Amortisation?

TZ: Ja, also die Methoden sind an sich beispielhafte Methoden, weil grundsätzlich ist es so, dass das Modell die Idee ist, dass ein Unternehmen z. B. für Ergonomie, klassische Methode EAWS, schon anwendet, dann sollen sie bitte das verwenden, das kann man im Modell austauschen. Das ist nicht das Problem. Das ist das wie ich das gemacht habe in meinen praktischen Use Cases. Ok, das war jetzt die Frage zu zusätzlichen Kriterien. Sind irgendwelche Kriterien eurer Meinung nach überflüssig oder weniger relevant?

I3W: Hm weiß nicht, wie ist Arbeitsbelastung zu verstehen?

TZ: Das ist die wahrgenommene Arbeitsbelastung auf die Person, d. h. hauptsächlich mentale Belastung, aber auch, wenn ich physische Belastung habe. Zum Beispiel, wenn ich mir nach 2 Stunden denke ich bin komplett erledigt, ist das die subjektiv wahrgenommene.

I3W: Also im Ist-Prozess?

TZ: Im Ist- und im Soll-Prozess. Also das ist nicht objektiv, sondern es könnte sein zum Beispiel wir zwei machen genau die gleiche Arbeit und ich denke mir nach 2 Stunden „poa, ich bin komplett erledigt“ und du denkst dir „wann fangen wir endlich an?“ also die subjektiv wahrgenommene Belastung beim Arbeiten.

I3W: Und wie entwickelt sich die Qualifikation, ist es nicht auch der Wille? Oder wie ist das zu verstehen?

TZ: Bei der Qualifikation, oftmals ist die Idee ein Assistenzsystem einzuführen, um die Qualifikation in irgendeiner Form, also zum Beispiel um die Einschulung zu erleichtern oder um tatsächlich weniger Qualifikationen am Prozess zu benötigen, da gibt es unterschiedliche Ansätze und da zu schauen, dass sie die Qualifikation senken, bei anderen erhöht sich aber auch. Was ist dann tatsächlich möglich, wenn man das System einsetzt. Teilweise wird sie auch höher durch den Einsatz.

I2W: Bei der Kostenseite sollte man sich glaube ich nicht nur die Wirtschaftlichkeit anschauen, sondern auch die indirekten Kosten, die jetzt beispielsweise noch zusätzlich entstehen in Richtung, all die internen Kapazitäten, die ich brauche, um den Betriebsrat mit ins Boot zu holen, um das ganze überhaupt zum Laufen zu bringen, weißt du, was ich meine?

TZ: Also alles was im Prinzip im Aufwand von der System Einführung drinnen ist.

I2W: Ja genau, aber nicht die direkten, also das System, sondern das was es braucht. Also vor allem wenn ich jetzt denk an ...

I3W: Auch die ganzen Workshops am Anfang.

I2W: Ja das schon, aber das könntest du sogar noch reinnehmen in diese Implementierungsworkshops, aber ich rede hauptsächlich von der Sache, wenn ich eine Betriebsvereinbarung brauch, zum Beispiel. Die ganzen Abstimmungstermine mit dem Betriebsrat und die zeitliche Komponente die dahinter hängt. also das ist auch ein bisschen das Thema, weil Datenschutz ist bei diesen Sachen ein ganz maßgebliches Thema.

TZ: Ok, guter Punkt.

I2W: Und inwiefern, da weiß ich jetzt nicht wie das abgedeckt ist, aber wenn man industriell an Assistenzsystemen arbeitet, hat man ja zwei Arten von Veränderungen. Wir haben einerseits die inhaltliche also quasi jetzt wird mit dem neuen System gearbeitet, und andererseits die Nutzung von dem Tool an sich, also das Anziehen von einem Exoskelett an sich. Das heißt es sind eigentlich zwei Dimensionen, die man sich anschauen muss. Da weiß ich nicht wie man das vielleicht hineinbringen könnte.

TZ: Ist es noch bei Kultur drinnen vielleicht? Oder ...

I2W: Vielleicht eher so Lerneffekt also mehr bei Qualifikation vielleicht. Dass es zwei Elemente sind. Also die Hardware Nutzung quasi und dann die Nutzungssicherheit bzw. die Qualität des Outputs. Also wenn ich mit dem Ding arbeite.

I3W: Das heißt, ich muss Hardware und Software verstanden haben, falls es eine Software hat.

I2W: Ja genau, weil du fokussiert dich hier sehr stark auf das tun an sich, also ich habe jetzt das Exoskelett an und bin jetzt besser drinnen, aber dieser Parallelprozess dass du den Mitarbeiter erst dazu bringen musst das anzuziehen und richtig zu beherrschen das fehlt mir noch ein bisschen im System.

TZ: Ist es mehr Richtung Zeit, also die Einschulungsdauer auf die Systeme zum Beispiel?

I2W: Ja, genau.

TZ: Ok, super. Okay, dann die nächste Frage ist, denkt ihr, dass es in der Praxis anwendbar ist? Beziehungsweise inwiefern ist es in der Industrie anwendbar? Eurer Einschätzung nach.

I2W: Von der objektiven Anwendbarkeit her denke ich ja ist es anwendbar, aber ich bin mir sicher, dass die Unternehmen nicht die Ressourcen aufwenden würden, um

das alles zu machen. Heißt so viel wie einige Kennzahlen, wie zum Beispiel die Durchlaufzeitmessung ja, die sind ja meistens auch vorliegend und kann man schnell machen, aber zum Beispiel den NASA-RTLX zu machen zum Beispiel oder sich ein TAM Modell aufzubauen, alles wo man Zusatzressourcen braucht, um die Methode überhaupt durchführen zu können, auch Interviews und so weiter und da bin ich mir nicht sicher, ob Unternehmen das tatsächlich tun würden. Das ist glaube ich der größte Knackpunkt. Wenn ich das jetzt richtig sehe ist natürlich Kosten und Prozess sehr unternehmensnahe, das ist das was einfach ist. Aber die anderen Dinge halt nicht so.

I3W: Aber die Messmethoden sind variabel oder? Also wie du gesagt hast die Amortisationsrechnung könnte auch mit einem ROI gemacht werden. Dann könnte ich bei der Nutzerakzeptanz ja zum Beispiel nicht das TAM machen, sondern irgendwelche anderen Wege, oder?

I2W: Das schon, aber das sind meistens keine Daten, die ich schon habe im Unternehmen. Weil die Prozesskennzahlen habe ich meistens.

TZ: Genau, alles was in dieser Nutzer:innen-Dimension ist, da muss man mit den Leuten reden und die Daten erst irgendwoher bekommen.

I2W: Ich glaube das ist das größte Problem. Aber das ist ja generell bei solchen Tools das Problem. Dass man da immer weniger in die Richtung schaut.

TZ: Mhm ok, gut, dann. Eine Frage habe ich noch sehen wir immer Unterschiede in der Anwendung bei Prozessen oder verschiedenen Branchen? Von der Anwendbarkeit.

I2W: Ich glaube das ist nicht immer leicht abgrenzbar. Es kommt drauf an wofür ich es verwende, reden wir jetzt nur von klassischer Produktionsunterstützung oder auch von Randthemen wie On-Boardingprozess?

TZ: Ja auch von sowas, also Einschulungsprozesse für Produktion oder es können auch Logistikprozesse in der Produktion sein.

I2W: Weil das ist schon auch sehr individuell.

TZ: Ja.

I2W: Also ich glaub schon, dass man das Modell runter brechen kann auf die einzelnen Bereiche und ich glaube auch nicht, dass es viel unterschied macht in der Produktion. Es kann natürlich sein, dass man die Kriterien ein bisschen ändern muss.

TZ: Okay.

I2W: Zum Beispiel in unserem Prozess Check sprechen wir von der Informationsbeschaffungszeit, die ein Thema ist, wenn man mit XR arbeitet z. B.

TZ: Ok, ja das ist gut. Ok, jetzt bin ich schon bei der letzten Frage, ob ihr noch weitere Rückmeldungen oder Anmerkungen habt zum Modell?

I2W: Also wie gesagt ich finde es als Metermodell gut, wobei ich eben glaube, dass gerade die Kriterien vielleicht durchaus einen Unterschied machen, welche Art von Prozess ich mir anschau, also ob es jetzt wirklich der reine Produktionsprozess oder ein Instandhaltungsprozess ist oder ein On-Boarding Prozess oder was auch immer ist, und dass sich dann eben die Kriterien mit den Messmethoden ändern. Also es würde vielleicht noch Sinn machen, sich da noch mehr Kriterien zu überlegen, um zu schauen wie man das abdecken kann. Und wenn man dann ein Set hat und dann schau ich mir Dimensionen an, die sind fix, und für mich passt jetzt genau dieses oder jenes Kriterium.

TZ: Also so ein modulares System quasi?

I2W: Ja genau.

I3W: Auch wenn es Richtung Schulung, wären auch andere, weil bei Qualität geht es zum Beispiel nicht darum wie schnell die Person ist, also die neue Methode im Vergleich zur konservativen Methode was hat es jetzt mehr gebracht, also zeitlich, wo jemand anderer etwas anderes machen konnte, leichter getan, gerade wenn man jetzt schaut, da ist der Lehrer vielleicht älteres Semester und der junge Lehrling, dass man vielleicht da unterschiedliche Wege hat zu kommunizieren, könnte damit umgangen werden, das wäre auch eine andere Form der Qualität der Lehre sozusagen.

TZ: Absolut ja, ok gut, dann vielen Dank.

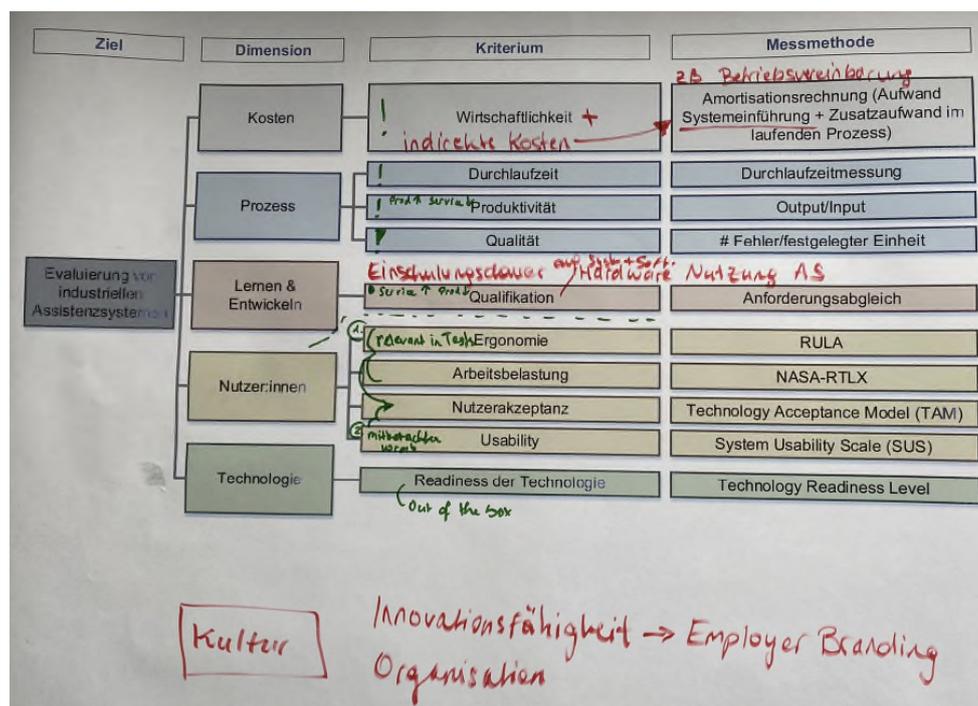


Abbildung 53: Mitschrift Interview 1 (grüne Schrift), Interview 2 (rote Schrift), eigene Darstellung

### 8.10.3 Interview 3

Datum: 27.04.2022

Interviewpartner:in:

- I4U: Production Resources and Tools, Branche: Anlagenbau

TZ: Ist es okay, wenn ich das Gespräch aufnehme?

I4U: Sehr gerne.

TZ: Ok super, dann starten wir gleich los einmal, bitte kurz Name Position Unternehmen und Branche einmal sagen bitte, damit ich das habe.

I4U: Anlagenbau, Production Resources and Tools über gehabt, jetzt im Bereich R & D und Engineering Support. Ich habe in der Vergangenheit schon einige Software Einführungen geleitet.

TZ: Ok perfekt, danke. Ist es okay wenn ich Rolle und Branche nenne?

I4U: Ja, ist in Ordnung.

TZ: So jetzt haben wir das formale mal abgehakt. Wie triffst du die Entscheidung bei einem Prozess ein neues System einzuführen? Also wie ist dieser Entscheidungsprozess war in der ehemaligen Position? Also grundsätzlich der Prozess, also der Entscheidungsprozess.

I4U: Also ganz grundsätzlich würde ich damit beginnen was auch ganz oben steht mit den Kosten. Ist immer die Frage was bringt mir das ganze System, ist natürlich immer extrem schwierig meiner Erfahrung nach die Wirtschaftlichkeit nachzuweisen, also wirklich konkret nachzuweisen, vor allem, wenn man in einer Industrie arbeitet sehr inhomogene Produkte herstellt. Sehr viele verschiedene Prozesse also jetzt in Bezug auf Fertigungstechnologien abwickeln muss. Das heißt wann hat vielleicht ganz einfache manuelle Tätigkeiten bis zur hochkomplexen Maschinen Bedienung von automatisierten Anlagen. Das heißt wenn ich beispielsweise an unsere MES Einführung denke, da mal zu überlegen, was bringt einem das jetzt von der Wirtschaftlichkeit wirklich. Von dem her ist es der erste Schritt der aber schon extrem schwierig ist, wo man sehr ins Detail gehen muss um wirklich herauszuarbeiten, wenn man da den ROI errechnen will und den Vorteil tatsächlich errechnen will. Natürlich schaut man sich dann auch an, wie das überhaupt in so einen Prozess reinpassen würde. in einem Konzern hat natürlich auch immer wieder das Thema was gibt's dort für Vorgaben und so weiter. Das macht es manchmal einfacher und manchmal viel viel schwieriger. Also wenn man gerade so wie in unserem Bereich IT gibt es da sehr viele Richtlinien an die man sich halten muss, die einen einschränken und die Entscheidung definitiv beeinflussen.

TZ: Wenn du jetzt sagst ROI. Was ist ein gangbarer ROI, wo ihr sagt ja das passt das machen wir sofort, da denken wir nicht mal drüber nach?

I4U: Bei uns rechnen wir so drei Jahre bis maximal fünf Jahre als Amortisationszeit. Meistens rechnen wir tatsächlich auf Zeit.

TZ: Ok alles klar. Gut ich habe vorhin das Evaluierungsmodell vorgestellt und das hängt da jetzt auch noch mal. Dann gehen wir vielleicht mal durch die Kriterien, welche sehr wichtig sind bei der Einführung aus seiner Sicht und Welche vielleicht gar nicht betrachtet werden bei euch, wenn ihr ein neues System einführt. Ich würde jetzt auch gleich mitschreiben, also Wirtschaftlichkeit heute verstanden ist ganz groß geschrieben quasi. Das werde ich mal so dokumentieren.

I4U: Man kann jetzt nicht wirklich sagen, dass etwas unwichtig ist priorisiert. Wie hier dargestellt natürlich Prozess ist fast gleich relevant wie die Wirtschaftlichkeit würde ich sagen. Als zweites würde ich dann die Technologie einstufen. Als drittes dann Nutzerinnen einstufen. Und dann bleibt eh nur noch eins über.

TZ: Und innerhalb von der Dimension-Nutzer:innen ist da irgendetwas speziell wichtig?

I4U: Also was ich vielleicht sagen kann ist, dass das eigentlich relativ spät betrachtet wird. Es wird zwar spät betrachtet aber man kommt dann drauf, dass die Relevanz sehr hoch ist, obwohl man es eigentlich erst so spät betrachtet. Weil wenn das nicht gegeben ist hilft mir alles andere nichts. Da kann die Wirtschaftlichkeit super sein und kann super den Prozess unterstützen, aber wenn eben der Nutzer nicht damit zurecht kommt funktioniert es einfach nicht. Also ja das ist eigentlich fast fundamental. Also hoch relevant. Fällt mir jetzt eigentlich gerade erst auf, dass das eigentlich wahrscheinlich viel zu spät betrachtet wird. Also denke ich die Relevanz von so PoC, wo man sich wirklich mal den Prozess komplett durchdenkt und einen horizontalen Prototypen baut, und wirklich auch mit jedem der damit arbeitet damit frühzeitig schon konfrontiert wird. Auch schon im Vorhinein, damit man großartiges Feedback und das dann auch in die Entscheidung einfließen kann. Und nicht erst so spät. Weil meistens ist es einfach so, die haben im Entscheidungsprozess werden sie wenig abgeholt, sag ich jetzt einmal. es wird schon drüber geredet, aber die haben da nicht die macht irgendwas zu entscheiden. Wobei wenn es dann eingeführt wird die macht haben, weil wenn sie das nicht haben wollen, bringt es nichts und es war alles für nichts kann man sagen.

TZ: Genau das ist die Idee dahinter, dass man sich eben nicht nur die Prozesskriterien ansieht, sondern auch die menschenzentrierten Kriterien aufnimmt und mit betrachtet und schaut wie beeinflusst es eigentlich das Ganze. Fehlen irgendwelche Kriterien deiner Meinung nach? Irgendwas was du dir noch zusätzlich anschauen würdest?

I4U: Ich finde da sind sicher die relevanten Kriterien angeführt. Wenn man sich mit denen intensiv auseinandersetzt deckt man mit Sicherheit alles ab. Also alles was relevant ist. Ich will jetzt nicht sagen, dass ich noch irgendwas ergänzen würde, was Sinn hätte. Das würde das stark beeinflussen, das glaub ich nicht.

TZ: Ok, dann ist die nächste Frage ist dieses Modell denkst du in der Praxis überhaupt anwendbar? Und falls nein warum nicht was müssten wir noch ändern um es anwenden zu können?

I4U: Na klar, es ist anwendbar, es muss natürlich irgendwie so angepasst werden, dass das in den Entscheidungsprozess ideal einfließen kann. Also wenn ich nur die Stichworte jemanden vorlegen würde und sage lass das in deinen Entscheidungsprozess einfließen dann führt das zu Nix meiner Meinung nach. Das muss konkret in die Vorgehensweise eingearbeitet werden. Dass man alle Punkte irgendwie abdeckt, gar nicht jetzt plakativ dargestellt ist, sondern Man geht da durch und deckt alles ab obwohl man es nicht bekommt so in die Richtung.

TZ: Also im Prinzip ein Prozess also wo man Schritt für Schritt durchgeht und am Ende hat man alles abgedeckt?

I4U: Ja genau. So ohne dass man sich wirklich Gedanken machen muss habe ich jetzt alles eingearbeitet. Sondern dass das in irgendeiner Art und Weise in einer Vorgehensweise vorgegeben wird ja.

TZ: Ok danke. Und dann noch die Frage. Gibt es irgendeinen Unterschied vielleicht zwischen unterschiedlichen Prozessen oder unterschiedlichen Branchen, wo man das anwendet, von der Anwendung her, aus deiner Erfahrung heraus?

I4U: Ich glaub schon, dass das allein schon, wenn ich mir die unterschiedlichen Bereiche in einem Unternehmen anschau, dass wenn ich mir den Produktionsbereich anschau, schaut es sicher anders aus als in einem Entwicklungsbereich, weil der Fokus wo ganz wo anders ist, ich habe auch mit ganz anderen Leuten zu tun, was man sicher auch berücksichtigen muss. Wenn ich einen Service Bereich habe, detto, wenn ich mit dem agieren muss, schaut es wieder anders aus. Also meiner Meinung nach ist es sehr individuell. Was es natürlich auch wieder schwieriger macht.

TZ: Also grundsätzlich ist es modular aufgebaut. Das ist die Idee dahinter genau eben um dieses Problem,

I4U: dass man es genauso konzipiert für den entsprechenden Anwendungsfall.

TZ: Ja genau. Ok super, dann letzte Frage gibt es noch Rückmeldungen oder Anmerkungen oder irgendwas was du noch loswerden möchtest?

I4U: Nein, ich finde es auf alle Fälle sinnvoll, dass man sowas macht. Vor allem, weil das Entscheidungen sind, die immer mehr anstehen in Unternehmen. Von dem her ist es ein Tool, dass ich sicher vielen Unternehmen weiterhelfen kann, weil das Know How bei den Entscheidungsträgern, ich würde sagen, oft nicht so vorhanden ist. Dementsprechend glaube ich, wenn sie das einfach vorgelegt bekommen, wo das alles berücksichtigt ist, vermeidet das irgendwelche Probleme, die dann später auftreten. Meine Denkweise.

TZ: Ok, dann vielen Dank.

#### 8.10.4 Interview 4

Datum: 27.04.2022

Interviewpartner:in:

- I5U: Abteilungsleiter Bereich Logistik und Produktion, Branche: Anlagenbau, Maschinenbau
- I6U: Prozessmanagement, Branche: Elektrogetriebe und -motoren

TZ: Ist es für euch okay, dass ich euch aufnehme? Das Gespräch aufnehmen?

I5U: Ja.

I6U: Ja.

TZ: Super. Dann sagt mir bitte ganz kurz euren Namen. Position, Firma und Branche.

I5U: Also, Name von der Firma oder meinen Namen?

TZ: Beides.

I5U: Firma ist YY. Mein Name ist XX. Ich bin in der Firma der Abteilungsleiter für den Bereich Logistik und für die komplette Produktion von Elektroschaltschränken, von Aggregaten, also Hydraulikaggregaten und Branche ist Hydraulik, Maschinenbau, Anlagenbau.

TZ: Ok, das ist das, was wir dann reinnehmen. Super, danke.

I6U: Firma ist YY. Name XX. Ich bin Mitarbeiter im Prozessmanagement und verantwortlich für diverse Digitalisierungs- und Automatisierungsumsetzungen intern bei uns. Und die Branche ist quasi Elektrogetriebe, -motoren, die wir herstellen, zumindestens am Standort Asten.

TZ: Perfekt. Super, danke. Und dann haben wir die ersten zwei Punkte abgehakt. Das sind die methodischen. Die erste Frage ist: Wie trifft ihr derzeit die Entscheidung, in einem Prozess, also den Prozess zu verbessern bzw. in den Prozess

Unterstützungssysteme einzusetzen in irgendeiner Form? Also das können digitale Systeme sein, so wie jetzt AR/VR oder irgendein Roboter Einsatz, ein Exoskelett. Wie ist da der Entscheidungsprozess?

I6U: Bei uns beginnt das meistens damit, dass wir Gemba Walks haben wöchentlich mit unseren Kollegen, Mitarbeitern in der Produktion und dann eigentlich versuchen festzustellen, wo gibt es überhaupt Potenzial, was man verbessern könnte. Dann wird das meistens intern irgendwie noch mal diskutiert, in Ebenen, die sich halt mit der Technik dann auseinandersetzen, wie das umsetzbar ist, ob das umsetzbar ist und dann wird dann irgendwann mit den Chefs gesprochen, was das kosten würde und ob man das machen möchte.

TZ: Ja, okay, super.

I5U: Also bei uns läuft es über den Zieleprozess in der Regel. (TZ: Okay) Das heißt, es wird normalerweise vom Stammhaus vorgegeben, welche Ziele zu erreichen sind, da sind unter anderem Digitalisierungsanforderungen dahinter, die man dann in der Produktion sozusagen umsetzt. Das können aber auch, wie der Kollege sagt, Gemba oder irgendwelche Begehungen oder was auch immer Erfordernisse auftreten. Und diese Erfordernisse werden dann über PDCA oder dergleichen begleitet und dann wird halt an diesen Themen gearbeitet. Und dann gibt es in der Regel, wenn man so weit sind, dass man uns sortiert haben und sagen, wir investieren, gibt es im Prinzip Wirtschaftlichkeitsberechnung, damit ich weiß, dass quasi die Kosten auch dementsprechend dafür stehen. Und da gibt es je nachdem was für Wertgrenze dann überschritten oder unterschritten wird, eine qualitativ quantitative Berechnung, die dann das mehr oder weniger definiert, ob dieses Produkt dementsprechend würdig ist, dass man es investiert. So läuft es eigentlich im großen Ganzen und dann ist in der Umsetzung. Da spielt natürlich auch sehr stark mit, ob ich irgendwelche Assistenzbereiche brauche, wie zum Beispiel eine CI oder so was für Implementierung. So läuft es im Endeffekt.

TZ: Und in dieser Vorauswahl, also in dieser Phase, was jetzt gerade beschrieben hat, wo es darum geht, okay, was kostet es und was bringt es? Was sind bei euch sonst so für Kriterien, die ihr da mit betrachtet oder was ihr überlegt was da für ein Bedarf ist?

I5U: Vielleicht kann ich da gleich sagen. Bei mir ist grundsätzlich immer Arbeitseffizienz ein riesen Thema, wenn man nicht irgendwas begründen kann mit einer Effizienzsteigerung ist es eher schwierig bei jeder Art von Investition in der Regel. Also das muss man ein Kostennutzen bringen. Eine, ich sage jetzt mal salopp gesagt, eine Spielerei würde nicht unterstützt werden. Das heißt, ich habe eigentlich immer Hard Facts, wo ich dann einen KPI dahinter habe, den es signifikant beeinflusse und wenn ich den KPI dementsprechend argumentativ ins Rennen bringe und gleichzeitig dann

die Chefität, die dann das Geld quasi ausgeben muss, dadurch überzeugen kann, dann habe ich im Prinzip eine Chance. Also für mich sind KPIs, Arbeitseffizienz, Durchlaufzeitsverbesserung, ich sage jetzt einmal Supply Chain Modeling, solche Sachen, das sind dann so Aspekte, die bei mir mitspielen, und die resultieren wiederum in eben ganz klare Kennzahlen, also Hard Facts wie OCT, also on time delivery, also sprich Liefertermintreue, Lieferfähigkeit, solche Dinge dann halt, dann als ausschlaggebende Grund. Und ja.

TZ: Okay.

IU6: Bei uns in letzter Zeit gerade auch Qualität. Wir haben jetzt so Pick by Light-systeme einfach, damit die Leute beim Verbauen von Getrieben halt die richtigen Teile einfach greifen, weil wir eine ganz hohe Varianz bei uns haben. Also Qualität Faktor ist genauso zu allen anderen Themen.

TZ: Okay, danke. Ich habe vorhin das Evaluierungsmodell vorgestellt. Das habe ich jetzt da nochmal aufgehängt. Da ist die Frage einerseits sind die Kriterien für euch so wie sie das sind relevant? Jetzt haben wir schon ein bisschen was gehört, das wird sich jetzt teilweise überschneiden. Bzw. was ist vielleicht nicht relevant oder vielleicht nicht so relevant? Und ja, das ist jetzt mal die erste, die erste Frage. Das habe ich deshalb jetzt mal mitbekommen, das ist sehr relevant (Wirtschaftlichkeit).

I6U: Ja genau.

I5U: Ist in Ordnung.

TZ: Also beide sehr wichtig (Wirtschaftlichkeit und Produktivität)

I6U: Ja definitiv.

TZ: Qualität.

I5U: und Produktivität ist Effizienz und Effektivität und Durchlaufzeit.

TZ: also quasi alle drei.

I5U: Gehört alles dazu, genau.

TZ: Okay, das ist ja genau das. Das sind genau diese klassischen und Prozessspezifischen Kriterien. Und zusätzlich sind jetzt zusätzliche Kriterien gedacht sowas wie Ergonomie, Arbeitsbelastung, Akzeptanz, Usabilitythemen. Die Frage ist: Würdet ihr das in euren Entscheidungsprozess mit einbeziehen? Wer, wie macht ihr das? Alle davon oder nur ein Teil davon? Das sind übrigens nur beispielhafte Messmethode? Das heißt nicht, dass ihr das genauso machen müsst. Das ist nur als Beispiel gedacht.

I5U: Also aus Produktionssicht würde ich sagen, es ist alles relevant für mich. Ich wüsste nicht, wo ich sag, wir haben grad drinnen gesprochen über Ergonomie, also auch im Design sozusagen. Also in der präventiven Phase. Ich habe es ganz bescheiden, sag ich jetzt mal, wenn ich jetzt irgendein Teil einbaue, das konstruktiv von der Ergonomie ja so bescheiden konstruiert worden ist, dass ich es nicht anbringen. Also das sind Dinge, da würde die Akzeptanz relativ schnell verlieren. Arbeitsbelastung ist natürlich genauso wieder Thema. Also, Qualifikation sitzt grundsätzlich voraus, ich habe eine Qualifikationsmatrix bei mir. Es gibt nur Facharbeiter, die produktiv arbeiten.

TZ: Vielleicht kurz dazu. Es geht vor allem darum, wenn man jetzt Assistenzsysteme einsetzt oder Systeme in der Produktion einsetzt, ist teilweise der Gedanke dahinter, dass man die Qualifikation von der Person, also die die notwendige Qualifikation für diese Stelle senken bzw. in der Form irgendwie.

I5U: Das habe ich zum Beispiel nicht, weil bei mir gibt es das nicht, weil wir sind eine Einzelstückfertigung, ich habe keine Serienfertigung. Damit muss sie auch hohe Qualifikation haben, weil sobald ich jemanden hinstelle, der jetzt nicht in der Lage ist, ein Gewinde zu schneiden, dann kann ich mit dem nichts anfangen. Von daher ist für mich Qualifikation.

TZ: Ist quasi eine Basis.

I5U: Ich kann es dir auch ganz anders erklären, FMEA. Die FMEA setzt bei mir quasi grundsätzlich voraus, dass jeder Facharbeiter ist. Weil sonst müsste ich durch den manuellen Prozess eigentlich Automatismen einbauen, die aber nicht machen kann bei einer Einzelstückfertigung, weil ich eine Prototypenfertigung bin, damit ich für mich die Qualifikation in der Qualifikationsmatrix als Facharbeiter eine Grundvoraussetzung, damit ich sozusagen die FMEA erreiche und gleichzeitig aber dann arbeiten kann damit. Das macht es mir aber auch schwerer, wenn ich dann ein System einsetze, das sozusagen auf einer Serie basierend ist. Und bei mir ist es immer anders. Ich muss jedes Mal Daten neu aufbereiten unter Umständen.

TZ: Okay.

I6U: Genau. Bei uns ist das mit der Qualifikation genau andersrum, weil wir haben sehr hohe Fluktuation bei uns, in dem, in der Montage eigentlich, wir haben viele Leiharbeiter und da ist es gerade, da setzt man halt auch auf Assistenzsysteme, um sagen zu können, der ist neu, der hat die Produkte vielleicht, der wird zwar eingeschult, wie die zusammengebaut werden, aber man soll ja trotzdem möglichst schnell produktiv arbeiten und dass da dann halt keine Fehler passieren. Genau deshalb wollen wir dann so Assistenzsysteme einsetzen.

TZ: Ok, das heißt ihr betrachtet genau das auch in der Auswahl?

I6U: Genau.

I5U: Das ist genau konträr eigentlich.

TZ: Ja, deshalb das ist das spannende in den unterschiedlichen Anwendungen.

I6U: Und ich finde auch die Usability extrem wichtig, weil wenn die Leute extrem, wenn es sehr schwer ist, die neue Technik einzusetzen, benutzen sie es dann einfach irgendwann nicht mehr. Da kann man dahinterstehen wie man möchte, dann lassen sie es halt einfach.

I5U: Wobei, da muss ich jetzt bis zu einem gewissen Grad, also aus meiner Erfahrung, ich habe zum Beispiel das Problem mit Demografie gehabt. Ich habe Leute, die sind junge und ältere, die Jungen sind schnell mal Feuer und Flamme für moderne, neue Technologien. Und dann hab ich denen ein Tablet in die Hand gedrückt und der ältere Kollege hat gesagt, wenn du mir meine Zeichnung wegnimmst, dann sind wir keine Freunde mehr. Und das ist dann aber trotzdem, hat er einen Schritt der Digitalisierung mitgehen müssen. Und zwischenzeitlich habe ich quasi so einen Art Verstärker eingebaut. Das sind dann die Jungen, die dann sagen, das geht jetzt viel schneller. Wenn es dir das anschaut, nimmst Fotos her, brauchst dir nicht mehr die Zeichnung aufrufen, schaut dir drei Fotos an und weißt auch, wie du es bauen musst. Das heißt, im Prinzip habe ich einen Verstärker. Eigentlich habe ich es ihm aufs Auge gedrückt auf gut Deutsch und das ist dann habe ich eigentlich, ich habe es nicht abhängig gemacht, ob man will oder nicht. Es ist ein bisschen brutal jetzt von der Formulierung, aber ich habe es ihm einfach. Ich kann eine gewisse Digitalisierung, da mache ich nicht jeden eine Freude damit und wenn ich jetzt sage, ich habe immer wieder an Anforderungsbedarf, dass Leute neu reinkommen und angelernt werden müssen, dann muss das intuitiv gut bedienbar sein. Aber ich stelle dem nicht die Frage, ob er will oder nicht will. Der hat das zu nutzen.

I6U: Das ist aber das Gute an neuen Mitarbeitern, die müssen ja eh das Vorhandene benutzen.

I5U: Ja, genau.

I6U: Das ist immer mit den älteren Mitarbeitern so, dass das nicht weg sind.

I5U: Ja, genau.

I6U: Vor allem die finden dann auch immer das Haar in der Suppe. Die Schrift ist zu klein, das Ding könnte ja eventuell irgendwelche Strahlungen aussenden. [Teil auf Wunsch von Interviewten entfernt]

TZ: Fehlen irgendwelche Kriterien eurer Meinung nach, also irgendwas was man beachten sollte bei der Einführung, was jetzt da nicht draufsteht?

I5U: Naja, was schon ein Thema ist, von der Akzeptanz her dann, ist vielleicht das Umweltbewusstsein in irgendeiner Form.

TZ: Okay.

I5U: Ich habe oft das Thema, dass Leute dann, insbesondere, wenn sie zum Beispiel recht, wie soll ich sagen, umweltfreundlich eingestellt sind, dass er mir da was nicht akzeptiert, wo er sagt, das wäre irgendwie ein Problem. Ich weiß nicht wie ich sagen soll. Also wie ist der globale Footprint, das ist eines, insbesondere in Richtung CO2 vielleicht und so, wenn irgendwas wäre.

I6U: Beispiel ich meine, ein Stapler ist ja auch ein Assistenzsystem, wenn der halt noch Diesel betrieben ist.

I5U: Ja genau.

I6U: Hätte man vielleicht Probleme.

I5U: Und genau das meine damit. Also da würden bei mir die Leute sagen wieso sind die nicht alle mit Batterie? Und dann sagt er wenn jetzt Batterie, eine Blei Batterie drin sind? Warum sind es keine Lithium-Ionen-Akkus. Also so meine ich jetzt. Und die Akzeptanz dahinter, wenn er nach Hause geht, sagt er bei mir gibt es nur Lithium-Ionen-Akkus. Das hört sich jetzt ein bisschen blöd an, aber das mag ein Kriterium sein. Und was auch noch ein Thema ist, glaube ich und das ist schon, die gesundheitliche Belastung, ich habe es zuerst gesagt, ich habe einen Workshop gemacht, wo wir gesagt haben HoloLens und habe ihnen die HoloLens aufgesetzt haben, hat er gesagt, den ganzen Tag die HoloLens im Kopf. Das drückt mir auf dem Nasenflügel, das habe ich quasi da auf den Ohren. Ich habe quasi ständig eine permanente Einstrahlung, da fühle ich mich nicht wohl. Und da rede ich nicht so sehr von der Ergonomie, da geht es um Arbeitssicherheit. Also weißt du was ich meine? Das Problem ist, der sagt, warum soll, wenn ich ein Handy eingesteckt habe, dann macht man mich das möglicherweise, hat einen Einfluss auf mich persönlich. Und das zwar im privaten Umfeld akzeptiert, aber im dienstlichen Kontext, wenn's dann um Gesundheitsaspekte geht, zum Beispiel, den wir jetzt negativ beeinflussen durch ein Assistenzsystem, wie zum Beispiel einen ganzen Tag einen Helm zu tragen, ein Assistenzsystem, ein Exoskelett von mir aus, das mag noch unterstützen, aber das kann aber auch vielleicht dementsprechend belasten oder beeinflussen oder Strahlung haben. Das erste was ich gekriegt habe, wie ich diskutiert habe, ob wir was machen, war, das strahlt alles. Habe ich sage, ja was strahlt nicht? Messen wir mal in dieser Luft, was da strahlt. Sagt er: bist du wahnsinnig, wenn ich jetzt permanent diese Strahlung am Kopf trage. Und ich habe dort hinten den Akku drinnen, wie man es dort bei der HoloLens sehen, zum Beispiel, das wollten mir die Leute nicht nehmen. Ob sie einen Vorteil sehen oder nicht einen Vorteil sehen, die Druckstellen möglicherweise. Das ist, wenn ich ihm eine Schutzbrille aufs Auge drücke. Genauso wie das jetzt ist mit Maske, riesen Themen

Diskussionsmäßig. Da steht außer Frage, dass es sinnvoll ist oder eine Anordnung ist, aber da hast du immer wieder Leute dabei, die sagen, das mach ich nicht und die Akzeptanz ist dann als Widerstand abzusehen. Daher glaub ich Arbeitssicherheit, gesundheitliche Aspekte, das könnte ein Thema sein, da kannst du noch so ein geiles System haben, das könnte ein Neck Breaker sein, wenn du ein Pech hast.

I6U: Da hatten wir das gleiche Thema mit RFID.

I5U: Ja genau.

I6U: Für mehrere Tore. Das war das erste was gefragt wurde. Wo werden wir da bestrahlt? Ja genau, da mussten wir dann die CE Zertifikate raussuchen und..

I5U: ja genau, ist so.

TZ: Ok, ja guter Punkt, danke. Hast du eine andere Sache, wo du sagst das fehlt oder zusätzlich?

I6U: [Kopfschütteln]

TZ: Okay, gut, dann die nächste Frage ist: Glaubt ihr, dass das so wie es da ist mit den Kriterien, also jetzt die Messmethoden, das ist individuell fürs Unternehmen, aber grundsätzlich die Kriterien in der Form umsetzbar ist oder einsetzbar ist oder anwendbar in der Praxis ist?

I5U: Ja, würde ich schon sagen. Also wir müssen sowieso immer wieder alles neu in Frage stellen und demzufolge, wenn ich es immer wieder neu evaluiere, ja natürlich. Würde ich schon so sagen.

[I6U nickt zustimmend]

TZ: Okay, dann eine Frage noch. Seht ihr einen Unterschied in der Anwendung von unterschiedlichen Prozessen, Bereichen, Branchen, vielleicht sogar, von diesem Modell? Also du hast vorher gesagt Logistik, Produktion, gibt es da Unterschiede oder wäre das von den Kriterien her ähnlich oder sogar gleich? Oder wo wären die Unterschiede?

I5U: Wo wären die Unterschiede?

I6U: Also ich finde, die Kriterien passen eigentlich auf jeden Bereich.

I5U: Genau das sehe ich auch so.

I6U: Ich sehe jetzt keinen Bereich bei uns, wenn ich bei uns an den ganzen Standort denke, wo man das nicht einsetzen könnte.

I5U: Ja sehe ich auch so. Also mir fällt da jetzt auch nichts Gravierendes ein, wo ich mir denke, also es deckt sich alles eigentlich. Und ich sage mal, du hast das jetzt so, wie es bei mir jetzt ist, zum Beispiel oben an Prüfstand über reine Montage, über Schweißer, über Lackiererei. Ich sehe jetzt bei mir nur vielleicht ein Thema in der Lackierkabine, in einer Schutzzone, kann ich nicht irgendwen mit einem Akku reinlaufen lassen. Wo er nicht mal ein Handy mitnehmen darf oder in ein VWF Lager, zum Beispiel. Das mögen Neck Breaker sein. Dort hätte ich eine Ausgrenzung, weil da kann ich digitalisieren, was ich will der darf halt einfach in ein VBF Lager aufgrund gesetzlicher Vorgaben nicht einmal mit dem Handy reingehen. Also demzufolge, das wäre ein Unterschied im Prozess. Aber ansonsten, wie der Kollege sagt, würde ich mir auch aus der Sicht Logistik nirgendwo nicht eine Möglichkeit sehen, das anzuwenden. Aber wie gesagt, wenn es gesetzliche Vorgaben gibt, dann nicht. Der Schutzbereich oder keine Ahnung oder in einen, zum Beispiel, jetzt bin ich ganz provokant in einem privaten Bereich, also Kantine oder Umkleidebereich oder so, dort natürlich nicht, ich mein da sind wir wieder bei Grundbedürfnis nicht. Weil wo ich schon ein Problem sehe ist, wenn ich in irgendeiner Form eine Überwachung inszeniere, habe ich sofort das Problem mit Betriebsrat und dergleichen, weil ich dann sag Du bist gut und du bist schlecht. Also das könnte, das könnte in einzelnen Bereichen, wenn man es so verwenden würde, so wie es zum Beispiel der Bericht ist auf dem Handy, du hast was nicht wie viel Bildschirmzeit oder sowas, wenn ich das auswerten würde und nutzt das wer oder nutzt das jemand nicht und ist der dann daraus resultierend ein Faulsack und der andere ist aktiv und bemüht. Solche Dinge dürfte ich nicht reinbringen, klarerweise. Ansonsten das waren für mich so die oben einzelnen Neck Breaker, mehr hätte ich da jetzt nicht.

TZ: Okay.

I5U: Ja und doch, ein Thema habe ich schon noch. Die CI könnte auch noch ein Thema sein. Und zwar, weil wenn ich zum Beispiel bei uns Bosch Netzwerk, da kannst du nicht alles reinbringen, was du möchtest, indem Sinne. Ich sage jetzt mal auch in andere Bereiche. Ich könnte evaluieren, das Erfordernis könnte noch so hoch sein, wenn ich quasi über diesen Shared Service CI bei uns Bosch direkt ins Bosch Netzwerk nicht rein darf aufgrund von einer strikten Policy von mir aus, also ich kann nicht sagen, ich muss in meinem Bereich digitalisieren und der CI-ler sagt aber du kriegst kein eigenes Netzwerk. Zum Beispiel habe ich diese Erfordernis gehabt, ich habe eine Kundenabnahme und meine Kundenabnahmen, da wollen die Kunden ja quasi in ein Netzwerk rein, also irgendwo in ein WIFI und in ein Bosch Netzwerk kommt keiner extern als Beispiel und da kann dir der nicht einmal ein Datenblatt schicken, außer er macht sich einen Exospot über das Handy. Aber solche Sachen könnten Themen sein, also für mich jetzt als Neck Breaker und dann sag ich mal eine Abteilung wie zum Beispiel CI oder Arbeitssicherheit oder irgendwas die sagt, geht gar nicht zum Einsetzen. Und da kann ich mir wünschen was ich will, das geht nicht.

TZ: Ok, da gibt es ein paar so Deal Breakers quasi, also die können, egal was rauskommt, einstampfen?

I5U: Genau. Aber das hat jetzt nicht damit zu tun, dass ich es nicht überall verwenden kann.

TZ: Ah ja, okay. Habt ihr sonst noch Rückmeldungen, Anmerkungen zum Modell generell, irgendwas, was ihr loswerden wollt?

I5U: Nein.

I6U: Nein, spontan nicht.

TZ: Ok super, das war es schon. Herzlichen Dank.

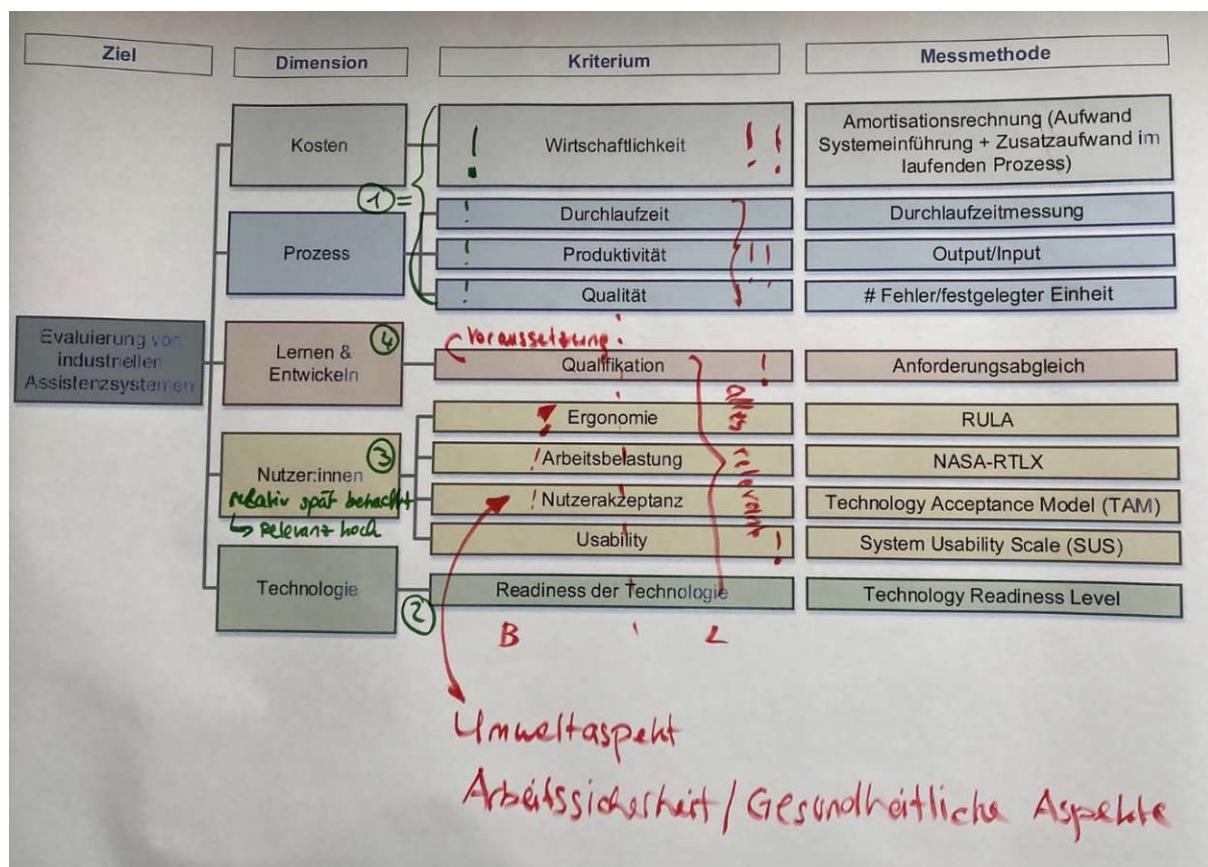


Abbildung 54: Mitschrift Interview 3 (rote Schrift), Interview 4 (grüne Schrift), eigene Darstellung

### 8.10.5 Interview 5

Datum: 27.04.2022

Interviewpartner:in:

- I7W: Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Industrial Engineering, Branche: Forschung/Wissenschaft, Fokus: Betriebstechnik und Kreislaufwirtschaft

TZ: Ist es okay, wenn ich das Gespräch aufnehmen?

I7W: Ja.

TZ: Okay, super. Kannst du bitte kurz deinen Namen Position unternehmen und Branche sagen?

I7W: Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Forschungseinrichtung

TZ: Sehr gut, danke. Ich habe vorhin das Evaluierungsmodell vorgestellt. Sind deiner Meinung nach alle wichtigen oder relevanten sind Kriterien enthalten, um die Entscheidung zum Einsatz bzw. Die Evaluierung von Assistenzsystemen machen zu können?

I7W: Ja.

TZ: Findest du dass irgendetwas überflüssig ist oder etwas fehlt? Würdest du noch etwas ergänzen?

I7W: Für die Produktion nein.

TZ: Ok, glaubst du, dass das Modell in der Praxis anwendbar ist?

I7W: Ich glaube, dass das Modell ist in der Praxis anwendbar ist.

TZ: Ok, siehst du irgendwelche Risiken oder irgendwas was nicht so gut funktionieren könnte?

I7W: Naja, wenn Mitarbeiter mit den Methoden zu wenig vertraut sind, also der evaluierende, wenn der vielleicht die Methoden nicht so beherrscht.

TZ: Also die Person, die das Modell anwendet, dass die nicht richtig ausgebildet ist?

I7W: Ja genau. Weil es doch für so viele Kriterien so viele verschiedene Vorgehensweisen gibt. Und die Methoden meistens nicht trivial sind.

TZ: Ok, guter Punkt. Und siehst du Unterschiede in der Anwendung bei verschiedenen Prozessen, Bereichen oder gar Branchen? Wenn du jetzt in einer Produktion bist, sagen wir Maschinenbau, Medizintechnik oder unterschiedliche ...

I7W: Also es gibt ja ganz krasse Unterschiede zwischen den Assistenzsystemen, dann zwischen den Anwendungsfällen.

TZ: Und bezogen aufs Modell? Also auf das Evaluierungsmodell?

I7W: Da kann es sein, dass man bei manchen Use Cases nicht alle Kriterien benötigt. Gewisse Branchen, da gibt es möglicherweise Unterschiede, aber ein produzierendes Unternehmen das Medizintechnik produziert ist vermutlich gleich anzuwenden wie ein

produzierendes Unternehmen das Motoren produziert. Da sehe ich keine Unterschiede. Innerhalb von produzierenden Unternehmen ist hier relativ wenig Unterschied.

TZ: Ok gut. Hast du sonst noch irgendwelche Rückmeldungen oder Anmerkungen zum Modell?

I7W: Derzeit nicht

TZ: Ok, vielen Dank.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Forschungsarbeit.....	12
Abbildung 2: Design Science Research Methodology (DSRM) nach Peffers et al. (2007, S. 48).....	13
Abbildung 3: Forschungszyklen und verwendete Methoden im Rahmen der DSRM, eigene Darstellung.....	15
Abbildung 4: Kognitive und physische Assistenzsysteme, eigene Abbildung in Anlehnung an Reinhart (2017, S. 57).....	17
Abbildung 5: Einteilung von kognitiven Assistenzsystemen im Rahmen dieser Forschungsarbeit, eigene Darstellung.....	18
Abbildung 6: Mixed-Reality-Kontinuum mit den Levels der Immersion, aus Schlund und Zigart (2020) in Anlehnung an Milgram und Kishino (1994, S. 3).....	20
Abbildung 7: Industrielle Augmented-Reality-Anwendungen, eigene Abbildung und Übersetzung von Baroroh et al. (2021, S. 705).....	21
Abbildung 8: Einteilung von physischen Assistenzsystemen für diese Forschungsarbeit, eigene Darstellung.....	23
Abbildung 9: Definition der Zusammenarbeitsgrade von Mensch und Roboter (Bauer et al., 2016, S. 9).....	24
Abbildung 10: Kognitive und physische Assistenzsysteme, eigene Darstellung.....	27
Abbildung 11: Aufbau der AHP-Ebenen, eigene Darstellung angelehnt an R. W. Saaty (1987, S. 162).....	32
Abbildung 12: Mensch-Technik-Organisation-Konzept, eigene Darstellung nach Ulich (2013).....	36
Abbildung 13: Methodische Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche, eigene Darstellung.....	39
Abbildung 14: Schlüsselwörter, Inklusions- und Exklusionskriterien in der systematischen Literaturrecherche, eigene Darstellung.....	40
Abbildung 15: Auftrittshäufigkeiten von Kriterien und Methoden, eigene Darstellung.....	42
Abbildung 16: Evaluierter Literatur zu Assistenzsystemen über den Zeitverlauf, eigene Darstellung.....	43
Abbildung 17: Evaluierung des Nutzens von digitalen Assistenzsystemen, eigene Abbildung in Anlehnung an Keller et al. (2019, S. 442).....	44
Abbildung 18: Indikatoren für das Evaluierungs-Framework für MRK, eigene Übersetzung aus Holm et al. (2021, S. 426).....	52
Abbildung 19: Sieben-Phasen-Methode, eigene Übersetzung aus Ralfs et al. (2021, S. 3).....	54
Abbildung 20: Strategischer Kriterienkatalog, eigene Darstellung nach Liebrecht (2020, S. 99).....	57
Abbildung 21: Evaluierungsmodell für industrielle Assistenzsysteme, in Anlehnung an Zigart und Schlund (2020b, S. 4).....	65

Abbildung 22: Zusammensetzung der Overall Equipment Effectiveness (OEE), in Anlehnung an Kletti und Schumacher (2011, S. 80).....	71
Abbildung 23: Technology Acceptance Model (TAM; (Davis et al., 1989, S. 985), eigene Übersetzung .....	82
Abbildung 24: Technologiereifegrade (TRL), in Anlehnung an Kind et al. (2018, S. 3) .....	83
Abbildung 25: Ablauf für die Anwendung des Evaluierungsmodells, eigene Darstellung .....	85
Abbildung 26: Schaltschrankbestückung mit Laserprojektion (LAP Laser Applikationen, 2019).....	91
Abbildung 27: Arbeitsplatzgestaltung inkl. Assistenzsysteme, eigene Darstellung....	92
Abbildung 28: Arbeitsplatz Schaltschrankmontage in der TU Wien Pilotfabrik, eigene Darstellung .....	92
Abbildung 29: Digitales Werkerassistenzsystem „Arbeitsanweisung Elektroschaltschrank“ © Johann Li .....	93
Abbildung 30: Projektionssystem „Arbeitsanweisung Elektroschaltschrank“ © Johann Li.....	93
Abbildung 31: Passives Exoskelett zur Unterstützung der Bestückung auf Überkopfhöhe © Johann Li.....	94
Abbildung 32: Cobot zur Materialbereitstellung im Arbeitsbereich © Johann Li .....	94
Abbildung 33: Bauteile und Bauteilbezeichnungen in Kurzform (links, v. l. n. r.: Endanschlag in Grau, Reihenklemme in Gelb, Reihenklemme in Orange, Reihenklemme in Rot, Reihenklemme in Grau), Kabel und Kabelbezeichnungen in Kurzform (rechts), eigene Darstellung .....	94
Abbildung 34: Materialbereitstellung am Arbeitsplatz, eigene Darstellung .....	95
Abbildung 35: Elektroschaltschrank inkl. Hutschienen, eigene Darstellung.....	95
Abbildung 36: Prozessabbildung mittels erweiterter ereignisgesteuerter Prozesskette (eEPK), eigene Darstellung .....	96
Abbildung 37: Ablauf der Studie, eigene Darstellung .....	98
Abbildung 38: Prozesszeiten der Testfälle mit Mittelwert (X), Median, Minimum, Maximum und Ausreißer, eigene Darstellung.....	108
Abbildung 39: Grafische Darstellung des Qualitätsgrads, eigene Darstellung.....	110
Abbildung 40: SUS-Score im Boxplot Diagramm, eigene Darstellung.....	116
Abbildung 41: Einzelauswertungen der Dimensionen mit Gewichtung der einzelnen Testfälle, eigene Darstellung .....	122
Abbildung 42: Vergleich der Dimensionen aller Fälle mit Gewichtung, eigene Darstellung .....	123
Abbildung 43: Kompetenzatlas (Heyse & Erpenbeck, 2010).....	141
Abbildung 44: RULA Arbeitsbogen: Analyse der Arm- und Handgelenkshaltung (BGIA, 2007, S. 5).....	144

Abbildung 45: RULA Arbeitsbogen: Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung (BGIA, 2007, S. 6) .....	144
Abbildung 46: : RULA Arbeitsbogen: Gesamtpunktzahl (BGIA, 2007, S. 7) .....	145
Abbildung 47: System Usability Scale (SUS) von 0 bis 100 (Brooke, 2013, S. 36) .	146
Abbildung 48: Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 (Statistik Austria, 2020a) .....	148
Abbildung 49: Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 (Statistik Austria, 2020b) .....	149
Abbildung 50: Nettojahresgehalt nach Gewerbe 2020 (Statistik Austria, 2020c).....	150
Abbildung 51: AHP Gewichtung Fallbeispiel, eigene Darstellung .....	156
Abbildung 52: Montageanleitung Beispiel, eigene Darstellung .....	159
Abbildung 53: Mitschrift Interview 1 (grüne Schrift), Interview 2 (rote Schrift), eigene Darstellung .....	169
Abbildung 54: Mitschrift Interview 3 (rote Schrift), Interview 4 (grüne Schrift), eigene Darstellung .....	181

## 10 Formelverzeichnis

Formel 1: Kehrwertberechnung, angelehnt an T. L. Saaty (1990).....	33
Formel 2: Berechnung des Eigenwerts, angelehnt an T. L. Saaty (1990) .....	34
Formel 3: Berechnung des Konsistenzindex, angelehnt an T. L. Saaty (1990) .....	35
Formel 4: Berechnung des Konsistenzverhältnisses, angelehnt an T. L. Saaty (1990) .....	35
Formel 5: Angepasste Prioritätsvektoren A und C, angelehnt an T. L. Saaty (1990).	36
Formel 6: Berechnung des Return on Investment (ROI) .....	68
Formel 7: Berechnung der Amortisationszeit (Rally & Scholtz, 2020) .....	68
Formel 8: Berechnung der Overall Equipment Effectiveness (OEE; Kletti & Schumacher, 2011) .....	71
Formel 9: Berechnung des Qualitätsgrads (Kletti & Schumacher, 2011).....	72
Formel 10: Berechnung des Ausschussgrads (Kletti & Schumacher, 2011) .....	72
Formel 11: Berechnung des Nacharbeitsgrads (Kletti & Schumacher, 2011).....	73
Formel 12: Personalkosten pro Tag, eigene Darstellung.....	102
Formel 13: Durchschnittliche Ausfallkosten pro Mitarbeiter:in pro Jahr, eigene Darstellung .....	102
Formel 14: Gesamtausfallkosten pro Jahr (ohne Exoskelett), eigene Darstellung ..	102
Formel 15: Hilfsfaktor für die Ausfallreduktion, eigene Darstellung .....	102
Formel 16: Gesamtausfallkosten pro Jahr (mit Exoskelett), eigene Darstellung.....	103
Formel 17: Jährliche Einsparung durch das Exoskelett, eigene Darstellung .....	103
Formel 18: Arbeitsstunden pro Jahr .....	104
Formel 19: Einzelarbeitsplatzauslastung (Stunden/Jahr) .....	104
Formel 20: Jahresstückzahl.....	104

# 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Exoskeletten, angepasst nach DGUV Fachbereich Handel und Logistik (2018, S. 3).....	26
Tabelle 2: Schematische Einordnung von MCDA-Methoden, angepasst nach Geldermann und Lerche (2014, S. 11) .....	28
Tabelle 3: Klassifikation von MADM-Verfahren, angepasst nach Geldermann (2008, S. 1).....	30
Tabelle 4: AHP 9-Punkte-Skala, eigene Übersetzung aus und angepasst nach R. W. Saaty (1987, S. 163).....	33
Tabelle 5: Beispiel einer Gewichtung von Kriterien mithilfe von Vergleichspaaren nach AHP, eigenes Beispiel .....	34
Tabelle 6: Beispiel einer Gewichtung von Kriterien mithilfe von Vergleichspaaren nach AHP mit Prioritätsvektor, eigenes Beispiel.....	34
Tabelle 7: Werte für den Random Consistency Index (RI), angelehnt an R. W. Saaty (1987).....	35
Tabelle 8: Kriterien in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten, eigene Darstellung .....	41
Tabelle 9: Methoden zur Evaluierung von Trainings in VR, eigene Übersetzung aus Hoedt et al. (2016, S. 263).....	48
Tabelle 10: Auszug aus dem RULA, eigene Übersetzung aus Mateus et al. (2019, S. 2678).....	50
Tabelle 11: Vergleich verschiedener Methoden zur Ergonomiebewertung von Exoskeletten, eigene Übersetzung aus Dahmen und Constantinescu (2020, S. 7)...	54
Tabelle 12: Übersicht verschiedener Evaluierungskriterien für Production Technology, eigene Übersetzung aus Dengler et al. (2017, S. 495).....	55
Tabelle 13: Auswahl relevanter Literatur, eigene Darstellung.....	59
Tabelle 14: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Kosten, eigene Darstellung.....	66
Tabelle 15: Vergleich statischer Investitionsrechnungsmethoden, basierend auf Daum et al. (2018) und D. Müller (2006).....	67
Tabelle 16: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Prozess, eigene Darstellung .....	69
Tabelle 17: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Lernen und entwickeln, eigene Darstellung	73
Tabelle 18: Schlüsselwörter und Methoden in Publikationen und Verwendungshäufigkeiten – Dimension Nutzer:innen, eigene Darstellung .....	76
Tabelle 19: Vergleich unterschiedlicher Ergonomie-Modelle, aufbauend auf Kugler (2010) sowie Dahmen und Constantinescu (2020, S. 7) .....	77
Tabelle 20: RULA-Bewertungsmethode (BGIA, 2007, S. 1).....	78
Tabelle 21: TRL von Assistenzsystemen, eigene Darstellung.....	84

Tabelle 22: Erwartungen an das Assistenzsystem, eigene Darstellung .....	85
Tabelle 23: AHP 9-Punkte-Skala, eigene Übersetzung aus T. L. Saaty (1990, S. 15) .....	86
Tabelle 24: Gewichtung der Dimensionen mithilfe von Vergleichspaaren nach AHP, eigene Darstellung.....	86
Tabelle 25: Gleichmäßige Gewichtung der Dimensionen, eigene Darstellung .....	87
Tabelle 26: Bewertungskriterien und -skalen, eigene Darstellung .....	88
Tabelle 27: Quantitative Skalen der Kriterien, eigene Darstellung.....	88
Tabelle 28: Testszenarien der Assistenzsysteme, eigene Darstellung.....	99
Tabelle 29: Geschlechterverteilung der teilnehmenden Personen, eigene Darstellung .....	99
Tabelle 30: Altersverteilung der teilnehmenden Personen, eigene Darstellung .....	100
Tabelle 31: Aktuelle Tätigkeiten der teilnehmenden Personen (Mehrfachantworten möglich), eigene Darstellung .....	100
Tabelle 32: Kosten der Assistenzsysteme, eigene Darstellung .....	101
Tabelle 33: Gesamtkosten der Testfälle, eigene Darstellung .....	101
Tabelle 34: Berechnung der Kostenreduktion durch die Reduzierung von Krankentagen, eigene Darstellung .....	103
Tabelle 35: Berechnung der Kostensenkung durch die Verbesserung der Produktivität im Vergleich zum Ist-Zustand, eigene Darstellung .....	104
Tabelle 36: Berechnung der Veränderung der Qualitätskosten durch Veränderung des Qualitätsgrads im Vergleich zum Ist-Zustand, eigene Darstellung .....	105
Tabelle 37: Kosten-Nutzen-Betrachtung und Errechnung der Amortisationszeit, eigene Darstellung .....	105
Tabelle 38: Amortisationszeit (Jahren) – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	106
Tabelle 39: Durchlaufzeitveränderung – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	106
Tabelle 40: Auswertung der Produktivität, eigene Darstellung .....	107
Tabelle 41: Produktivitätsveränderung – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	108
Tabelle 42: Auswertung des Qualitätsgrads, eigene Darstellung .....	109
Tabelle 43: Qualitätsgrad – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	110
Tabelle 44: Zuordnung der entlasteten Fertigkeiten und Fähigkeiten, angelehnt an Mark et al. (2020) .....	111
Tabelle 45: Anzahl der unterstützenden Qualifikation nach Fällen, eigene Darstellung .....	111
Tabelle 46: Qualifikations-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	112

Tabelle 47: RULA-Score A – Analyse der Arm- und Handgelenkhaltung, eigene Darstellung .....	112
Tabelle 48: RULA-Score B – Analyse der Hals-, Oberkörper- und Beinhaltung, eigene Darstellung .....	113
Tabelle 49: RULA-Tabelle zur Ermittlung der Gesamtpunktzahl (BGIA, 2007).....	113
Tabelle 50: RULA-Score C – Gesamtpunktzahl der Testfälle, eigene Darstellung ..	114
Tabelle 51: RULA-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	114
Tabelle 52: NASA-RTLX-Score der Testfälle, eigene Darstellung.....	115
Tabelle 53: NASA-RTLX-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung .....	115
Tabelle 54: SUS-Score der einzelnen Assistenzsysteme, eigene Darstellung .....	115
Tabelle 55: SUS-Score der Testfälle, eigene Darstellung .....	116
Tabelle 56: SUS-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung.	116
Tabelle 57: Nutzer:innenakzeptanz-Score der Testfälle, eigene Darstellung .....	117
Tabelle 58: Nutzer:innenakzeptanz-Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung.....	117
Tabelle 59: Technology Readiness Level (TRL) der eingesetzten Assistenzsysteme, eigene Darstellung.....	118
Tabelle 60: Auswertung TRL der Testfälle, eigene Darstellung.....	118
Tabelle 61: TRL Score – Einordnung im Evaluierungsmodell, eigene Darstellung..	118
Tabelle 62: Einordnung aller Fälle in das Evaluierungsmodell, eigene Darstellung.	119
Tabelle 63: Gewichtung der Dimensionen und der Kriterien für das Fallbeispiel, eigene Darstellung .....	120
Tabelle 64: Gewichtete Auswertung der Ergebnisse, eigene Darstellung .....	121
Tabelle 65: Limitationen in der Anwendung der Kriterien und notwendige Änderungen für die Anwendung in der Industrie, eigene Darstellung .....	124
Tabelle 66: Qualitative Feedback der Facharbeiter:innen, eigene Darstellung .....	126
Tabelle 67: Zusammenfassung der Expert:inneninterviews .....	131
Tabelle 68: Abgleich mit den Anforderungen.....	135
Tabelle 69: Forschungsfragen der Literaturrecherche, eigene Darstellung .....	140
Tabelle 70: Suchergebnisse in den Datenbanken, eigene Darstellung .....	140
Tabelle 71: Zuordnung von funktionalen Anforderungen und industriellen Assistenzsystemen (Mark et al., 2020, S. 282).....	142
Tabelle 72: Legende der Assistenzsysteme in Tabelle 71 (Mark et al., 2020, S. 279) .....	143
Tabelle 73: Kostenaufstellung Projektionssystem, eigene Darstellung.....	150
Tabelle 74: Kosten der Testfälle, eigene Darstellung .....	151
Tabelle 75: Interviewleitfaden zur Validierung des Evaluierungsmodells, eigene Darstellung .....	159

## 12 Abkürzungsverzeichnis

AAWS	Automotive Assembly Worksheet
AB	Arbeitsbelastung
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIWS	Assisting-Industrial-Workplace-Systems
AMT	Advanced manufacturing technology
AR	Augmented Reality
AWS light	Assembly Worksheet light
BPMN	Business Process Model and Notation
Cobot	Kollaborationsfähiger Roboter
CUELA	Computer-assisted recording and long-term analysis of musculoskeletal load
DZ	Durchlaufzeit
EAWS	Ergonomic Assessment Work Sheet
eEPK	Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
EMG	Elektromyografie
ER	Ergonomie
G	Gewichtung
$G_n$	Gewichteter Wert
$G_{Auss}$	Ausschussgrad
$G_{NA}$	Nacharbeitsgrad
$G_{Qual}$	Qualitätsgrad
GATM	General Assembly Task Model
GEQ	Game Experience Questionnaire
GT	Gebrauchstauglichkeit
$h_{Ausfall}$	Hilfsfaktor für Ausfallreduktion
HHT	Halten heben tragen
IAD-BkB	Institut für Arbeitswissenschaften Darmstadt - Verfahren zur Bewertung von körperlichen Belastungen
IQA	Interquartilsabstand
$k_{Ausfall}$	Ausfallkosten
$k_{LK}$	Laufende Kosten
KIM MA	Key indicator method
KPI	Key Performance Indicator
$K_r$	Kriterien
LMM	Leitmerkmal Methode
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MAP	Manuelle Arbeitsprozesse
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MODM	Multi-Objective Decision Making
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankung

MTM	Methods Time Measurement
MTM-UAS	Methods-Time Measurement - Universelles Analysier-System
MTO-Konzept	Mensch-Technik-Organisation-Konzept
n.a.	Nicht anwendbar
NA	Nutzer:innenakzeptanz
NASA-RTLX	NASA-Raw Task Load Index
NASA-TLX	NASA-Task Load Index
NIOSH	National Institute for Occupational Safety & Health
OCRA	Occupational Repetitive Actions
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OX	Operator Experience
PEOU	Perceived of Ease of Use
PP	Perceive Playfulness
PR	Produktivität
PU	Perceived Usefulness
Q1	Oberes Quartil
Q3	Unteres Quartil
QK	Qualifikation
QT	Qualität
QUEAD	Questionnaire for the Evaluation of Physical Assistive Devices
QUESI	Questionnaire for Measuring the Subjective Consequences of Intuitive Use
REBA	Rapid Entire Body Assessment
RPDs	Ratings of perceived discomfort
RG	Reifegrad der Technologie
ROI	Return of Investment
RRI	Responsible Research and Innovation
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SART	Situation Awareness Rating Technique
SAPPS	Self-Adapting-Production-Planning-System
S <sub>n</sub>	Skala
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TRL	Technology Readiness Level, technologischer Reifegrad
TB	Total body
UB	Upper body
UTAUT	Unified theory of acceptance and use of technology
VR	Virtual Reality
WK	Wirtschaftlichkeit
Z/S	Ziehen und schieben

## 13 Betreute Studierendenarbeiten

### Seminararbeiten

- Maximilian Nowak: Auswertung der Nuggets Evaluierung, 2021
- Alexander Granig: Vergleich der Technology Readiness Levels unterschiedlicher Assistenzsysteme im Allgemeinen und im Einsatz in der Produktion, 2021
- Johannes Patsch: DigiBack Projektergebnisse für zwf Paper, 2021
- André Gundiger: Evaluierungstool in MS Excel mit VBA Makro, 2022
- Michael Mantl: EMG zur Ergonomieevaluierung von AR/VR, 2022

### Bachelorarbeiten

- Johannes Patsch: Darstellung, Analyse und Bewertung von existierenden Qualifikations-Bewertungssystemen im industriellen Umfeld mit Fokus auf Augmented und Virtual Reality Anwendungen, 2019
- Serdar Süner: Darstellung, Analyse und Bewertung existierender Ergonomie Bewertungsmodelle im industriellen Umfeld mit Fokus auf Augmented und Virtual Reality Anwendungen, 2019
- Eltan Allahyarli: Ergonomie von Fahrerständen in Stadt- und Straßenbahnen, 2020
- Oskar Beck: Digitale Assistenzsysteme in der Lebensmittel- und Bäckereibranche, Marktanalyse von ERP- und MES-Systemen für die Lebensmittelproduktion, 2020
- Victoria Wunderl: Der OEE im Zeitalter der Digitalisierung, Fallstudie eines digitalen Kennzahlensystems am Beispiel eines Lebensmittelproduzenten, 2020
- Florian Mitterhauser: Methoden zur Berechnung von Investitions- und laufenden Kosten bei der Einführung von Assistenzsystemen in der Produktion, 2020
- Philipp Eichler: Evaluierung von Auswirkung von XR auf ökologischen Fußabdruck, 2022
- Matthias Kerbl: Marktanalyse zu Augmented- und Virtual Reality Devices mit Fokus auf deren Einsatz in der Produktion, 2022
- Felix Stürzl: Alternative Methoden zur Aufnahme industrieller Prozesse, 2022
- Dirk Vieth: Beschreibung, Simulation und Bewertung eines mit Assistenzsystemen unterstützten Montagearbeitsplatzes, 2022 (in Arbeit)

### Master- und Diplomarbeiten

- Maximilian Nowak: Anwendungsbasierte Evaluation von Assistenzsystemen in der Produktion, 2021
- Immanuel Kalcher: Weiterentwicklung des Ergonomiebewertungsmodells EAWS für die ergonomische Bewertung der Anwendung von Augmented Reality Brillen am Arbeitsplatz, 2022 (in Arbeit)

## 14 Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

### Konferenzen

- Zigart, T., Schlund, S. (2020). Multikriterielle Evaluation von industriellen Assistenzsystemen am Beispiel von Augmented Reality-Anwendungen in der Produktion, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg): Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?, Dortmund: GfA-Press
- Zigart, T., Schlund, S. (2020). Evaluation of Augmented Reality Technologies in Manufacturing - A Literature Review, In: Advances in Human Factors and Systems Interaction (AHFE), Springer Cham, Vol. 1207, 75-82
- Schmidbauer, C., Umele, M., Zigart, T., Weiss, A. & Schlund, S. (2020). On the Intention to Use the Pepper Robot as Communication Channel in a Business Context: Results of a User Acceptance Survey, HAI
- Mayrhofer, W., Nixdorf, S., Fischer, C., Zigart, T., Schmidbauer, C. & Schlund, S. (2021). Learning nuggets for cobot education: a conceptual framework, implementation, and evaluation of adaptive learning content for robotics and physical assistance systems, CIRP 11<sup>th</sup> Conference on Learning Factories, CLF2021
- Lovasz-Bukvova, H., Hölzl, M., Zigart, T., Kormann-Hainzl, G., Schlund, S. (2021). Usability and task load of applications in Augmented and Virtual Reality, How applicable are the technologies in corporate settings?, EuroSPI European System, Software & Service Process Improvement & Innovation, 708-718
- Holly, F., Zigart, T., Maurer, M., Wolfartsberger, J., Brunnhofer, M., Sorko, S., Moser, T., Schlager, A. (2022). Gaining Impact with Mixed Reality in Industry – A Sustainable Approach, International Conference on Computer Technology Applications (ICCTA), 128-134
- Zigart, T., Schlund, S. (2022). Ready for Industrial Use? A User Study of Spatial Augmented Reality in Industrial Assembly, ISMAR 2022

### Journals

- Patsch, J., Zigart, T., Kostolani, D., Rupprecht, P., Schlund, S. (2021). Simulationsbasierte Steigerung der Energieeffizienz in der Lebensmittelindustrie, Die Vorteile der ereignisorientierten Simulation am Beispiel einer Großbäckerei, ZWF
- Zigart, T., Kormann-Hainzl, G., Lovasz-Bukvova, H., Hölzl, M., Moser, T., Schlund, S. (2022). Application of a Multi-Criteria Evaluation Model for Augmented and Virtual Reality Use Cases in Manufacturing (in progress)
- Zigart, T., Zafari, S., Stürzl, F., Kiesewetter, R., Kasparick, H.-P., Schlund, S. (2022). Multi assistance systems in manufacturing - A user study evaluating multi-criteria impact in high-mix low-volume assembly (in progress)

### Fachbeiträge

- Moser, T., Zigart, T., Kormann-Hainzl, G. & Lovasz-Bukvova, H. (2020). Assistenzsysteme der Zukunft schon heute, Aktuelle Anwendungsfälle von Mixed Reality in der Produktion, WINGbusiness, 2/20, 18-24
- Papa, M., Fischer, C., Nixdorf, S., Zigart, T., Schlund, S. (2021). Digitale Learning Nuggets: Robotik Inhalte in digitaler und kompakter Form personalisiert lernen und lehren, WINGbusiness, 3/21, 32-37

## 15 Durchgeführte Projekte

Im Rahmen der Dissertation wurden folgende Projekte durchgeführt.

1. Increasing the Competitiveness of the Domestic SMEs in Order to Improve Their Cooperation with Foreign Investors' Companies (InComSME):
  - Projektlaufzeit: 12/2017 bis 12/2019
  - Thema: Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit lokaler KMUs in Nordmazedonien, um Kooperationen mit ausländischen Investoren zu fördern
2. Mixed Reality based Collaboration for Industry (MRBC4I):
  - Projektlaufzeit: 09/2018 bis 03/2021
  - Thema: Multikriterielle Evaluierung von Mixed Reality-Systemen in der Industrie
3. Digitales Assistenzsystem für die variantenreiche Backwarenproduktion (DigiBack):
  - Projektlaufzeit: 10/2019 bis 02/2022
  - Thema: Entwicklung eines digitalen Assistenzsystems für die variantenreiche Backwarenproduktion zur halbautomatisierten energieeffizienten Ofensteuerung
4. Learning Nuggets for Robots and Physical Assistance in Manufacturing (RoboNuggets):
  - Projektlaufzeit: 01/2020 bis 12/2020
  - Thema: RoboNuggets bietet hochmoderne Lerninhalte für die Guided Learning Plattform von EIT Manufacturing. Es erstellt modulare, interaktive Lektionen (sogenannte "Learning Nuggets") in Robotik und physischer Unterstützung in der Fertigung.
5. Teaching and Learning Nuggets for Interactive Robotics (UN.I.CO):
  - Projektlaufzeit: 01/2020 bis 12/2020
  - Thema: UN.I.CO: TeleNuggetsRob liefert innovative Bildungsinhalte für die Guided Learning Plattform von EIT Manufacturing.
6. Industrial Manufacturing Process And Collaboration Tools for sustainable XR (IMPACT-sXR):
  - Projektlaufzeit: 2021/09 bis 2023/09
  - Thema: Entwicklung eines Evaluierungstools für Mixed Reality-Systeme in der Industrie

## 16 Literaturverzeichnis

- Abdel-Kader, M. G. & Dugdale, D. (2001). Evaluating Investments in Advanced Manufacturing Technology: A Fuzzy Set Theory Approach. *The British Accounting Review*, 33(4), 455–489. <https://doi.org/10.1006/bare.2001.0177>
- Abraham, M. & Annunziata, M. (2017). *Augmented Reality Is Already Improving Worker Performance*. Operations and Supply Chain Management. <https://hbr.org/2017/03/augmented-reality-is-already-improving-worker-performance>
- Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*(50), 179–211.
- Altieri, A., Ceccacci, S., Talipu, A. & Mengoni, M. (2021). A Low Cost Motion Analysis System Based on RGB Cameras to Support Ergonomic Risk Assessment in Real Workplaces. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2020*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1115/1.0002017V>
- Apt, W., Bovenschulte, M., Priesack, K., Weiß, C. & Hartmann, E. A. (2018). *Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb*. Berlin, Heidelberg. iit - Institut für Innovation und Technik.
- Arbeiterkammer. (2022). *Ihr Anspruch auf Urlaub*. [https://www.arbeiterkammer.at/beratung/arbeitsrecht/Urlaub/So\\_viel\\_Urlaub\\_bekommen\\_Sie.html](https://www.arbeiterkammer.at/beratung/arbeitsrecht/Urlaub/So_viel_Urlaub_bekommen_Sie.html)
- Aschenbrenner, D., Leutert, F., Çençen, A., Verlinden, J., Schilling, K., Latoschik, M. & Lukosch, S. (2019). Comparing Human Factors for Augmented Reality Supported Single-User and Collaborative Repair Operations of Industrial Robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, Artikel 37, 401. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00037>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence*(Vol. 6, No. 4), 355–385.
- Baroroh, D. K., Chu, C.-H. & Wang, L [Lihui] (2021). Systematic literature review on augmented reality in smart manufacturing: Collaboration between human and computational intelligence. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 696–711. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.10.017>
- Bauer, W., Bender, M., Braun, M., Rally, P. & Scholtz, O. (2016). *Leichtbauroboter in der manuellen Montage - Einfach einfach anfangen: Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen*. Stuttgart.
- Becker, T. (2008). *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77556-0>
- Bellotti, V. (2003). CHI 2003: New horizons conference proceedings, Conference on Human Factors in Computing Systems, 5, issue #1.
- BGIA (2007). Das "Rapid Upper Limb Assessment (RULA)".

- Billinghamst, M., Clark, A. & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, 8(2-3), 73–272. <https://doi.org/10.1561/11000000049>
- Biondi, F. N., Saberi, B., Graf, F., Cort, J., Pillai, P. & Balasingam, B. (2022). Distracted worker: Using pupil size and blink rate to detect cognitive load during manufacturing tasks. *Applied Ergonomics*, 106, 103867. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103867>
- Blumberg, V. S. L. & Kauffeld, S. (2020). Anwendungsszenarien und Technologiebewertung von digitalen Werkerassistenzsystemen in der Produktion – Ergebnisse einer Interview-Studie mit Experten aus der Wissenschaft, der Politik und der betrieblichen Praxis. *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)*, 51(1), 5–24. <https://doi.org/10.1007/s11612-020-00506-0>
- Bokranz, R. & Landau, K. (2006). *MTM-Handbuch: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen*. Schäffer-Poeschel Verlag.
- Bornmann, J., Kurzweg, A. & Heinrich, K. (2016). Tragbare Assistenzsysteme in der Automobilmontage: Forschung und Entwicklung innovativer orthetischer Systeme zur physischen Unterstützung während der Überkopfarbeit. In R. Weidner (Hrsg.), *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen: Zweite Transdisziplinäre Konferenz : Hamburg 2016* (S. 507–516). Laboratorium Fertigungstechnik smartASSIST Helmut Schmidt Universität.
- Bosch, T., van Rhijn, G., Krause, F., Könemann, R., Wilschut, E. S. & Looze, M. de (2020). Spatial augmented reality: a tool for operator guidance and training evaluated in five industrial case studies, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3389189.3397975>
- Bottani, E. & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IIE Transactions*, 51(3), 284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
- Brooke, J. (1996). SUS: a 'quick and dirty' usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189–194.
- Brooke, J. (2013). SUS: A Retrospective. *JUS Journal of Usability Studies*(8), Artikel 2, 29–40.
- Brown, J. (2005). *The World Café: Shaping our futures through conversations that matter* (1. ed.). BK Berrett-Koehler Publishers.
- Buxbaum, H.-J. (2020). *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28307-0>
- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z. & Hui, P. (2017). Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go. *IEEE Access*, 5, 6917–6950. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2698164>

- Chen, F [Fang] & Terken, J. (2023). Situation Awareness, Multi-tasking and Distraction. In F. Chen & J. Terken (Hrsg.), *Springer eBook Collection. Automotive Interaction Design: From Theory to Practice* (1. Aufl., S. 83–100). Springer Nature Singapore; Imprint Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3448-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3448-3_5)
- Chen, F [Fei], Sekiyama, K., Cannella, F. & Fukuda, T. (2014). Optimal Subtask Allocation for Human and Robot Collaboration Within Hybrid Assembly System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(4), 1065–1075. <https://doi.org/10.1109/TASE.2013.2274099>
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. & Simon, G.-M. (2016). JackEx: The New Digital Manufacturing Resource for Optimization of Exoskeleton-based Factory Environments. *Procedia CIRP*, 50, 508–511. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.048>
- Constantinescu, C., Todorovic, O. & Ippolito, D. (2019). Comprehensive modelling and simulation towards the identification of critical parameters for evaluation of exoskeleton-centred workplaces. *Procedia CIRP*, 79, 176–179. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.040>
- Dahmen, C. & Constantinescu, C. (2020). Methodology of Employing Exoskeleton Technology in Manufacturing by Considering Time-Related and Ergonomics Influences. *Applied Sciences*, 10(5), 1591. <https://doi.org/10.3390/app10051591>
- Damiani, L., Demartini, M., Guizzi, G., Revetria, R. & Tonelli, F. (2018). Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 624–630. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.388>
- Daum, A., Greife, W. & Przywara, R. (2018). *BWL für Ingenieurstudium und -praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20467-9>
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *IT Usefulness and Ease of Use, MIS Quarterly*.
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P. & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance of Computer Technology A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science*(35, 8), 982–1003.
- del Amo, I. F., Galeotti, E., Palmarini, R., Dini, G., Erkoyuncu, J. & Roy, R. (2018). An innovative user-centred support tool for Augmented Reality maintenance systems design: a preliminary study. *Procedia CIRP*, 70, 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.020>
- Dengler, C., Schönmann, A., Lohmann, B. & Reinhart, G. (2017). Cycle-oriented Evaluation of Production Technologies: Extending the Model of the Production Cycle. *Procedia CIRP*, 61, 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.157>

- DGUV Fachbereich Handel und Logistik (2018). Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. *Sachgebiet Physische Belastungen*.  
<https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3579>
- DIN 33402-2 (2020). DIN 33402-2, Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte.
- DIN-Normenausschuss Maschinenbau (2017). *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016)*.
- Dombrowski, U., Riechel, C. & Evers, M. (2014). Industrie 4.0 - Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution. *Kersten W, Koller H, Hermann L. Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*, 129–153.
- Domschke, W. & Klein, R. (2004). Bestimmung von Opportunitätskosten am Beispiel des Produktionscontrolling. *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung*(15), 275–294.
- Dresing, T. & Pehl, T. (Hrsg.). (2018). *Praxisbuch Transkription: Regelsysteme, Software und praktische Anleitungen für qualitative ForscherInnen* (8. Auflage). Dr. Dresing und Pehl GmbH.
- Duden. (2021). <https://www.duden.de/rechtschreibung/Evaluation>
- Edison, S. W. & Geissler, G. L. (2003). Measuring attitudes towards general technology: Antecedents, hypotheses and scale development. *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*(12), Artikel 2, 137–156.
- Ender, J., Wagner, J. C., Kunert, G., Guo, F. B., Larek, R. & Pawletta, T. (2019). Concept of a self-learning workplace cell for worker assistance while collaboration with a robot within the self-adapting-production-planning-system. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 9(4), 4–9. <https://doi.org/10.35784/iapgos.36>
- Erlach, K. (2010). *Wertstromdesign*. Springer Berlin Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-89867-2>
- European Commission. (2020). *Industry 5.0: human centric, sustainable and resilient*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/073781>
- Fast-Berglund, Å., Gong, L. & Li, D. (2018). Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 25, 31–38.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
- Ferienwiki. (2021). *Arbeitstage Rechner Österreich*.  
<https://www.ferienwiki.at/tools/arbeitsstagerechner>
- Fishbein, M. & Ajzen, I. (1975). Belief, Attitude, Intention and Behavior. *Addison-Wesley*.
- Frijns, H. A. & Schmidbauer, C. (2021). Design Guidelines for Collaborative Industrial Robot User Interfaces. In C. Ardito, R. Lanzilotti, A. Malizia, H. Petrie, A. Piccinno, G. Desolda & K. Inkpen (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science. Human-Computer Interaction – INTERACT 2021* (Bd. 12934, S. 407–427).

- Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85613-7\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85613-7_28)
- Frizziero, L., Liverani, A., Caligiana, G., Donnici, G. & Chinaglia, L. (2019). Design for Disassembly (DfD) and Augmented Reality (AR): Case Study Applied to a Gearbox. *Machines*, 7(2), 29. <https://doi.org/10.3390/machines7020029>
- Funk, M. (2016). *Augmented Reality at the Workplace: A Context-Aware Assistive System using In-Situ Projection* [Dissertation]. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Funk, M., Kosch, T., Greenwald, S. W. & Schmidt, A. (2015). A benchmark for interactive augmented reality instructions for assembly tasks, 253–257. <https://doi.org/10.1145/2836041.2836067>
- Funk, M., Kosch, T. & Schmidt, A. (2016). Interactive worker assistance. In *Lukowicz, Krüger et al 2016* (S. 934–939). <https://doi.org/10.1145/2971648.2971706> (Erstveröffentlichung 2016)
- Galy, E., Cariou, M. & Mélan, C. (2012). What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 83(3), 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.023>
- Geldermann, J. (2008). Multikriterielle Optimierung. *Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik*.
- Geldermann, J. & Lerche, N. (2014). Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung.
- Georgsson, M. (2020). NASA RTLX as a Novel Assessment Tool for Determining Cognitive Load and User Acceptance of Expert and User-based Usability Evaluation Methods. *EJBI*, 16(2). <https://doi.org/10.24105/ejbi.2020.16.2.14>
- Gombolay, M. C., Gutierrez, R. A., Clarke, S. G., Sturla, G. F. & Shah, J. A. (2015). Decision-making authority, team efficiency and human worker satisfaction in mixed human–robot teams. *Autonomous Robots*, 39(3), 293–312. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9457-9>
- Hamilton, S. & Chervany, N. L. (1981). Evaluating Information System Effectiveness - Part I: Comparing Evaluation Approaches. *MIS Quarterly*(5), Artikel 3, 55–69.
- Hannola, L., Heinrich, P., Richter, A. & Stocker, A. (2016). Sociotechnical challenges in knowledge-intensive production environments. *ISPIM Innovation Conference*.
- Hart, S. G. (2006). NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later.
- Havard, V., Baudry, D., Jeanne, B., Louis, A. & Savatier, X. (2021). A use case study comparing augmented reality (AR) and electronic document-based maintenance instructions considering tasks complexity and operator competency level. *Virtual Reality*, 25(4), 999–1014. <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00493-z>

- Hegenberg, J. & Schmidt, L. (2021). Augmented-Reality-basierte Assistenz für das Anlernen manueller und roboterunterstützter Montageprozesse. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 75(4), 367–387. <https://doi.org/10.1007/s41449-021-00278-3>
- Helin, K., Kuula, T., Vizzi, C., Karjalainen, J. & Vovk, A. (2018). User Experience of Augmented Reality System for Astronaut's Manual Work Support. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, Artikel 106, 22. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00106>
- Hennink, M. M. (2014). *Focus Group Discussions*. Oxford University Press.
- Hertzum, M. (2021). Reference values and subscale patterns for the task load index (TLX): a meta-analytic review. *Ergonomics*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1876927>
- Heyse, V. & Erpenbeck, J. (2010). *Kompetenztraining: Informations- und Trainingsprogramme* (2. Auflage). Schäffer-Poeschel.
- Hill, S. G., Iavecchia, H. P., Byers, J. C., Bittner, A. C., Zaklad, A. L. & Christ, R. E. (1992). Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *HFES - Human Factors and Ergonomics Society*(34), Artikel 4, 429–439.
- Hoedt, S., Claeys, A., van Landeghem, H. & Cottyn, J [J.] (2016). Evaluation Framework for Virtual Training within Mixed-Model Manual Assembly. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.614>
- Hoffman, G. (2019). Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(3), 209–218. <https://doi.org/10.1109/THMS.2019.2904558>
- Hoffmann, N., Prokop, G. & Weidner, R. (2022). Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications. *Ergonomics*, 65(2), 276–295. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1970823>
- Hold, P. (2020). *Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage* [Dissertation]. Technische Universität Wien, Wien.
- Hold, P., Erol, S., Reisinger, G. & Sihm, W. (2017). Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. *Procedia Manufacturing*, 9, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.024>
- Hold, P., Ranz, F. & Holly, F. (2020). Exoskelette in der Produktion und Logistik: Grundlagen, Morphologie und Vorgehensweise zur Implementierung. *Fraunhofer Austria*.
- Holly, F., Zigart, T., Maurer, M., Wolfartsberger, J., Brunnhofer, M., Sorko, S. R., Moser, T. & Schlager, A. (2022). Gaining Impact with Mixed Reality in Industry: A Sustainable Approach. *2022 8th International Conference 2022*, 128–134.
- Holm, M., Senington, R., Wang, W. & Lindblom, J. (2021). Real-World Industrial Demonstrators on Human–Robot Collaborative Assembly. In L. Wang, X. V. Wang, J. Váncza & Z. Kemény (Hrsg.), *Advanced Human-Robot Collaboration*

- in Manufacturing* (S. 413–438). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-69178-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69178-3_17)
- Hornung, L. (2021, 21. April). *Tourings, Ergebnisse der Umfrage Mensch-Roboter-Kollaborationen (MRK)*. Forschungsgruppe Robotik und Autonome Systeme, Hochschule Karlsruhe, University of Applied Sciences.
- Imai, M. (1997). *Gemba kaizen: A commonsense low-cost approach to management*. McGraw-Hill. <http://www.loc.gov/catdir/description/mh022/96052406.html>
- Kallio, H., Pietilä, A.-M., Johnson, M. & Kangasniemi, M. (2016). Systematic methodological review: developing a framework for a qualitative semi-structured interview guide. *Journal of advanced nursing*, 72(12), 2954–2965.  
<https://doi.org/10.1111/jan.13031>
- Kaplan, R. S. & Norton, D. P. (1992). The Balanced Scorecard: Measures that Drive Performance. *Harvard Business Review*, 71–79.
- Karahanna, E., Agarwal, R. & Angst, C. M. (2006). Reconceptualizing Compatibility Beliefs in Technology Acceptance Research. *MIS Quarterly*(30), Artikel 4, 781–804.
- karriere.at. (2021). *Lohnkostenrechner*. <https://www.karriere.at/hr/lohnkostenrechner>
- Keller, T., Bayer, C., Bausch, P. & Metternich, J. (2019). Benefit evaluation of digital assistance systems for assembly workstations. *Procedia CIRP*, 81, 441–446.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.076>
- Kim, M., Choi, S. H., Park, K.-B. & Lee, J. Y. (2019). User Interactions for Augmented Reality Smart Glasses: A Comparative Evaluation of Visual Contexts and Interaction Gestures. *Applied Sciences*, 9(15), 3171.  
<https://doi.org/10.3390/app9153171>
- Kind, S., Kerlen, C., Wangler, L. & Wessels, J. (2018). *Technologiereifegrad zur Ermittlung von Fortschritten in FuE-Projekten*. Institut für Innovation und Technik. Jahrestagung der DeGEval, Dresden.
- Kinz, A. (2017). *Ausgestaltung einer dynamischen, lern- und wertschöpfungsorientierten Instandhaltung* [Dissertation]. Montanuniversität Leoben, Leoben.
- Kletti, J. & Schumacher, J. (2011). *Die perfekte Produktion*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13845-4>
- Klöß, S. (2021). *Augmented und Virtual Reality: Potenziale und praktische Anwendung immersiver Technologien*.
- Kodekonzept. (2019). *Der KODE® KompetenzAtlas: 64 präzise definierte Kompetenzen*. <https://www.kodekonzept.com/wissensressourcen/kode-kompetenzatlas/>
- Kosch, T., Kettner, R., Funk, M. & Schmidt, A. (2016). Comparing Tactile, Auditory, and Visual Assembly Error-Feedback for Workers with Cognitive Impairments. *ASSETS '16: Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS*

- Conference on Computers and Accessibility*, 53–60.  
<https://doi.org/10.1145/2982142.2982157>
- Krueger, R. A. & Casey, M. A. (2001). Focus Group Interviewing. In D. Carson, A. Gilmore, C. Perry & K. Gronhaug (Hrsg.), *Qualitative Marketing Research* (S. 113–131). SAGE Publications, Ltd.  
<https://doi.org/10.4135/9781849209625.n8>
- Kugler, M., Bierwirth, M., Schaub, K., Sinn-Behrendt, A., Feith, A., Ghezal-Ahmadi, K. & Bruder, R. (2010). *Ergonomie in der Industrie - aber wie? Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements* (1. Aufl.).  
[https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Praevention/pdf/Muskel-Skelett-1.pdf?\\_\\_blob=](https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Praevention/pdf/Muskel-Skelett-1.pdf?__blob=)
- Lacueva-Pérez, F. J., Khakurel, J., Brandl, P., Hannola, L., Gracia-Bandrés, M. Á. & Schafler, M. (2018). Assessing TRL of HCI Technologies Supporting Shop Floor Workers. *Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference*, 311–318.  
<https://doi.org/10.1145/3197768.3203175>
- LAP Laser Applikationen. (2019). *Assembly 4.0 with laser projection: LAP demonstrates live scenarios for digitalization in worker guidance at Motek*.  
<https://www.pressebox.com/pressrelease/lap-gmbh-laser-applikationen/Assembly-4-0-with-laser-projection/boxid/975367>
- Lewis, J. R. & Sauro, J. (2017). Revisiting the Factor Structure of the System Usability Scale. *Journal of Usability Studies*(12), Artikel 4, 183–192.
- Liebrecht, C. (2020). *Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz – Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen* [Dissertation], Karlsruhe.
- Liebrecht, C., Jacob, A., Kuhnle, A. & Lanza, G. (2017). Multi-criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty. *Procedia CIRP*, 63, 224–229.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.147>
- Lindblom, J., Alenljung, B. & Billing, E. (2020). Evaluating the User Experience of Human–Robot Interaction. In T. Belpaeme, C. Bethel, D. Chrysostomou, N. Crook, M. Grandgeorge, C. Jost, B. Le Pévédic & N. Mirnig (Hrsg.), *Springer Series on Bio- and Neurosystems: volume 12. Human-Robot Interaction: Evaluation Methods and their Standardization* (Bd. 12, S. 231–256). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42307-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42307-0_9)
- Lindblom, J. & Wang, W. (2018). Towards an Evaluation Framework of Safety, Trust, and Operator Experience in Different Demonstrators of Human-Robot Collaboration. *Advances in Manufacturing Technology XXXII*, 145–150.  
<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-902-7-145>
- Liu, Y. & Wickens, C. D. (1994). Mental workload and cognitive task automaticity: an evaluation of subjective and time estimation metrics. *Ergonomics*, 37(11), 1843–1854. <https://doi.org/10.1080/00140139408964953>

- Longo, L. (2018). Experienced mental workload, perception of usability, their interaction and impact on task performance. *PLOS one*(13), 1–36.  
<https://doi.org/10.1371/journal>.
- Looze, M. de, Vries, A. de & Krause, F. (27. Mai 2020). Exoskelette, wie nützlich sind sie wirklich? *VMN Vakmedianet*.
- Looze, M. P. de, Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671–681.  
<https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Looze, M. P. de, Krause, F. & O'Sullivan, L. W. (2017). The Potential and Acceptance of Exoskeletons in Industry. *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, 195–199.
- Lovasz-Bukvova, H., Hölzl, M., Kormann-Hainzl, G., Moser, T., Zigart, T. & Schlund, S. (2021). Usability and Task Load of Applications in Augmented and Virtual Reality. In M. Yilmaz, P. Clarke, R. Messnarz & M. Reiner (Hrsg.), *Communications in Computer and Information Science. Systems, Software and Services Process Improvement* (Bd. 1442, S. 708–718). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85521-5\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85521-5_48)
- Ludwig, C. & Reimann, C. (2005). Augmented Reality: Information im Fokus.
- Mankins, J. C. (2009). Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica*, 65(9-10), 1216–1223.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>
- Mark, B. G., Gualtieri, L., Marchi, M. de, Rauch, E. & Matt, D. T. (2020). Function-Based Mapping of Industrial Assistance Systems to User Groups in Production. *Procedia CIRP*, 96, 278–283.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.087>
- Mark, B. G., Rauch, E. & Matt, D. (2021). Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 228–250.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.017>
- Mark, B. G., Rauch, E. & Matt, D. T. (2022). Systematic selection methodology for worker assistance systems in manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 166, 107982. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107982>
- Martinetti, A., Rajabalinejad, M. & van Dongen, L. (2017). Shaping the Future Maintenance Operations: Reflections on the Adoptions of Augmented Reality Through Problems and Opportunities. *Procedia CIRP*, 59, 14–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.130>
- Mateus, J. C., Claeys, D., Limère, V., Cottyn, J [Johannes] & Aghezaf, E.-H. (2019). A structured methodology for the design of a human-robot collaborative assembly workplace. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

- Technology*, 102(5-8), 2663–2681. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03356-3>
- Mayrhofer, W., Kames, D. & Schlund, S. (2019). Made in Austria: Produktionsarbeit in Österreich 2019.
- Mayrhofer, W., Nixdorf, S., Fischer, C., Zigart, T., Schmidbauer, C. & Schlund, S. (2021). Learning nuggets for cobot education: a conceptual framework, implementation, and evaluation of adaptive learning content. *11th Conference on Learning Factories, CLF2021*.
- Mayrhofer, W., Rupprecht, P. & Schlund, S. (2019). One-Fits-All vs. Tailor-Made: User-Centered Workstations for Field Assembly with an Application in Aircraft Parts Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 39, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.287>
- Mayring, P. (2010). Qualitative Inhaltsanalyse, 187–211.
- McAtamney, L. & Corlett, N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*(24), Artikel 2, 91–99.
- Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J. F. & Dusek, J. A. (2009). Impact of Incremental Increases in Cognitive Workload on Physiological Arousal and Performance in Young Adult Drivers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2138(1), 6–12. <https://doi.org/10.3141/2138-02>
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Informations Systems*(Vol E77-D, No. 12).
- Miller, S. (2001). Literature Review: Workload Measures.
- Moser, T., Zigart, T., Kormann-Hainzl, G. & Lovasz-Bukvova, H. (2020). Assistenzsysteme der Zukunft schon heute: Aktuelle Anwendungsfälle von Mixed Reality in der Produktion. *WING Business*.
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Giannoulis, C., Siganakis, E. & Zogopoulos, V. (2016). Applications for Frugal Product Customization and Design of Manufacturing Networks. *Procedia CIRP*, 52, 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.055>
- Müller, D. (2006). *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure: Mit 83 Abbildungen und 70 Tabellen* (1. Aufl.). Springer. [http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2760848&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2760848&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm)
- Müller, R., Vette, M. & Mailahn, O. (2016). Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction. *Procedia CIRP*, 44, 210–215. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.080>
- Müller, R., Vette, M., Mailahn, O., Ginschel, A. & Ball, J. (2014). Innovative Produktionsassistenz für die Montage: Intelligente Werkerunterstützung bei der Montage von Großbauteilen in der Luftfahrt. *wt Werkstattstechnik*, 104(9), 552–560.

- Nägele, F. & Dörbaum, M. (2021). *Automatisierte Tragschienenmontage mit Robotern*. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. [https://www.wago.com/de/roboter-automatisierte-tragschienenmontage?utm\\_source=social&utm\\_medium=li\\_organic&utm\\_term=Bild&utm\\_content=MM36508&utm\\_campaign=MA806000](https://www.wago.com/de/roboter-automatisierte-tragschienenmontage?utm_source=social&utm_medium=li_organic&utm_term=Bild&utm_content=MM36508&utm_campaign=MA806000)
- Nardo, M., Forino, D. & Murino, T. (2020). The evolution of man–machine interaction: the role of human in Industry 4.0 paradigm. *Production & Manufacturing Research*, 8(1), 20–34. <https://doi.org/10.1080/21693277.2020.1737592>
- Notander, G. (2020). *Technology Readiness Levels - TRL: NASA's contribution to Horizon 2020*.
- Nowak, M. (2021). *Anwendungsbasierte Evaluation von Assistenzsystemen in der Produktion* [Diplomarbeit]. Technische Universität Wien, Wien.
- Oestreich, H., Töniges, T., Wojtynek, M. & Wrede, S. (2019). Interactive Learning of Assembly Processes using Digital Assistance. *Procedia Manufacturing*, 31, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.003>
- Okoli, C. & Schabram, K. (2010). A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research. *Sprouts: Working Papers on Information*(10(26)).
- Otto, M., Lampen, E., Agethen, P., Langohr, M., Zachmann, G. & Rukzio, E. (2019). A Virtual Reality Assembly Assessment Benchmark for Measuring VR Performance & Limitations. *Procedia CIRP*, 81, 785–790. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.195>
- Pace, F. de, Manuri, F., Sanna, A. & Zappia, D. (2019). A Comparison Between Two Different Approaches for a Collaborative Mixed-Virtual Environment in Industrial Maintenance. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, Artikel 18, 171. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00018>
- Parsa, B. & Banerjee, A. G. (2021). A Multi-Task Learning Approach for Human Activity Segmentation and Ergonomics Risk Assessment. *WACV*, 2351–2361. <https://doi.org/10.1109/WACV48630.2021.00240>
- Passath, T., Huber, C. & Biedermann, H. (2020). Dynamic criticality assessment as a supporting tool for knowledge retention to increase the efficiency and effectiveness of maintenance. *1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL)*.
- Patsch, J., Kames, D., Mayrhofer, W. & Schlund, S. (2021). Made in Austria: Produktionsarbeit in Österreich 2021. *Technische Universität Wien*.
- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*(Vol. 24), Artikel Issue 3, 45–78.
- Peissner, M. & Hipp, C. (2013). Potenziale der Mensch-Technik Interaktion für die effiziente und vernetzte Produktion von morgen. *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO*.

- Pimminger, S., Kurschl, W., Panholzer, L., Neumayr, T., Augstein, M., Altmann, J. & Heinzlreiter, J. (2020). Assembly Task Analysis Using the General Assembly Task Model (GATM) on the Shop Floor. *Procedia CIRP*, 93, 1109–1114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.007>
- Pokorni, B., Zwerina, J. & Hämmerle, M. (2020). Human-centered design approach for manufacturing assistance systems based on Design Sprints. *Procedia CIRP*, 91, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.181>
- Pringle, A., Hutka, S., Mom, J., van Esch, R., Heffernan, N. & Chen, P. (2019). Ethnographic study of a commercially available augmented reality HMD app for industry work instruction. *PETRA '19: Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 389–397. <https://doi.org/10.1145/3316782.3322752>
- Qu, S. Q. & Dumay, J. (2011). The qualitative research interview. *Qualitative Research in Accounting & Management*, 8(3), 238–264. <https://doi.org/10.1108/11766091111162070>
- Quandt, M. & Freitag, M. (2021). A Systematic Review of User Acceptance in Industrial Augmented Reality. *Frontiers in Education*, 6, Artikel 700760. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.700760>
- Quandt, M., Knoke, B., Gorltd, C., Freitag, M. & Thoben, K.-D. (2018). General Requirements for Industrial Augmented Reality Applications. *Procedia CIRP*, 72, 1130–1135. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.061>
- Ralfs, L., Hoffmann, N. & Weidner, R. (2021). Method and Test Course for the Evaluation of Industrial Exoskeletons. *Applied Sciences*, 11(20), 9614. <https://doi.org/10.3390/app11209614>
- Rally, P. & Scholtz, O. (2020). Abschätzung der Wirtschaftlichkeit für MRK-Anwendungen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115(3), 166–170. <https://doi.org/10.3139/104.112215>
- Rashedi, E., Kim, S., Nussbaum, M. A. & Agnew, M. J. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 57(12), 1864–1874. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682>
- Reinhart, G. (2017). *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446449893>
- Reinhart, G., Shen, Y. & Spillner, R. (2013). Hybride Systeme – Arbeitsplätze der Zukunft: Nachhaltige und flexible Produktivitätssteigerung in hybriden Arbeitssystemen. *wt Werkstattstechnik*, 103(6), 543–547.
- Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J. & Fast-Berglund, Å. (2016). The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. *IFIP International Federation for Information Processing*, 488, 677–686. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7\\_80](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_80)

- RRI-Practice. (2016). *What is RRI?* RRI. <https://www.rri-practice.eu/about-rri-practice/what-is-rri/>
- Rupprecht, P. (2022). *Spatial Augmented Reality in der industriellen Großgeräte- und Baustellenmontage: Entwicklung eines Assistenzsystems mit dynamischer In-situ-Projektion und nutzeradaptiver Gesteninteraktion* [Dissertation]. Technische Universität Wien, Wien.
- Rupprecht, P., Kueffner-McCauley, H. & Schlund, S. (2020). Information provision utilizing a dynamic projection system in industrial site assembly. *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems*.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*(48), 9–26.
- Schafner, M., Lacueva-Pérez, F. J., Hannola, L., Damalas, S., Nierhoff, J. & Herrmann, T. (2018). Insights into the Introduction of Digital Interventions at the shop floor. In Unknown (Hrsg.), *Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference on - PETRA '18* (S. 331–338). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3197768.3203176>
- Scheer, A.-W., Nüggens, M. & Zimmermann, V. (1997). Objektorientierte Ereignisgesteuerte Prozesskette (oEPK): Methode und Anwendung. *Universität Saarland*.
- Schlund, S., Mayrhofer, W. & Rupprecht, P. (2018). Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 72(4), 276–286. <https://doi.org/10.1007/s41449-018-0128-5>
- Schlund, S. & Zigart, T. (2020, 4. März). *Assistance Systems in Manufacturing 2: L1: Introduction, Revision, Augmented & Virtual Reality in Manufacturing*. TU Wien. IMW MMI, Wien.
- Schmidbauer, C. (2022). *Adaptive Task Sharing between Humans and Cobots in Assembly Processes*. Technische Universität Wien, Wien.
- Schmidbauer, C., Hader, B. & Schlund, S. (2021). Evaluation of a Digital Worker Assistance System to enable Adaptive Task Sharing between Humans and Cobots in Manufacturing. *54th CIRP Conference on Manufacturing Systems*.
- Schmidbauer, C., Komenda, T. & Schlund, S. (2020). Teaching Cobots in Learning Factories – User and Usability-Driven Implications. *Procedia Manufacturing*, 45, 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.043>
- Schmidler, J., Bengler, K., Dimeas, F. & Campeau-Lecours, A. (2017). A Questionnaire for the Evaluation of Physical Assistive Devices (QUEAD): Testing Usability and Acceptance in physical Human-Robot Interaction. *IEEE*

- International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 876–881.  
<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8114675>
- Schröder, W. (2010). *Ganzheitliches Instandhaltungsmanagement: Aufbau, Ausgestaltung und Bewertung*. Zugl.: Leoben, Montanuniv., Diss., 2009 (1. Aufl.). *Gabler Research Techno-ökonomische Forschung und Praxis*. Gabler.
- Sonntag, D., Albuquerque, G., Magnor, M. & Bodensiek, O. (2019). Hybrid learning environments by data-driven augmented reality. *Procedia Manufacturing*, 31, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.006>
- Souza Cardoso, L. F. de, Mariano, F. C. M. Q. & Zorzal, E. R. (2020). A survey of industrial augmented reality. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106159. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159>
- Spath, D., Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T. & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer.
- Statistik Austria. (2020a). *Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 nach Geschlecht und Diagnose*.  
[https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/gesundheit/gesundheitszustand/krankenstaende/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/gesundheit/gesundheitszustand/krankenstaende/index.html)
- Statistik Austria (2020b). *Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2020 nach Geschlecht, Alter und Wirtschaftsabschnitt*.  
[https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/gesundheit/gesundheitszustand/krankenstaende/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/gesundheit/gesundheitszustand/krankenstaende/index.html)
- Statistik Austria. (2020c). *Nettomonatseinkommen*.  
[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))
- Stockinger, C., Stuke, F. & Subtil, I. (2021). User-centered development of a worker guidance system for a flexible production line. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 31(5), 532–545.  
<https://doi.org/10.1002/hfm.20901>
- Strohm, O. & Ulich, E. (Hrsg.). (1997). *Mensch, Technik, Organisation: Bd. 10. Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten: Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation*. vdf Hochschulverl. an der ETH Zürich.
- Suárez-Warden, F., Mendivil, E. G., Rodríguez, C. A. & Garcia-Lumbreras, S. (2015). Assembly Operations Aided by Augmented Reality: An Endeavour toward a Comparative Analysis. *Procedia Computer Science*, 75, 281–290.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.249>

- Syberfeldt, A., Danielsson, O., Holm, M. & Wang, L [Lihui] (2015). Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*, 1, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.068>
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., Holm, M. & Wang, L [Lihui] (2016). Dynamic Operator Instructions Based on Augmented Reality and Rule-based Expert Systems. *Procedia CIRP*, 41, 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.113>
- Terhoeven, J., Schiefelbein, F.-P. & Wischniewski, S. (2018). User expectations on smart glasses as work assistance in electronics manufacturing. *Procedia CIRP*, 72, 1028–1032. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.060>
- Theis, S., Pfindler, C., Alexander, T., Mertens, A., Brandl, C. & Schlick, C. M. (2016). Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Physische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs.
- Tian, Y., Liu, H., Yin, J., Luo, M. & Wu, G. (2015). Evaluation of simulation-based training for aircraft carrier marshalling with learning cubic and Kirkpatrick's models. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(1), 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.12.002>
- Tolio, T., Copani, G. & Terkaj, W. (2019). *Factories of the Future*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94358-9>
- Töllner, A. (2009). Modell und Modellierung. In G. Bandow & H. H. Holzmüller (Hrsg.), „Das ist gar kein Modell!“. *Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften* (S. 3–21). Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making methods: a comparative study*. Springer-Science+Business Media, B.V.
- Ulich, E. (2005). *Arbeitspsychologie* (6., überarb. und erw. Aufl.). vdf Hochschulverl. an der ETH; Schäffer-Poeschel.
- Ulich, E. (2013). Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme - eine Erinnerung. *Journal Psychologie des Alltagshandelns*(6), Artikel 1, 4–12.
- van Krevelen, D. W. F. & Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality*(9), Artikel 2, 1–20.
- VDI-Richtlinien 3633 (2014). Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Grundlagen.
- VDI-Richtlinien 3633 (2018). Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Begriffe.
- Venable, J., Pries-Heje, J. & Baskerville, R. (2012). A Comprehensive Framework for Evaluation in Design Science Research. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G.

- Weikum, K. Peffers, M. Rothenberger & B. Kuechler (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science. Design Science Research in Information Systems. Advances in Theory and Practice* (Bd. 7286, S. 423–438). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29863-9\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29863-9_31)
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & David, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*(27, 3), 425–478.
- Wang, J., Chen, D., Zhu, M. & Sun, Y. (2021). Risk assessment for musculoskeletal disorders based on the characteristics of work posture. *Automation in Construction*, 131, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103921>
- Wang, L [L.], Gao, R., Váncza, J [J.], Krüger, J., Wang, X. V [X. V.], Makris, S. & Chryssolouris, G. (2019). Symbiotic human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(2), 701–726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>
- Wang, X. V [Xi Vincent], Kemény, Z., Váncza, J [József] & Wang, L [Lihui] (2017). Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation. *CIRP Annals*, 66(1), 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.101>
- Wappis, J. & Jung, B. (2013). *Null-Fehler-Management: Umsetzung von Six Sigma* (5. Aufl.). Hanser.
- Weidner, R. (Hrsg.). (2016). *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen: Zweite Transdisziplinäre Konferenz : Hamburg 2016*. Laboratorium Fertigungstechnik smartASSIST Helmut Schmidt Universität.
- Weidner, R., Hoffmann, N. & Linnenberg, C. (2020). Exoskelette im industriellen Anwendungsfall: Eine multikriterielle Betrachtung aus verschiedenen Perspektiven. *GfA - Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?*(B.5.5).
- Weidner, R., Redlich, T. & Wulfsberg, J. P. (2015). *Technische Unterstützungssysteme*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48383-1>
- Wichmann, R. L., Eisenbart, B. & Gericke, K. (2019). The Direction of Industry: A Literature Review on Industry 4.0. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 2129–2138. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.219>
- Wischmann, S. & Hartmann, E. A. (2018). *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49266-6>
- WKO. (2022). *Kollektivvertrag Eisen- und Metallverarbeitenden Gewerbe, Arbeiter/innen, gültig ab 1.1.2022: IX. Entlohnung Monatliche Mindestgrundlöhne, 1. Lohngruppen*. [https://www.wko.at/service/kollektivvertrag/kv-eisen-metallverarbeitendegewerbe-arbeiter-2022.html#heading\\_mindestgrundloehne](https://www.wko.at/service/kollektivvertrag/kv-eisen-metallverarbeitendegewerbe-arbeiter-2022.html#heading_mindestgrundloehne)

- Zhou, Y., Ji, S., Xu, T. & Wang, Z. (2018). Promoting Knowledge Construction: A Model for Using Virtual Reality Interaction to Enhance Learning. *Procedia Computer Science*, 130, 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.035>
- Zigart, T., Kormann-Hainzl, G., Lovasz-Bukvova, H., Hölzl, M., Moser, T. & Schlund, S. (2022). Application of a Multi-Criteria Evaluation Model for Augmented and Virtual Reality Use Cases in Manufacturing, (in progress).
- Zigart, T. & Schlund, S. (2020a). Evaluation of Augmented Reality Technologies in Manufacturing - A Literature Review. *Advances in Human Factors and Systems Interaction*, Vol. 1207, 75–82. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51369-6>
- Zigart, T. & Schlund, S. (2020b). Multikriterielle Evaluation von industriellen Assistenzsystemen am Beispiel von Augmented Reality-Anwendungen in der Produktion. *GfA - Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?*
- Zigart, T. & Schlund, S. (2022). Ready for Industrial Use? A User Study of Spatial Augmented Reality in Industrial Assembly. *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*.
- Zigart, T., Zafari, S., Stürzl, F., Kiesewetter, R., Kasparick, H.-P. & Schlund, S. (2022). Multi assistance systems in manufacturing: A user study evaluating multi-criteria impact in high-mix low-volume assembly, (in progress).