

Schlussbericht vom 31.01.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21605 N

Thema

Systematische Nutzung von Exoskeletten in Produktion und Logistik

Berichtszeitraum

01.01.2021 – 31.01.2023

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dortmund
Institut für Produktionssysteme (IPS)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF-Forschungsvorhaben 21605 N

Forschungsthema

Systematische Nutzung von Exoskeletten in Produktion und Logistik

Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund

Institut für Produktionssysteme

Professur für Arbeits- und Produktionssysteme

Leonhard-Euler-Straße 5

44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 21605 N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V., Schlachte 31, 28195 Bremen wird über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Danksagung

Besonderer Dank gilt den teilnehmenden Unternehmen und Verbänden der projektbegleitenden Ausschüsse: Audi AG, Babymarkt.de GmbH, Brock GmbH, CleanControlling GmbH, DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH, GBS German Bionic Systems GmbH, Goldbeck Bauelemente Bielefeld SE, Goldbeck Bauelemente Treuen SE, Hunic GmbH, Insta GmbH, itturi GmbH, KHS GmbH, Laevo B.V., Miele GmbH & Cie. KG, Mosaiic GmbH, MPS Verpackungsdienstleistungen GmbH, Netzwerk Industrie RuhrOst e.V., Ottobock SE & Co. KGaA, REFA-Institut e.V., scalefit UG, Schweizerische Bundesbahnen AG, SIBA GmbH, Siemens AG, Stahl- und Metallbau Viet GmbH, TopStar GmbH, Verband der Metall- und Elektroindustrie Baden-Württemberg e. V. (Südwestmetall), Wiese Tischlerei + Brandschutzbau GmbH und Wilo SE

sowie den Referenten der Treffen des projektbegleitenden Ausschusses am **30.06.2021**:

Herr David Duwe	Ottobock SE & Co. KGaA
Herr Maximilian Rittel	German Bionic
Herr PD Dr. rer. Nat. Benjamin Steinhilber	Institut für Arbeitsmedizin, Sozialmedizin und Versorgungsforschung (IASV) - Universitätsklinikums Tübingen

, am **09.12.2021**:

Herr Ismail Uygur	DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH
Herr Yasin Uysal	Wilo SE

, am **28.06.2022**:

Herr Andreas Eichbaum	Miele GmbH & Cie. KG
Herr David Duwe	Ottobock SE & Co. KG
Herr Dr. sportwiss. Frank Emrich	scalefit UG

, am **09.08.2022** (gemeinsamer Workshop des PA):

Frau Tanja Sindram	Mosaiic GmbH
Herr Daniaal Dar	Mosaiic GmbH

und am **14.12.2022**:

Herr Bas Wagemaker	Laevo B.V.
Herr Dr. sportwiss. Andreas Argubi-Wollesen	exoIQ GmbH
Frau Rachele Sessa	Fondazione Ergo
Herr Dr.-Ing. Fabian Nöhring	Deutsche MTM-Gesellschaft mbH

Darüber hinaus sei allen Unternehmen, die im Rahmen von Expertengesprächen, Interviews oder Umfragen zum Projektfortschritt beigetragen haben, für ihre Kooperation gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Forschungsziel	3
1.3	Lösungsweg	4
2	Stand der Wissenschaft	6
2.1	Historische Entwicklung von Exoskeletten	6
2.2	Industrielle Exoskelette	7
2.2.1	Definition	7
2.2.2	Kategorisierung von Exoskeletten	7
2.2.3	Einsatzgebiete von Exoskeletten	9
2.2.4	Rechtliche und normative Rahmenbedingungen	10
2.3	Forschungsvorhaben für den industriellen Einsatz von Exoskeletten	13
2.4	Studien zu Exoskeletten	14
2.4.1	Physiologische Wirkung von Exoskeletten	15
2.4.2	Auswirkungen auf die Mitarbeiterproduktivität	21
3	Konzeptentwicklung	23
3.1	AP 1: Kategorisierung und Analyse kommerziell verfügbarer Exoskelett-Lösungen	25
3.2	AP 2: Identifikation und Systematisierung von typischen Anwendungsfeldern	28
3.3	AP 3: Datenaufnahme und –auswahl auf Basis von Exoskelett-Nutzung zur Anwendungsanalyse	32
3.3.1	Studie zur Beeinflussung der Mitarbeiterproduktivität	33
3.3.2	Studie zur Beeinflussung von Bewegungsmustern	35
3.4	AP 4: Datenauswertung und Identifikation von Nutzenpotenzialen in Produktion und Logistik	36
3.5	AP 5: Entwicklung eines Quick-Checks zur Identifikation von Einsatzfeldern	39
3.6	AP 6: Validierung im industriellen Kontext	46
3.6.1	Validierung mittels Einzel-Usability-Tests	50
3.6.2	Validierung mittels Workshops	52

3.6.3 Ergebnisse und Implementierung	54
3.7 AP 7: Dokumentation und Ergebnistransfer	55
4 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	56
5 Bewertung des Einzelfinanzierungsplans	60
6 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	63
7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für Unternehmen, insbesondere KMU	64
8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft	66
8.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen	68
8.2 Transfermaßnahmen nach Projektende und Bewertung	69
9 Literaturverzeichnis	72
10 Anhang	86

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
AWF	Arbeitsgemeinschaft für wirtschaftliche Fertigung
BVL	Bundesvereinigung Logistik e.V.
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAWS	Ergonomic Assessment Worksheet
EN	Europäische Norm
ESD	Elektrostatische Entladung
GfA	Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
HHT	Heben, Halten und Tragen
IPS	Institut für Produktionssysteme
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Kleinstunternehmen, kleine und mittlere Unternehmen
LMM	Leitmerkmalmethode
MHI	Wissenschaftliche Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik e.V.
MM	Menschmonate
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankungen
MTM	Methods-Time Measurement
NIRO	Netzwerk Industrie RuhrOst e.V.
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PM	Personenmonate
RED	Radio Equipment Directive
SHK	Studentische Hilfskraft
TOP	Technische, organisatorische, personelle Maßnahmen
TR	Technical Report
vAW	Vorhabenbezogene Aufwendungen der Wirtschaft

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Bevölkerung in Millionen und Anteilen der Altersgruppen in Prozent ab 1970, ab 2020 Prognose (i.A.a. Destatis 2019).....	1
Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung zweier passiver Exoskelette mit rigider (links) sowie weicher (rechts) Stützstruktur (Jansing et al. 2023).....	8
Abbildung 3: Exoskelette der Fa. Ottobock SE & Co. KG für unterschiedliche Unterstützungsregionen: a) Paexo Back, b) Paexo Shoulder, c) Paexo Soft Back, d) Paexo Neck, e) Paexo Wrist, f) Paexo Thumb (Ottobock 2022).....	9
Abbildung 4: Visualisierung des der TOP-Maßnahmenhierarchie	10
Abbildung 5: Prototyp des Exoskelett-Arm-Moduls Robo-Mate (Robo-Mate 2016b).....	13
Abbildung 6: Muskuloskelettales Modell von Raabe und Chaudhari (2016) mit Exoskelett zur Rumpfunterstützung in der Sagitalebene.....	17
Abbildung 7: Skelettmodell beim Heben und Halten von Lasten mit Krafteinleitung an den Händen.....	18
Abbildung 8: Chairless Chair 2.0 zur Unterstützung der unteren Extremitäten (Noonee 2019).....	21
Abbildung 9: Beantragte Abfolge der AP im Rahmen des Forschungsprojektes einschließlich geplanter Treffen des PA und geplanter Mitarbeiterkapazitäten.....	23
Abbildung 10: Ausgewählte Merkmale industrieller Exoskelette.....	27
Abbildung 11: Ausschnitt der erstellten Marktübersicht zu verfügbaren Exoskeletten für die industrielle Anwendung	28
Abbildung 12: Auswertung von Hemmnissen beim Einsatz von Exoskeletten	32
Abbildung 13: Kritischer Einflussfaktoren zur erfolgreichen Implementierung von Exoskeletten (Fox et al. 2020).....	37
Abbildung 14: Ablauf des Quick-Checks zur Identifizierung des Einsatzpotentials von Exoskeletten.....	42
Abbildung 15: Beispielhaftes Ergebnis für zwei untersuchte Tätigkeiten.....	45
Abbildung 16: Ausschnitt aus der Tätigkeitsdefinition im entwickelten Webtool	46
Abbildung 17: Modelle der anwendungsbezogenen Qualität (i.A.a. ISO/IEC 25010:2011-03).....	48
Abbildung 18: Modell der Produktqualität (i.A.a. ISO/IEC 25010:2011-03)	48

Abbildung 19: Funktionales Modell zur Beschreibung der Abhängigkeit des relativen Anteils identifizierter Usability-Probleme in Abhängigkeit der Anzahl an Testnutzern (i.A.a. Nielson 2000)	49
Abbildung 20: Interaktives Miro-Board zur Dokumentation der Gruppendiskussion im Rahmen des durchgeführten Workshops	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorschlag zur Einordnung von Exoskeletten hinsichtlich EG-Richtlinien und in Bezug auf Normen (i.A.a. BGHM 2017)	12
Tabelle 2: Zuordnung aufgewendeter Menschenmonate (MM) und Bearbeitungsstatus zu AP	24
Tabelle 3: Themengebiete und beispielhafte Fragen in den durchgeführten Interviews.....	29
Tabelle 4: Übersicht der modifizierten Testbatterie mit Zuordnung zu den Gruppen der Haupt- und Nebentätigkeiten sowie Grundbewegungen	34
Tabelle 5: Katalog nichtfunktionaler Anforderungen	42
Tabelle 6: Einfluss der Merkmalsausprägungen der LMM-HHT auf die Einsatzpotentialbewertung (grün: positiver Einfluss, rot: negativer Einfluss von Exoskeletten)	43
Tabelle 7: Mögliche Kosten und Nutzen beim Exoskeletteinsatz (i.A.a. Kaupe et al. 2021).....	44
Tabelle 8: Restriktive Merkmale eines Arbeitsplatzes nach Interessensgruppen mit limitierenden (hellgrau) und ausschließenden (dunkelgrau) Merkmalsausprägungen.....	44
Tabelle 9: Themenblöcke mit Themen der Detailfragen des Leitfadens und verwendeter Wörter im Rahmen des Post-Test-Interviews	52
Tabelle 10: Übersicht über beantragte Zuwendungen und getätigte Mittelabrufe über die Projektlaufzeit.....	61
Tabelle 11: Übersicht über die geleisteten vAW	62
Tabelle 12: Zusammensetzung und Kompetenzen des PA.....	67
Tabelle 13: Übersicht über im Rahmen des Projektes durchgeführten Transfermaßnahmen	68
Tabelle 14: Übersicht der nach Projektlaufzeit geplanten Transfermaßnahmen	71

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) sind unabhängig von der Altersgruppe weltweit die häufigste Ursache für körperliche Funktionseinschränkungen, chronische Schmerzen und den Verlust an Lebensqualität (Fuchs et al. 2013) und stehen in Deutschland auf Platz eins bei den Begründungen für Arbeitsunfähigkeit. MSE sind nicht nur auf gesellschaftliche Faktoren zurückzuführen, sondern auch die Berufsgruppe hat einen signifikanten Einfluss auf das Risiko für Arbeitsunfähigkeit. Insbesondere Männer in Berufen, mit manuellen Tätigkeiten in Produktion und Logistik, zeigen ein hohes Risiko für eine Arbeitsunfähigkeit auf (Liebers et al. 2013). Neben der gesundheitlichen Beeinträchtigung der Beschäftigten verursachen MSE hohe Kosten für das Gesundheitswesen sowie für Unternehmen. Allein im Jahr 2017 entstanden Kosten in Höhe von 17,2 Mrd. € durch Produktionsausfall sowie 30,5 Mrd. € durch den Ausfall an Bruttowertschöpfung (BAuA 2018).

Neben MSE-Erkrankungen stellt der demografische Wandel (vgl. Abbildung 1) und die damit korrelierende Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit der arbeitsfähigen Bevölkerungsgruppe auf langfristige Sicht eine große Herausforderung dar, weil mit diesem eine zunehmende Anzahl an körperlichen Beschwerden und Erkrankungen zu erwarten ist. Im Industriesektor ist zudem ein Mangel an Facharbeitskräften festzustellen, weshalb die aktuelle ältere Bevölkerungsgruppe gesondert zu betrachten ist. Umso mehr sind körperliche Hilfsmittel zur Bewältigung von schweren und manuellen Tätigkeiten erforderlich (Kaupe et al. 2021).

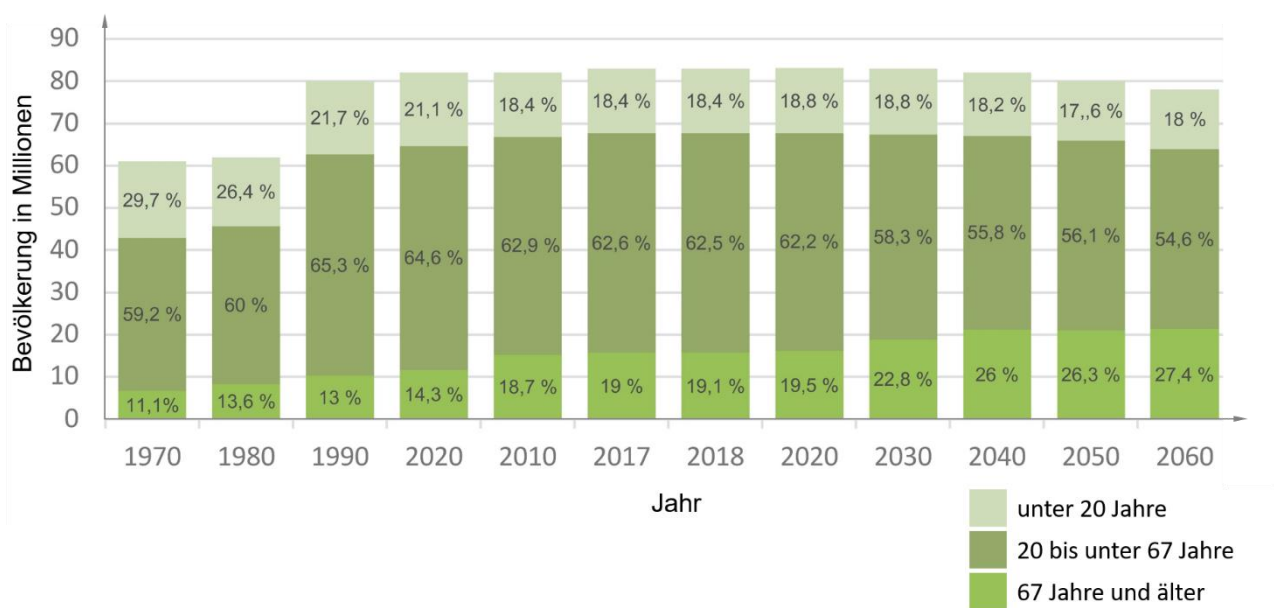


Abbildung 1: Entwicklung der Bevölkerung in Millionen und Anteilen der Altersgruppen in Prozent ab 1970, ab 2020 Prognose (i.A.a. Destatis 2019)

Vor dem Hintergrund von beruflich bedingten Erkrankungen und Beschwerden ist eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Arbeitsfähigkeit der Beschäftigten bis zum Rentenalter (Schneider et al. 2019). Nur so kann den Herausforderungen des demografischen Wandels und des Fachkräftemangels begegnet werden. Allerdings ist das Potenzial für eine traditionelle ergonomische Arbeitsplatzgestaltung oft begrenzt. (Groos et al. 2019) Ansatzpunkte für eine ergonomische Entlastung bieten neue Technologien. So können beispielsweise kollaborierende Roboter den Menschen unterstützen (Weber und Stowasser 2018). Allerdings lassen sich insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) auf Grund bestehender Variabilitäts- und Flexibilitätsanforderungen nicht alle Tätigkeiten technisch oder wirtschaftlich sinnvoll automatisieren, weshalb es weiterhin manueller Arbeit bedarf. (Groos et al. 2019) Dies gilt insbesondere für Prozesse mit geringen Stückzahlen, ortsveränderlichen manuellen Tätigkeiten und großen Bauteilen. Hier bieten Exoskelette eine Chance zur Verbesserung der Ergonomie (Schick 2018; Groos et al. 2019).

Exoskelett lassen sich als am Körper getragene Assistenzsysteme definieren, die mechanisch auf den Körper einwirken. Im beruflichen Kontext zielen Sie darauf ab, Funktionen des Skelett- und Bewegungssystems bei körperlicher Arbeit zu unterstützen. (Steinhilber et al. 2020) Es kann in Produktion, Montage, innerbetrieblicher Logistik und Lagertätigkeiten eingesetzt werden, wo präventive Maßnahmen nicht anwendbar, unwirtschaftlich oder ineffizient sind oder wo eine Automatisierung aufgrund von Variabilität nicht möglich ist. (Bosch et al. 2016)

Exoskelette bieten durch eine Reduzierung der Ausfallzeiten der Mitarbeiter und der damit einhergehenden Reduzierung von Kosten für Unternehmen durch die verbesserte Ergonomie ein großes wirtschaftliches Potenzial. (Hoffmann et al. 2020) Diese Effekte können jedoch aktuell noch nicht monetär bewertet werden, da sich die Forschung im Bereich der Exoskelette im industriellen Kontext noch am Anfang befindet und Erkenntnisse beispielsweise über reduzierte Ausfallzeiten der Mitarbeiter fehlen. Jedoch zeigen die Arbeitswissenschaften, dass Ergonomie und Wirtschaftlichkeit nicht im Widerspruch zueinanderstehen, sondern dass ergonomische Arbeitsplätze oft mit einer Produktivitätssteigerung einhergehen. (Lotter 2016) Erste Studien deuten darauf hin, dass eine ähnliche Beziehung für die Verwendung von Exoskeletten besteht. Aufgaben können über lange Zeit ohne Beschwerden ausgeführt werden (Bosch et al. 2016), und die Reduzierung des effektiven Verarbeitungsgewichts kann sich positiv auf die Ausführungszeit auswirken (Hempfen et al. 2009).

Der Ausschöpfung dieser wirtschaftlichen Potenziale durch die Reduktion von MSE und der Steigerung der Produktivität stehen jedoch noch viele Hemmnisse entgegen. So fehlen beispielsweise gesetzliche und normative Rahmenbedingungen für den Einsatz von Exoskeletten. Nach derzeitigem Stand unterliegen Exoskelette keinen Richtlinien oder spezifischen Normen, die ihre Anforderungen einheitlich regeln. Die Zuordnung zu bestehenden Richtlinien richtet sich nach

deren Verwendungszweck. Beim Einsatz von Exoskeletten als technisches Hilfsmittel ist die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG zu berücksichtigen. (Schick 2018) Weitere Spezifikationen können auf die EN ISO 13482:2014 bezogen werden, die Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter definiert. (Polunin et al. 2016) Für die Verwendung als medizinisches Hilfsmittel gilt dagegen die EU-Richtlinie 93/42/EWG, wohingegen bei einer Einstufung als persönliche Schutzausrüstung (PSA) die PSA-Verordnung 2016/425 Anwendung findet. (Schick 2018)

Entsprechend der Maßnahmenhierarchie im Arbeitsschutz, dem sogenannten TOP-Prinzip (technische, organisatorische, personelle Maßnahmen) werden Exoskelette je nach Verwendung den technischen oder personenbezogenen Maßnahmen zugeordnet. (Hahnzog 2014; Hensel und Keil 2018) Eine allgemeine Antwort auf diese Frage zu finden, ist schwierig, da die Einstufung stark vom Verwendungszweck und damit dem Einsatzgebiet des Exoskeletts in Fertigung und Logistik abhängt.

Einsatzfelder für Exoskelette wurden bisher noch nicht systematisch untersucht. Aktuell werden Exoskelette überwiegend in Pilotstudien eingesetzt. Aufgrund begrenzter Ressourcen können insbesondere KMU nur eingeschränkt neue Technologien ohne produktive Anwendungsfälle testen. Es ist daher nicht nur wichtig, Einsatzfelder zur rechtlichen Einordnung zu identifizieren, vielmehr brauchen Unternehmen, insbesondere KMU, eine Orientierung für die Einführung von Exoskeletten, um den Anschluss an diese Technologie zu halten, ihre Potenziale zu nutzen und wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Untersuchung von Nutzenpotenzialen erschließt ferner neue Anwendungsfelder für bestehende sowie Adaptionen- oder Entwicklungsbedarfe für neue Arten von Exoskeletten. Dies stärkt die Marktposition deutscher Hersteller, die sich zum Teil als innovative KMU-Start-Ups dem Themenfeld widmen.

1.2 Forschungsziel

Das Forschungsprojekt avisiert die Erschließung des bislang ungenutzten Potenzials von Exoskeletten in mittelständischen Unternehmen. Dazu sind in den Tätigkeitsbereichen der Produktion und Logistik der Unternehmen Einsatzpotenzial systematisch zu untersuchen. Hierbei sollen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens die Unternehmen unterstützen und ihnen durch einen Leitfaden für eine erfolgreiche Auswahl eines Systems sowie zur Implementierung assistieren. Das zentrale Element des Vorhabens stellt dazu die Entwicklung einer Potenzialanalyse in Form eines Quick-Checks dar, der es Unternehmen mit geringem Aufwand ermöglicht, Arbeitsplätze oder Bereiche mit einem hohen Nutzenpotenzial für Exoskelette zu identifizieren. Die Basis hierfür sowie für die Erarbeitung einer Handlungsempfehlung zur Unterstützung bei der Exoskelettauswahl und -implementierung stellt eine Kategorisierung von Einsatzfeldern und Exoskelett-Typen sowie die Analyse der Wirkbeziehungen dar.

1.3 Lösungsweg

Wie dargelegt, sind im Bereich der Exoskelett-Forschung noch viele Fragen unbeantwortet. Dies lässt sich insbesondere auf das noch recht junge Forschungsgebiet der Exoskelette im industriellen Kontext zurückführen. Die bisher durchgeführten oder laufenden Forschungsvorhaben adressieren neben der Produktentwicklung insbesondere Labor- und Pilotstudien, die erste wichtige Erkenntnisse für den Praxiseinsatz liefern. Trotz fehlender Langzeitstudien und gesetzlicher Rahmenbedingungen starten viele Großunternehmen umfassende Testphasen für Exoskelette. Insgesamt ist das Interesse an dem Thema in der Industrie sehr hoch. Dem Einsatz von Exoskeletten stehen jedoch insbesondere in KMUs begrenzte Ressourcen gegenüber, so dass sich hier noch wenige Exoskelette im Einsatz finden. Daraus abgeleitet ergibt sich die Arbeitshypothese, dass insbesondere fehlende Auswahlhilfen und Handlungsempfehlungen sowie nicht spezifizierte Einsatzfelder die Anwendung in KMUs verhindern.

Zur Erreichung der Forschungsziele werden im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende Arbeitshypothesen zu untersuchen:

- Exoskelette gliedern sich in den Kontext der Mensch-Technik-Interaktion ein und führen, in den richtigen Anwendungsfeldern eingesetzt, zu ergonomischen und wirtschaftlichen Vorteilen.
- Erst durch die Analyse, Charakterisierung und Systematisierung von Anwendungsfeldern für Exoskelette können Einsatzpotenziale in der Produktion und Logistik abgeleitet werden.
- Die detaillierte Kenntnis der Anwendungsfelder ist Voraussetzung für eine Einordnung von Exoskeletten nach dem TOP-Prinzip.
- Die aktuell existierende Kategorisierung von Exoskeletten ist für die praktische Nutzung in Unternehmen unzureichend, um ein Exoskelett auszuwählen.
- Durch die Entwicklung und Bereitstellung einer Potenzialanalyse und Handlungsempfehlung wird KMU der Einsatz von Exoskeletten im eigenen Produktivumfeld ermöglicht

Die Erarbeitung erfolgt in diskreten, konsekutiven Arbeitspaketen (AP), die neben der Ausarbeitung der Projekthinhalte insbesondere Iterationen zur Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Ergebnisse in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) vorsieht. Dieses stellt die Praxisnähe der Forschung sicher. Die Struktur des PA stellt die Repräsentation aller relevanten Branchen sicher und ermöglicht durch die Einbindung von Netzwerkpartnern die Entfaltung einer Breitenwirkung für die entwickelten Ergebnisse. Hierbei sind neben Anwendungspartnern in der Industrie insbesondere auch Hersteller von Exoskelettlösungen im PA vertreten.

Zur Bearbeitung des Projektes erfolgt innerhalb einer Gesamtprojektdauer von 22 Monaten durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter mit Einstufung TV-L E13 sowie durch einen wissenschaftlichen Assistenten für angeleitete, wiederkehrende Tätigkeiten und Routineaufgaben (Forschung, Experimente, Datenpflege etc.).

2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Wissenschaft bezüglich industrieller Exoskelette aufbereitet. Die Analyse einiger Themen, wie die Marktanalyse sind Bestandteil der AP und werden an entsprechender Stelle dargestellt. Grundsätzlich existieren im Themenfeld der Exoskelette sowohl in der deutschsprachigen als auch in der internationalen Literatur nur wenige einschlägige Grundlagenwerke.

2.1 Historische Entwicklung von Exoskeletten

Die ersten Konzepte von Exoskeletten gehen bis auf das Ende des 19. Jahrhunderts zurück und greifen die Idee auf, bewegungseingeschränkten Menschen zu helfen und gelähmten Menschen das Gehen wieder zu ermöglichen durch vom Gehirn gesteuerte Exoskelette. Bis zur erfolgreichen ersten Umsetzung dieses Konzeptes von aktiv gesteuerten Orthesen hat es jedoch über 100 Jahre gedauert. (Pons et al. 2008) Heute werden Exoskelette erfolgreich für die Rehabilitation und Unterstützung bewegungseingeschränkter Menschen eingesetzt. (IFAA 2019) Als Beispiel für die Fortschritte in der Rehabilitation lässt sich das Hybrid Assistive Limb (HAL) Exoskelett nennen. (Kadota et al. 2009) Es wurde in der Praxis erfolgreich bei der Therapie querschnittsgelähmter Patienten angewendet. (Grasmücke et al. 2017) Die Verbreitung und die Anzahl verschiedener Exoskelett-Systeme im Bereich der Rehabilitation nimmt stark zu, beispielsweise werden Anwendungen nicht nur für Querschnittsgelähmte, sondern auch für Schlaganfallpatienten entwickelt. Allein für den Bereich der Arme und Hände steht sowohl für den Einsatz in Therapiezentren (Maciejasz et al. 2014) als auch für die Weiterbehandlung im häuslichen Umfeld (Ates et al. 2017) eine Vielzahl an Systemen zur Verfügung.

Neben der Rehabilitation hat die Exoskelettforschung sich zunächst auf den militärischen Anwendungsbereich sowie für die Weltraumrobotik fokussiert und seit den 1960er Jahren versucht die Kraft des Menschen zu verstärken. (Crowell et al. 2019; Carr und Newman 2017) Ein bekanntes Vorhaben aus dieser Zeit ist das Hardiman project von 1966 bis 1971 von General Electric Co. Es wurde jedoch nur ein Arm des Ganzkörpersystems fertiggestellt, bevor das Projekt eingestellt wurde. Dieser Arm konnte zwar 350 kg heben, wog selbst jedoch eine dreiviertel Tonne. (Bogue 2009) Die Entwicklungen von Exoskeletten im Militärbereich werden jedoch bis heute insbesondere von den USA fortgesetzt und es zeigen sich vielversprechende Ergebnisse in den letzten Jahren. (Bogue 2009; Mudie et al. 2022; Pons et al. 2008)

Seit einigen Jahren wird die Aufmerksamkeit allerdings auch vermehrt auf eine Anwendung in der Industrie gerichtet. (Fox et al. 2020; Pesenti et al. 2021) Die ersten Veröffentlichungen und Studien zu industriellen Exoskeletten konnten im Jahr 2005 identifiziert werden, wobei die Anzahl der Veröffentlichungen in diesem Bereich seit dem Jahr 2015 rapide zunimmt. (Bock et al. 2022)

2.2 Industrielle Exoskelette

Exoskelette für den industriellen Einsatz bilden entsprechend ein vergleichsweise neues Forschungsfeld mit einer hohen Dynamik in Bezug auf verfügbare Systeme und Einsatzbereiche. (Weidner et al. 2020) Nachfolgend wird zunächst der Begriff industrieller Exoskelette definiert, bevor in einem Überblick deren Kategorisierung und potenziellen Einsatzgebiete vorgestellt werden.

2.2.1 Definition

Als Exoskelette werden am Körper getragene mechanische Unterstützungssysteme, die das Muskel-Skelett-System bei bestimmten Bewegungen oder Haltungen entlasten und damit positive gesundheitliche Effekte haben sollen, bezeichnet. (Glitsch et al. 2019; Hensel und Keil 2018; Hold et al. 2020) Sie folgen der menschlichen Körperform und umschließen einzelne oder mehrere Bereiche des Körpers, wobei sie durch ihre Gelenkkinematik die natürlichen Bewegungsmöglichkeiten weiterhin erlauben. Sie können dort zum Einsatz kommen, wo Risiken durch hohe Lastenhandhabungen oder ergonomisch ungeeignete Arbeitsinhalte nicht mittels Handhabungsgeräten, Gabelstaplern oder Robotern entgegengewirkt werden kann. (BGHM 2017)

Ein Entlastungseffekt kann dabei abhängig vom Tätigkeitsfall in verschiedenen Körperregionen angestrebt werden. Die Belastungsreduzierung in den Bereichen der Hände und Arme bietet sich beispielsweise bei Überkopftätigkeiten an. Im Gegensatz dazu ist die Unterstützung der Beinextremitäten bei Stehtätigkeiten und Lastenanhebungen sowie bei statischer Haltnungsarbeit die Entlastung des Rumpfes von Vorteil (Looze et al. 2016).

Am häufigsten sind derzeit Rumpf- und Schulter-Arm-unterstützende Systeme am Markt vertreten (Voilque et al. 2019). Ganzkörper-Exoskelette sowie Unterstützungen für die unteren Extremitäten sind bislang hingegen kaum kommerziell verfügbar. (Exoskeleton Report LLC 2022)

2.2.2 Kategorisierung von Exoskeletten

Es existieren verschiedene Systeme zur Kategorisierung von Exoskeletten. Grundlegend ist die Einordnung von DGUV (2019), welche zwischen passiven und aktiven Systemen, der unterstützten Körperregion, der Funktionsweise sowie der Energiezufuhr unterscheidet. Bei aktiven Systemen ist eine externe Energiequelle vorhanden, die menschliche Bewegungen unterstützt oder verstärkt. (DGUV 2019) Passive Exoskelette verfügen hingegen über keine externe Energiezufuhr, sondern verwenden zur Bewegungsunterstützung passive Speichermöglichkeiten. (Lee et al. 2012) Darüber hinaus existieren Ansätze für hybride Systeme mit einer Kombination aus beiden Ansätzen, diese sind derzeit jedoch noch Gegenstand der Entwicklung. (Otten et al. 2018) Insgesamt befindet sich der Markt für industrielle Exoskelette in großer Bewegung.

Passive Systeme können darüber hinaus weiter unterteilt werden in starre Exoskelette mit formstabilen Strukturen zur Kraftübertragung und weiche Exoskelette mit textilen Elementen, die Kräfte übertragen. Ein Beispiel für entsprechende Systeme ist in der nachstehenden Abbildung 2 gegeben.



Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung zweier passiver Exoskelette mit rigider (links) sowie weicher (rechts) Stützstruktur (Jansing et al. 2023)

Passive Systeme weisen einen gegenüber den aktiven Systemen höheren technologischen Reifegrad auf und werden von der Industrie bevorzugt. (Voilque et al. 2019) Ursächlich hierfür kann sein, dass diese in der Regel leichter, günstiger und wartungsärmer als aktive Varianten sind (Schick 2018). Aktive Exoskelette können dagegen durch integrierte Sensoren als Schnittstelle zum Menschen in digitalisierten Produktionssystemen fungieren und individuelle Bewegungsmuster des Nutzers unterstützen. (Weidner und Karafillidis 2018) Erste Entwicklungsschritte für eine Schnittstelle mit dem Ziel einer stärkeren Verzahnung zwischen Menschen und Technik, in Bezug auf die automatische situationsabhängige Unterstützung, befinden sich im Fokus aktueller Forschungsvorhaben. Mensch-Technik-Schnittstellen von aktiven Ansätzen sollen somit im Vergleich zu passiven den Grad der Entlastung weiter steigern. (Weidner und Karafillidis 2018)

Die Antriebstechnologien für Exoskelette werden in elektrische, mechanische und pneumatische Systeme unterteilt. Aktive Exoskelette nutzen als externe Energiequelle elektrische oder pneumatische Antriebe, wohingegen passive Exoskelette zumeist mechanisch über Federn oder Seilsysteme angetrieben werden. (Hold et al. 2020) Seltener werden aktive Systeme auch hydraulisch angetrieben. (Voilque et al. 2019; La Tejera et al. 2021)

Sowohl bei den aktiven wie auch den passiven Systemen wird in fünf unterstützte Körperregionen unterschieden: Beine, Rumpf, Arme, Kombination, Ganzkörper. (DGUV 2019) Eine ähnliche

Einteilung verwenden Voilque et al. (2019) und Hold et al. (2020). Ein Beispiel für Unterstützungssysteme unterschiedlicher Körperbereiche gibt die Abbildung 3.



Abbildung 3: Exoskelette der Fa. Ottobock SE & Co. KG für unterschiedliche Unterstützungsregionen: a) Paexo Back, b) Paexo Shoulder, c) Paexo Soft Back, d) Paexo Neck, e) Paexo Wrist, f) Paexo Thumb (Ottobock 2022)

Neben einer reinen Unterscheidung nach Körperregion lassen sich typische Einsatzfelder beschreiben. (Voilque et al. 2019) Diese grundlegenden Merkmale finden sich in fast allen Kategorisierungssystemen wieder. (La Tejera et al. 2021; Voilque et al. 2019; Fox et al. 2020; Hold et al. 2020) In neueren Ansätzen spielt zunehmend auch die Struktur von Exoskeletten eine wichtige Rolle. (La Tejera et al. 2021)

Zudem ist eine Differenzierung von Exoskelette nach ihren Aufgaben möglich. Eine Unterscheidung sieht eine Trennung zwischen bewegungsunterstützenden und kraftverstärkenden Tätigkeiten vor. (Lee et al. 2012) Dazu werden teilweise auch die Funktionen von Exoskeletten als Schutzausrüstung sowie eine mögliche Schnittstellenfunktion zwischen menschlichem Operator und datenbasierten Informationssystemen unterschieden. (Yang et al. 2008)

Dieser Aspekt führt dazu, dass die Frage nach den Sicherheitsbestimmungen für die Nutzung von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen unbeantwortet ist. Die Einordnung in gesetzliche und normative Rahmenbedingungen, auf die an späterer Stelle ausführlich eingegangen werden soll, hat einen großen Einfluss auf die mögliche Nutzung von Exoskeletten. So erhalten technische Maßnahmen bei der Gestaltung von Arbeitsplätzen im Arbeitsschutz, gemäß des TOP-Prinzips, die höchste Priorität. Personelle Maßnahmen, unter denen Exoskelette häufig eingeordnet werden, sind dagegen erst als letzte Maßnahme zu wählen. (Hensel und Keil 2018)

2.2.3 Einsatzgebiete von Exoskeletten

Der Einsatz von Exoskeletten ist nicht auf die industrielle Fertigung von Gütern begrenzt. Einsatzgebiete industrieller Exoskelette in der Praxis bestehen dort, wo schwere körperliche Arbeit

oder Tätigkeiten in Zwangshaltungen nicht durch technische Hilfsmittel wie Kräne oder Vakuumheber adressiert werden können. Dies ist insbesondere bei ortsveränderlichen Arbeitsplätzen der Fall. (BGHM 2017) Dabei sollten, gemäß des TOP-Prinzips, veranschaulicht in Abbildung 4, zunächst stets technische sowie organisatorische Maßnahme ausgeschöpft werden, ehe Exoskelette als mögliche personenbezogene Maßnahmen eingesetzt werden können (Steinhilber et al. 2020). Bestehende Studien zum möglichen Einsatz von Exoskeletten in der Industrie fokussieren derzeit Anwendungen in der Automobilproduktion sowie in der Logistik (Kaupe et al. 2021; Spada et al. 2018; Sylla et al. 2014) Betrachtet wird in diesem Umfeld insbesondere der Nutzen bei Hebevorgängen, vornübergebeugten Zwangshaltungen sowie Überkopfarbeit. (Flor et al. 2021; Hensel und Keil 2019; Hensel et al. 2020)

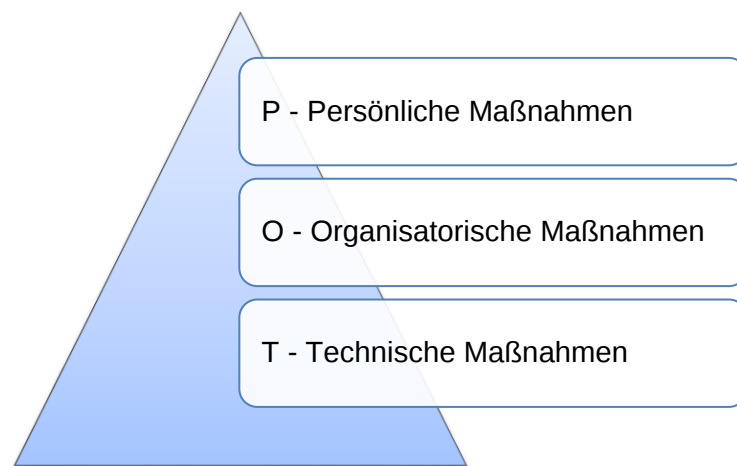


Abbildung 4: Visualisierung des der TOP-Maßnahmenhierarchie

Die Identifikation und Systematisierung von typischen Anwendungsfeldern stellen einen wesentlichen Aspekt des vorgestellten Forschungsvorhabens dar. So wird im Rahmen der Forschungsarbeit eine Analyse der Produktionsbereiche von Unternehmen durchgeführt, um typische Exoskelett-Anwendungsfälle zu identifizieren. Der Kernfokus liegt hierbei auf der besonderen Anwendbarkeit in Produktion und Logistik, wobei das Forschungsvorhaben eine möglichst große Diversität von analysierten Fertigungs- und Logistikbranchen berücksichtigt.

2.2.4 Rechtliche und normative Rahmenbedingungen

Die Sicherheitsbestimmungen für die Nutzung von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen sind nach aktuellem Stand unbeantwortet. So existieren neben den allgemeinen Vorgaben des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) keine expliziten rechtlichen Vorgaben für den Einsatz von Exoskeletten im industriellen Sektor (Schick 2018). Nach diesem ist der Arbeitgeber im Allgemeinen dazu aufgefordert, die Gesundheit des Arbeitnehmers zu schützen und für seine Sicherheit zu sorgen. Außerdem sind Gefahrenstellen zu beseitigen und es ist mit Mitteln der Arbeitswissenschaft

für eine ergonomische Auslegung der Arbeitsbedingungen zu sorgen (vgl. §4 Absatz 1 Satz 1 ArbSchG).

Neben der Betrachtung der Beanspruchung des menschlichen Körpers ist nach dem ArbSchG eine Beurteilung des Gefährdungspotenzials am Arbeitsplatz durchzuführen. Hierbei sind auf Grund einer noch fehlenden Gesetzeslage über den Einsatz von Exoskeletten aus den vorhandenen Richtlinien und Normen mögliche Sicherheitsanforderungen abzuleiten. Eine Eingliederung in eine bestimmte Richtlinie erfordert, aufgrund der Vielzahl an Einsatzbereichen, allerdings eine Abgrenzung innerhalb der Exoskelett-Typen. (Schick 2018) Laut der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) sind für die Verwendung von industriellen Exoskelett-Systemen die Wirksamkeit, Präventionspotentiale sowie Vermeidung von Risiken entscheidende Punkte, welche einen Einsatz rechtfertigen. Eine von der DGUV herausgegebene Checkliste klärt dabei über die grundsätzlichen Möglichkeiten der Integration von industriellen Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen auf. (DGUV 2020)

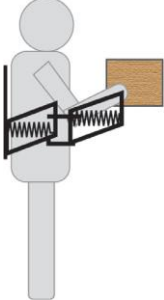
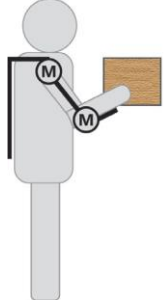
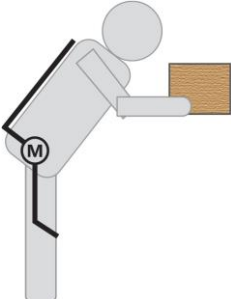
Die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG beispielsweise beschreibt die Rahmenbedingungen für den Umgang mit Maschinen und maschinenähnlichen Konstruktionen. Damit besitzt diese Richtlinie insbesondere im Fall der aktiven Exoskelette eine besondere Bedeutung, da diese im Regelfall über selbst regulierende Antriebssysteme verfügen. Aber auch passive Exoskelette fallen als unterstützende Assistenzsysteme unter die Vorgaben der Richtlinie. (Hensel und Keil 2018) Die Erfüllung der Vorgaben der Maschinenrichtlinie stellt die Basis für eine Zulassung auf dem europäischen Markt dar. Weitere im Rahmen der Inverkehrbringung von Exoskeletten zu berücksichtigende Richtlinien sind bspw. Die EMV-Richtlinie 2014/30/EU mit Vorgaben für die Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit sowie die RED-Richtlinie 2014/53/EU, falls in den entwickelten Exoskeletten Funkverbindungssysteme integriert sind. (Hold et al. 2020)

Eine weitere wesentliche Rahmenrichtlinie ist mit der DIN EN ISO 13482 für persönliche Assistenzroboter gegeben. Diese Norm legt fest, dass für den Einsatz von aktiven Exoskeletten u. a. sicherheitsrelevante Aspekte in Bezug auf die Konstruktion und den Präventionsschutz eingehalten werden. Im Hinblick auf die Einhaltung der Sicherheitsaspekte bei der Konstruktion eines Exoskeletts stellt die europäische Verordnung für PSA 2016/425/EG eine Möglichkeit zur Orientierung dar. Die PSA-Verordnung dient der Erfüllung der arbeitsrechtlichen Vorgaben zur Gestaltung eines ergonomischen Arbeitsplatzes, ist allerdings je nach Zweckerfüllung von Exoskelett-Aufgaben entsprechend auszuführen. (Hold et al. 2020; Hensel und Keil 2018)

Es zeigt sich, dass je nach Konstruktion oder Auslegung eines Arbeitsschrittes entsprechende Richtlinien und Normen anzuwenden sind, da es bisher an einer einheitlichen und universellen Normung für den industriellen Einsatz von Exoskeletten fehlt. Für den gewerblichen Einsatz von Exoskeletten ist so bspw. die DIN EN ISO 10218-1 zu nutzen, in der der sicherheitsgerechte Einsatz

von Industrierobotern in Mensch-Roboter-Kollaborationssystemen geregelt wird. (BGHM 2017) Eine Übersicht für eine mögliche Richtlinienzuordnung gibt die nachstehende Tabelle 1.

Tabelle 1: Vorschlag zur Einordnung von Exoskeletten hinsichtlich EG-Richtlinien und in Bezug auf Normen (i.A.a. BGHM 2017)

Bestimmungsgemäße Verwendung	Beispiel	EG-Richtlinien	Bemerkung/Norm
Passiv		2006/42/EG (Maschinen)	RL 2006/42/EG Art. 2 Nr. a) 5. Spiegelstrich
Aktiv zur Bewegungserleichterung		2006/42/EG (Maschinen)	Verbesserung der Lebensqualität: EN ISO 13482 Gewerblicher Einsatz: EN ISO 10218-1
Aktiv zur Vermeidung von Gesundheitsgefahren		2006/42/EG (Maschinen) 89/686/EWG (PSA)	Verbesserung der Lebensqualität: EN ISO 13482 Gewerblicher Einsatz: EN ISO 10218-1

Im Grundsatz jedoch gilt, dass zur Gewährleistung des Arbeitsschutzes Maßnahmen zu treffen sind, welche präventiv das Risiko einer Gefährdung minimieren. Hierzu ist das TOP-Prinzip, abgeleitet nach §4 ArbSchG, eine geeignete Methode die Sicherheit am Arbeitsplatz zu erhöhen. Die Rangfolge der Maßnahmen entspricht technischen, organisatorischen und abschließend personenbezogenen Schutzmaßnahmen. Im ersten Schritt sind technische Maßnahmen zu finden, welche die Gefahrenquelle eliminiert oder durch eine technologische Verbesserung austauscht. Falls dies nicht ausreicht, sind im zweiten Schritt organisatorische Maßnahmen im Sinne des Arbeitsschutzes zu treffen. Als letzte Option sind personenbezogene Maßnahmen zu vollziehen, in welcher die Schutzmaßnahme den Menschen selbst betrifft und in welche der Einsatz von Exoskeletten einzuordnen ist. (Fellner 2021)

2.3 Forschungsvorhaben für den industriellen Einsatz von Exoskeletten

Im Rahmen der Erforschung körpernaher Assistenzsysteme gilt das bis 2016 von der Europäischen Kommission geförderte Forschungsvorhaben ROBO-MATE für Exoskelette als richtungsweisend. Im Fokus der Untersuchungen stand die Entwicklung eines nutzerfreundlichen, intelligenten, tragbaren Mensch-Roboter-Systems für manuelle Handhabungstätigkeiten. Neben einem prototypisch umgesetzten, aktiven und passiven Exoskelett-Arm-Modul wurden im Rahmen des Projektes ein aktives Rumpf- sowie Handschuh-Modul entwickelt. (Robo-Mate 2016a) Das entwickelte passive Unterstützungssystem für die Arme ist in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt. Bei einer Eigenmasse von 3,7 kg pro Arm führt es pro Körperseite zu einer maximalen Lastkompensation von 7,5 kg. (Robo-Mate 2016b) Zwar haben die Ergebnisse einen frühen Beitrag zur technologischen Ausgestaltung von Exoskelett-Systemen geleistet, jedoch konnte aufgrund der prototypischen Projektnatur keine flächendeckende Umsetzung in der industriellen Praxis erreicht werden. Der Fokus des Vorhabens lag primär in der Produktentwicklung für den industriellen Kontext (Kozłowski et al. 2014).



Abbildung 5: Prototyp des Exoskelett-Arm-Moduls Robo-Mate (Robo-Mate 2016b)

Ein weiteres Forschungsvorhaben mit industriellem Bezug stellt Exo@Work dar. Der Schwerpunkt des Projektes liegt in der Bewertung exoskelettaler Systeme in der Arbeitswelt mit einem Betrachtungsfokus auf die biomechanische Analyse des Wirkeffekts von rumpf- bzw. hüftunterstützenden Exoskeletten, der ergonomischen Evaluation in der betrieblichen Praxis und einer Beurteilung der Gesundheitsgefährdungen (DGUV 2019). Ähnliche Bestrebungen zur biomechanischen Analyse und Simulation stellen Tröster et al. (2018) unter Nutzung des Simulationsmodells AnyBody dar. Im Rahmen des Vorhabens Exo@Work wurde die Erprobungsversion einer Checkliste für den betrieblichen Einsatz von Exoskeletten als personenbezogene Maßnahme veröffentlicht. Durch in fünf Themenfelder unterteilte Entscheidungsfragen soll eine Gefährdungsbeurteilung unterstützt werden. (BGHM 2019) Da in

diesem Vorhaben insbesondere die Rolle von Exoskeletten als personenbezogene Maßnahme betrachtet wird, ist die entwickelte Checkliste als Auswahlhilfe zur Identifikation potenzieller Einsatzbereiche und als zielgerichtete Auswahl- bzw. Beschaffungssystematik von Exoskeletten nur unzureichend geeignet. Des Weiteren ist die Identifikation von Anwendungsfällen sehr allgemein gehalten, wodurch sich keine allgemeine Offenlegung von Nutzungspotenzialen ableiten lässt. Andere Systematiken fokussieren die technische Evaluation von Exoskeletten, wie beispielsweise Hoffmann et al. (2020) und Nabeshima et al. (2018).

Weitere Forschungsprojekte fokussieren die konstruktive Gestaltung von Exoskeletten, wie bspw. die Entwicklung der Technologie-Plattform Stuttgart Exo-Jacket als modulares Exoskelett-System für die oberen Extremitäten (Ebrahimi 2017). Weitere Ansätze verfolgen die Unterstützung einzelner Körperteile, wie bspw. das KIT-EXO-1 als aktives System für die unteren menschlichen Gliedmaßen. Der Anwendungsbereich fokussiert bei diesem Projekt jedoch besonders die Rehabilitation im industriellen Kontext (Beil et al. 2015).

Die im Rahmen der bisherig durchgeführten Forschungsprojekte veröffentlichten Ergebnisse lassen nur in geringem Maße Hinweise auf die praktische Anwendbarkeit der unterschiedlichen Ausprägungen von Exoskeletten im industriellen Einsatz zu, insbesondere nicht für KMU. Der Einsatz von Exoskeletten unter den Rahmenbedingungen von KMU war bisher nicht Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtung. Dabei spielen die Einsatzfelder für die Festlegung von Richtlinien und Normen für Exoskelette eine wichtige Rolle, da davon abhängig eine Einordnung in technische oder personelle Maßnahmen erfolgt. Auch für Untersuchungen zu den langfristigen Wirkungen ist es entscheidend, die Anwendungsfälle mit dem höchsten Potenzial auszuwählen und priorisiert zu untersuchen. Aus diesem Grund fokussiert das Forschungsvorhaben SyNExo die Identifikation ungenutzter Potenziale von Exoskeletten in Produktion und Logistik. Durch die zu erarbeitende Potenzialanalyse werden Anwender und Hersteller unterstützt, Exoskelette zielgerichtet zu entwickeln und einzusetzen. Die industrielle Nutzung von Exoskeletten steht dabei noch am Anfang, was sich auch an den vielfältigen offenen Fragestellungen und Forschungsansätzen widerspiegelt (Hensel und Steinhilber 2018).

2.4 Studien zu Exoskeletten

Im Bereich der industriellen Anwendung existieren bisher nur eingeschränkte Studien und Anwendungserfahrungen zumeist bei großen Automobilherstellern. So wurden beispielsweise bei der AUDI AG Exoskelette in drei unterschiedlichen Anwendungsgebieten in Feldstudien getestet: zur Unterstützung des unteren Rückens, zur Entlastung der Beine bei Stehtätigkeiten sowie der Unterstützung bei Überkopfarbeit. Bei den Ergebnissen stehen positive Effekte der Belastungsreduktion, die für die untersuchten Exoskelette zusätzlich in Laboruntersuchungen festgestellt werden konnten (Looze et al. 2016; Hensel und Keil 2018), Einschränkungen im

Tragekomfort und in der Bewegungsausführung gegenüber. Das Potenzial der Exoskelette hängt dabei maßgeblich von der konkreten Belastungssituation und der Auswahl eines geeigneten Systems ab (Hensel und Keil 2018).

Ähnliche Studien wurden bei Fiat Chrysler Automobiles (Spada et al. 2018) und Peugeot durchgeführt (Sylla et al. 2014). Es wurden ebenfalls ausgewählte Exoskelette in spezifischen Anwendungsfällen untersucht. Die ermittelten Effekte waren überwiegend positiv, so zeigte sich eine erhöhte Ausdauer bei der Überkopfarbeit, jedoch war das Exoskelett bei einem sehr engen Bauraum eher hinderlich. Solche Aspekte können die Akzeptanz der Mitarbeiter negativ beeinflussen und bedürfen noch weiterer Forschung (Spada et al. 2018).

Abseits der Betrachtung des industriellen Einsatzes stehen die Entwicklung von Exoskeletten, sowie systematische Übersichtsarbeiten zum Forschungsstand in den meisten Publikationen im Fokus (Zhu et al. 2021). Zumeist steht die physiologische Wirkung von Exoskeletten bei der Forschung im Vordergrund, aber auch Funktionale Parameter wie die Performance oder die User Experience rücken vermehrt in den betrachteten Schwerpunkt (Looze et al. 2016).

2.4.1 Physiologische Wirkung von Exoskeletten

Die ergonomische Unterstützung durch den Einsatz von Exoskeletten zielt auf spezifische Körperregionen bei definierten Arbeitsaufgaben und Tätigkeiten ab. Hierzu sind die Exoskelette entsprechend des ergonomischen Effekts auszuwählen. Nachfolgend werden aktuelle Studien zur Untersuchung des Effekts von Exoskeletten dargelegt. Dabei werden nacheinander die Zielregionen Rumpf, obere Extremitäten und untere Extremitäten untersucht. Hierin ordnen sich entsprechend auch Untersuchungen zu Hebevorgängen und vornübergebeugten Zwangshaltungen ein. (Flor et al. 2021; Hensel und Keil 2019; Hensel et al. 2020)

Studien wie von Bosch und Weidner berichten, dass die Exoskelette die Muskelaktivität beim Heben und Senken von Objekten, beim statischen Halten von Lasten auch in gebeugter Körperhaltung und bei Überkopfarbeit reduzieren. Außerdem stellen sie eine Reduktion der internen Kräfte in der Wirbelsäule dar (Bosch et al. 2016; Weidner 2016; Baltrusch et al. 2018). In einer Studie von Bär et al. (2021), in dem sechs passive und zwei aktive Exoskelette untersucht worden sind, zeigte sich für ein rückenunterstützenden Exoskeletts eine statistisch signifikant reduzierte Muskelaktivität am Rumpf. Jedoch stellten Looze et al. (2016) in einer Übersichtsarbeit fest, dass neben der Verringerung der Rückenbelastung auch eine Zunahme der Beinmuskelaktivität bei Verwendung von Exoskeletten entsteht. Exoskelette ohne rigide Struktur, wie sie beispielsweise durch Asbeck et al. (2014) oder Bartenbach et al. (2015) vorgestellt werden, weisen eine tendenziell geringere Eigenmasse auf. Bei der Studie von Schwartz et al. (2021) wurde festgestellt, dass auch diese zu einer Verringerung der Muskelaktivität bei vornübergebeugter Tätigkeit führen.

Studien zu Langzeitfolgen durch den Einsatz von Exoskeletten sind auf Grund des erst verhältnismäßig jungen Einsatzes der Assistenzsysteme im industriellen Umfeld nicht verfügbar. So liegen bis dato lediglich spezifische Studien zu einzelnen Exoskelett-Produkten vor. (Dahmen und Hefferle 2018) Die Wirksamkeit der Verwendung eines Exoskeletts ist jedoch nicht personenunabhängig, abhängig vom Gerät selbst ist subjektiv wahrgenommene Auswirkung des Benutzers wichtig. (Toxiri et al. 2019) Daneben ist die Studienlage für aktive gegenüber passiven Systemen deutlich eingeschränkter. Aktive Exoskelette besitzen die Fähigkeit, gleichzeitig mehrere Gelenke zu entlasten, während passive Systeme häufig auf ein Körpergebiet beschränkt sind. (Bosch et al. 2016; Baltrusch et al. 2018; Weidner 2016)

In den nachfolgenden Abschnitten wird daher und auf Grund des verstärkten Einsatzes von passiven Systemen in der Industrie nicht näher auf aktive Systeme eingegangen. Allgemein ist jedoch festzustellen, dass durch die Verwendung aktiver Exoskelette eine muskuläre Entlastung, bspw. im Bereich der Rückenmuskulatur, nachzuweisen ist. (Weidner 2016; Baltrusch et al. 2018; Weidner et al. 2015) Jedoch ist durch entsprechende Systeme auch eine wesentliche Beeinflussung der Bewegungsmuster, bspw. beim Gehen, erkennbar. Dieses wird auf die noch ungenaue Steuerung der Aktuatoren aktiver Exoskelette bei gleichzeitiger Ungenauigkeit der Vorhersage individueller Bewegungsmuster zurückgeführt. (Zanotto et al. 2013)

Rücken- und Rumpfmuskulatur

Die Entlastung der Rücken- und Rumpfmuskulatur stellt den Schwerpunkt beim Einsatz von Exoskeletten bei logistischen Tätigkeiten dar, was sich in einer breiten Studienlage widerspiegelt. (Koopman et al. 2019; Looze et al. 2016; Glitsch et al. 2019; Bär et al. 2021) Unter rückenunterstützenden Exoskeletten werden Exoskelette verstanden, die Kraft- und Drehmomente in der Sagittalebene zwischen dem Rumpf und den Oberschenkeln des Benutzers aufbringen, um die Streckung des Rückens zu unterstützen. (Toxiri et al. 2019) Die nachfolgende Abbildung 6 verdeutlicht diese Wirkung am Beispiel eines rigiden Exoskeletts an einem muskuloskelettalen Modell.

In einer Studie der Universität Tübingen wurde der Einsatz des passiven und rückenunterstützenden Exoskeletts vom Unternehmen Laevo untersucht. Hierzu führten die männlichen Probanden zwei verschiedene Versuchsreihen durch. In der ersten Versuchsreihe wurden typische Industrietätigkeiten wie Hebevorgänge oder Befestigungstätigkeiten absolviert. In einer zweiten Versuchsreihe wurden Arbeitsaufgaben erfüllt, für die der Einsatz des Exoskeletts nicht angedacht ist. Es zeigte sich bei der elektromyografischen Auswertung der Studie eine Reduktion der Muskelaktivität bei Nutzung des Exoskeletts. Außerdem wurde durch das Exoskelett die Kraftaufbringung des menschlichen Körpers für die Hüftstreckung zur Aufrechterhaltung des Oberkörpers reduziert. Einen geringeren Einfluss konnte auf die Rumpfmuskulatur bei den Hebe- und Befestigungsvorgängen festgestellt werden. Ein Effekt auf die Herzfrequenz bei der

Durchführung der Tätigkeiten als Anzeichen der Anstrengung konnte nicht nachgewiesen werden. (Luger et al. 2023)

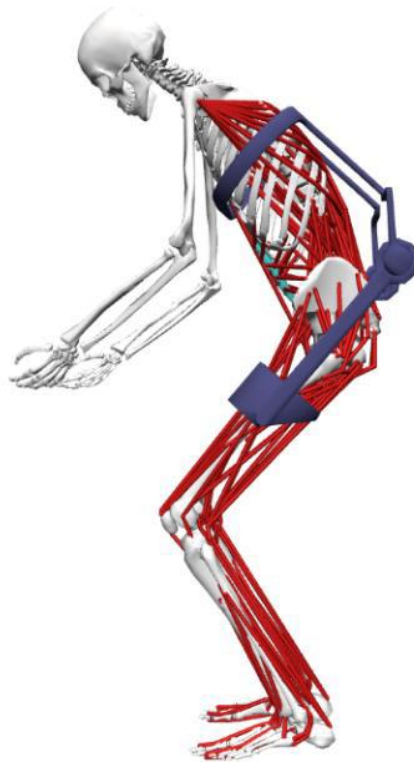


Abbildung 6: Muskuloskelettales Modell von Raabe und Chaudhari (2016) mit Exoskelett zur Rumpfunterstützung in der Sagitalebene

Eine weitere Studie mit dem rückenunterstützenden Exoskelett SPEXOR bestätigt die Wirksamkeit zur Entlastung der Rückenmuskulatur. In der Untersuchung wurde zwischen einem Beugevorgang und Hebevorgang differenziert. Beide Versuchsreihen wurden mehrmals mit und ohne Exoskelett durchgeführt. Beim Beugeversuch wurde eine Reduzierung der Kraftbelastung an der Wirbelsäule um bis zu 21 % festgestellt und beim Hebevorgang eine Reduktion von bis zu 14 % im Vergleich zur Ausführung ohne Exoskelett. (Koopman et al. 2019)

Eine Entlastung der Rumpfmuskulatur wurde außerdem in einer weiteren Studie von Bosch et al. (2016) nachgewiesen. Dabei nahmen die Teilnehmer eine nach vorne gebeugte Position für eine längere Zeit ein. Auch hier zeigte die elektromyographische Auswertung der muskulären Aktivität eine deutliche Reduktion von bis zu 38 % in der gebeugten Rumpfposition. Insbesondere im Lendenbereich konnte eine erhebliche Entlastung identifiziert werden, womit eine deutliche Reduzierung der Kraftbeanspruchung auf die Wirbelsäule erreicht werden konnte. (Bosch et al. 2016)

In einer Studie von Glitsch et al. (2019) wurde die Auswirkung des Tragens von rumpfunterstützenden Exoskeletten bei Hebeaufgaben aus verschiedenen Höhen untersucht. In der biomechanischen Auswertung wurde eine Abnahme des Gelenkmomentes um bis zu 20 %

festgestellt. Über elektromyographische Daten wurde insbesondere eine Entlastung der Streckaktivitäten im Rückenbereich von bis zu 27 % ermittelt. (Glitsch et al. 2019)

Die muskulären Entlastungen im Rücken- und Rumpfbereich beim Tragen eines rückenunterstützenden Exoskeletts wurden in einer Mehrzahl von Studien bestätigt. Neben der vorgestellten Auswahl existieren im Bereich der rumpfunterstützenden Exoskelette mit u.a. von Baltrusch et al. (2020), Dewi und Komatsuzaki (2018), Giustetto Ambra et al. (2021), Kinne et al. (2020), Kozinc et al. (2021), Lotz et al. (2009) sowie Madinei et al. (2020) weitere Studien, auf deren ausführliche Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird. In vielen Studien konnte dabei neben dem Unterstützungseffekt eine erhöhte Belastung des Brustkorbes festgestellt werden, welche aus der Kraftumverteilung am verwendeten Exoskelett zu erklären ist. (Bär et al. 2021)

Hebeaufgaben

Hebetätigkeiten stellen einen wesentlichen Kernbestandteil der Arbeit in den Bereichen der Produktion und Logistik dar. Neben der Beanspruchung der Rückenmuskulatur ist hierbei auch die Belastung der Armmuskulatur nicht zu vernachlässigen. Dieses verdeutlicht die Abbildung des Skelettmodells für exemplarische Körperhaltungen beim Heben von Lasten (vgl. Abbildung 7), bei der durch die offene Kinematik des Körpers hohe Drehmomentbelastungen in den Gelenken und insbesondere zwischen den Lendenwirbeln auftreten.

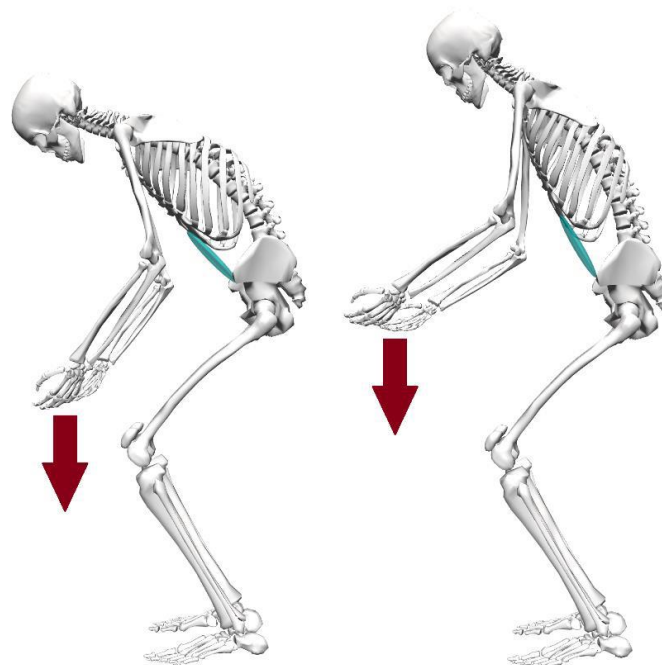


Abbildung 7: Skelettmodell beim Heben und Halten von Lasten mit Krafteinleitung an den Händen

In diesem Sinne wurde ein Exoskelett für Hebetätigkeiten entwickelt, welches in einer Studie von Qu et al. (2021) untersucht wurde. Das Exoskelett mit Unterstützungspunkten an Rücken, Schulter,

Taille und Beinen soll eine gleichmäßige Entlastung der durch die Tätigkeit beanspruchten Körperzonen ermöglichen.

Die Untersuchung erfolgte sowohl auf Basis oberflächenelektromyografischer Daten als auch durch subjektive Einschätzungen der Probanden. Es konnte festgestellt werden, dass über 2/3 der Befragten eine positive Rückmeldung zugunsten des Einsatzes des Exoskeletts abgaben. Die statistische Auswertung der objektiven Parameter zeigte eine signifikante Reduktion der Muskelaktivität von bis zu 38 % in unterschiedlichen Muskelgruppen (Lendenstrecker, vordere Deltamuskulatur, Bizeps-Labrum-Komplex) und damit eine wesentliche Reduktion der Beanspruchung identifiziert werden. (Qu et al. 2021)

Obere Extremitäten

Neben der Gefährdung des Rückens stellen Überkopftätigkeiten eine komplexe Gefährdungssituation für die Arm- und Schultermuskulatur dar. Auf langer Sicht besteht hierdurch die Gefahr zur Bildung degenerativer Erkrankungen der Schultergelenke und Halswirbelsäule. (Kinali et al. 2016) In dieser Arbeitssituation eignet sich das Exoskelett als personenzentrierte Maßnahme zur Entlastung des Mitarbeiters, indem es den Arm im Oberarmbereich bspw. mit Schalen abstützt und so ein quasistatisches Gleichgewicht herstellt. Es leitet das Gewicht der Arme über eine Stützstruktur in die Hüfte ein. (Hensel und Keil 2018)

Eine Studie der University of California zeigt, welches Potenzial Exoskelette im Hinblick auf eine ergonomische Verbesserung besitzen. Das entwickelte Exoskelett (ShoulderX) dient zur Unterstützung der Schulter und besitzt die Möglichkeit zur winkelinduzierten Manipulation des unterstützenden Drehmoments. Es ist mit seiner Antriebs-Sensorik eher den aktiven Exoskeletten zuzuordnen. In der Studie führten Probanden Überkopfarbeiten mit verschiedenen schweren Werkzeugen mit unterschiedlichen Drehmomentkonfigurationen durch. In einer Umfrage befürworteten alle Studienteilnehmenden die Arbeit mit dem Exoskelett. Die Auswertung der physiologischen Parameter bestätigt den positiven Effekt des Exoskeletts auf die Muskelaktivität der Trapez- und Deltamuskulatur. In der durchschnittlichen Gesamtbetrachtung wird eine Entlastung von bis zu 80 % erzielt. Es wird zudem festgestellt, dass die Konfiguration des Unterstützungsmoments einen wesentlichen Effekt auf die Wirksamkeit des Assistenzsystems besitzt. (van Engelhoven et al. 2018)

Die Entlastungswirkung konnte in einer weiteren Studie mit dem passiven Exoskelett Paexo Shoulder bestätigt werden. Probanden mit unterschiedlichen Geschlechtern und Körpergrößen führten dabei Verschraubungen mit einem Akkuschauber im Überkopfbereich durch. Die statistische Auswertung erfolgte mit der Berechnung der Muskelermüdung über elektromyografische Kennwerte. Im Vergleich der Versuchsdurchführungen mit und ohne Exoskelett konnte eine wesentlich reduzierte muskuläre Ermüdung festgestellt werden. (Schmalz et al. 2019)

Die Ergebnisse einer weiteren Studie mit dem Paexo Shoulder bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse zum Abfall der Muskelaktivität bei Ausführung von Überkopf-Tätigkeiten. So konnte neben der Reduzierung der Muskelaktivität auch eine wesentliche Verringerung des Kraftbedarfs festgestellt werden. (Fritzsche et al. 2021)

Weitere Studien stellen eine deutliche Verbesserung des physischen Zustandes durch den Einsatz schulterunterstützender Exoskelette fest. Mit Verwendung des Exoskeletts sinkt der Sauerstoffverbrauch als Referenz für den Arbeitsenergieumsatz um 33 %. Ebenfalls lässt sich eine Reduktion der Herzfrequenz als Parameter für die körperliche Anstrengung um 19 % feststellen. (Maurice et al. 2020)

Eine Studie zu Überkopfarbeiten mit dem semi-passiven Exoskelett H-Pulse stellt ebenso eine Abnahme der Herzfrequenz und eine Reduktion der Muskelaktivität in der durch die Tätigkeit belasteten Körperregion fest. Das Exoskelett zeichnet sich durch die Antriebsmotorik mit Sensoren aus, welche je nach Haltungsposition eine entsprechende Unterstützungsklasse durch das semi-passive Exoskelett vorgegeben. (Grazi et al. 2020)

Eine Studie der Vrije Universiteit in den Niederlanden untersuchte die Schultermuskulatur und das Schultermoment im Falle von Arbeitsaufgaben mit erhöhten Armpositionen. Mit der Nutzung eines Exoskeletts konnte dabei eine deutliche Minimierung des Schultermomentes erreicht werden. Die vom Exoskelett ausgehende Stützkraft war durchschnittlich in der Lage, das von der Schulter ausgehende Moment um 56 % abzusenken. (Vries et al. 2021)

Zur Gewinnung von Erkenntnissen über die Langzeitwirkung des Einsatzes von entsprechenden Assistenzsystemen führte die Ford Motor Company eine Feldstudie in der Automobilindustrie durch. In einem Betrachtungszeitraum von 18 Monate in 2018 und 2019 wurden die subjektive Einschätzung der Studienteilnehmer erfragt. Dabei konnten keine wesentlichen Unterschiede durch das Tragen von Exoskeletten festgestellt werden. (Kim et al. 2021)

Untere Extremitäten

Exoskelette zur Unterstützung der unteren Extremitäten sind für den industriellen Einsatzbereich wenig erforscht. Ein Potenzial besteht jedoch in der ergonomischen Verbesserung der häufig eingesetzten Stehtätigkeiten in der industriellen Montage. Das zur Beinunterstützung entwickelte Exoskelett Chairless Chair, dargestellt in Abbildung 8, wurde in einer Studie von Steinhilber et al. (2020) hinsichtlich seines Effektes bei der Durchführung von typischen industriellen Arbeiten untersucht. Über die statistische Auswertung von Schwerpunkt- und Drehmomentberechnungen konnte kein wesentlicher Effekt durch die Stützstruktur festgestellt werden. (Steinhilber et al. 2020)

In einer weiteren Untersuchung des Exoskeletts zur Wirksamkeit konnte eine körperliche Entlastung im Bereich der Rücken- und Beinmuskulatur auf Basis subjektiver Einschätzungen der Probanden

festgestellt werden. (Hensel und Keil 2018) Weitere Studien mit ähnlichem Studiendesign konnten jedoch keinen bedeutenden entlastenden Effekt nachweisen. (Bär et al. 2021)



Abbildung 8: Chairless Chair 2.0 zur Unterstützung der unteren Extremitäten (Noonee 2019)

2.4.2 Auswirkungen auf die Mitarbeiterproduktivität

Für den Begriff Produktivität existiert keine allgemeingültige Definition, da diese vom Kontext abhängig ist. (Tangen 2004) Im Allgemeinen wird unter der Produktivität eine wirtschaftliche Kennzahl verstanden, die sich bspw. als mengenorientierte Produktivität aus dem Verhältnis von Output zu Mengenaufwand ergibt. (Frenz 1963) Die Mitarbeiterproduktivität ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der tatsächlichen und der geplanten Leistung der Mitarbeiter und wird als Zeitgrad bezeichnet. Ein Zeitgrad von 100 % entspricht dem Erreichen der zugrundeliegenden Bezugsleistung. (REFA 1997)

Die Mitarbeiterproduktivität ist eine wichtige Kennzahl in der industriellen Produktion und Logistik. Der Einfluss des Einsatzes von Exoskeletten als neue Technologie auf die Mitarbeiterproduktivität ist daher nicht unwesentlich. Auch im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojektes SyNExo wurde eine Studie zur Beeinflussung von Exoskeletten auf die Mitarbeiterproduktivität durchgeführt. Auf die Kernpunkte dieser Studie wird zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen.

Bei der zeitlichen Produktionsplanung werden mögliche Einflussgrößen wie das Tragen von Exoskeletten auf die Ausführungszeit berücksichtigt. Der Einsatz kann dabei sowohl zu Zeitverlusten, bspw. durch eingeschränkte Bewegungen und Kraftaufwände bei passiven Systemen, als auch zu Zeitgewinnen, bspw. durch eine erhöhte Flexibilität oder schnellere Bewegungen, führen. (Dahmen und Constantinescu 2020; Hensel et al. 2020) Hensel et al. (2020) untersuchen in

ihrer Arbeit die Auswirkungen des Einsatzes von Exoskeletten bei manuellen Arbeitsabläufen auf die Ermittlung von Sollzeiten mit dem Grundverfahren des Methods-Time Measurement (MTM). Dabei fassen sie die mutmaßlichen Effekte durch passive Exoskelette auf den Nutzer zusammen und leiten daraus bewegungsinduzierte Effekte ab. Darüber hinaus ordnen sie den Effekten ursächlich betroffenen MTM-Prozessbausteinen zu. Die Autoren kategorisieren dabei die Effekte nach der unterstützten Körperregion. In Bezug auf passive Exoskelette zur Rückenunterstützung vermuten die Autoren zum einen Bewegungseinschränkungen, z. B. bei Rotations-Bewegungen, die zu Beeinträchtigungen bei der Körperdrehung und Körperhilfe führen könnten. Zum anderen wirke die passive Unterstützung auf den Rücken wie eine Gegenkraft bei der Rumpfflexion, die zu einer Verzögerung der Bewegung führe. Darüber hinaus wird eine Einschränkung der Hüftflexion in der Schwungphase des Gehens vermutet, die zu einer verkürzten Schrittlänge führen könnte. (Hensel et al. 2020)

3 Konzeptentwicklung

Die zugrundeliegende Konzeptentwicklung ist neben der Dokumentation und dem Ergebnistransfer in insgesamt sechs AP untergliedert und in der Abbildung 9 dargestellt. Verglichen zur Antragstellung sind einzelne Anpassungen erkennbar, welche nachfolgend zunächst erläutert werden. Anschließend wird auf die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse des Projektes eingegangen.

Arbeitspakete	PM		Projektlaufzeit: 22 Monate																					
	Wiss. MA	SHK	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1 Kategorisierung und Analyse kommerziell verfügbarer Exoskelett-Lösungen	3	3																						
2 Identifikation und Systematisierung von typischen Anwendungsfeldern	3	3	X																					
3 Datenaufnahme und -auswahl auf Basis von Exoskelett-Nutzung zur Anwendungsanalyse	4	4								X														
4 Datenauswertung und Identifikation von Nutzenpotenzialen in Produktion und Logistik	5	5																X						
5 Entwicklung eines Quick-Checks zur Identifikation von Einsatzfeldern	4	4																						
6 Validierung im industriellen Kontext	3	3																						X
7 Dokumentation	-	-																						
Σ			22	22	X Sitzungen des projektbegleitenden Ausschuss																			

Abbildung 9: Beantragte Abfolge der AP im Rahmen des Forschungsprojektes einschließlich geplanter Treffen des PA und geplanter Mitarbeiterkapazitäten

Durch eine verzögerte Zustellung des Zuwendungsbescheids bedingt konnte die Personalakquise erst verzögert begonnen werden, sodass der inhaltliche Projektstart abweichend vom beantragten Vorhaben am 01.04.2021 erfolgte. Durch einen verzögerten Bearbeitungsbeginn hat sich eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um drei Monate ergeben, welche zum Projektabschluss Ende Januar 2023 führte. Hierdurch wurden eine inhaltliche Bearbeitung des Projektes sowie der Projektabschluss wie beantragt ermöglicht. Auf Grund des verzögerten Projektstarts fand eine Neuterminierung des abschließenden PA-Treffens statt. Dieses wurde zum Ende des Kalenderjahres 2022 am 14.12.2022 digital durchgeführt. Die Form der digitalen Veranstaltung hat sich in der pandemischen Lage der Corona-Pandemie als effektiv erwiesen, um eine hohe Anzahl interessierter Unternehmen zu erreichen. Insbesondere vor dem Hintergrund der durchgeführten Verifizierung und Validierung des erarbeiteten Quick-Check Tools als digitales Werkzeug erwies sich eine digitale Veranstaltung als zielführend.

Die nachstehende Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die im Forschungsvorhaben geplanten AP, deren Status der Bearbeitung sowie die erbrachten Aufwände.

Tabelle 2: Zuordnung aufgewendeter Menschenmonate (MM) und Bearbeitungsstatus zu AP

AP		MM (Ist)	Status
1	Kategorisierung und Analyse kommerziell verfügbarer Exoskelett-Lösungen	4,64	abgeschlossen
2	Identifikation und Systematisierung von typischen Anwendungsfeldern	3,00	abgeschlossen
3	Datenaufnahme und -auswahl auf Basis von Exoskelett-Nutzung zur Anwendungsanalyse	4,00	abgeschlossen
4	Datenauswertung und Identifikation von Nutzenpotenzialen in Produktion und Logistik	5,00	abgeschlossen
5	Entwicklung eines Quick-Checks zur Identifikation von Einsatzfeldern	4,00	abgeschlossen
6	Validierung im industriellen Kontext	3,00	abgeschlossen
7	Dokumentation	-	abgeschlossen

Die bisherigen Ausführungen weisen auf noch viele unbeantwortete Fragen im Bereich der Exoskelett-Forschung hin. Dies lässt sich insbesondere auf das noch recht junge Forschungsgebiet der Exoskelette im industriellen Kontext zurückführen. Die bisher durchgeführten oder laufenden Forschungsvorhaben adressieren neben der Produktentwicklung insbesondere Labor- und Pilotstudien, die erste wichtige Erkenntnisse für den Praxiseinsatz liefern. Dabei ist insgesamt ein hohes industrielles Interesse an dem Themengebiet der Exoskelette festzustellen, welches sich in umfassenden Testphasen in Großunternehmen trotz fehlender Langzeitstudien und gesetzlicher Rahmenbedingungen widerspiegelt.

Dem Einsatz von Exoskeletten stehen insbesondere begrenzte Ressourcen gegenüber, was zu einer Unterrepräsentanz in KMU führt. Es ergibt sich die daraus abgeleitete Arbeitshypothese, dass insbesondere fehlende Auswahlhilfen und Handlungsempfehlungen sowie nicht spezifizierte Einsatzfelder die Anwendung hemmen. Das Ziel des Forschungsvorhabens stellt daher die Entwicklung einer Potenzialanalyse dar, mittels derer Arbeitsplätze auf ihr Potenzial hinsichtlich des Einsatzes von Exoskeletten überprüft werden können, sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Auswahl und Einsatz von Exoskeletten. Hierdurch werden anwendende Unternehmen dazu befähigt, Exoskelette zielgerichtet und mit vermindertem Planungsaufwand einzusetzen. Zur Erreichung der Forschungsziele wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende Arbeitshypothesen betrachtet:

- Exoskelette gliedern sich in den Kontext der Mensch-Technik-Interaktion ein und führen, in den richtigen Anwendungsfeldern eingesetzt, zu ergonomischen und wirtschaftlichen Vorteilen.
- Erst durch die Analyse, Charakterisierung und Systematisierung von Anwendungsfeldern für Exoskelette können Einsatzpotenziale in der Produktion und Logistik abgeleitet werden.

- Die detaillierte Kenntnis der Anwendungsfelder ist Voraussetzung für eine Einordnung von Exoskeletten nach dem TOP-Prinzip.
- Die aktuell existierende Kategorisierung von Exoskeletten ist für die praktische Nutzung in Unternehmen unzureichend, um ein Exoskelett auszuwählen.
- Durch die Entwicklung und Bereitstellung einer Potenzialanalyse und Handlungsempfehlung wird KMU der Einsatz von Exoskeletten im eigenen Produktivumfeld ermöglicht.

Nachfolgend erfolgt eine Beschreibung der einzelnen im Rahmen des Projektes durchgeführten AP mit der beabsichtigten Zielsetzung. Es werden im Einzelnen die durchgeführten Arbeiten sowie erzielten Ergebnisse dargestellt.

3.1 AP 1: Kategorisierung und Analyse kommerziell verfügbarer Exoskelett-Lösungen

Zielsetzung: In den Bereichen der Produktion und Logistik stehen unterschiedliche Exoskelette als Assistenzsysteme für differenzierte Aufgaben potenziellen Anwenderunternehmen zur Verfügung. Dies erschwert die Auswahl des richtigen Systems für den konkreten Anwendungsfall. In AP 1 wurde daher das Ziel verfolgt, eine Basis für eine systematische Auswahl kommerziell erhältlicher Lösungen zu erarbeiten. Dazu war eine detaillierte Marktanalyse durchzuführen, die in Europa bestehende Exoskelett-Lösungen für den industriellen Einsatz recherchiert. Die Erkenntnisse dieser Studie sollten anhand ihrer Limitationen, Anwendbarkeit und notwendigen Rahmenbedingungen vorklassifiziert werden. Das AP 1 ist dabei eng mit dem AP 2, der Identifikation von Anwendungsfeldern, verknüpft, weshalb beide AP parallel bearbeitet werden konnten.

Durchgeführte Arbeiten: Zur Erfüllung der definierten Zielsetzung erfolgte die Bearbeitung des AP in mehreren Schritten. Neben der Recherche verfügbarer Informationen in digitalen und analogen Quellen stand im Besondere eine Herstellerbefragung im Fokus der Ausarbeitung. Die Ergebnisse der Bearbeitung wurden in einer Marktanalyse zusammengeführt, deren Kernergebnisse im Anschluss an die Ausführung dargelegt werden.

Im Zuge der Ausarbeitung erfolgte zunächst eine Recherche von Herstellern exoskelettaler Lösungen für den industriellen Einsatz. Dabei wurde auf Grund der Ausrichtung des Forschungsprojektes auf industrielle und marktgängige Lösungen eine strikte Abgrenzung zu Produkten im medizinischen, rehabilitatorischen sowie militärischen Einsatz getroffen. In einem nächsten Schritt wurden die verfügbaren Informationen zu den Modellen der Hersteller zusammengetragen. Auf Grund des hoch dynamischen Marktumfeldes fand zunächst eine Berücksichtigung sowohl marktverfügbarer sowie prototypischer Lösungen statt. Die spätere Marktübersicht stellt jedoch ausschließlich marktverfügbare Lösungen gegenüber, ebenso fand eine

Beschränkung auf Exoskelette mit Zulassung auf dem europäischen Markt statt. Diese Einschränkungen sollen den späteren Anwendern eine praxistaugliche Lösung für den Realeinsatz der vorgestellten Lösungen offerieren.

Eine erste Grundlage zur systematischen Recherche bildeten die Webseiten des Exoskeleton Report sowie des Fraunhofer Institut Austria. In einer sich anschließenden Internetrecherche auf globaler Ebene konnten weitere knapp 30 Unternehmen und Institutionen identifiziert werden, welche anschließend auf ihre angebotenen Lösungen hin untersucht wurden. Mit diesem Ansatz konnten aus insgesamt über 70 Unternehmen über 30 Hersteller als relevant für industrielle Exoskelettlösungen identifiziert werden. Im Zuge der Analyse wurden damit Informationen von über 120 Exoskeletten gesammelt, wobei die relevanten Unternehmen knapp 50 unterschiedliche Exoskelette marktverfügbar anbieten.

Die ermittelten Exoskelette wurden anschließend nach der unterstützten Körperregion untergliedert und spezifische Informationen zu den Lösungen ermittelt. Dabei wurde der Schwerpunkt neben dem Antrieb, Typ, Eigengewicht der Exoskelette und der maximalen Unterstützung auf die Einsatzbereiche und Tätigkeiten gelegt. Die aufgeführten Parameter wurden als relevant erachtet, da sie einen unmittelbaren Einfluss auf den Effekt, das Einsatzpotenzial sowie die Akzeptanz der Mitarbeiter besitzen. So sind Angaben zum Antrieb wichtig, um die Leistung des Assistenzsystems zu beurteilen. Das Eigengewicht spielt eine nicht unwesentliche Rolle bei der Akzeptanz der Mitarbeiter. Durch die maximale Unterstützung wird eine Einschätzung potenzieller Einsatzgebiete ermöglicht, durch die Angabe von beispielhaften Tätigkeiten und Anwendungsbeispielen wird dieses Bild ergänzt. Eine Angabe zu Kosten der Lösungen war trotz hoher wirtschaftlicher Relevanz für den Einsatz der Lösungen nicht möglich, da diese Informationen nicht einheitlich und zuverlässig ermittelt werden konnten. Durch die Marktanalyse sollten hauptsächlich die folgenden Fragen beantwortet werden: Um welche Funktionsweise handelt es sich bei den Produkten? Welche Körperregionen unterstützen Exoskelette? Welche Lastenhöhen können Exoskelette unterstützen? Über welches Eigengewicht verfügen Exoskelette? In welchen Einsatzgebieten können Exoskelette eingesetzt werden? Welche Anwendungsbeispiele werden von den Herstellern vorgegeben?

Neben der Recherche freiverfügbarer Informationen wurden darüber hinaus direkte Herstellerbefragungen durchgeführt. So konnten sich diese unmittelbar zu den abgefragten Eigenschaften ihrer Lösungen äußern. Mit Hilfe der direkten Befragung konnten so Informationen zu über 20 Exoskelettlösungen unmittelbar zusammengetragen werden.

Ergebnisse: Im Rahmen der Recherche konnte festgestellt werden, dass es sich bei Exoskeletten um einen sehr dynamischen Markt handelt. Nach Abschätzung der International Federation of Robotics sowie dem Marktforschungsunternehmen ABI Research wird von einer Wachstumsrate

von jährlich 40 % ausgegangen, sowie von einem Einsatz der vertriebenen Lösungen zu über 50 % in industriellen Prozessen. (IFAA 2019)

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass für den Bereich industrieller und marktverfügbarer Exoskelette kaum Übersichtsarbeiten bestehen. Aus den vorhandenen Analysen wird deutlich, dass die Anzahl an Exoskeletten insgesamt ebenso zunimmt wie die Anzahl marktreifer Modelle. Werden die verfügbaren Systeme und die in Entwicklung befindlichen Exoskelette gesamt betrachtet, so überwiegt der Anteil aktiver Exoskelette. Werden jedoch nur kommerziell verfügbare Systeme betrachtet, überwiegen passive Systeme jedoch deutlich. (Voilque et al. 2019; Weidner et al. 2020; Exoskeleton Report LLC 2022)

Im Rahmen der erstellten Marktübersicht, aus welcher in der nachstehenden Abbildung 10 ein Ausschnitt dargestellt ist, wurden ausgewählte Merkmale auf Basis der Recherche und Herstellerbefragung aufgeführt. Die Übersicht beinhaltet knapp 50 Exoskelettlösungen aus 10 Ländern von 20 Herstellern, wobei passive Systeme mit einem Anteil von über 80 % überwiegen. Den größten Anteil besitzen rumpfunterstützende Systeme (knapp 50 %) sowie Exoskelette mit Unterstützung der Schulter/Arme (27 %). In den weiteren analysierten Körperregionen Nacken (2), Hände (4) und Beine (3) gibt es jeweils nur wenige Modelle. Hinzu kommen modulare Modelle die auf verschiedene Körperregionen wirken sowie Exoskelette für Spezialanwendungen (z.B. Werkzeughalterungen).



Abbildung 10: Ausgewählte Merkmale industrieller Exoskelette

Die Marktanalyse wurde den Mitgliedern des PA im Rahmen des zweiten Treffens vorgestellt und zur Verfügung gestellt. Einen entsprechenden Ausschnitt stellt die Abbildung 11 dar.

Forschungsnetzwerk
Mittelstand





Institut für Produktionssysteme

Marktstudie zu verfügbaren industriellen Exoskeletten mit Anwen

Allgemeines						
Produktname	Bild	Hersteller	Herkunft	Wirkungsbereich	Einsatzbereich (Primär)	Einsatzbereich 2
AGAGEXO Shoulder		AGADE	Italien	Schulter/Arme	Überkopfarbeit	Arbeiten auf Brusthöhe
AGAGEXO Low-Back		AGADE	Italien	Rumpf	Heben von Lasten	Tragen von Lasten
ExoSoft		Cyber Human	Spanien	Rumpf	Heben von Lasten	

Abbildung 11: Ausschnitt der erstellten Marktübersicht zu verfügbaren Exoskeletten für die industrielle Anwendung

3.2 AP 2: Identifikation und Systematisierung von typischen Anwendungsfeldern

Zielsetzung: Im zweiten AP steht die Analyse der Produktionsbereiche der im PA beteiligten Unternehmen zur Identifikation typischer Exoskelett-Anwendungsfälle im Fokus. Ziel ist die Nutzung bestehender Systemlösungen, insbesondere deren Anwendbarkeit in Produktion und Logistik. Um einen hohen Anwendernutzen aus den erarbeiteten Forschungsergebnissen zu ziehen, wird bei der Betrachtung der analysierten Fertigungs- und Logistikbranche auf eine große Diversität geachtet.

Durchgeführte Arbeiten: Da Aufgrund der Einschränkungen durch die Coronapandemie keine Besichtigungen vor Ort bei den Mitgliedern des PA möglich waren, wurden in einem explorativen Forschungsansatz virtuelle Interviews durchgeführt. Der gewählte semi-strukturierte Ansatz mit einem standardisierten Gesprächsleitfaden sowie fallspezifischen Folgefragen erlaubte es, aufkommende Themen flexibel zu vertiefen und offen neue Erkenntnisse zu erschließen. (Adams 2015) Im Vergleich zu einem narrativen Interview, bei dem die befragte Person selbst die Strukturierung des Gesprächs vornimmt, wird beim leitfadengestützten Interview die Strukturierung durch die befragende Person bestimmt. Dies ist eine Form des nicht standardisierten Interviews, bei dem der Interviewer anhand einer ausführlichen Liste offener Fragen ein Gespräch mit dem Befragten führt. (Pickel et al. 2009; Gläser und Laudel 2010) Für die so gestaltete Interviewreihe wurden verschiedene Experten mit Fachwissen zu möglichen Anwendungen von Exoskeletten in Produktion und Logistik aus dem PA rekrutiert. Als Experte werden nach Meuser und Nagel (2009) Person bezeichnet, deren Wissen über den Forschungskontext nicht jedem im Interessengebiet zugänglich ist. Daraus ergab sich jedoch die Notwendigkeit eines strukturierten thematischen

Leitfadens für die Durchführung des Interviews. Neben einem gut gestalteten Leitfaden hängt der Erfolg des Interviews von den Fähigkeiten des Interviewers ab. Daher sind Kenntnisse und Vorabinformationen über den besprochenen Kontext für den Interviewer von besonderer Bedeutung. (Helfferrich 2009)

Der Leitfaden beginnt mit der Vorstellung des Ziels des Interviews. Anschließend werden nach der beruflichen Position der Interviewenden und einige Fragen zur dessen Unternehmen erfragt. Auch wenn diese Daten im weiteren Verlauf anonymisiert werden, sind diese Daten für die Einordnung der Aussagen relevant. Es folgen Fragen zur Einschätzung des Fachwissens des Befragten. Nach Misoch (2019) sollen alle Themen möglichst als offen formuliert Fragen ausgeführt werden. Dieses ist durch fünf offene Fragen und eine konkrete Frage im Leitfaden berücksichtigt. Jede Frage enthält weitere Unterfragen. Falls die Befragten wenig zu den Fragen aussagen können, werden die Unterfragen zur Unterstützung verwendet, um eine detaillierte Antwort zu erhalten. Durch die Anzahl und Auswahl der Fragen sollte gewährleistet werden, dass alle nötigen Informationen zu den verschiedenen Kriterien abgefragt werden.

Die durchgeführten Interviews wurden aufgezeichnet und im Nachgang qualitativ ausgewertet. Dazu wurden die entsprechenden Gesprächsinhalte anonymisiert und Erkenntnisse hinsichtlich der in abgefragten Themengebiete zusammengefasst. Eine Übersicht der vier spezifizierten Schwerpunkte mit beispielhaften Fragen ist in Tabelle 3 aufgeführt, wobei der Wortlaut der Fragen für die Durchführung an die individuellen Interviewpartner angepasst wurde.

Tabelle 3: Themengebiete und beispielhafte Fragen in den durchgeführten Interviews

Themengebiet	Beispielhafte Fragen
Ergonomie / Unterstützung	- Mit welchen ergonomischen Problemen setzt sich Ihr Unternehmen aktuell auseinander? - Welche Körperregionen sollten durch den Einsatz von Exoskeletten unterstützt werden?
Einsatzgebiete	- In welchen Bereichen könnten Sie sich vorstellen, Exoskelette in Ihrem Unternehmen einzusetzen? - Beschreiben Sie kurz exemplarische Tätigkeiten: Wie begründen Sie Ihre Auswahl?
Hindernisse	- Was sind aktuell noch Hindernisse für den Einsatz industrieller Exoskelette in der Praxis? - Wo sehen Sie diesbezüglich die größten Schwierigkeiten?
Vorstellung	- Wie sieht Ihre Idealvorstellung von einem industriellen Exoskelett aus? - Auf welche Aspekte legen Sie besonders viel wert?

Insgesamt wurden 21 Interviews mit 29 Personen aus 15 verschiedenen Organisationen durchgeführt, wobei die Dauer der Befragung abhängig von der Anzahl der Gesprächspartner zwischen 40 und 90 Minuten betrug. Die Auswahl der Befragten sollte ein möglichst repräsentatives Bild abdecken und die Konzentration auf einen Unternehmenstyp verhindern. Die Interviewpartner

gehören nicht nur Unternehmen mit Interesse an Exoskeletten an, auch wurden Personen interviewt, welche bereits in ihren Unternehmen Exoskelette im Einsatz haben oder als Berater für Unternehmen zuständig sowie als Hersteller von Exoskelettlösungen tätig sind.

Die Interviews wurden zwischen dem 10.08.2021 und 17.09.2021 online per Microsoft Teams während der Arbeitszeit der Befragten durchgeführt. Vor dem Interview erhielten die Interviewpartner einen Überblick über das Thema des Interviews und wurden in die Thematik eingeführt. Es wurden sowohl Interviews mit einem Gesprächspartner als auch Befragungen mit mehr als einem Interviewten statt. Je nach Ausführungen der Befragten wurden die Reihenfolge und Art der Fragestellung dem Gesprächsverlauf angepasst. Es bestand für die Experten die Möglichkeit Aspekte anzusprechen, die vorher nicht in Betracht gezogen worden waren.

Ergebnisse: Die Auswertung der Ergebnisse der Interviews werden in strukturierter Analyse ausgewertet. Dabei wird die Methode der freien Interpretation angewandt, die in der Forschungspraxis für die Auswertung semistrukturierter Interviews weit verbreitet ist. (Gläser und Laudel 2010) Im Folgenden wird auf die einzelnen der vier befragten Themengebiete eingegangen und die Ergebnisse dargelegt.

Im Themengebiet „Ergonomie / Unterstützung“ kann in den Interviews ein einheitliches Bild festgestellt werden. In 19 der 21 Gespräche wird eine erwünschte Unterstützung des Rumpfes durch industrielle Exoskelette thematisiert. Ergonomische Probleme im Arm- und Schulterbereich, welche aus körperfernen Armhaltungen resultieren, werden etwas weniger häufig, in noch 14 Interviews, beschrieben. Selten auftretend mit sechs oder weniger Nennungen ist eine gewünschte Unterstützung der Beine, des Nackens oder der Hände. Wegen der begrenzten Stichprobe und des explorativen Forschungsansatzes haben die dargestellten Häufigkeiten keinen Anspruch auf Generalisierbarkeit. Allerdings lassen sich daraus klar die im PA vorliegenden Schwerpunkte hinsichtlich der Unterstützungsbedarfe ableiten, die im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes zu berücksichtigen sind.

Die in den Interviews im zweiten Themengebiet ermittelten möglichen Einsatzgebiete industrieller Exoskelette sind anhand der zuvor beschriebenen Körperregionen gegliedert, für die eine Unterstützung benötigt wird. Anwendungsmöglichkeiten im Bereich des Rumpfes werden vor allem bei vornübergebeugten Zwangshaltungen sowie Hebe- und Tragetätigkeiten gesehen. Während erstere insbesondere beim Umgang mit sperrigen Produkten in der Fertigung auftreten (z.B. Montage eines Wasserkastens im Automobilbau), sind letztere typische Abläufe aus der Logistik (z.B. Entladevorgänge oder Kommissionierungen). Als weiteres Einsatzgebiet für rumpfunterstützende Exoskelette können zudem länger andauernde Stehtätigkeiten identifiziert werden.

Im Hinblick auf eine Unterstützung im Arm- und Schulterbereich können manuelle Arbeitsprozesse aus zwei verschiedenen Kategorien unterschieden werden. Einerseits werden mehrere Überkopftätigkeiten beschrieben, bei denen die Arbeit über dem Kopf mit nach oben gerichtetem Blick durchgeführt wird (z.B. Verschrauben von Unterböden). Andererseits bestehen viele manuelle Abläufe, bei denen auf Brusthöhe mit nach vorne gerichtetem Blick gearbeitet wird (z.B. Haltearbeit beim Verschweißen). Beide Kategorien lassen sich darüber hinaus noch in statische und dynamische Abläufe unterteilen.

Bei den Beinen werden Stehtätigkeiten oder dynamische Kniebelastungen (z.B. häufige Pedalbetätigung) als Anwendungsbereiche für Exoskelette eingeschätzt. Als Anwendungen für Nackenunterstützungen werden nur Überkopftätigkeiten genannt, während Einsatzgebiete im Bereich der Hand das Eindrücken von Steckteilen, wiederholtes Greifen von Gegenständen sowie längere Haltevorgänge mit resultierender Handgelenksbelastung umfassen.

Neben der Identifizierung von Einsatzgebieten zeigen die Ergebnisse der explorativen Interviews im dritten Themengebiet noch bestehende Hindernisse für eine Verwendung von Exoskeletten in der Praxis. Ein Überblick über die genannten Hindernisse für den Einsatz von Exoskeletten wird in der nachstehenden Abbildung 12 gegeben. Die vier meistbeschriebenen Hindernisse sind Mitarbeiterakzeptanz, Kosten, Bewegungseinschränkungen und zeitliche Aspekte. Exoskelette sind aufgrund ihrer Neuheit vielen Beschäftigten noch fremd und insbesondere optisch auffällige Systeme können negativ durch Mitarbeiter wahrgenommen werden. Die aktuell noch hohen Anschaffungskosten sind darüber hinaus vor allem für kleinere Unternehmen ein großes Hindernis, da auch der durch die ergonomische Unterstützung erzielte Nutzen schwer monetär quantifizierbar ist. Durch Exoskelette verursachte Bewegungseinschränkungen stellen zudem bei Nebentätigkeiten wie dem Sitzen an einem Arbeitscomputer ein Problem dar und werden durch Beschäftigte als störend wahrgenommen. Weiterhin werden zeitliche Aspekte der Exoskelett Nutzung wie etwa Rüstzeiten für das An- und Ausziehen oder etwaige Produktivitätseinbußen als kritisch gesehen.

Die Erkenntnisse im letzten Themengebiet deuten abschließend auf eine einheitliche Idealvorstellung industrieller Exoskelette bei den Interviewpartnern hin. In allen Interviews wird ein hoher Komfort des Systems mit einem niedrigen Gewicht sowie möglichst geringen Bewegungseinschränkungen als zentrales Merkmal genannt. Ein Exoskelett solle unscheinbar sein, möglichst eng am Körper anliegen und ähnlich einem herkömmlichen Kleidungsstück tragbar sein. Darüber hinaus müsse eine einfache Reinigung der Komponenten möglich sein sowie ein umfassender Service durch den ExoskelettHersteller bestehen.

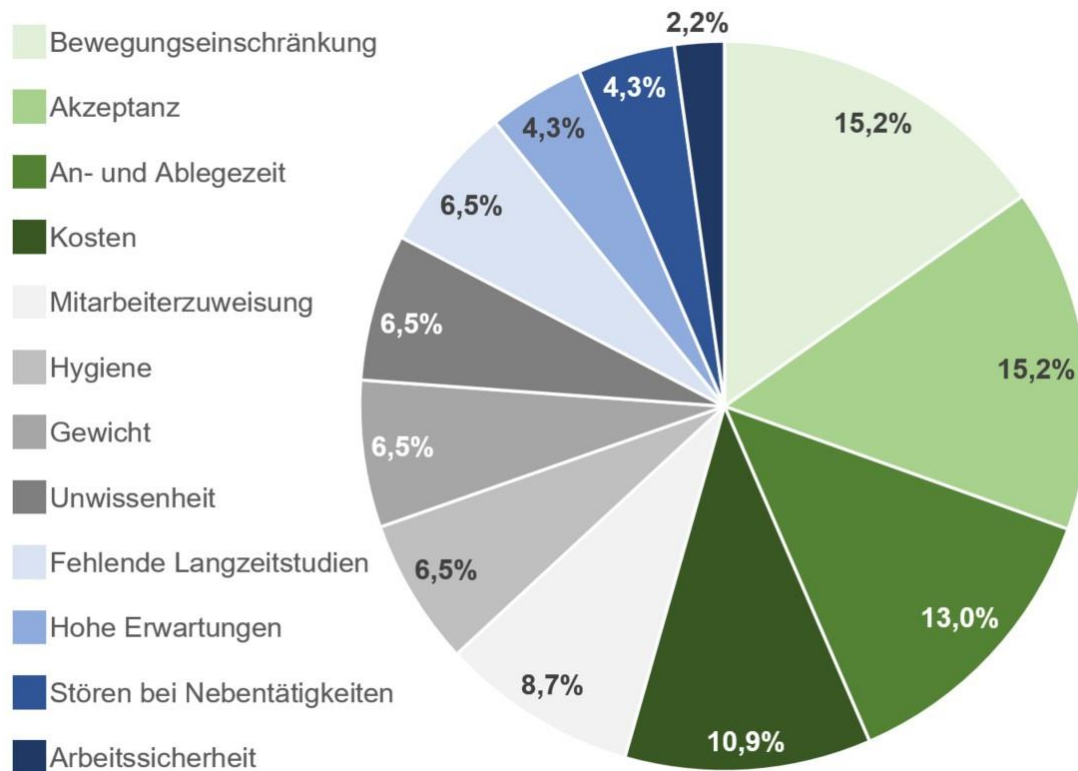


Abbildung 12: Auswertung von Hemmnissen beim Einsatz von Exoskeletten

Die im Rahmen der explorativen Interviews generierten Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für die folgenden AP des Forschungsvorhabens. So wurden die identifizierten Einsatzbereiche mit den Ergebnissen aus AP 1 kombiniert und als systematische Verknüpfung von Anwendungsfeldern und verfügbaren Exoskeletten aufbereitet. Diese dient als Basis für den in AP 5 zu entwickelnden Quick-Check mit Handlungsempfehlungen zur Systemauswahl. Weiterhin liefern die genannten Hindernisse wichtige Ansatzpunkte für die experimentelle Untersuchung von Exoskeletten, die in AP3 und AP4 aufgegriffen wurden.

3.3 AP 3: Datenaufnahme und –auswahl auf Basis von Exoskelett-Nutzung zur Anwendungsanalyse

Zielsetzung: Im dritten AP steht der Einfluss industrieller Exoskelette auf die potenziellen Anwender im Fokus. Dabei sind Einflüsse auf die Bewegungsausführung durch die getragene Stützstruktur sowie auf die Mitarbeiterproduktivität bei der Ausführung manueller Tätigkeiten zu untersuchen. Als Basis der Analyse sollen praktische Pilotstudien dienen. Die Ergebnisse einer vergleichenden Gegenüberstellung sollen im Sinne einer potenziellen Nutzenabschätzung sowie Auswirkungsanalyse in die späteren AP Integration finden.

Durchgeführte Arbeiten: Die geforderte Analyse ist auf Basis der Ergebnisse der bereits durchgeführten AP durchzuführen. Für die hierzu notwendigen Studien wurden auf die Laborfläche

des Industrial Engineering-Trainingscenter am Institut für Produktionssysteme (IPS) an der TU Dortmund zurückgegriffen. Die Untersuchung erfolgte anhand marktverfügbarer Exoskelette gemäß der zuvor durchgeführten Marktanalyse. Im Fokus der Studien standen repräsentative Tätigkeiten in Produktion und Logistik, welche u.a. anhand der zuvor durchgeführten Befragungen identifiziert werden konnten. Basierend auf den in den Interviews ermittelten Erkenntnissen wurde der Fokus auf rumpfunterstützende Exoskelette gelegt. Es wurden sowohl Systeme mit rigiden Strukturen berücksichtigt als auch textilbasierte Soft-Exoskelette. Auf die Untersuchung aktiver Exoskelette wurde im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Studien verzichtet. Ursächlich hierfür ist zum einen die hohe Marktdurchdringung passiver Systeme, zum anderen hohe Kosten für die Anschaffung entsprechender aktiver Systeme. So stand ein geleastes aktives Exoskelett zur Rumpfunterstützung zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführungen auf Grund eines sich verzögernden Beschaffungsprozesses nicht zur Verfügung.

Die Beschaffung der Exoskelette wurde durch Schulungen der Hersteller begleitet, die die Voraussetzung für eine korrekte Anwendung der Assistenzsysteme darstellt. Diesbezüglich stand das korrekte Anpassen der Systeme an verschiedene Personen im Vordergrund, dass eine wichtige Voraussetzung für den ordnungsgemäßen Einsatz in den Experimenten darstellt. Im Anschluss fand die Vorbereitung der Untersuchungen auf der Laborfläche des IPS statt, wobei es zunächst galt das Studiendesign festzulegen. Dafür wurden repräsentative Bewegungsabläufe wie Hebe- und Tragetätigkeiten oder die Arbeit in vornübergebeugten Zwangshaltungen an verschiedenen Stationen umgesetzt und aufzunehmende Zielgrößen für die Experimente festgelegt. Dabei wurden bestehende, validierte Studiendesigns zur Untersuchung von Exoskeletten recherchiert und für das Forschungsprojekt adaptiert. Im Anschluss an die Festlegung des detaillierten experimentellen Ablaufes wurden zudem bereits Probanden für eine Studienteilnahme rekrutiert.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Studiendesigns zur Untersuchung beider Parameter vorgestellt und die Ergebnisse separat diskutiert. In beiden Untersuchungen fand neben der Untersuchung des grundsätzlichen Effekts der Stützstruktur ein Vergleich rigider zu weichen Strukturen statt. Die Durchführung der Versuche mit Datenaufnahme fand im Jahr 2022 statt und ermöglichte durch die zeitliche Integration in das Gesamtprojekt eine Berücksichtigung der Ergebnisse in den nachfolgenden AP und damit als wesentlicher Impuls in der Entwicklung des Quick-Checks.

3.3.1 Studie zur Beeinflussung der Mitarbeiterproduktivität

Im Fokus der Untersuchung der Beeinflussung der Mitarbeiterproduktivität stand die Untersuchung von passiven Exoskeletten zur Rückenunterstützung. In der Evaluationsstudie wurden Tätigkeiten betrachtet, bei denen die Exoskelette eine potenzielle Unterstützung bieten (z.B. Hebevorgänge).

Daneben wurden auch Tätigkeiten untersucht, bei denen Exoskelette einen potenziell störenden Effekt aufweisen können (z.B. Hinsetzen).

Das Studiendesign orientierte sich an der von Baltrusch et al. (2018) entwickelten und validierten Testbatterie zur standardisierten funktionellen Bewertung rumpfunterstützender Exoskelette. Die Aufgaben der Testbatterie wurden aus Beobachtungen realer Arbeitssituation in der industriellen Produktion und Logistik abgeleitet. (Baltrusch et al. 2018) Zudem wurden bewährte Tätigkeiten zur Bewertung der funktionalen Kapazität von Probanden in die Studie miteinbezogen. In der Testbatterie nach Baltrusch et al. (2018) werden 12 Aufgaben definiert, die die meisten der aufgestellten Voraussetzungen erfüllen. Durch weitere Modifikationen konnte die Testbatterie weiterentwickelt werden. So wurden Aufgaben wie das 3-Punkte-Knien aufgrund des geringen Leistungseinflusses bzw. wegen Deckeleffekten in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt. (Kozinc et al. 2020; Baltrusch et al. 2018) Als Alternative wurde eine Tätigkeit entwickelt, die das Umlagern in der Logistik simuliert. Die im Zuge der Analyse genutzte Testbatterie besteht aus unterschiedlichen Gruppen an Tätigkeiten und wird sowohl mit als auch ohne Exoskelette durchlaufen. Die Aufschlüsselung der Tätigkeiten in die Aufgabengruppen ist in der nachfolgenden Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Übersicht der modifizierten Testbatterie mit Zuordnung zu den Gruppen der Haupt- und Nebentätigkeiten sowie Grundbewegungen

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Haupttätigkeiten	Nebentätigkeiten	Grundbewegungen
• Lastheben • Lasttragen • Vorwärtsbeugen • Umlagern	• 6-Minuten-Lauf • Leitersteigen • Treppensteigen • Sitz-Stand-Abfolge	• Rumpfbeugen • Weitstand • Rumpfrotation • Kniebeugen
Unterstützung eingeschaltet	Unterstützung ausgeschaltet	

Insbesondere die Auswirkungen weicher Stützstrukturen auf die Arbeitsleistung sind bisher im Vergleich zu rigiden Exoskeletten nur unzureichend untersucht. Zwar wurden rigide und weiche Systeme isoliert untersucht, ein Vergleich der Ergebnisse ist auf Grund einer fehlenden Standardisierung des Studiendesigns nicht möglich. Es konnte keine Studie identifiziert werden, die rigide und weiche Exoskelette im Hinblick auf das vorliegende Forschungsvorhaben miteinander vergleichen. Ziel der Studie war daher u.a. die vergleichende Untersuchung der Auswirkungen der Materialeigenschaften der ausgewählten Exoskelette auf die Mitarbeiterproduktivität. Um Unterschiede zwischen dem weichen und rigiden Exoskelett zu ermitteln, wurde neben der zeitlichen Arbeitsleistung auch die Nutzererfahrung und die Kinematik berücksichtigt. Dazu fand neben einer

detaillierten Analyse der Teiltätigkeiten eine standardisierte Befragung der Probanden zu den Wahrnehmungen bezogen auf die genutzten Assistenzsysteme statt.

In den Studiendurchläufen mit Exoskelett wurden gegenüber Durchläufen ohne zusätzliche Stützstruktur ergänzende Schritte durchgeführt. Dazu gehört sowohl die individuelle Einstellung der Systeme an die Versuchsperson als auch die Erläuterung der Funktionsweise des Systems und Überprüfung auf ordnungsgemäße Funktionsweise.

Die Inhalte des beschriebenen ersten Studiendesigns adressierten mehrere der in AP 2 ermittelten Hindernisse für einen Einsatz von Exoskeletten in Produktion und Logistik. Durch den verwendeten Fragebogen wurden Einschätzungen der Nutzer abgefragt, die Rückschlüsse auf eine mögliche Akzeptanz der Unterstützung ermöglichen. Zudem wurden mögliche Bewegungseinschränkungen bei Nebentätigkeiten untersucht und durch die Ermittlung von Ausführungszeiten mögliche Veränderungen in der Mitarbeiterproduktivität untersucht.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass beide untersuchten Exoskelett-Typen ihre spezifischen Vor- und Nachteile besitzen und sowohl bei Hebeaufgaben den Nutzenden signifikant unterstützen. Für statische Körperhaltungen konnten rigide Systeme als den soften Exoskeletten zu bevorzugende Assistenzsysteme identifiziert werden. Dem gegenüber steht eine Verringerung der Leistung der Probanden bei Aufgaben mit seitlicher Rumpfdrehung. Darüber hinaus waren insbesondere alle Aufgaben betroffen, die ein hohes Maß an Gehen erforderten. Hier sind weiche Systeme vorzuziehen.

3.3.2 Studie zur Beeinflussung von Bewegungsmustern

Das zweite festgelegte Studiendesign verfolgt einen explorativen Forschungsansatz. Dabei wurden für verschiedene repräsentative Arbeitsabläufe aus den Bereichen Produktion und Logistik Bewegungsmuster mit einem Motion Capturing System aufgezeichnet und ausgewertet. Durch den Vergleich der Daten mit und ohne Assistenzsystem konnte eingeschätzt werden, inwiefern die Nutzung der Systeme Bewegungen und Haltungen verändert. Dabei wurden sowohl mögliche positive Effekte wie eine Haltungskorrektur für ein ergonomisches Heben als auch mögliche negative Auswirkungen wie eine verkürzte Schrittlänge untersucht.

Als Bewegungsmuster wird eine Abfolge zusammenhängender Bewegungen zur Erledigung einer Arbeitsaufgabe verstanden. Entsprechende vergleichende Untersuchungen, insbesondere vor dem Hintergrund industrieller Tätigkeiten sind kaum verfügbar. Dieses spiegelt sich zudem insbesondere in fehlenden einheitlichen Definitionen von Bewegungsmustern in der Literatur wieder. Bewegungsmuster stellen einen ausschlaggebenden Punkt für die ergonomische Ausführung von Prozessen dar, da falsche Bewegungsabläufe zu Verletzungen und Schmerzen führen können. Korrekte Bewegungsmuster tragen dagegen dazu bei, dass die Haltung der Person durch eine

Stabilisation des Rumpfs optimiert wird. Ein zielgerichteter Bewegungsumfang kann den Körper ebenso vor Überlastungen und Verletzungen schützen. (Spitzhahn und Ullmann 2019)

Die Studie zur Beeinflussung von Bewegungsmustern fokussierte insbesondere das Kommissionieren als eine der am häufigsten manuell durchgeführten Tätigkeiten in der operativen Logistik. (Bednorz et al. 2019) Daneben stellt die Kommissionierung zugleich eine der schwierigsten innerbetrieblichen Aufgaben dar, die jedoch entscheidend zum wirtschaftlichen Erfolg eines Betriebs beiträgt. (Hompel et al. 2011; Gudehus 2012) Die vergleichende Pilotstudie wurde unter Zuhilfenahme des initialen Motion Capturing System Xsens MVN Awinda sowie mit den industriellen Exoskelette Paexo Back von Ottobock sowie LiftSuit von Auxivo durchgeführt.

Für die Pilotstudie wurden manuelle Tätigkeiten ausgewählt, die einerseits eine hohe Belastung für Produktions- und Logistikmitarbeiter bewirken, andererseits häufig in manuellen Produktions- und Arbeitsprozessen vorkommen. Beispielsweise stellen die Rumpfneigungen mit einer Rumpfneigung von mehr als 20° eine erhöhte Belastung für das Muskel-Skelett-System dar. Auch die manuelle Lastenhandhabung wie das Heben, Halten und Tragen (HHT) von Gewichten sind nach Angaben der DGUV durch häufiges Vorkommen, schwere Lasten und Regelmäßigkeit sowie ungünstige Körperhaltungen als erhöhte Belastung für die Mitarbeiter einzustufen und fanden in der Studie entsprechende Berücksichtigung. (DGUV 2013)

Die Studie sowie die erzielten Ergebnisse erscheinen als Beitrag „Exploratory pilot study investigating effects of exoskeletons on movement patterns“ zum 8. MHI Fachkolloquium 2023 in Chemnitz. (Jansing et al. 2023) Auf eine explizite Erörterung wird daher an dieser Stelle verzichtet. Im Allgemeinen konnte jedoch ein signifikanter Effekt von Exoskeletten auf die Bewegungsmuster der Probanden nachgewiesen werden. Dabei konnten Unterschiede zwischen Assistenzsystemen mit rigider und softer Stützstruktur festgestellt werden. Während Exoskelette mit rigider Stützstruktur einen höheren Einfluss besitzen, konnten diese mit einem geringeren Maß an Beschwerden bei der Tätigkeitsausführung in Verbindung gebracht werden als weiche Systeme.

3.4 AP 4: Datenauswertung und Identifikation von Nutzenpotenzialen in Produktion und Logistik

Zielsetzung: Zusammen mit der Schilderung des Designs der durchgeführten Studien erfolgte unter dem dritten AP bereits die Erörterung der Datenauswertung. Aus diesem Grund sei zur Datenauswertung an dieser Stelle auf Kapitel 3.3 (S. 32) verwiesen. Die geschaffene Datengrundlage sowie die Ergebnisse bieten jedoch im Rahmen des Forschungsvorhabens eine nicht unwesentliche Basis zur Spezifizierung anwendungsrelevanter Rahmenbedingungen und Einschränkungen. Dazu verfolgt das vierte AP die Erweiterung des morphologischen Kastens zur späteren individuellen Identifikation anwendungsoptimaler Exoskelette. Darüber hinaus wird in

diesem AP das allgemeine Ziel der kritischen Analyse erfolgskritischer Faktoren bei der Implementierung von Exoskeletten verfolgt, deren Einschränkungen ebenfalls der morphologischen Struktur hinzuzufügen sind.

Durchgeführte Arbeiten: Neben der statistischen Auswertung der erfassten subjektiven und objektiven Daten im Rahmen der durchgeführten Studien sowie einer sich anschließenden Interpretation wurde sich im Rahmen des vierten AP mit der Frage der Nutzerakzeptanz bei der Einführung von Exoskeletten auseinandergesetzt. Diese stellt eine weitere Basis für die spätere Entwicklung des Quick-Checks dar.

Die erfolgreiche Implementierung von Exoskeletten im industriellen Umfeld stellt eine Herausforderung dar, da sie den späteren Nutzenden als Individuum zu berücksichtigen ist. Aus diesem Grund sind die Eigenschaften des menschlichen Körpers, die Erwartungen der Nutzenden sowie die Anforderungen der Arbeitsumgebung hinreichend zu berücksichtigen (Looze et al. 2016). In der nachstehenden Abbildung 13 sind Einflussfaktoren aufgeführt, welche als relevant bei Anwendung eines Exoskeletts identifiziert werden konnten. Sie überschneiden sich mit den allgemein im Rahmen arbeitsphysiologischer Arbeitsplatzgestaltung zu berücksichtigenden Faktoren und führen bei Beachtung zur Verbesserung der ergonomischen Situation sowie Leistungsfähigkeit des Mitarbeitenden. Neben einer allgemeinen Berücksichtigung wie muskulärer Vorerkrankungen oder tätigkeitsspezifischer Belastungsmerkmalen sind hierbei ebenso fähig- und fertigkeitsspezifische Kompetenzen der Mitarbeitenden zu berücksichtigen.

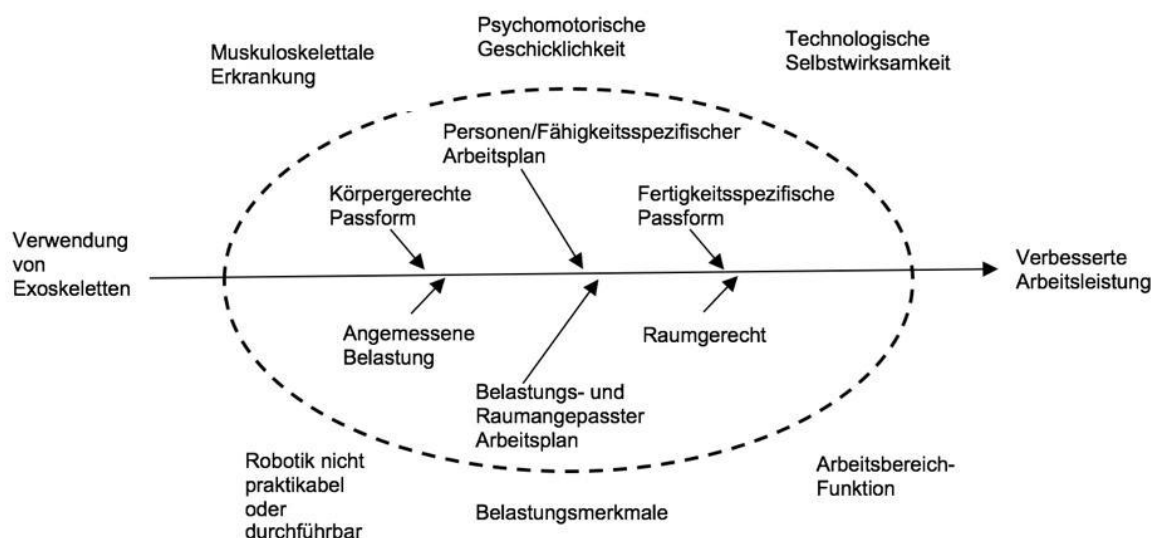


Abbildung 13: Kritischer Einflussfaktoren zur erfolgreichen Implementierung von Exoskeletten (Fox et al. 2020)

Neben den kritischen Einflussfaktoren wurden im Rahmen des vierten AP nutzerakzeptanzkritische Indikatoren untersucht, welche die Einführung von exoskelettalen Assistenzsystemen hemmen können. Die Bemessung der Nutzerakzeptanz fußt dabei auf subjektiven Einflüssen, wobei das

subjektive Empfinden bezüglich einzelner Exoskelette neben den objektiven Vor- und Nachteilen eines Exoskeletteinsatzes eine weitere Entscheidungshilfe darstellen kann. (Hoffmann et al. 2022) So konnte festgestellt werden, dass den unterschiedlichen im Rahmen des dritten AP untersuchten Assistenzsysteme unterschiedliche Einflüsse auf die Nutzerakzeptanz zugeordnet werden können.

Die Nutzerakzeptanz beschreibt die Einstellung von (potenziellen) Nutzern gegenüber einem Exoskelett und wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Basierend auf einer Literaturrecherche sowie verifiziert durch die praktischen Studien konnten dabei die folgenden wesentlichen Faktoren ausgemacht werden: Rüstzeit, Tragekomfort, Bewegungsfreiheit, Bedienbarkeit, Nützlichkeit, Zuverlässigkeit und Unbehagen. (Spada et al. 2017; Dahmen und Constantinescu 2020; Rogge et al. 2016) Sie steht im positiven Zusammenhang mit der Nutzungsintention. (Kaupe et al. 2021) Insbesondere für die Akzeptanz aktiver Systeme konnten auch die Reaktionsschnelligkeit und Leichtgängigkeit der Aktoren als relevant identifiziert werden. (Toxiri et al. 2019)

Da die Probanden diese Faktoren in Studien subjektiv wahrnehmen, bedurfte es geeigneter Methoden diese empirisch zu erfassen. Zur quantitativen Analyse konnte dazu im Rahmen der Studien auf strukturierte Leitfadeninterviews sowie auf fragebogenbasierte Messungen zurückgegriffen werden. Beispiele hierfür sind die „System Usability Scale“, die „Usability Metric for User Experience“, die „Local Perceived Discomfort Scale“ sowie die „Body Part Discomfort Scale“. (Hold et al. 2020; Bosch et al. 2016; Hensel und Keil 2018; Maurice et al. 2020; Corlett und Bishop 1976)

Ergebnisse: Im Rahmen der zwei durchgeführten Laborstudien konnten Einschränkungen hinsichtlich anwendungsrelevanter Rahmenbedingungen ermittelt und erfolgskritische Faktoren hinsichtlich der Nutzerakzeptanz identifiziert werden. Die Ergebnisse lassen sich dabei sowohl als allgemein bezogen auf Exoskelette als Assistenzsysteme an sich sowie spezifisch auf einzelne Fabrikate verstehen. Damit stellen die Ergebnisse weitere im Rahmen der späteren Ausarbeitung des Quick-Checks zu berücksichtigende Faktoren dar. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass die im Rahmen von Laborstudien aber auch in Feldstudien ermittelte Nutzerakzeptanz eines Exoskeletts nur bedingt auf andere Arbeitsaufgaben oder Versuchsdesigns übertragbar ist. Auch eine Vergleichbarkeit der Nutzerakzeptanz verschiedener Exoskelette kann allenfalls bei identischen Versuchsabläufen gegeben sein. (Maurice et al. 2020) So obliegt die Auswahl eines geeigneten Exoskeletts aufgrund der Nutzerakzeptanz weiterhin einer anwendungsbedingten Einzelfallentscheidung. (Golabchi et al. 2022)

3.5 AP 5: Entwicklung eines Quick-Checks zur Identifikation von Einsatzfeldern

Zielsetzung: Den Kern des Forschungsprojektes sowie das Ziel der vorangegangenen Untersuchungen stellt die Entwicklung eines Quick-Checks dar. Dieser soll in Form einer Potenzialanalyse dabei helfen, bestehende Arbeitsplätze hinsichtlich ihres Potenzials zum Einsatz von Exoskeletten zu bewerten. Entsprechend der zuvor identifizierten Anwendungsfelder ist dieser so zu gestalten, dass er in den unterschiedlichen Bereichen von Produktion und Logistik einsetzbar ist. Durch die verstärkte Einbindung von Unternehmen sind praktische Anforderungen zu berücksichtigen. Das zu entwickelnde Werkzeug ist dabei so zu gestalten, dass Analysen objektiv und zeitsparend durchzuführen sind. Darüber hinaus ist eine Anwendbarkeit, ohne oder mit geringen Vorkenntnissen anzustreben, um insbesondere kleineren Unternehmen mit nicht hoch ausgeprägten fachlichen Kompetenzen in den Bereichen der Ergonomie einen niederschweligen Einstieg in die Nutzung von Exoskeletten zu ermöglichen. Die Umsetzung soll in Form eines IT-Demonstrators erfolgen, in dem sowohl technische und ergonomische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigt werden. Das Ergebnis einer späteren Anwendung soll eine Handlungsempfehlung darstellen, welche u.a. Hinweise zur Akzeptanzförderung bei der Einführung sowie limitierende Faktoren beinhaltet.

Durchgeführte Arbeiten: Die Entwicklung eines entsprechenden Werkzeugs verlief in mehreren Phasen und integrierte die in den vorherigen AP definierten Anforderungen an das Tool. Im Fokus der Ausarbeitung stand zunächst eine Recherche zu den Möglichkeiten der Bewertung von Nutzenpotenzialen auf der Basis einfacher ergonomischer Rahmenbedingungen. Neben der Berücksichtigung methodischer Ansätze zur Implementierung von Exoskeletten im industriellen Umfeld wurden zudem explorative Interviews durchgeführt, welche eine wichtige Grundlage zur Entwicklung eines Grundkonzeptes darstellten.

Um eine systematische Methode zur Identifizierung ergonomischer Verbesserungspotentiale durch den Einsatz von Exoskeletten entwickeln zu können, wurden zunächst Bewertungsverfahren der Arbeitsplatzergonomie hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften und zur Durchführung erforderlichen Kompetenzen untersucht. Hierbei kristallisierte sich insbesondere die Leitmerkmalmethode (LMM) als relevantes Werkzeug der ergonomischen Bewertung heraus. Die LMM umfasst mehrere praxisorientierte Verfahren zur Beurteilung verschiedener Beanspruchungsarten. Leitmerkmale bezeichnen charakteristische Haupt und Nebenbelastungen einer bestimmten (Teil-)Tätigkeit eines Arbeitsplatzes. (Schmauder und Spanner-Ulmer 2022) Als zentrale Methode konnte die Bewertung von Belastungen beim manuellen HHT von Lasten, die insbesondere für die Bewertung logistischer Tätigkeiten geeignet ist, sowie die Methode zur

Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen, z. B. in der Montage, identifiziert werden. (BAuA 2019)

Eine Beurteilung der Beanspruchung von Mitarbeitenden anhand der Methoden der LMM erfolgt grundsätzlich in drei Schritten. Zunächst ist der zeitliche Anteil der betrachteten Teiltätigkeit des Arbeitsplatzes innerhalb eines Arbeitstages zu gewichten, anschließend erfolgt die schrittweise Einschätzung der restlichen Leitmerkmalsausprägungen (Wichtung) anhand des jeweiligen Formblatts. Es schließt sich die Wichtungen Addition der methodenspezifischen Leitmerkmale und die Multiplikation mit der Zeitwichtung an. Der resultierende Punktwert lässt sich dann in einen viergliedrigen Risikobereich, unterteilt nach einzelnen Punktbereichen, einordnen. (Schmauder und Spanner-Ulmer 2022; Steinberg et al. 2007)

Neben der Analyse ergonomischer Screeningverfahren und der Überprüfung deren Eignung für die zu bearbeitende Fragestellung schloss sich eine Analyse von spezifischen Anforderungen hinsichtlich eines wirtschaftlichen, humanitären und arbeitsschutzkonformen Einsatzes von Exoskeletten an. Darüber hinaus wurden bereits bestehende Ansätze zur instruierten Integration von Exoskeletten untersucht, die eine Erschließung bisher identifizierter Verbesserungspotentiale der Arbeitsplatzergonomie unter den genannten Bedingungen ermöglichen.

Da sich die Anforderungen an industrielle Exoskelette entsprechend ihrer heterogenen Verwendungsbereiche stark unterscheiden, liegen bislang keine eindeutigen Klassifizierungsvorschriften vor. (Gull et al. 2020; Peters und Wischniewski 2019) Daher wurde sich auf bereits existierende Vorschriften in Abhängigkeit der bestimmungsgerechten Verwendung von Exoskeletten konzentriert. Diese sind in Kapitel 2.2.4 (S. 10) ausgeführt, wobei Exoskelette als technische Hilfsmittel grundsätzlich den Vorschriften der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG unterliegen.

Zusätzlich zu den Merkmalen der Exoskelette und den arbeitsorganisatorischen Anstrengungen seitens der Arbeitgeber, können eine Reihe limitierender Faktoren des vorgesehenen Arbeitsumfeldes ihre Einsatzsicherheit und Eignung beeinflussen bzw. gefährden. Grundsätzlich ist der Einsatz eines Exoskeletts arbeitsplatzspezifisch zu planen und zu evaluieren, wobei gemäß dem TOP-Prinzip im Arbeitsschutz an stationären Arbeitsplätzen zunächst andere technischen Maßnahmen, wie Lastenmanipulatoren oder Hubwagen, zur ergonomischen Gestaltung umzusetzen sind und darüber hinaus meist eine höhere Eignung als personenbezogene Assistenzsysteme aufweisen. (DGUV 2019; Hold et al. 2020) Es wurde festgestellt, dass bereits bestehende Maßnahmen zum Arbeitsschutz, wie PSA oder andere spezielle Arbeitskleidung, auf die Kompatibilität mit dem Einsatz von Exoskeletten zu prüfen sind. Darüber hinaus wurden Faktoren identifiziert, die zu weiteren oder einer verstärkten Gefährdung der Arbeitnehmenden durch den Einsatz von Exoskeletten führen. Eine solche Gefährdung kann bspw. eine erhöhte

Verletzungsgefahr bei Stolper-, Sturz- und Rutschunfällen darstellen, die durch ein durch das Exoskelett hervorgerufenen Gewicht bedingt wird. (Schick 2018)

Daneben wurden räumlichen Umgebungsbedingungen am Arbeitsplatz als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Funktionalität eines Exoskeletts identifiziert. (Schick 2018) Feuchtigkeit und Staub können zu Verunreinigungen führen, die im Extremfall auch Funktionsstörungen und –ausfälle zur Folge haben können. (Hold et al. 2020) Eine ordnungsgemäße Wartung und Reinigung der Geräte in solchen Einsatzumgebungen als auch aus hygienischen Aspekten wurde als obligat erachtet. Daneben konnte eine Raumtemperatur von oberhalb 30°C ebenfalls als exklusiver Faktor identifiziert, da sich intensive Schweißbildung an Kontaktstellen in Diskomfort und hygienisch negativen Ausprägungen äußern kann. (Steinhilber et al. 2020)

Die Einführung von Exoskeletten kann sich aufgrund mangelnder Erfahrung sowie der Vielzahl marktverfügbarer Exoskelette als schwierig erweisen. (Hoffmann et al. 2021) Daneben konnten zahlreiche Leitfäden als Hilfestellung zur Einführung von Exoskeletten als Hemmnis identifiziert werden. Dabei fokussieren sich einige Leitfäden auf spezifische Projektabschnitte der Exoskeletteinführung (Dahmen et al. 2018; Ippolito et al. 2020; Ralfs et al. 2022), während sich andere der Definition des gesamten Ablaufs des Einführungsprozesses annehmen (Bornmann et al. 2020; Tomás-Royo et al. 2022; Hoffmann et al. 2021).

Für die gestalterische Umsetzung des zu erarbeitenden Quick-Checks wurden in einer ersten Phase zielgruppengerechte Anforderungen an das Werkzeug ermittelt. Im Anschluss wurde auf Grundlage der erstellten morphologischen Struktur an Anforderungen und Verschränkungen ein geeignetes Bewertungsverfahren sowie Kriterien zur Arbeitsplatzbewertung abgeleitet und in einen Programmablauf integriert. Anschließend wurde der so entstandene Programmablaufplan umgesetzt und in einer abschließenden Phase anhand der zuvor getroffenen Spezifikationen verifiziert. Neben den bereits zusammengetragenen Anforderungen wurden dazu in einem ersten Schritt nichtfunktionale Anforderungen an das zu erstellende Tool erarbeitet und spezifiziert. Während sich funktionale Anforderungen Funktionen des Programms festlegen stellen nichtfunktionale Anforderungen alle Programmeigenschaften, die allenfalls mittelbar in Beziehung zur Programmfunktionalität stehen. Insbesondere qualitätsbezogene Anforderungen verstehen sich dabei als nichtfunktional (Versteegen 2002). In der nachfolgend abgebildeten Tabelle 5 ist ein Ausschnitt aus dem Katalog nichtfunktionaler Anforderungen an das zu entwickelnde Tool aufgeführt.

Tabelle 5: Katalog nichtfunktionaler Anforderungen

Kategorie	Nichtfunktionale Anforderung
Umsetzung	• Interaktiv • Rechnergestützt • Barrierearm • Auch auf mobilen Engeräten nutzbar • Modular
Nutzerkreis	• Betriebliche Praktiker mit Vorkenntnissen in Arbeitsplatzbewertung und -gestaltung • Ohne Kenntnisse bezüglich Exoskelette
Aufbau	• Listenartig • Frage-Antwort-Aufbau • Multiple/Single Choice
Umfang	• Maximal 60 min

Die im Rahmen der Entwicklung umgesetzte Segmentierung des Ablaufs der Arbeitsplatzevaluation ist in der nachstehenden Abbildung 14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine dreiteilige Segmentierung umgesetzt wurde. Im ersten Segment wurde die Überprüfung der Ergonomie des Arbeitsplatzes anhand eines etablierten Ergonomiebewertungsverfahrens umgesetzt. Es schließt sich die im zweiten Segment umgesetzte Bewertung belastender Faktoren zur Überprüfung der Eignung für einen Exoskeletteinsatz an. Im abschließenden dritten Segment wurde die Abfrage restriktiver Faktoren ergänzt. In einer sich anschließenden Kompatibilitätsprüfung wurde der Abgleich auf typische Anwendungsbereiche und Eigenschaften von Exoskeletten ergänzt. Dieser mündet in einer Handlungsempfehlung für die Einführung von Exoskeletten bzw. einer negativen Handlungsempfehlung unter Angabe und Erläuterung der relevanten Faktoren.

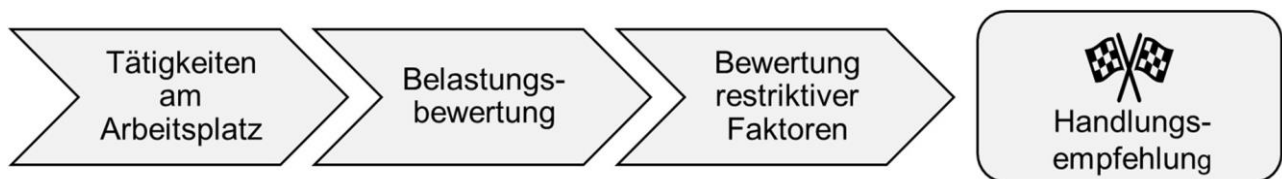


Abbildung 14: Ablauf des Quick-Checks zur Identifizierung des Einsatzpotentials von Exoskeletten

Durch die Implementierung der LMM als Verfahren zur ergonomischen Beurteilung der beschriebenen Ablaufschritte konnte der Zeitliche Aufwand aufgrund geringerer Differenzierungsgrade gegenüber der Verwendung von Expertenverfahren wie dem Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) reduziert werden. Darüber hinaus führt die Nutzung des Screening-Verfahrens LMM zu einer Reduzierung der zur Analyse erforderlichen ergonomischen Fachkompetenz beim Anwendenden. Damit konnte die Anwendbarkeit des Tools auch für betriebliche Praktiker und Praktikerinnen mit gewissen Vorkenntnissen im Bereich der Ergonomie

ermöglicht werden. Ein Beispiel für die Implementierung der Einflüsse der Merkmalsausprägungen in der LMM-HHT ist in der nachstehenden Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6: Einfluss der Merkmalsausprägungen der LMM-HHT auf die Einsatzpotentialbewertung (grün: positiver Einfluss, rot: negativer Einfluss von Exoskeletten)

Leitmerkmal	Ausprägung	Einfluss	Grund	Gewichtung
Arbeitsorganisation / zeitliche Verteilung	Gut	rot	Effizienter Einsatz nicht möglich	0,1
	Eingeschränkt	gelb	Effizienter Einsatz nur eingeschränkt möglich	
	Ungünstig	grün	Effizienter Einsatz möglich	
Körperhaltung	Knien oder Hocken	rot	Wirkung ist abzuschalten	0,25
	Vorbeugen (> 60°)	gelb	Wirkung eingeschränkt	
	Vorbeugen (< 60°)	grün	Wirkung ist maximal	
	Stehen	grün	Wirkung ist maximal	
	Gelegentliche Rumpfverdrehung	gelb	Systemstruktur beeinflusst	
	Häufige Rumpfverdrehung	rot	Flexibilität der Mitarbeiter	
Ungünstige Ausführungsbedingungen	Umgebungsbedingungen eingeschränkt	rot	Zusätzliche Belastung durch Hitze etc.	0,05
	Räumliche Bedingungen mind. Eingeschränkt	rot	Beweglichkeit im Raum weiter eingeschränkt	
	Kleidung	rot	Exoskelett schränkt zusätzlich ein	
	Erschwernis durch Halten und Tragen	grün	Unterstützung durch Exoskelett	
	Deutliche Erschwernis durch Halten und Tragen	grün	Exoskelett kann gewährleistet werden	
		grün	Exoskelett kann gewährleistet werden	
Zeitwichtung	Entsprechend gesonderter Klassifizierung		Potenzial abhängig von Dauer und Häufigkeit	0,5
Wirksames Lastgewicht	Entsprechend gesonderter Klassifizierung		Wirkung abhängig von Lastgewicht	0,1

Nach einer Arbeitsplatzbewertung hinsichtlich der ergonomischen Gestaltung eines bestehenden Arbeitsplatzes im ersten Segment der Arbeitsplatzevaluierung mit Hilfe des Tools wurden weitere mitarbeiterspezifischen sowie arbeitssicherheitsrelevanten oder unternehmensseitig eingebrachte Interessen in die Bewertung zur Berücksichtigung implementiert. Dabei wurde die Überprüfung des Potenzials einer Exoskeletteinführung auf Basis eines Katalogs limitierender und ausschließender Arbeitsplatzmerkmale implementiert. Ein Beispiel für die implementierten Faktoren bildet die nachfolgend aufgeführte Tabelle 7, in der in Anlehnung an Kaupe et al. (2021) Faktoren aufgeführt sind, welche den Einfluss von Exoskeletten bewerten. Es ist zu erkennen, dass sich der Einfluss neben der Mitarbeiterproduktivität über zusätzliche Zeitbedarfe ebenso auf Investitions- sowie laufende Kosten und qualitäts- sowie flexibilitätsprägende Implikationen erstreckt.

Tabelle 7: Mögliche Kosten und Nutzen beim Exoskeletteinsatz (i.A.a. Kaupe et al. 2021)

Einflussbereich	Mögliche Kosten	Möglicher Nutzen
Zeit	• Erhöhung der Rüstzeit durch An- und Ablegen • Wechsel des Energiespeichers • Höhere Wegezeiten durch Bewegungseinschränkungen	• Verkürzung von Zykluszeiten • Erhöhte Prozessqualität durch geringere Ermüdung • Gesteigerte Motivation der durch ergonomische Unterstützung
Einmalige Kosten	• Anschaffungskosten • Schulung	• Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter
Laufende Kosten	• Miet- oder Lizenzgebühren • Wartung und Reparatur • Lagerung/Platzbedarf • Energie	• Reduzierung von Mitarbeiterausfällen • Abwendung von Arbeitsunfällen • Hinfälligkeit von Überstunden
Flexibilität	• -	• Einsetzbarkeit von Mitarbeitern und Arbeitsplätzen • Flexibilisierung vor dem Hintergrund der Variantenvielfalt
Qualität	• -	• Prozessqualität durch höhere Präzision, Fehlervermeidung und Stabilisierung von Arbeitsabläufen • Erhöhung der Produktqualität

Die umgesetzte Abfrage von restriktiven Rahmenbedingungen kann ermittelte Potenziale neutralisieren, sofern bestimmte Faktoren einen Exoskeletteinsatz verwehren. Die kritischen Faktoren wurden dabei in limitierende und ausschließende Faktoren unterteilt. Mit dem Erreichen einer definierten Anzahl limitierender Faktoren wurde dieses darüber hinaus als Ausschlusskriterium definiert. Eine Übersicht, über die im Tool implementierten restriktiven Merkmale stellt die nachfolgende Tabelle 8 dar.

Tabelle 8: Restriktive Merkmale eines Arbeitsplatzes nach Interessensgruppen mit limitierenden (hellgrau) und ausschließenden (dunkelgrau) Merkmalsausprägungen

Interessensgruppe	Arbeitsplatzmerkmal	Merkmalsausprägung		
Unternehmensführung	Schmutz und Staub	niemals	manchmal	häufig
	Funkenflug	niemals	manchmal	häufig
	An- und Ablegehäufigkeit	niemals	manchmal	häufig
	Dauer in Stunden pro Tag	< 1	1-2	>2
	Wöchentliche Wiederholungen	0-1	2-4	5-7
	Reinraumumgebung	ja		nein
Arbeitssicherheit	Beengter Tätigkeitsbereich	niemals	manchmal	häufig
	Schutzausrüstung erforderlich	ja		nein
Mitarbeitende	Warme Umgebungstemperatur	ja		nein
	Kalte Umgebungstemperatur	ja		nein

Die umgesetzte Programmlogik ermöglicht die gleichzeitige Bewertung mehrerer charakteristischer Teilarbeiten eines Arbeitsplatzes zur Abschätzung des Einsatzpotenzials von Exoskeletten. Dazu werden unter Beanspruchungsaspekten vergleichbare Tätigkeiten einer Person gemeinsam bewertet. Es findet eine konsekutive Beschreibung und Bewertung der Teilaktivitäten statt, ehe für

diese getrennt eine Handlungsempfehlung ausgegeben wird. Die Handlungsempfehlung wurde dabei differenziert in die grundsätzliche Eignung, detaillierte Erläuterungen zur Empfehlung sowie ein Protokoll über die getätigten Angaben differenziert umgesetzt. Eine beispielhafte Abbildung ist dazu in Abbildung 15 dargestellt.

Handlungsempfehlung für den untersuchten Arbeitsplatz

Die Arbeitsplatzbewertung ist nun abgeschlossen.

Um das Einsatzpotential von Exoskeletten für Ihre Tätigkeiten bestimmen zu können, wird nun noch die gängige Arbeitszeit am untersuchten Arbeitsplatz benötigt: 8 h

Nachfolgend finden Sie die Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Exoskeletten unter den angegebenen Rahmenbedingungen. Weitere Informationen zum Exoskeletteinsatz finden sie auf der [Projekthomepage](#).

Tätigkeit 1: Kommissionierung

Dauer: 300 Minuten
Belastungsart: Heben, Halten und Tragen von Lasten

Ein geeignetes Exoskelett kann die Beanspruchung bei der Ausführung optimieren. Eine ausführlichere Untersuchung des Arbeitsplatzes ist ratsam.

Eignungspotential für den Exoskeletteinsatz

gering

hoch

Details

Protokoll

Tätigkeit 2: Vormontage

Dauer: 60 Minuten
Belastungsart: Zwangshaltung der Arme

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ein Exoskeletteinsatz **nicht** empfohlen.

Eignungspotential für den Exoskeletteinsatz

gering

hoch

Details

Protokoll

Abbildung 15: Beispielhaftes Ergebnis für zwei untersuchte Tätigkeiten

Die Umsetzung des Werkzeugs erfolgte als Webtool, welches ohne Installation sowohl auf stationären als auch mobilen Endgeräten genutzt werden kann. Der Zugriff auf das Tool erfolgt browserbasiert über eine durch die Forschungsstelle gehostete Webpräsenz. Der Zugang ist unbeschränkt und für alle interessierten Anwender möglich und wird über die Projektlaufzeit hinaus garantiert. Ein Zugriff ist über die Domain www.synexo.mb.tu-dortmund.de möglich. Die nachfolgende Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt aus der umgesetzten Tätigkeitsdefinition in Anlehnung an die LMM-HHT.

SyNExo institut für Produktionssysteme

Bewertung LMM Heben-Halten-Tragen für Tätigkeit [Ⓢ] : Kommissionierung

Um das Potential eines Exoskeletts abschätzen zu können, wird eine Beurteilung der IST-Belastung am Arbeitsplatz benötigt.
Beantworten Sie hierfür die nachfolgenden Fragen:

1. Zeitdauer der Tätigkeit pro Arbeitstag min

2. Häufigkeit [Ⓢ] pro Arbeitstag

bis 5	5 bis 20	20 bis 50	50 bis 100	100 bis 150	150 bis 220	220 bis 300	300 bis 500	500 bis 750	750 bis 1000	1000 bis 1500
1500 bis 2000						2000 bis 2500				

3. Wirksames Lastgewicht in kg [Ⓢ]

3 bis 5	5 bis 10	10 bis 15	15 bis 20	20 bis 25	25 bis 30	30 bis 35	35 bis 40	> 40
---------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------

4. Lastaufnahmebedingungen [Ⓢ]

beidhändig und symmetrisch	zeitweilig einhändig oder unsymmetrisch	überwiegend einhändig oder Instabilität des Lastenschwerpunkts
----------------------------	---	--

5. Körperhaltung in Startposition [Ⓢ]

--	--	--	--

©BAuA

Abbildung 16: Ausschnitt aus der Tätigkeitsdefinition im entwickelten Webtool

Ergebnisse: Um eine Einzelfallprüfung manueller Arbeitsplätze eines Unternehmens zu erleichtern und zu standardisieren, wurde ein entsprechendes Werkzeug in Form eines IT-Demonstrators entwickelt. Mit Hilfe dieses Werkzeugs wird es mittelbaren sowie unmittelbaren Arbeitsplatzverantwortlichen ermöglicht, zügig und ohne besondere Vorkenntnisse die Potenziale durch den Einsatz von Exoskeletten an den betrachteten Systemen hinsichtlich ihres ergonomischen sowie wirtschaftlichen Impacts zu beurteilen. Das als Webtool ausgeführte Werkzeug ermöglicht eine mobile und einfache Anwendung ohne Installation und führt in der finalen Handlungsempfehlung Hinweise zur Implementierung von Exoskeletten am untersuchten Arbeitsplatz an. Bei der Bedienung wurde auf eine nutzerfreundliche Gestaltung geachtet, welche eine iterative und intuitive Nutzung des Programmes zulässt.

Nach der Implementierung des Tools fand eine physische Prüfung des Funktionsumfangs statt, welche die Einhaltung der zuvor definierten Anforderungen überprüfte. Es wurden darüber hinaus Optimierungspotenziale aufgedeckt, deren Implementierung abhängig vom Validierungsergebnis im nachfolgenden AP erfolgen konnte.

3.6 AP 6: Validierung im industriellen Kontext

Zielsetzung: Das letzte inhaltliche AP verfolgt die Validierung und Optimierung der erarbeiteten Anwendung in der industriellen Praxis. In einer systematisierten Implementierungsphase sollen dabei anhand von Use Cases die Benutzerfreundlichkeit sowie Validität der Ergebnisse überprüft werden. Auf Basis des erzielten Feedbacks soll eine iterative Optimierung eine hohe Qualität der

erarbeiteten Anwendung sicherstellen. Durch eine einföhrungsbegleitende Dokumentation oder entsprechende Gestaltung der Anwendung sollen Unternehmen zur eigenständigen und intuitiven Nutzung der Anwendung befähigt werden und damit zum richtigen Zeitpunkt Informationen und Hilfestellungen zur Abschätzung des Nutzenpotenzials von Exoskeletten im Produktiveinsatz erhalten.

Durchgeführte Arbeiten: Nach Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse und Anforderungen in das Webtool wurde eine Validierung dessen Funktionalität und Ergebnisqualität durchgeführt. In diesem Rahmen konnten Grenzen und weitere Optimierungspotenziale des Tools identifiziert werden, die im Rahmen eines iterativen Prozesses erfasst sowie implementiert werden konnten. Im Rahmen der Validierung wurden sowohl die Benutzerfreundlichkeit der entwickelten Anwendung geprüft als auch die Ergebnisqualität an sich. Im Rahmen des Validierungs- und Optimierungsprozesses konnte eine solche Simplifizierung der Anwendung sowie Integration entsprechender Hinweise und Hilfestellungen erfolgen, sodass eine besondere Anleitung für die Nutzung nicht erforderlich ist.

Die Validierung eines Softwaresystems umfasst allgemein den Prozess, der die Erfüllung definierter Erwartungen, Bedürfnissen und Anforderungen überprüft. (Sommerville 2018; Schatten et al. 2010) Der Fokus der Validierung ist auf das finale System gerichtet, welches am Ende des Entwicklungsprozesses vorliegt. Im Rahmen der Validierung wird ein Softwaresystem durch den Prozess der Evaluation hinsichtlich der Softwareanforderungen validiert. Die Validierung folgt dabei der Leitfrage, ob das richtige Produkt entwickelt wurde. (Boehm 1984) Sie ist von der Verifikation zu unterscheiden, die einen Nachweis darüber liefert, dass das System mit den festgelegten Spezifikationen übereinstimmt. (Sommerville 2018) Die Verifikation folgt der Leitfrage, ob das Produkt richtig entwickelt wurde. (Boehm 1984) Evaluation bezeichnet die systematische Bewertung der Erfüllung der an ein System gestellten Kriterien. Übertragen auf ein Softwaresystem wiederum bedeutet dies, dass mithilfe der Evaluation eines Softwaresystems geprüft wird, ob die daran gestellten Qualitätsmerkmale mit den Anforderungen an das System übereinstimmen. Die Evaluation dient somit dazu, über die Erfüllung der Kriterien zu entscheiden. (ISO/IEC 25040:2011-03) Die Validierung und Verifikation besitzen als Teil des Softwarelebenszyklus eine besondere Bedeutung, da diese einen unmittelbaren Einfluss auf die Akzeptanz des Kunden sicherstellen bzw. eine Nicht-Erfüllung von Anforderungen zu negativen Folgen wie z. B. psychischen Belastungen und/oder schlechteren Arbeitsergebnissen führen kann. (Boehm 1984; Versteegen 2002)

Im Fokus der Untersuchung wurden die anwendungsbezogene als auch produktbezogene Qualität untersucht. Die in der ISO/IEC 25010:2011-03 definierten Modelle der Qualität unterscheiden sich dabei hinsichtlich ihrer Ausrichtung. Die nachstehende Abbildung 17 gibt einen Überblick über die in die anwendungsbezogene Qualität einbezogenen Einflussgrößen. Hierzu werden neben der

Effektivität und Effizienz im Besonderen auch Faktoren wie das Vertrauen in eine Anwendung oder empfundener Komfort gezählt, welche als Zufriedenstellung zusammengefasst werden.



Abbildung 17: Modelle der anwendungsbezogenen Qualität (i.A.a. ISO/IEC 25010:2011-03)

Daneben wird in der Abbildung 18 das Modell der Produktqualität in Anlehnung an ISO/IEC 25010:2011-03 dargestellt. Die Produktqualität findet in diesem Modell eine Unterscheidung vor allem nach den Kernaspekten der Funktionalität und Leistungseffizienz.



Abbildung 18: Modell der Produktqualität (i.A.a. ISO/IEC 25010:2011-03)

Zur Validierung der im Rahmen der Softwareentwicklung fokussierten Qualitätsparameter wurde eine Mindestanforderung von fünf Probanden gestellt. Diese Anzahl reicht nach Nielsen (2006) zur Identifikation der wesentlichen Erkenntnisse. Ursächlich hierfür ist der funktionale Zusammenhang zwischen identifizierter Qualitätsdefizite und der Anzahl an Testnutzern, welcher in nachstehender Abbildung 19 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass bereits mit einem Kollektiv aus fünf Probanden 85% der identifizierbaren Probleme einer Software ermittelt werden können. Jede weitere Testperson lässt kaum noch weitere neue Verbesserungen und Probleme ausfindig machen. Aus diesem Grund wird eine Mindestanforderung an fünf Validierungsnutzer als ausreichend betrachtet.

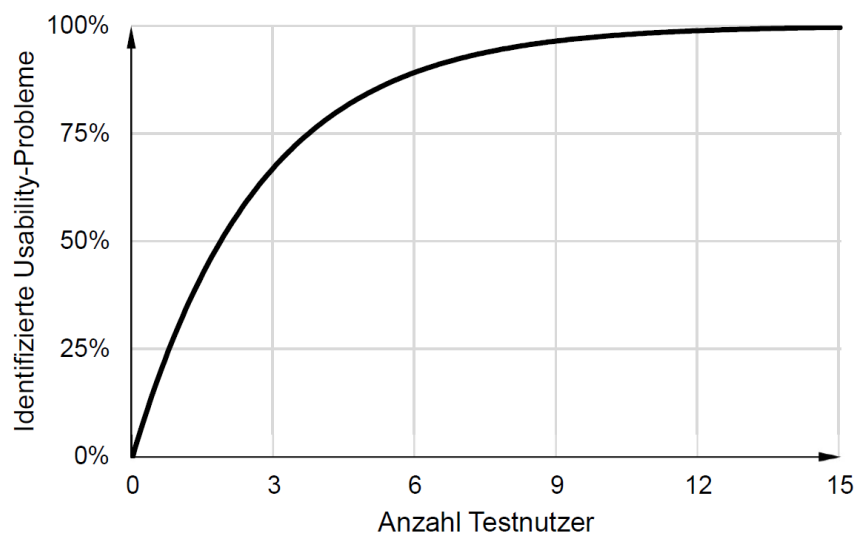


Abbildung 19: Funktionales Modell zur Beschreibung der Abhängigkeit des relativen Anteils identifizierter Usability-Probleme in Abhängigkeit der Anzahl an Testnutzern (i.A.a. Nielson 2000)

Für die Evaluation des im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Quick-Checks wurden zwei Evaluationspläne angesetzt. Der erste umfasste die Durchführung eines Usability-Tests, bei dem bis zu zwei Personen gemeinsam das Werkzeug auf in einem Validierungs-Use Case anwenden. Dabei wurde mit diesen Personen ein intensives Feedback erarbeitet. Auf Grund der zeitintensiven Eruiierung geeigneter Use Cases sowie der Durchführung mittels Mitarbeiter volontierender Unternehmen wurde der Probandenkreis gemäß obiger Erläuterungen eingeschränkt. Bei der Auswahl der an der Validierung partizipierenden Probanden wurde dabei auf eine für die Nutzung des Softwarewerkzeugs repräsentative Personengruppe geachtet. Gleichzeitig wurde auf eine breite Streuung bereits vorhandener Kompetenzen in den adressierten Themenfeldern Ergonomie und Exoskelette unter den Testnutzern geachtet. Durch das hierdurch entstehende Feedback wurde eine hohe Güte des Validierungsergebnisses bei gleichzeitig kleinem Probandenkollektiv gewährleistet.

3.6.1 Validierung mittels Einzel-Usability-Tests

Der Ablauf des ersten Evaluationsplans bestand zunächst aus der Beschreibung des Validierungs-Use Cases. Dieser wurde in Einzelfällen und in enger Absprache mit der Forschungsstelle hinsichtlich der relevanten Repräsentanz sowohl durch die Unternehmen beigesteuert, teils wurden auf Realarbeitsplätzen basierende Use Cases durch erweiternde Fiktion zurückgegriffen. Die Vorstellung sicherte ein gemeinsames Verständnis über die Ausgangslage sowie Problemstellung und wurde durch den versuchsleitenden Mitarbeiter der Forschungsstelle dokumentiert. Anschließend folgte der Ablauf des eigentlichen Usability-Tests. Dieser beinhaltete die Bestandteile eines Thinking Aloud, eines Fragebogens sowie eines Post-Test-Interviews.

Der Hauptbestandteil der Datenerfassung während des ersten Evaluationsplans wurde durch die Methode Thinking Aloud geprägt, als einem „lauten Denken“. Im Zuge der Einführung der Nutzer an die Validierung wurde diesen die Funktionsweise der Methode erörtert, die mit der Methode verbundenen Aufgaben und der Grund der Anwendung dieser Methode. Ergänzt wurde die Erklärung dabei jeweils durch ein verdeutlichendes Beispiel. Diese Informationen wurden als wesentlich angesehen, da die Methode des Thinking Aloud nur wenig bekannt ist und daher gezwungen erscheinen könnte. (Barnum 2011) Da während des Usability-Tests weitere Performancegrößen wie bspw. die benötigte Zeit gemessen wurden, war eine Erklärung der Methode zudem nicht während der aktiven Nutzung des Werkzeugs durch die Probanden möglich, ohne die erhobenen Daten zu verfälschen. Die Datenaufnahme erfolgte durch ein Beobachtungsprotokoll zur Verschriftlichung der qualitativ erhobenen Daten. (Döring und Pöschl-Günther 2016) Durch die Methode des Protokolls anstelle einer Aufzeichnung konnte die Wahrscheinlichkeit für eine positive Rückmeldung angefragter Probanden erhöht werden. (Vogel und Funck 2017)

Da die Methode des Thinking Aloud aus unterschiedlichen Gründen eine besondere Eignung für die Validierung des Werkzeugs und der Beantwortung der Forschungsfrage aufwies, wurde sich auf diese Methode als Kern des Konzeptes fokussiert. Durch die Verbalisierung der Gedanken wurde ersichtlich, welche Aspekte als intuitiv und gut empfunden wurden. (Barnum 2011) Außerdem konnte identifiziert werden, an welchen Stellen Probleme auftreten wie, z. B. falsche Interpretationen von Angaben und Hilfestellungen durch den Nutzenden. In diesem Zuge wurde es ermöglicht, die zugehörigen Ursachen zu identifizieren, was eine unmittelbare Ableitung von Optimierungspotenzialen ermöglichte. (Hegner 2003; Herczeg 2018) Im Rahmen eines Thinking Alouds müssen die Gedanken des Probanden nicht aus seinen Handlungen abgeleitet werden wie bei einer reinen Beobachtung. (Barnum 2011; ISO/TR 16982:2002) Das macht die Ergebnisse unabhängiger vom Wissen des Testers über die Interpretation von Beobachtungsdaten. (ISO/TR 16982:2002) Neben tiefgreifenden Ergebnissen bestand der Vorteil in der Methode darüber hinaus

aus der geringen zeitlichen Abkopplung des Feedbacks vom Zeitpunkt des Auftretens eines Problems oder Fehlers. Dadurch konnte das Risiko eines Vergessen oder einer verfälschten Wiedergabe des Eindrucks vermieden werden. (Herczeg 2018) Dieses besitzt insbesondere vor dem Aspekt Gewicht, als dass die Anwendung des Softwarewerkzeugs trotz seiner einfachen und nutzerfreundlichen Gestaltung ein hohes Maß an Konzentration und Aufmerksamkeit zur Bedienung gefordert ist.

Während der Nutzung wurde den Testanwendern keine Hilfestellungen geboten sowie keine inhaltlichen Fragen beantwortet, die ihm während einer realnahen Nutzung des Werkzeugs ebenfalls nicht zur Verfügung stehen. Dies dient der Beobachtung des Problemlösungsverhaltens der Nutzer. Daher wurden Fragen der Nutzenden mit Gegenfragen beantwortet, die zu einem eigenständigen Lösen der Problematik führen. (Barnum 2011)

Anschließend erfolgte die Befragung der Probanden durch einen Fragebogen und Interview. Der Fragebogen wurde dabei im halbstrukturierten Post-Test-Interview integriert und basiert auf der System Usability Scale. Der Fragebogen wurde basierend auf Gao et al. 2020 erarbeitet und basiert auf zehn Fragen, die unterschiedliche Faktoren hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigen. Die Beantwortung der Fragen erfolgte quantitativ, wobei die Ausrichtung der Fragen hinsichtlich positiver und negativer Formulierung wechselte. (Brooke 1996) Die verwendeten Fragen sind in verwendeter Reihenfolge im Anhang 1 (S. 86) aufgelistet. Im Rahmen des Fragebogens wurden zudem Vorkenntnisse in den Themengebieten der ergonomischen Gestaltung und Bewertung von Arbeitsplätzen sowie dem Einsatz industrieller Exoskeletten erfasst. Mithilfe dieser Information konnte eine aussagekräftige Einordnung der Ergebnisse erfolgen. Außerdem konnten Rückschlüsse auf die Anforderung gezogen werden, nach der eine Verwendung des Softwaretools auch durch Anwender ohne Vorkenntnisse in den genannten Themengebieten möglich sein soll.

Das durchgeführte Interview wurde leitfadengeführt umgesetzt. Dieses erhöhte die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Testpersonen. Bei jedem Interview wurden die gleichen inhaltlichen Fragen verwendet und qualitativ beantwortet. (Helfferich 2022) Durch die offene Gestaltung der Interviewfragen wurde dem Grundsatz der Offenheit vor unerwarteten und neuen Ergebnissen Rechnung getragen. (Döring und Pöschl-Günther 2016) Das Gütekriterium der Objektivität konnte methodenbedingt durch das Interview hinsichtlich der methodischen Subjektivität nicht gewährleistet werden. (Helfferich 2022) Die Strukturierung des dem Interview zugrundeliegenden Leitfadens erfolgte entlang der Themenblöcke Bedienung/Anwendung, Aufbau, Informationsdarstellung sowie die durch die Software bereitgestellten Funktionen. Eine Ausführung hinsichtlich der durch Detailfragen abgedeckten Themen mit zur Befragung einheitlich verwendeten Wörter bildet die nachfolgende Tabelle 9.

Tabelle 9: Themenblöcke mit Themen der Detailfragen des Leitfadens und verwendeter Wörter im Rahmen des Post-Test-Interviews

Themen des Interviews	Themen der Detailfragen	Verwendete Wörter
Bedienung / Anwendung	Selbstbeschreibung Erwartungskonformität Fehlertoleranz	Selbstbeschreibend Intuitiv Erwartbar Überraschend
Aufbau	Transparenz Orientierungsförderlichkeit	Nachvollziehbar Verständlich Orientierung Zurechtfinden Navigieren
Informationsdarstellung	Verständlichkeit Eindeutige Interpretierbarkeit	Verstehen Eindeutig interpretieren
Funktionen • Bewertung • Handlungsempfehlung • Export	Korrektheit Vollständigkeit Angemessenheit	Korrekt Plausibel Angemessen genau und detailliert Vollständig Erwartungskonform

3.6.2 Validierung mittels Workshops

Der zweite Evaluationsplan basiert auf der Durchführung eines Gruppenworkshops. Dieser erfolgte zeitchronologisch nach der Durchführung der Einzel-Usability-Tests im Rahmen eines Treffens mit den im PA vertretenden Unternehmensvertretern. Der Ablauf ähnelt dabei in seinen Schritten dem der Einzel-Usability-Tests. Nach einer gemeinsamen Einführung wurden gruppenspezifische Arbeitsplätze vorgestellt und anschließend durch die Gruppen bearbeitet. In diesem Zusammenhang erfolgte eine qualitative Datenaufnahme mittels der Methode Thinking Aloud. Die Anwendung des Werkzeugs war gefolgt von der individuellen Beantwortung eines dem der Einzel-Usability-Test gleichenden Fragebogens mittels Umfragewerkzeug sowie einer anschließenden Gruppendiskussion. Aufgrund der Teilnehmeranzahl des Workshops wurde sich für die Fokusgruppenmethode entschieden. Der zweite Evaluationsplan umfasste einen Workshop mit sieben Teilnehmern in zwei Gruppen.

Der Anwendung der Bewertung des Validierungs-Use Cases vorgeschaltet erfolgte vergleichbar zur Einzel-Validierung die Vermittlung der angewandten Methodenkenntnis zum Thinking Aloud. Die Dokumentation erfolgte mit Hilfe von Beobachtungsprotokollen. Während der Bewertung des Use Cases fand eine rege Kommunikation zwischen den partizipierenden Nutzern statt. Die Beantwortung von Fragen an die Moderatoren des Workshops beschränkte sich vergleichbar zu den Einzel-Usability-Tests auf orientierungsassistierende Gegenfragen. Hierdurch wurde ein vergleichbarer Evaluationskontext gewährleistet. Die Umsetzung der individuellen Fragebogenbeantwortung durch die Probanden erfolgte durch eine Digitalisierungslösung.

Im letzten Schritt fand eine Datenerhebung mittels Fokusgruppen bzw. Gruppendiskussionen statt. Fokusgruppen stellen eine Usability-Evaluationsmethode dar, die zur Evaluation und zum Testen eines Softwareproduktes geeignet ist. (Blank 2011; ISO/TR 16982:2002; Hegner 2003) Die Diskussion erfolgte gruppenorientiert separiert in den im Vorfeld definierten Personengruppen. Die Beibehaltung der kleinen Gruppengrößen im Rahmen der Diskussion ermöglichte eine vollumfängliche Kommunikation der Meinung und Feedback der Teilnehmenden. (Bloor et al. 2001) Zur Fokussierung und Lenkung der Gruppendiskussion wurden die gewünschten Themen in einem Leitfaden abgedeckt, der durch die Gruppenmitglieder interaktiv bearbeitet wurde. Auf Grund der Corona-bedingt digitalen Durchführung des Workshops wurde ein Miro-Board zur Dokumentation genutzt. Dieses ist schematisch nachfolgend in Abbildung 20 abgebildet. Der Leitfaden gliedert sich in vier große Themenblöcke. Die einzelnen Themenblöcke entsprechen denen des Leitfadeninterviews, darüber hinaus wurde der gesamte Leitfaden an das halbstrukturierte Interview in den Einzel-Usability-Tests angelehnt. Dadurch konnten methodisch vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.



Abbildung 20: Interaktives Miro-Board zur Dokumentation der Gruppendiskussion im Rahmen des durchgeführten Workshops

3.6.3 Ergebnisse und Implementierung

Im Rahmen der durchgeführten Evaluation mittels Einzel-Usability-Tests und Workshop konnten verschiedene repräsentative Arbeitsplätze als Validierungs-Use Cases betrachtet werden. Durch die Praxisrepräsentanz fand eine verstärkte aber nicht ausschließliche Fokussierung der Use Cases auf Tätigkeiten im Bereich der Rumpfunterstützung statt. Abgedeckte Themenfelder sind dabei u.a. die Montage in der Einzel- und Kleinserienfertigung, Kommissioniertätigkeiten sowie die Arbeit an einer getakteten Montagelinie. Die an der Validierung beteiligten zehn Testnutzer verfügten über unterschiedliche Fachexpertise in den angesprochenen Themenbereichen. Die zur Durchführung der Bewertung benötigte Zeit reichte dabei von 18 Minuten bis hin zu maximal 33 Minuten.

Neben den Ergebnissen des Thinking Aloud wurde eine auf Basis der Interviewfragen basierender Gesamtpunktwert nach Brooke (1996) ermittelt, der die Akzeptanz des entwickelten Werkzeugs widerspiegelt. Das erreichte Gesamtergebnis von knapp 78 % führt zu einer Gesamtbewertung durch die Testnutzer im bestmöglichen Akzeptanzbereich „akzeptabel“. Im Rahmen einer Adjektivbewertungsskala ist das Ergebnis als gutes, aber noch nicht exzellentes Ergebnis einzustufen. Damit konnte die Validierung eine bereits hohe Qualität und Anwendbarkeit des Tools zeigen. Dabei konnten die wesentlichen spezifizierten Anforderungen und festgelegten Qualitätsmerkmale als erfüllt charakterisiert werden. Es konnte validiert werden, dass sowohl der Ablauf sowie der Aufbau verständlich und nachvollziehbar und eine Bearbeitung in der vorgegebenen Zeit möglich war. Ebenfalls wurde gezeigt, dass die Nutzung barrierefrei möglich und die Handlungsempfehlung als plausibel und hilfreich einzustufen ist. Darüber hinaus wurde das entwickelte Werkzeug von den Testnutzern akzeptiert und als überdurchschnittlich gutes, webbasiertes Tool eingeordnet.

Im Rahmen des Thinking Aloud sowie dem anschließenden leitfadengestützten Interview konnten jedoch weitere Potenziale für unterschiedliche Handlungsfelder identifiziert werden. Die sich der Validierung anschließende Implementierungsphase von Lösungsoptionen hinsichtlich identifizierter Potenzialträger verfolgte eine Steigerung der Qualität in der Anwendung sowie in der vereinfachten Interpretation ausgegebener Ergebnisse. Dazu wurden die geäußerten Anforderungen weiter spezifiziert und in das Konzept eingearbeitet. Durch niederschwelle, partielle Validierungsschleifen mit einzelnen Testnutzern konnte die erfolgte inkrementelle Überarbeitung im Gesamtkonzept als erfolgreich gewertet werden. Insbesondere wurden Darstellungsformen, die bereitgestellte Hilfe, die Granularität abgefragter Tätigkeit, die Verständlichkeit und Eindeutigkeit der Informationstexte sowie die Vollständigkeit, Richtigkeit und Relevanz der Informationen überarbeitet. Das Ergebnis der iterativen Validierung bestätigte abschließend die erfolgreiche Implementierung der gestellten Anforderungen.

Ergebnisse: Die im Rahmen des sechsten AP durchgeführten Maßnahmen konnten die Validität des Webtools als niederschwellige Handreichung für die Entscheidungsfindung und Implementierung von Exoskeletten in produzierenden Unternehmen bestätigen. Im Rahmen der durchgeführten Workshops und Interviews sowie Case Studies wurde die Erfüllung der geforderten Qualitätsmerkmale überprüft und durch eine iterative Optimierung des Quick-Check integriert. Es konnte nachgewiesen werden, dass es sich bei der entwickelten Anwendung um ein barrierearmes Tool handelt, das auf eine hohe Akzeptanz unter den industriellen Partnern des Projektes gestoßen ist. Durch Validierungsworkshops außerhalb des das Projekt begleitenden PA konnte die Nutzerfreundlichkeit und Praktikabilität darüber hinaus bestätigt werden. Weitere Anfragen aus produzierenden Unternehmen nach erfolgreichem Projektabschluss bestätigen ebenfalls die Relevanz der Thematik und Güte des erarbeiteten Werkzeugs.

3.7 AP 7: Dokumentation und Ergebnistransfer

Das Forschungsvorhaben wurde durch ein Projektmanagement begleitet, das die Qualität des Gesamtprojekts sichergestellt hat. Dieses Vorgehen ermöglichte einen kontinuierlichen Abgleich der Projektentwicklung mit den Forschungszielen. Durch eine regelmäßige Einbindung des PA auch außerhalb der regelmäßig angesetzten PA-Treffen wurde eine zielgerichtete und anwendungsorientierte Forschung gewährleistet. Weitere Bestandteile des AP waren die regelmäßige Berichterstattung zum Projektträger, die Definition von Kooperationsstrukturen zwischen Forschungseinrichtung und dem PA sowie die Öffentlichkeitsarbeit. Die Öffentlichkeitsarbeit beinhaltete sowohl die Implementierung der erarbeiteten Lösung sowie die Pflege auf der institutseigenen Homepage, auf der laufend über die Ergebnisse informiert und der IT-Demonstrator bereitgestellt wurde. Des Weiteren umfasst die Öffentlichkeitsarbeit die Planung und Durchführung der Transfermaßnahmen der Forschungsergebnisse.

Neben der Berichterstattung gegenüber dem Fördermittelgeber wurden im Rahmen des Projektes weitere Publikationen erstellt, die die Inhalte der erarbeiteten AP dem Stand der Technik der forschenden Gemeinschaft zur Verfügung stellen. Hierzu zählen insbesondere im Rahmen des dritten AP entstandenen Veröffentlichungen zu den Ergebnissen der zwei durchgeführten Studien zur Auswirkung von Exoskeletten auf die Mitarbeiterproduktivität sowie Bewegungsmuster. Die Veröffentlichungen haben grundsätzlich einen peer-review-Prozess durchlaufen, der eine hohe wissenschaftliche Qualität der Beiträge gewährleistet. Die Veröffentlichung erfolgte sowohl im Rahmen von Konferenzbeiträgen bspw. bei der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik – MHI e.V. sowie im Rahmen von Beiträgen in Fachjournalen.

4 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Ziel des beschriebenen Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Potenzialanalyse, die Unternehmen eine niederschwellige und aufwandsarme Abschätzung des Nutzenpotenzials für den industriellen Einsatz von Exoskeletten an einzelnen Arbeitsplätzen oder Bereichen ermöglicht. Gleichzeitig sollte eine Handlungsempfehlung entwickelt werden, welche bei der Auswahl und Einführung von Exoskeletten in mittelständischen Betrieben unterstützt. Als besonderer Fokus sollte vor dem Hintergrund des angestrebten Einsatzes v.a. in kleinen und mittleren Unternehmen auf der Umsetzung der Entscheidungssystematik als Anwendung liegen, welche eine nur grundlegende Vorbildung in den Bereichen der Ergonomie und dem Einsatz von Exoskeletten erfordert. Hierdurch soll eine Identifikation und Ausnutzung noch nicht ausgereizter Potenziale in verschiedenen Teilbereichen der Produktion und Logistik ermöglicht werden.

Das IPS an der Technischen Universität Dortmund konnte dabei als durchführende Forschungsstelle auf umfangreiche Vorarbeiten und Kompetenzen in den Bereichen der Planung und Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen, der Mensch-Technik-Interaktion sowie Ergonomie zurückgreifen. Als wesentlich sind in diesem Zusammenhang neben weiteren Projekten die Arbeiten zu den Forschungsvorhaben KoMPI, ErgoKom sowie AIM hervorzuheben. Während aus dem Forschungsprojekt KoMPI Erfahrungen insbesondere zur Gestaltung niederschwelliger und aufwandsarmer Potenzialanalysen gezogen werden konnten, wurde im Rahmen von ErgoKom eine spezifizierte und aufwandsarme Methodik zur Analyse, Bewertung und Visualisierung auftretender körperlicher Belastungen in Kommissioniersystemen unter Berücksichtigung anerkannter Arbeitsanalyseverfahren erarbeitet. Das durchgeführte Forschungsvorhaben zielte auf die ergonomischen Potenziale von Exoskeletten im Rahmen betrieblicher Gestaltungsfaktoren im Rahmen einer gesundheitsförderlichen Arbeitsplatzgestaltung ab und stellt damit inhaltlich eine Fortsetzung eines bereits in AIM verfolgten Forschungsstrangs dar. Das Ziel dieses Forschungsprojektes stellte die Entwicklung einer neuen Komponente des betrieblichen Gesundheitsmanagements für den dauerhaften Erhalt der Anpassungs- und Beschäftigungsfähigkeit von Mitarbeitern dar.

Die Erarbeitung der Forschungsfrage erfolgte in mehreren teils konsekutiven und parallelen Schritten. Das Ergebnis der Projektbearbeitung stellt ein webbasiertes Werkzeug zur niederschweligen und aufwandsarmen Potenzialanalyse für den industriellen Einsatz von Exoskeletten in den Tätigkeitsfeldern der Produktion und Logistik dar und liefert neben einer Einschätzung des Potenzials eine entsprechende Analyse relevanter und ausschlaggebender Parameter sowie eine Handlungsempfehlung zur erfolgreichen Auswahl und Einführung einer entsprechenden Lösung im konkreten Anwendungsfall. Die abschließende Validierung und

Optimierung der erarbeiteten Lösung konnte nachweisen, dass die bearbeitete Forschungsfrage durch das Projektergebnis vollständig beantwortet werden konnte. Die im Rahmen der Projektbearbeitung geleisteten Arbeiten sowie aufgetretenen Fragestellungen werden nachfolgend zusammengefasst und in einem Ausblick eingeordnet.

Zusammenfassung

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurde eine grundlegende Analyse und Kategorisierung kommerziell verfügbarer Exoskelett-Lösungen erstellt. Einer ersten Übersichtsarbeit als Basis für die weitere Projektarbeit wurde eine Phase der kontinuierlichen Erweiterung und Schärfung parallel zum weiteren Projektverlauf angeschlossen. Die im Rahmen der umfassenden Recherche berücksichtigten Aspekte schlossen dabei sowohl technische als auch rechtliche Fragestellungen und Rahmenbedingungen für den Einsatz entsprechender Systeme im industriellen Umfeld ein. Es wurde festgestellt, dass in summarischer Betrachtung der in Entwicklung befindlichen und bereits kommerziell verfügbaren Systeme, aktive Exoskelette dominieren. Bei einer diskreten Betrachtung marktverfügbarer Systeme überwiegen jedoch deutlich passive Systeme. (Voilque et al. 2019; Hoffmann et al. 2020; Exoskeleton Report LLC 2022) Parallel dazu wurden typische Anwendungsfelder durch Experteninterviews mit Anwendern und Herstellern identifiziert und gegliedert. Dadurch konnte eine systematische Verknüpfung von Anwendungsfeldern und verfügbaren Exoskelett-Systemen erstellt werden, welche eine wichtige Basis für die zielgerichtete Auswahl von Exoskeletten bildet. Eine exemplarische Erkenntnis der entsprechenden Befragung zeigt eine starke jedoch nicht ausschließliche Fokussierung auf rumpfunterstützende Systeme im industriellen Umfeld.

Die im Rahmen der Interviews gewonnenen Ergebnisse bildeten eine wichtige Grundlage für die sich anschließenden AP des Forschungsvorhabens. Die identifizierten Anwendungsbereiche wurden mit den Ergebnissen des ersten AP kombiniert und als systematische Verknüpfung zwischen Anwendungsbereichen und verfügbaren Exoskeletten behandelt. Diese diente als Grundlage für das zentral im Forschungsprojekt zu entwickelnde Analysewerkzeug. Darüber hinaus bildeten die für eine Untersuchung als Barrieren und Hemmnisse benannten Aspekte einen wichtigen Ausgangspunkt für die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten experimentellen Studien zum industriellen Einsatz von Exoskeletten unter repräsentativen Rahmenbedingungen. Diese wurden zentral in den AP drei und vier bearbeitet und ausgewertet. Die durchgeführten Studien fokussierten sich auf die als relevant identifizierten Kernpunkte der Bewegungsbeeinflussung von Exoskeletten sowie deren Einfluss auf die Mitarbeiterproduktivität. Für die Untersuchung wurden verschiedene marktgängige Unterstützungssysteme beschafft, welche ein möglichst breites und zugleich repräsentatives Feld einsetzbarer Exoskelettlösungen abdeckte. Der Aufbau der Studien konzentrierte sich auf praxisnahe Belastungssituationen, welche auf der Laborfläche der durchführenden Forschungsstelle nachgebildet werden konnten. Durch die

umfangreiche und industrietypische Ausstattung an Montagesystemen und Produkten konnte hierbei die Praxisrepräsentanz der Untersuchung gewährleistet werden.

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen sowie der analytischen Recherche konnte eine vergleichende Überführung der untersuchten Systeme in eine morphologische Auswahlssystematik erreicht werden. Diese stellt die Basis für die sich anschließende Entwicklung des Kernergebnisses des Forschungsprojektes dar: Ein interaktives Werkzeug zur Durchführung von fachkompetenzreduzierten und aufwandsarmen Potenzialanalysen und der Ausgabe eines individuellen Handlungs- und Implementierungsleitfadens. Das Ergebnis des iterativen Validierungs- und Optimierungsprozesses bestätigt dabei das erarbeitete Werkzeug in seiner Wirkung als leichten und zugänglichen Einstieg in das Themenfeld der Exoskelette insbesondere für KMU. Als Webapplikation wurde das entwickelte Tool nach erfolgter Validierung auf der Projekthomepage frei zugänglich veröffentlicht. Der Zugriff erfolgt direkt über die Adresse www.synexo.mb.tu-dortmund.de. Neben der reinen Veröffentlichung zeigt eine bereits angelaufene Bewerbung in den beteiligten Netzwerken eine große Breite an industriellem Interesse an der Entwicklung. Es ist zu erwarten, dass das Ergebnis die prospektierte Breitenwirkung erfüllen und damit Unternehmen darin unterstützen wird, die adressierten ergonomischen und wirtschaftlichen Potenziale in der Produktion und Logistik zu heben.

Ausblick

Die vorgestellten Projektergebnisse bieten Anlass für eine weiterführende Forschung im Bereich der produktivitäts- und ergonomiebewussten Integration von Exoskeletten in den Wertschöpfungsprozess von Unternehmen. Insbesondere vor dem Hintergrund des demografischen Wandels bedarf es dazu neben einem weiteren Abbau von Hemmschwellen und der aktiven Förderung der themenspezifischen Kompetenz bei interessierten Unternehmen einer Ausweitung potenzieller Einsatzfelder. Die Integration entsprechender Assistenzsysteme bietet großes Potenzial zur Senkung spezifischer muskuloskelettaler Erkrankungen und weist damit ein hohes wirtschaftliches Potenzial auf. Ein Beispiel für die Integration von Exoskeletten in andere Produktionsbereiche kann das Baugewerbe darstellen. Bei gleichzeitig hohen Anforderungen an die Ortsflexibilität sind die Tätigkeiten in diesem Bereich der Produktion von hohen körperlichen Belastungen und darauf zurückzuführende Arbeitsunfähigkeiten geprägt. Das Adressieren spezifischer Rahmenbedingungen, insbesondere der starken Staubbelastung und klimatischen Anforderungen, stellt neben der Bereitstellung entsprechender Handlungs- und Implementierungsleitfäden eine wesentliche Kernfrage dar. Unter dem Titel „Akzeptanz und Wirkung von Exoskeletten in der Bauindustrie [AWExo]“ wird diese Thematik u.a. durch eine der berichtserstattenden Forschungsstelle assoziierte Organisation und dem Institut für Arbeitsschutz der DGUV bereits behandelt. Darüber hinaus dienen die im Rahmen des Projektes gewonnen Erkenntnisse als Anstoß für Forschungsaktivitäten im Bereich der Ergonomie und Logistik. In diesem

Zusammenhang sind Forschungsanträge geplant, die unter Einbeziehung von technischen, organisatorischen und persönlichen Maßnahmen die Demographieresilienz von Logistikunternehmen sowie der mit Logistikprozessen betrauten Abteilungen in produzierenden Unternehmen adressieren. Dabei soll auf den gewonnenen Erkenntnissen sowohl im Bereich der persönlichen Asisstenzsysteme als auch der Erarbeitung von Screeningtools, wie dem entwickelten Quickcheck, zurückgegriffen werden.

5 Bewertung des Einzelfinanzierungsplans

Dem Forschungsantrag sowie dem im Arbeitsplan dargestellten Aufgabenspektrum entsprechend wurde das Forschungsprojekt in einem Zeitraum von 22 Monaten bearbeitet. Der eingesetzte Personalaufwand war mit 23,64 MM an wissenschaftlich-technischem Personal etwas höher als angesetzt. Es wurde ein Mitarbeiter als Projektleiter über den gesamten bewilligten Zeitraum sowie über die Dauer der ergänzend bewilligten kostenneutralen Verlängerung eingesetzt und nach den jeweiligen erforderlichen Fachkenntnissen durch weitere Projektmitarbeiter unterstützt. Darüber hinaus unterstützte eine studentische/wissenschaftliche Hilfskraft (SHK) in der Erarbeitung sowie Dokumentation der Ergebnisse. Durch die feste Zuweisung eines Projektleiters zu dem Vorhaben wurde eine durchgängige Bearbeitung des Forschungsvorhabens über die gesamte Projektlaufzeit sichergestellt, sodass ohne Übergangsverluste auf vorhandene Ergebnisse und erarbeitetes Wissen zurückgegriffen werden konnte.

Durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter wurde eine inhaltlich und methodisch korrekte Bearbeitung des Projektes sichergestellt. Die wissenschaftlichen Angestellten wurden während der gesamten Laufzeit von SHK, je nach Aufwand der AP, unterstützt. Die Aufgabe beschränkte sich dabei auf wissenschaftliche Aktivitäten auf Weisung. Durch die Einbindung studentischer Arbeiten in der Forschungsfrage nahestehenden Themenbereichen konnte bereits in frühen Projektphasen eine transferierende Integration in die aktuellen Studieninhalte stattfinden.

Die bewilligten Mittel sowie getätigten Mittelabrufe sind in Tabelle 10 aufgeschlüsselt. Neben dem Einsatz und Abruf von Mitteln für wissenschaftlich-technisches Personal wurden gemäß Einzelansatz B des Finanzierungsplans Gerätschaften beschafft. Im Rahmen des Forschungsprojektes SyNExo wurden zur Bearbeitung der Forschungsfrage passive Exoskelettsysteme angeschafft. Im Fokus der Beschaffung standen dabei Lösungen, welche sowohl am Markt als auch im PA die höchste Relevanz aufgewiesen haben. Dabei wurden drei Exoskelette sowohl mit softer als auch rigider Struktur beschafft, um die Systeme entsprechend vergleichen zu können. Die hierfür bewilligten Mittel belaufen sich auf eine Summe von 14.040,00 €. Die durch den Ankauf der Exoskelette im Projektzeitraum entstandenen Kosten belaufen sich auf 12.762,75 €, damit wurde die beantragte Summe nicht überschritten.

Daneben sind Kosten i.H.v. 15.020,00 € für Leistungen Dritter im Sinne des Einzelansatzes C des Finanzierungsplans bewilligt worden. Diese entsprechen den beantragten Mitteln zur Miete eines aktiven Exoskeletts über einen Ausschnitt des Projektzeitraums. Die dabei real entstandenen Ausgaben belaufen sich auf eine Gesamtsumme von 15.265,32 €. Die entstandenen Mehrkosten erklären sich über den Abschluss einer für das Leasing erforderlichen Maschinenversicherung. Die Kosten hierfür waren im zum Zeitpunkt der Antragsstellung vorliegenden Angebot noch nicht enthalten, eine entsprechende Absicherung wurde jedoch als Grundlegend für den Abschluss des

Leasing-Vertrags erachtet. Der Mietzeitraum erstreckte sich über eine Dauer von zwölf Monaten und endet am 19.06.2023. Die Verzögerung im Beginn des Mietverhältnisses erklärt sich durch die Aushandlung der Mietbedingungen zwischen der German Bionic Systems GmbH und der TU Dortmund. So wurde in der Angebotsanfrage vom 29.09.2021 der 01.11.2021 als Mietzeitraum benannt. Die Rechnungsstellung damit einhergehend der Beginn des Leasingzeitraums beläuft sich auf den 15.06.2022. Auf Grund der vornehmlichen Fokussierung auf passive Systeme in der frühen Phase des Projektes entstand hierdurch kein Nachteil. Das aktive System stand in beabsichtigter Weise für Demonstrations- und zum Transfermaßnahmen innerhalb der Projektlaufzeit zur Verfügung.

Die entstandenen Kosten für das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal wurden um 18.250,21 € überschritten, die bewilligten Mittel für Hilfskräfte um 2.989,25 € unterschritten. Die Abweichungen resultieren zum einen durch den teilweisen Einsatz von Hilfskräften ohne Bachelorabschluss, zum anderen durch den geleisteten Mehraufwand für die projektbegleitende Recherche im AP 1. In der Durchführung der Marktanalyse zeigte sich, dass diese auf Grund des dynamischen Angebots über die Projektlaufzeit regelmäßig aktualisiert werden musste.

Tabelle 10: Übersicht über beantragte Zuwendungen und getätigte Mittelabrufe über die Projektlaufzeit

Position	Zuwendung laut Einzelfinanzierungsplan [€]	Getätigter Mittelabruf [€]
Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	110.330,00	128.580,21
Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	0,00	0,00
Bruttoentgelte für Hilfskräfte	17.572,50	14.583,25
Pauschale für Personalausgaben	8.953,18	8.953,18
Ausgaben für Gerätebeschaffung	14.040,00	12.762,75
Ausgaben für Leistungen Dritter	15.020,00	15.265,32
Pauschale für Sonstige Ausgaben	30.179,14	30.179,14
Summe	196.094,82	210.323,85

Neben den monetär geleisteten Ausgaben wurden im Rahmen des Forschungsprojektes durch die Wirtschaft unentgeltliche Leistungen zur Verfügung gestellt. Diese vAW erklären sich im Forschungsprojekt durch die Bereitstellung von Personalressourcen durch die Unternehmen. Die Quantifizierung der Unterstützungsleistung erfolgt gemäß Richtlinien. Eine Übersicht der Mittel sowie der Gesamtkosten für das Forschungsvorhaben ist in Tabelle 11 aufgelistet. Aufgrund der

vorherrschenden Pandemiebedingungen insbesondere zu Beginn des Projektes im Jahr 2021 konnten die geplanten Interviews nicht vor Ort durchgeführt werden. Die über 20 digital durchgeführten Interviews dauerten zumeist ca. 60 Minuten und sind somit unter die Erfassungsgrenze gefallen. Zudem wurde der zusätzlich digital durchgeführte Workshop "Der Faktor Mensch in Exoskelettprojekten als zusätzliches PA-Treffen erfasst und nicht als DL. Daher ergeben sich höhere Werte für den PA und geringere bei den Dienstleistungen. Insgesamt überschreitet die Summe der vAWs den angesetzten Wert trotz der benannten Einschränkungen um knapp 22 %.

Tabelle 11: Übersicht über die geleisteten vAW

Position	Aufwendungen gemäß Beantragung [€]	Entstandene Aufwendungen [€]	Abweichung
Sachleistungen (SL)	0,00	5.447,00	+ 100 %
Dienstleistungen (DL)	10.440,00	5.365,00	- 48,6 %
Aufwendungen für den PA (AP)	32.000,00	40.940,00	+ 27,9 %
Summe	42.440,00	51.752,00	+ 21,9 %

Die beantragten Forschungsgelder wurden zur erfolgreichen Bearbeitung des Forschungsvorhabens und die damit einhergehende Ergebniserarbeitung eingesetzt und abgerufen. Es wurde wirtschaftlich und sparsam verfahren, entstandene Abweichungen konnten dargelegt und begründet werden. Die nachgewiesenen Aufwendungen für die vorhabenbezogenen Dienstleistungen und die Treffen des PA belegen zudem den regen Austausch mit interessierten Unternehmen, durch den ein dauerhafter Transfer von Forschungsergebnissen und Erfahrungen zwischen dem Forschungsinstitut und der Wirtschaft gewährleistet wurde sowie die hohe praktische Relevanz der Forschungsfrage.

6 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Entsprechend dem begutachteten und bewilligten Forschungsantrag wurde die Bearbeitung des Projektes im Rahmen der beantragten Mittel erfolgreich abgeschlossen. Der Abschluss des Projektes erfolgte, durch einen verzögerten Projektstart begründet, am 31.01.2023 und damit später als mit der Antragstellung beabsichtigt. Die Verzögerung wurde durch die Forschungsstelle kostenneutral vorgenommen. Die Reaktion der Wirtschaft auf das erstellte Projektergebnis unterstreicht darüber hinaus wie hohe praktische Relevanz der bearbeiteten Forschungsfrage sowie die hohe Güte des erzielten Ergebnisses.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die geleisteten Arbeiten in dem angegebenen Umfang erforderlich waren, um die beschriebenen Ergebnisse zu erzielen. Die Verzögerung gegenüber dem geplanten Projektstart zur Sicherstellung der vorgesehenen AP hinsichtlich Art und Umfang, wurde am 29.06.2022 ordnungsgemäß eine kostenneutrale Verlängerung um drei Monate beantragt, der am 04.08.2022 stattgegeben wurde.

7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für Unternehmen, insbesondere KMU

Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Anwendung zur Analyse des Einsatzpotenzials von Exoskeletten im industriellen Umfeld in den Bereichen der Produktion und Logistik sowie der Handreichung eines individuellen Implementierungsleitfadens unterstützt die anwendenden Unternehmen unmittelbar in der Nutzung von Ergonomie- und Produktivitätsreserven. Nachfolgend wird der Nutzen der Anwendung für produzierende Unternehmen und insbesondere für KMU beschrieben. Dieses wird gefolgt von einer abstrahierten Abschätzung des monetären Nutzens der Anwendung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Es ist jedoch zu beachten, dass insbesondere vor dem Hintergrund weicher Wettbewerbsfaktoren über den direkten monetären Nutzen hinausgehende positive Effekte durch die Nutzung des Forschungsergebnisses erzielt werden. Deren Quantifizierung stellt zum derzeitigen Zeitpunkt auf Grund mangelnder Erfahrungswerte sowie fehlenden Langzeitstudien hinsichtlich des Einsatzes von Exoskeletten eine große Herausforderung dar, welche lediglich eine Abschätzung der Quantifizierung des Wirkzusammenhangs erlaubt.

Der Arbeitsausfall von Mitarbeitenden führt in produzierenden Unternehmen zu hohen Kosten, insbesondere durch Krankheitsbilder wie MSE. (BAuA 2018) Entsprechende Erkrankungen beruhen auf einer Überbeanspruchung von Körperregionen. Vor dem Hintergrund dieser Erkrankungen bildet eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung die wichtigste Voraussetzung, damit Arbeitnehmer bis zur Rente an ihrem Arbeitsplatz tätig sein können. (Schneider et al. 2019) Nur so kann den Herausforderungen des demografischen Wandels sowie dem Mangel an Fachkräften begegnet werden und einem Verlust an Wissen und Arbeitsleistung vorgebeugt werden. (Hahnzog 2014) Durch den krankheitsbedingten Ausfall an Arbeitskräften entstanden allein im Jahr 2017 Kosten in Höhe von 17,2 Mrd. € durch Produktionsausfall sowie 30,5 Mrd. € durch den Ausfall an Bruttowertschöpfung. (BAuA 2018) Exoskelette bieten Potenziale, diese Kosten zu reduzieren. Insbesondere in KMU sind längerfristige ausfällt von Mitabreitenden schwerwiegend, da dieses auf Grund häufig nur eingeschränkt verfügbarer Mitarbeiterkompetenzen mit hohen monetären Risiken assoziiert ist.

Die avisierten Ergebnisse des Forschungsvorhabens SyNExo erleichtern insbesondere für KMU den Einstieg in die Bewertung und den Einsatz von Exoskeletten in industriellen Produktions- und Logistikprozessen. Exoskelette werden als ergonomische Potenzialträger insbesondere in den Bereichen betrachtet, in denen die mittel konventioneller ergonomischer Arbeitsplatzgestaltung an ihre Grenzen stoßen. (Groos et al. 2019) Diese Rahmenbedingungen sind insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung von KMU vorzufinden, in denen Variabilitätseinflüsse und Flexibilitätsanforderungen entsprechenden Präventions- oder Automatisierungsmaßnahmen

entgegenstehen. Auch im Zuge des Fachkräftemangels bieten sich durch den Einsatz von Exoskeletten Wettbewerbsvorteile. Als Teil einer betrieblichen Gesundheitsförderung können sie dabei helfen, sowohl neue Mitarbeiter anzuwerben als auch langfristig im Unternehmen zu halten. (Hey 2014)

Durch das erarbeitete Werkzeug und die begleitenden Handlungsempfehlungen verkürzen sich die Zeit und der Aufwand bei der Einführung von Exoskeletten. Dadurch fördern die Ergebnisse die Verbreitung von Exoskeletten in Unternehmen und Tragen so auch zur Minderung der Belastung von Mitarbeitern im Mittelstand bei. Neben den Mitarbeitenden in KMU, die Exoskelette im Produktiveinsatz verwenden, profitieren darüber hinaus Hersteller von Exoskeletten sowie Planer von Arbeits- und Logistiksystemen von den Ergebnissen des Forschungsvorhabens. Die Ergebnisse führen zu einer verbesserten Kenntnis über wechselseitige Anforderungen sowie einer beschleunigten Adaption und Bewertung der jeweiligen Systeme.

Für die Hersteller der Exoskelette bieten die Forschungsergebnisse ebenfalls Vorteile. Durch das Vorhaben wird die Planung des Einsatzes von Exoskeletten vereinfacht, was dazu beiträgt, die Anwendung dieser Systeme in Produktion und Logistik zu erhöhen. Insgesamt zeichnet sich ab, dass dieser Markt im Wachstum begriffen ist. Das weltweite Exoskelett-Marktvolumen wird vom unabhängigen Institut BIS Research für 2026 auf 4,65 Mrd. USD geschätzt. (BIS Research 2017) Eine Prognose von ABI-Research für das Jahr 2028 sagt sogar ein Volumen von \$5,8 Mrd. USD voraus. (ABI Research 2019) Diese Vorhersagen unterstreichen die Bedeutung eines bevorstehenden Technologiesprungs. Es können Parallelen zu der Technologie der Leichtbauroboter und Mensch-Roboter-Interaktion gezogen werden, die vor einigen Jahren mit ähnlichen Entwicklungen und Fragestellungen konfrontiert wurde. Bei den Leichtbaurobotersystemen stellte ebenfalls die richtige Auswahl des Anwendungsfalles sowie die komplexe Planung und Integration in den Unternehmen eine große Herausforderung und ein Hemmnis für die Verbreitung dar. Dieses konnte jedoch mithilfe von Planungssystematiken und Handlungsempfehlungen abgebaut werden. (Weßkamp et al. 2019) Durch das Forschungsvorhaben können ähnliche Ergebnisse im Bereich der Exoskelette erzielt werden.

8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Forschungsergebnisse wurden sowohl während als auch nach der Projektlaufzeit der Wirtschaft und der breiten Öffentlichkeit durch diverse Maßnahmen zugänglich gemacht. Der Zugang zu den Projektergebnissen ist dabei diskriminierungs- sowie kostenfrei und soll durch die niederschwellige Aufbereitung insbesondere für KMU eine entsprechende Breitenwirkung ermöglichen. Die frühzeitige Sicherstellung der Umsetzbarkeit der Ergebnisse in der industriellen Praxis steht im Vordergrund der Transfermaßnahmen des Forschungsvorhabens.

Die Bereitstellung erfolgt über verschiedene Medien und Wege. Dadurch wird es interessierten Unternehmen ermöglicht, die gewonnenen Erkenntnisse mit geringem Aufwand in der betrieblichen Praxis zu nutzen. Das Forschungsvorhaben stößt in der Industrie bereits auf reges Interesse und Bereitschaft zur aktiven Mitarbeit. Durch die Einbindung von Netzwerkpartnern wie NIRO in den Entwicklungsprozess, bspw. bei der Durchführung eines Vorabworkshops mit knapp 30 Teilnehmern zum Kennenlernen von Exoskeletten sowie zur Definition erster Anforderungen, wird die Reichweite der Forschung multipliziert. Die Identifikation von potenziellen Anwendungsfeldern und die Entwicklungsarbeit wurden durch einen regelmäßigen Austausch mit unterschiedlichen Industriebranchen durchgeführt. Die Branchen erstrecken sich von der Elektronikfertigung über die Großgerätemontage und Bauindustrie bis hin zur Logistik. Dabei sind in der Logistik aktuell vor allem Exoskelette zum Heben und Tragen von besonderem Interesse. In anderen Bereichen liegt der Fokus voraussichtlich auf der Unterstützung in ergonomisch kritischen Haltungen. Es wird darüber hinaus angestrebt, die Ergebnisse in weiteren Forschungsvorhaben zu adaptieren und auch für Unternehmen außerhalb der Produktion und Logistik nutzbar zu machen, wie z. B. im Handwerk.

Die Gewährleistung einer branchenübergreifenden industriellen Verwendbarkeit der Systematik erfolgt u. a. durch die Repräsentation unterschiedlicher Branchen und Leistungsprofile im PA mit verschiedenen Produktionsbedingungen und Betriebsgrößen, wie in Tabelle 12 dargestellt. Über die Einbindung des PA hinaus werden Netzwerke für den Wissenstransfer genutzt. Hierdurch können Ergebnisse in ständigem Austausch mit Mitgliedern praxisnah diskutiert werden, um die Qualität und Eignung insbesondere für KMU sicherzustellen.

Tabelle 12: Zusammensetzung und Kompetenzen des PA

Anwenderunternehmen (Zielgrößen- und Anforderungsdefinitionen, Validierung)	
Audi AG	Automobil OEM
Babymarkt.de GmbH	Versandhandel für Baby-Erstausrüstung
Brock GmbH	Kehrtechnik (KMU)
CleanControlling GmbH	Technische Sauberkeit (KMU)
DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH	Instandhaltung von Schienenfahrzeugen
Goldbeck Bauelemente Bielefeld SE	Bauindustrie
Goldbeck Bauelemente Treuen SE	Bauindustrie
Insta GmbH	Gebäudesystemtechnik (KMU)
itturi GmbH	Bekleidungsindustrie (KMU)
KHS GmbH	Abfüll- und Verpackungslösungen
Miele GmbH & Cie. KG	Weißes Ware
Mosaic GmbH	Unternehmensberatung (KMU)
MPS Verpackungsdienstleistungen GmbH	Logistikdienstleister (KMU)
scalefit UG	Biomechanische Arbeitsplatzanalyse (KMU)
Schweizerische Bundesbahnen AG	Eisenbahnunternehmen
SIBA GmbH	Elektrosicherungen
Siemens AG	Technologiekonzern
Stahl- und Metallbau Viet GmbH	Stahl- u. Metallbau (KMU)
TopStar GmbH	Bürostuhlproduzent (KMU)
Wiese Tischlerei + Brandschutzbau GmbH	Brandschutzlösungen und Fassaden (KMU)
Wilo SE	Pumpensystemhersteller
Entwicklungsunternehmen (Unterstützung bei Anforderungsdefinition, Validierung)	
GBS German Bionic Systems GmbH	Exoskelett Hersteller (KMU)
Hunic GmbH	Exoskelett Hersteller (KMU)
Laevo B.V.	Exoskelett Hersteller (KMU)
Ottobock SE & Co. KGaA	Exoskelett Hersteller
Netzwerk und Verbände (Ergebnisvalidierung und -transfer)	
Netzwerk Industrie RuhrOst e.V.	Netzwerk Industrie RuhrOst e. V. (KMU)
REFA-Institut e.V.	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (KMU)
Verband der Metall- und Elektroindustrie Baden-Württemberg e. V. (Südwestmetall)	Verband der Metall- und Elektroindustrie Baden-Württemberg e.V. (KMU)

8.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Im Rahmen des Bewilligungszeitraums wurden umfangreiche Transfermaßnahmen durchgeführt, die in Tabelle 13 zusammenfassend dargestellt sind. Im nachfolgenden Kapitel wird der Ergebnistransfer in die Wirtschaft abschließend bewertet und in einem Ausblick ein Überblick über noch über den Projektzeitraum hinaus anstehende Transfermaßnahmen gegeben.

Tabelle 13: Übersicht über im Rahmen des Projektes durchgeführten Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum
Sitzungen des PA	• Ermittlung von Anforderungen • Inhaltliche Diskussion des Projektfortschritts • Sicherstellung von Praxisorientierung und Akzeptanz • Validierung entwickelter Methoden und Konzepte • Verbreitung der Projektergebnisse • Vermittlung weiterer für die erfolgreiche Einführung von Exoskeletten erforderlichen Kompetenzen	Sowohl in Präsenz im Labor der Forschungsstelle sowie digital, ca. halbjährlich (Kick-Off, Meilensteine, Abschluss) sowie für einen gemeinsamen Workshop zum Change Management bei der Einführung von Exoskeletten in produzierende Industrieunternehmen	1.PA: 30.06.2021 2.PA: 09.12.2021 3.PA: 28.06.2022 4.PA: 14.12.2022 zus. Workshop: 09.08.2022
Experteninterviews zum Einsatz von Exoskeletten mit 21 Probanden aus dem PA	Ermittlung von Anforderungen und Rahmenbedingungen sowie Zielgrößen und praktischer Erfahrungen	Digital als Web-/ Videokonferenz	10.08.2021 – 15.10.2021
Information über die Institutshomepage	• Verbreitung von Projektfortschritt und Projektergebnissen • Bereitstellung des im Rahmen des Projektes entwickelten Webtools	Webbasiert	Fortlaufend
Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten zu Themen des Forschungsvorhabens und Transfer in die Lehre	• Heranführung von Studierenden an ein selbständiges und wissenschaftliches Arbeiten • Erarbeitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen im Projektkontext	• Betreuung der studentischen Arbeiten durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter und Professoren der Forschungsinstitute • Einbindung der Projektergebnisse in die Veranstaltungsreihe	Fortlaufend

	• Wissenstransfer in die Lehre durch die Einbindung von Projektergebnissen in Lehrveranstaltungen	„Gestaltung von Produktionssystemen“ (TU Dortmund)	
Vorstellung auf Tagungen, Kongressen, Konferenzen und Industrie- und Arbeitskreisen	• Vortrag und wissenschaftlicher Bericht von Projektergebnissen für Forschung und Industrie • Kontaktaufnahme zu interessierten Unternehmen und Diskussion der Ergebnisse	AWF-Arbeitsgruppe, Informationsveranstaltungen des NIRO, GfA Frühjahrskongress 2022	Fortlaufend, u.a. zum GfA-Kongress am 03.03.2022
Veröffentlichung in Fachzeitschriften und Journals	Publikation der Ergebnisse für Industrie und Forschung	1) Tagungsband zum 68. GfA-Frühjahresskongress 2) Konferenzband zum 8. MHI Fachkolloquium 3) Vorbereitung der Publikation von Studienergebnissen in einem internationalen Fachjournal, wie der Applied Ergonomics	1) Publikation in 2022 2/3) Publikation in 2023
Zwischen- und Abschlussberichte	Information über aktuellen Projektfortschritt	• Homepage der BVL • Projekthomepage	Fortlaufend
Pilotartige Anwendung der Projektergebnisse	• Validierung und Optimierung der Projektergebnisse • Transfer der Projektergebnisse in Unternehmen	Durchgeführt bei drei Unternehmen des PA (siehe AP 6)	Drei Termine mit den Unternehmen in Q4/2022

8.2 Transfermaßnahmen nach Projektende und Bewertung

Die Projektergebnisse wurden nach Abschluss des Vorhabens sowie in regelmäßigen Abständen während der Projektlaufzeit über die institutseigene Internetseite und Projekthomepage veröffentlicht. Diese umfasst die während der Projektlaufzeit entstandenen Veröffentlichungen sowie den Verweis auf den diskriminierungsfrei zugänglichen Abschlussbericht. Um von Beginn an innerhalb des Forschungsvorhabens den praktischen Bezug der erarbeiteten Forschungsergebnisse zu gewährleisten, wurden in der ersten Sitzung des PA, Anforderungen an die Kooperation aufgenommen. Konkreter wurden die Erwartungen, Zielsetzungen sowie Möglichkeiten im Rahmen des Forschungsprojektes definiert und für die nächsten Schritte vorbereitet. So konnte sichergestellt

werden, dass die Ergebnisse nach Ende des Forschungsvorhabens die wesentlichen industriellen Anforderungen und Rahmenbedingungen erfüllen. Zudem wurde und wird durch die Vorstellung und Diskussion in den Unternehmen und Netzwerken der Bekanntheitsgrad des Forschungsvorhabens erhöht und die Unternehmen in die Entwicklungsarbeit eingebunden.

Darüber hinaus werden ergänzende Handlungsempfehlungen interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Diese umfassen die ausführliche Dokumentation der Forschungsergebnisse einschließlich zusätzlicher Informationen zur Auswahl und Einsatz von Exoskeletten, die im erarbeiteten Werkzeug nicht untergebracht werden konnten. Dadurch wird es potenziellen Anwendern ermöglicht, auf die erzielten Ergebnisse vollumfänglich zuzugreifen und sie in die unternehmerische Praxis zu übertragen. Um Kosten für die anwendenden Unternehmen zu vermeiden, wurde das entwickelte Werkzeug als lizenzfreie Webapplikation entwickelt. Dies ermöglicht den Unternehmen einen unmittelbaren Einsatz ohne zusätzliche finanzielle Aufwendungen.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt insbesondere ermittelte Anforderungen der Anwender an Exoskelette werden mit den beteiligten Herstellern von Exoskeletten geteilt, damit bestehende Produkte weiter verbessert werden können. Aus der Analyse der Anwendungsfelder können neue Potenziale aufgedeckt werden, die noch von keinem Exoskelett ausgeschöpft werden. Hier bieten sich für die Hersteller Ansätze zur Entwicklung neuer, praxisorientierter Systeme.

Nach Abschluss des Vorhabens werden die Forschungsergebnisse in Form der entwickelten Webapplikation einschließlich ergänzender Handlungsempfehlungen dauerhaft auf der Projekt-Homepage frei zugänglich zur Verfügung gestellt und über die einschlägigen Netzwerke beworben. Des Weiteren fließen die gewonnenen Erkenntnisse in geeigneter Form in die Aus- und Weiterbildung, beispielsweise in Form von Fallbeispielen in Vorlesungen, ein. Ferner wird das Forschungsergebnis durch ein Schulungs- und Beratungsangebot unterstützt, wie in Tabelle 14 aufgezeigt.

Neben den bereits im Rahmen des Forschungsprojektes entstandenen Transfermaßnahmen sind weitere wissenschaftliche Beiträge in der Umsetzung. Hierzu zählt insbesondere die Publikation der Studienergebnisse zu den Auswirkungen des Einsatzes von Exoskeletten auf die Mitarbeiterproduktivität sowie Bewegungsmuster. Konkret wird in diesem Zusammenhang neben einem Beitrag in Konferenzband zum 8. MHI Fachkolloquium 2023 in Chemnitz mit dem Titel „Exploratory pilot study investigating effects of exoskeletons on movement patterns“ (Jansing et al. 2023) eine Veröffentlichung von Studienergebnissen in einem Fachjournal, wie der Applied Ergonomics angestrebt. Entsprechende Veröffentlichungen stellen einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Gemeinschaft dar und ermöglichen eine inhaltlich fundierte Auseinandersetzung und Wiederverwendung der erarbeiteten Ergebnisse durch andere Forschungsstellen.

Tabelle 14: Übersicht der nach Projektlaufzeit geplanten Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Termin
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Industrie	Vorstellungen der Projektergebnisse bei Unternehmen und Verbänden	fortlaufend und auf Anfrage
Schulung und Befähigung	Praxisnahe Aufbereitung der Ergebnisse zur Durchführung von Workshops	Bspw. Angebot eines Workshops „Exoskelette in Produktions- und Logistiksystemen“ im Rahmen der NIRO-Akademie	ab Q3/2023
	Aufbereitung der Ergebnisse zur Einbindung in die universitäre Lehre	Transfer der Ergebnisse in die Vorlesungen Arbeitssystemgestaltung 1 und 2	Sommersemester 2023
	Erarbeitung von begleitenden Unterlagen zur Entfaltung einer Breitenwirkung im Rahmen von Netzwerkveranstaltungen	Bspw. in Zusammenarbeit mit der Handwerkskammer Dortmund im Rahmen der Digitalen Woche Dortmund	Ab Q2/2023
Wissenschaftliche Publikationen	Internationaler Ergebnistransfer	Publikation, z.B. in Applied Ergonomics oder als Konferenzbeitrag zum 8. MHI Fachkolloquium mit Publikation der Ergebnisse im Konferenzband	Q3/2023 und nachfolgend
Beratung von Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Industrie	Verwendung der Forschungsergebnisse in Industrieprojekten	fortlaufend auf Anfrage

Anhand der umgesetzten und geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist ersichtlich, dass die angestrebten Transferziele erreicht werden konnten. Dabei wurden die Ergebnisse sowohl interessierten Wirtschaftsunternehmen zur Verfügung gestellt, als auch als neuer Stand der Technik anderen Forschungseinrichtungen in geeigneter Form. Darüber hinaus fanden die Forschungsergebnisse Einzug in die universitäre Lehre. Das angestrebte Transferkonzept wurde somit erfolgreich umgesetzt und wird durch die noch laufenden Maßnahmen über das Ende der Projektlaufzeit hinaus ergänzt.

9 Literaturverzeichnis

- ABI Research (2019): Exoskeletons for Industrial Use Cases. Application Analysis Report (AN-5034). Oyster Bay, NY: ABI Research.
- Adams, William C. (2015): Conducting Semi-Structured Interviews. In: Kathryn E. Newcomer, Harry P. Hatry und Joseph S. Wholey (Hg.): Handbook of Practical Program Evaluation. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, S. 492–505.
- Asbeck, Alan T.; Rossi, Stefano M.M. de; Galiana, Ignacio; Ding, Ye; Walsh, Conor J. (Hg.) (2014): Stronger, Smarter, Softer: Next-Generation Wearable Robots (21).
- Ates, Serdar; Haarman, Claudia J. W.; Stienen, Arno H. A. (2017): SCRIPT passive orthosis: design of interactive hand and wrist exoskeleton for rehabilitation at home after stroke. In: *Auton Robot* 41 (3), S. 711–723.
- Baltrusch, S. J.; van Dieën, J. H.; et al. (2018): The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. In: *Appl Ergon* 72, S. 94–106.
- Baltrusch, Saskia J.; van Dieen, Jaap H.; van Bennekom, Coen A.M.; Houdijk, Han (2020): Testing an Exoskeleton That Helps Workers With Low-Back Pain: Less Discomfort With the Passive SPEXOR Trunk Device. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 27 (1), S. 66–76. DOI: 10.1109/mra.2019.2954160.
- Bär, Mona; Steinhilber, Benjamin; Rieger, Monika A.; Luger, Tessy (2021): The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton – A systematic review and meta-analysis. In: *Applied Ergonomics* 94, S. 103385. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103385.
- Barnum, Carol M. (2011): Usability Testing Essentials. Ready, Set...Test!: Elsevier.
- Bartenbach, Volker; Schmidt, Kai; Naef, Matthias; Wyss, Dario; Riener, Robert (2015): Concept of a soft exosuit for the support of leg function in rehabilitation. In: Haoyong Yu (Hg.): IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2015). Singapore, 11 - 14 August 2015, S. 125–130.
- BAuA (2018): Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - Berichtsjahr 2017. 1. Auflage. Hg. v. BMAS. Bundesministerium für Arbeit und Soziales. Dortmund/Berlin/Dresden.
- BAuA (2019): Gefährdungsbeurteilung bei physischer Belastung - die neuen Leitmerkmalmethoden (LMM). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Bednorz, Nicole; Kinne, Semhar; Kretschmer, Veronika (2019): Ergonomieunterstützung in der Logistik. Industrieller Einsatz von Exoskeletonen an Palettier- und Kommissionierarbeitsplätzen zur körperlichen Entlastung von Mitarbeitern. In: *GfA-Frühjahrskongress* (B 4).

- Beil, Jonas; Perner, Gernot; Asfour, Tamim (2015): Design and control of the lower limb exoskeleton KIT-EXO-1. In: Haoyong Yu (Hg.): IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2015). Singapore, 11 - 14 August 2015, S. 119–124.
- BGHM (2017): Einsatz von Exoskeletten an (gewerblichen) Arbeitsplätzen - BGHM FAQ-Liste. Fach-Information. Mainz: Berufsgenossenschaft Holz und Metall.
- BGHM (2019): Erprobungsversion einer Checkliste für den betrieblichen Einsatz von Exoskeletten als personenbezogene Maßnahme (PSA). Fach-Information. Mainz: Berufsgenossenschaft Holz und Metall.
- BIS Research (2017): Global Wearable Robotic Exoskeleton Market. Analysis and Forecast 2017-2026 (AD030A). Fremont, CA: BIS Research Inc.
- Blank, Renate (2011): Gruppendiskussionsverfahren. In: Gabriele Naderer, Eva Balzer, Bernad Batinic, Florian Bauer, Renate Blank, Julia David et al. (Hg.): Qualitative Marktforschung in Theorie und Praxis. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 289–312.
- Bloor, Michael; Frankland, Jane; Thomas, Michelle; Robson, Kate (2001): Focus groups in social research. London: Sage (Introducing qualitative methods).
- Bock, Sander de; Ghillebert, Jo; Govaerts, Renée; Tassignon, Bruno; Rodriguez-Guerrero, Carlos; Crea, Simona et al. (2022): Benchmarking occupational exoskeletons: An evidence mapping systematic review. In: *Applied Ergonomics* 98, S. 103582. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103582.
- Boehm, B. W. (1984): Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications. In: *IEEE Softw.* 1 (1), S. 75–88. DOI: 10.1109/MS.1984.233702.
- Bogue, Robert (2009): Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. In: *Industrial Robot: An International Journal* 36 (5), S. 421–427. DOI: 10.1108/01439910910980141.
- Bornmann, Jonas; Schirrmeister, Benjamin; Parth, Torsten; Gonzalez-Vargas, Jose (2020): Comprehensive development, implementation and evaluation of industrial exoskeletons. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 6 (2), Artikel 20202001. DOI: 10.1515/cdbme-2020-2001.
- Bosch, Tim; van Eck, Jennifer; Knitel, Karlijn; Looze, Michiel de (2016): The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. In: *Applied Ergonomics* 54, S. 212–217. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.12.003.

- Brooke, John (1996): SUS. A 'Quick and Dirty' Usability Scale. In: Patrick W. Jordan, B. Thomas, Ian Lyall McClelland und Bernard Weerdmeester (Hg.): Usability Evaluation In Industry.
- Carr, Christopher E.; Newman, Dava J. (2017): Exoskeleton energetics: Implications for planetary extravehicular activity. In: 2017 IEEE Aerospace Conference. 4-11 March 2017. Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, S. 1–14.
- Corlett, E. N.; Bishop, R. P. (1976): A technique for assessing postural discomfort. In: *Ergonomics* 19 (2), S. 175–182. DOI: 10.1080/00140137608931530.
- Crowell, Harrison P.; Park, Joon-Hyuk; Haynes, Courtney A.; Neugebauer, Jennifer M.; Boynton, Angela C. (2019): Design, Evaluation, and Research Challenges Relevant to Exoskeletons and Exosuits: A 26-Year Perspective From the U.S. Army Research Laboratory. In: *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7 (3-4), S. 199–212.
- Dahmen, Christian; Constantinescu, Carmen (2020): Methodology of Employing Exoskeleton Technology in Manufacturing by Considering Time-Related and Ergonomics Influences. In: *Applied Sciences* 10 (5), S. 1591. DOI: 10.3390/app10051591.
- Dahmen, Christian; Hefferle, Michael (2018): Application of ergonomic assessment methods on an exoskeleton centered workplace. In: *Proceedings of the XXXth Annual Occupational Ergonomics and Safety Conference, Pittsburgh, PA, USA*.
- Dahmen, Christian; Wöllecke, Frank; Constantinescu, Carmen (2018): Challenges and Possible Solutions for Enhancing the Workplaces of the Future by Integrating Smart and Adaptive Exoskeletons. In: *Procedia CIRP* 67, S. 268–273. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.211.
- Dewi, Nugrahaning Sani; Komatsuzaki, Masakazu (2018): On-body personal assist suit for commercial farming: Effect on heart rate, EMG, trunk movements, and user acceptance during digging. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 68, S. 290–296. DOI: 10.1016/j.ergon.2018.08.013.
- DGUV (2013): Belastungen für Rücken und Gelenke - was geht mich das an? In: *DGUV Information* (208-033). Online verfügbar unter https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Gesetze_Vorschriften/Informationen/208-033.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2023.
- DGUV (2019): Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Hg. v. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Fachbereich Aktuell). Online verfügbar unter <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/fachbereich-aktuell/handel-und-logistik/3579/fbhl-006-einsatz-von-exoskeletten-an-gewerblichen-arbeitsplaetzen>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

- DGUV (2020): Checkliste für den betrieblichen Einsatz von Exoskeletten. In: *Fachbereich AKTUELL - Sachgebiet Physische Belastungen* (FBHL-020). Online verfügbar unter https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Fachthemen/Fachinformationen/FI-0059_Einsatz-von-Exoskeletten-an-gewerblichen-Arbeitsplaetzen.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2023.
- Döring, Nicola; Pöschl-Günther, Sandra (2016): Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Unter Mitarbeit von Sandra Pöschl-Günther. 5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage 2016. Berlin, Heidelberg: Springer (SpringerLink Bücher).
- Ebrahimi, Amir (2017): Stuttgart Exo-Jacket: An exoskeleton for industrial upper body applications. In: 10th International Conference on Human System Interactions (HSI). Ulsan, South Korea 17. - 19. Juli 2017. Piscataway, NJ: IEEE, S. 258–263.
- ISO/TR 16982:2002: Ergonomics of human-system interaction — Usability methods supporting human-centred design.
- Exoskeleton Report LLC (2022): Exoskeleton Catalog. Online verfügbar unter <https://exoskeletonreport.com/productcategory/>, zuletzt geprüft am 01.08.2022.
- Fellner, Werner (2021): Normung für alle. Eine Einführung plus CE für Druckgeräte und Maschinen. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Flor, Raquel; Gaspar, Jacqueline; Fujão, Carlos; Nunes, Isabel L. (2021): How Workers Perceive LAEVO Exoskeleton Use in Non-cyclic Tasks. In: Isabel L. Nunes (Hg.): *Advances in Human Factors and System Interactions*, Bd. 265. Cham: Springer International Publishing, S. 147–154.
- Fox, Stephen; Aranko, Olli; Heilala, Juhani; Vahala, Päivi (2020): Exoskeletons. Comprehensive, comparative and critical analyses of their potential to improve manufacturing performance. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 31 (6), S. 1261–1280. DOI: 10.1108/JMTM-01-2019-0023.
- Frenz, Wolfgang (1963): Die Messung der Produktivität und ihr Vergleich. In: Wolfgang Frenz (Hg.): *Beitrag zur Messung der Produktivität und deren Vergleich auf der Grundlage technischer Mengengrößen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, 1228), S. 27–45.
- Fritzsche, Lars; Galibarov, Pavel E.; Gärtner, Christian; Bornmann, Jonas; Damsgaard, Michael; Wall, Rudolf et al. (2021): Assessing the efficiency of exoskeletons in physical strain reduction by biomechanical simulation with AnyBody Modeling System. In: *Wearable Technol.* 2. DOI: 10.1017/wtc.2021.5.

- Fuchs, J.; Rabenberg, M.; Scheidt-Nave, C. (2013): Prävalenz ausgewählter muskuloskelettaler Erkrankungen: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 56 (5-6), S. 678–686.
- Giustetto Ambra; Vieira Dos Anjos Fabio; Gallo Francesca; Monferino Rossella; Cerone Giacinto Luigi; Di Pardo Massimo et al. (2021): Investigating the effect of a passive trunk exoskeleton on local discomfort, perceived effort and spatial distribution of back muscles activity. In: *Ergonomics*, 64, S. 1379–1392. DOI: 10.37473/fic/10.1080/00140139.2021.1928297.
- Gläser, Jochen; Laudel, Grit (2010): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. 4. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag.
- Glitsch, Ulrich; Bäuerle, Ines; Hertrich, Lisa; Heinrich, Kai; Liedtke, Martin (2019): Biomechanische Beurteilung der Wirksamkeit von rumpfunterstützenden Exoskeletten für den industriellen Einsatz. In: *Z. Arb. Wiss.* 21 (5), S. 456.
- Golabchi, Ali; Chao, Andrew; Tavakoli, Mahdi (2022): A Systematic Review of Industrial Exoskeletons for Injury Prevention: Efficacy Evaluation Metrics, Target Tasks, and Supported Body Postures. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22 (7). DOI: 10.3390/s22072714.
- Grasmücke, Dennis; Zierjacks, Amrei; Jansen, Oliver; Fisahn, Christian; Sczesny-Kaiser, Matthias; Wessling, Martin et al. (2017): Against the odds: what to expect in rehabilitation of chronic spinal cord injury with a neurologically controlled Hybrid Assistive Limb exoskeleton. A subgroup analysis of 55 patients according to age and lesion level. In: *Neurosurgical focus* 42 (5), E15.
- Grazi, Lorenzo; Trigili, Emilio; Proface, Giulio; Giovacchini, Francesco; Crea, Simona; Vitiello, Nicola (2020): Design and Experimental Evaluation of a Semi-Passive Upper-Limb Exoskeleton for Workers With Motorized Tuning of Assistance. In: *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering* 28 (10), S. 2276–2285. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3014408.
- Groos, Sandra; Fuchs, Marie; Kluth, Karsten (2019): Belastungs- und Beanspruchungsanalyse beim Einsatz eines passiven Exoskelettes zur Bein- und Rückenunterstützung während simulierter Montagetätigkeiten. In: *Z. Arb. Wiss.* 54, S. 212.
- Gudehus, Timm (2012): Logistik 2. Netzwerke, Systeme und Lieferketten. 4. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Gull, Muhammad Ahsan; Bai, Shaoping; Bak, Thomas (2020): A Review on Design of Upper Limb Exoskeletons. In: *Robotics* 9 (1), S. 16. DOI: 10.3390/robotics9010016.
- Hahnzog, Simon (Hg.) (2014): Betriebliche Gesundheitsförderung. Das Praxishandbuch für den Mittelstand. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hegner, Marcus (2003): Methoden zur Evaluation von Software. Bonn (IZ-Arbeitsbericht, Bd. 29).

- Helfferich, Cornelia (2009): Die Qualität qualitativer Daten. Wiesbaden: Springer VS.
- Helfferich, Cornelia (2022): Leitfaden- und Experteninterviews. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer VS, S. 875–892.
- Hempfen, Sabine; Finke, Yvonne; Deuse, Jochen (2009): Ergonomie in logistischen Prozessen. In: Kurt Landau (Hg.): Produktivität im Betrieb. Tagungsband der GfA-Herbstkonferenz. Millstadt, Österreich, 23.-25.09.2009. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA). Stuttgart: Ergonomia Verlag, S. 259–263.
- Hensel, R.; Steinhilber, B. (2018): Bewertung von Exoskeletten für industrielle Arbeitsplätze. Mehrwert durch eine kombinierte Evaluation mittels Laboruntersuchung und Felderprobung. In: Robert Weidner und Athanasios Karafillidis (Hg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Dritte transdisziplinäre Konferenz: Hamburg 2018. Hamburg, Deutschland: Helmut-Schmidt-Universität, S. 107–115.
- Hensel, Ralph; Keil, Mathias (2018): Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. In: *Z. Arb. Wiss.* 72 (4), S. 252–263.
- Hensel, Ralph; Keil, Mathias (2019): Subjective Evaluation of a Passive Industrial Exoskeleton for Lower-back Support: A Field Study in the Automotive Sector. In: *IJSE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7 (3-4), S. 213–221. DOI: 10.1080/24725838.2019.1573770.
- Hensel, Ralph; Keil, Mathias; Sielaff, Bastian; Hofmann, Norman; Mayer, Tobias A.; Maiwald, Christian (2020): Auswirkungen der Nutzung von Exoskeletten auf die zeitliche Bewertung manueller Arbeitsabläufe mit dem MTM-Prozessbausteinsystem. In: *Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020*, Beitrag B.8.4.
- Herczeg, Michael (2018): Software-Ergonomie. Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme. 4. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg.
- Hey, Patrick (2014): Betriebliche Gesundheitsförderung führt zu erfolgreichem Personalmarketing. In: Simon Hahnzog (Hg.): Betriebliche Gesundheitsförderung. Das Praxishandbuch für den Mittelstand. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 51–58.
- Hoffmann, Nicals; Argubi-Wollesen, Andreas; Linnenberg, Christiane; Weidner, Robert (2020): Towards a Framework for Evaluating Exoskeletons. In: Jens Peter Wulfsberg, Wolfgang Hintze und Bernd-Arno Behrens (Hg.): Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), 30. September - 2. Oktober 2019, Hamburg. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 441–450.

- Hoffmann, Niclas; Prokop, Gilbert; Weidner, Robert (2022): Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications. In: *Ergonomics* 65 (2), S. 276–295. DOI: 10.1080/00140139.2021.1970823.
- Hoffmann, Niclas; Ralfs, Lennart; Weidner, Robert (2021): Leitmerkmale und Vorgehen einer Implementierung von Exoskeletten. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (7-8), S. 525–528. DOI: 10.1515/zwf-2021-0099.
- Hold, Philipp; Ranz, Fabian; Holly, Fabian; Cato, Marim; Markis, Alexandra; Oberweger, Andreas; Baumann, Wolfgang M. (2020): Exoskelette in Produktion und Logistik. Grundlagen, Morphologie und Vorgehensweise zur Implementierung. Hg. v. Fraunhofer Austria Research GmbH.
- Hompel, Michael; Sadowsky, Volker; Beck, Maria (2011): Kommissionierung. Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- IFAA (2019): Exoskelette. Physische Assistenzsysteme an Produktionsarbeitsplätzen. Unter Mitarbeit von Sebastian Terstegen und Stephan Sandrock. Düsseldorf: Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e. V.
- Ippolito, Daniele; Constantinescu, Carmen; Riedel, Oliver (2020): Holistic planning and optimization of human-centred workplaces with integrated Exoskeleton technology. In: *Procedia CIRP* 88, S. 214–217. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.038.
- Jansing, Steffen; Vakhnina, Elena; Weißkamp, Vanessa; Deuse, Jochen (2023): Exploratory pilot study investigating effects of exoskeletons on movement patterns. In: *8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik (MHI e.V.)*.
- Kadota, Kazuo; Akai, Masao; Kawashima, Kenji; Kagawa, Toshiharu (2009): Development of power-assist robot arm using pneumatic rubber muscles with a balloon sensor. In: *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* 18 (1), S. 546–551.
- Kaupe, Victor; Feldmann, Carsten; Lucas, Martin (Hg.) (2021): Exoskelette in der Intralogistik. Erfolgreich implementieren und Prozesse optimieren. Springer Fachmedien Wiesbaden. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler.
- Kim, Sunwook; Nussbaum, Maury A.; Smets, Marty; Ranganathan, Shyam (2021): Effects of an arm-support exoskeleton on perceived work intensity and musculoskeletal discomfort: An 18-month field study in automotive assembly. In: *American journal of industrial medicine* 64 (11), S. 905–914. DOI: 10.1002/ajim.23282.

- Kinali, Gulsah; Kara, Sadık; Yıldırım, Mustafa Selman (2016): Electromyographic analysis of an ergonomic risk factor: overhead work. In: *Journal of physical therapy science* 28 (6), S. 1924–1927. DOI: 10.1589/jpts.28.1924.
- Kinne, Semhar; Kretschmer, Veronika; Bednorz, Nicole (2020): Palletising Support in Intralogistics: The Effect of a Passive Exoskeleton on Workload and Task Difficulty Considering Handling and Comfort. In: Tareq Ahram (Hg.): *Proceedings of the 2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2019): Future Trends and Applications*, 16-18 September 2019, Universität der Bundeswehr München, Bd. 1026: Springer, S. 273–279.
- Koopman, Axel S.; Kingma, Idsart; Faber, Gert S.; Looze, Michiel P. de; van Dieën, Jaap H. (2019): Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. In: *Journal of Biomechanics* 83, S. 97–103. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.033.
- Kozinc, Žiga; Baltrusch, Saskia; Houdijk, Han; Šarabon, Nejc (2020): Reliability of a battery of tests for functional evaluation of trunk exoskeletons. In: *Applied Ergonomics* 86, S. 103117. DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103117.
- Kozinc, Žiga; Baltrusch, Saskia; Houdijk, Han; Šarabon, Nejc (2021): Short-Term Effects of a Passive Spinal Exoskeleton on Functional Performance, Discomfort and User Satisfaction in Patients with Low Back Pain. In: *Journal of occupational rehabilitation* 31 (1), S. 142–152. DOI: 10.1007/s10926-020-09899-7.
- Kozłowski, Krzysztof; Tokhi, Mohammad O.; Virk, Gurvinder S. (2014): *Mobile Service Robotics*. Singapore: World Scientific Publishing Company.
- La Tejera, Javier A. de; Bustamante-Bello, Rogelio; Ramirez-Mendoza, Ricardo A.; Izquierdo-Reyes, Javier (2021): Systematic Review of Exoskeletons towards a General Categorization Model Proposal. In: *Applied Sciences* 11 (1), S. 76. DOI: 10.3390/app11010076.
- Lee, Heedon; Kim, Wansoo; Han, Jungsoo; Han, Changsoo (2012): The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13 (8), S. 1491–1497.
- Liebers, F.; Brendler, C.; Latza, U. (2013): Alters- und berufsgruppenabhängige Unterschiede in der Arbeitsunfähigkeit durch häufige Muskel-Skelett-Erkrankungen. Rückenschmerzen und Gonarthrose. In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 56 (3), S. 367–380.
- Looze, Michiel P. de; Bosch, Tim; Krause, Frank; Stadler, Konrad S.; O’Sullivan, Leonard W. (2016): Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. In: *Ergonomics* 59 (5), S. 671–681. DOI: 10.1080/00140139.2015.1081988.

- Lotter, Bruno (2016): Wirtschaftlichkeit und Ergonomie – kein Gegensatz. In: Bruno Lotter, Jochen Deuse und Edwin Lotter (Hg.): Die Primäre Produktion. Ein praktischer Leitfaden zur verlustfreien Wertschöpfung. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 125–141.
- Lotz, Christy A.; Agnew, Michael J.; Godwin, Alison A.; Stevenson, Joan M. (2009): The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 19 (2), S. 331–340. DOI: 10.1016/j.jelekin.2007.08.006.
- Luger, Tessy; Bär, Mona; Seibt, Robert; Rieger, Monika A.; Steinhilber, Benjamin (2023): Using a Back Exoskeleton During Industrial and Functional Tasks-Effects on Muscle Activity, Posture, Performance, Usability, and Wearer Discomfort in a Laboratory Trial. In: *Human factors* 65 (1), S. 5–21. DOI: 10.1177/00187208211007267.
- Maciejasz, Paweł; Eschweiler, Jörg; Gerlach-Hahn, Kurt; Jansen-Troy, Arne; Leonhardt, Steffen (2014): A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. In: *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 11, S. 3.
- Madinei, Saman; Alemi, Mohammad Mehdi; Kim, Sunwook; Srinivasan, Divya; Nussbaum, Maury A. (2020): Biomechanical Evaluation of Passive Back-Support Exoskeletons in a Precision Manual Assembly Task: “Expected” Effects on Trunk Muscle Activity, Perceived Exertion, and Task Performance. In: *Human factors* 62 (3), S. 441–457. DOI: 10.1177/0018720819890966.
- Maurice, Pauline; Ivaldi, Serena; Babic, Jan; Camernik, Jernej; Gorjan, Dasa; Schirrmeister, Benjamin et al. (2020): Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. In: *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering* 28 (1), S. 152–164.
- Meuser, Michael; Nagel, Ulrike (2009): Das Experteninterview — konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage. In: Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 465–479.
- Misoch, Sabina (2019): Qualitative Interviews. 2., erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg.
- Mudie, Kurt; Billing, Daniel; Garofolini, Alessandro; Karakolis, Thomas; LaFiandra, Michael (2022): The need for a paradigm shift in the development of military exoskeletons. In: *European journal of sport science* 22 (1), S. 35–42. DOI: 10.1080/17461391.2021.1923813.
- Nabeshima, Cota; Ayusawa, Ko; Hochberg, Conrad; Yoshida, Eiichi (2018): Standard Performance Test of Wearable Robots for Lumbar Support. In: *IEEE Robot. Autom. Lett.* 3 (3), S. 2182–2189.

- Nielsen, Jakob (2006): Quantitative Studies: How Many Users to Test? Hg. v. Nielsen Norman Group. Online verfügbar unter <https://www.nngroup.com/articles/quantitative-studies-how-many-users/>, zuletzt aktualisiert am 23.06.2021, zuletzt geprüft am 09.05.2023.
- Nielson, Jakob (2000): Why You Only Need to Test with 5 Users. Hg. v. Nielsen Norman Group. Online verfügbar unter <https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5->, zuletzt aktualisiert am 02.09.2022, zuletzt geprüft am 15.11.2022.
- Noonee (2019): Chairless Chair 2.0. Online verfügbar unter <https://www.noonee.com/wp-content/uploads/2019/06/Slider-Neu-Mehr-schaffen-test.png>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2023.
- Otten, Bernward M.; Weidner, Robert; Argubi-Wollesen, Andreas (2018): Evaluation of a Novel Active Exoskeleton for Tasks at or Above Head Level. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (3), S. 2408–2415. DOI: 10.1109/LRA.2018.2812905.
- Ottobock (2022): Paexo Back. Online verfügbar unter <https://paexo.com/paexo-back/>, zuletzt geprüft am 12.04.2022.
- Pesenti, Mattia; Antonietti, Alberto; Gandolla, Marta; Pedrocchi, Alessandra (2021): Towards a Functional Performance Validation Standard for Industrial Low-Back Exoskeletons: State of the Art Review. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (3). DOI: 10.3390/s21030808.
- Peters, M.; Wischniewski, S. (2019): Der Einfluss von Exoskeletten auf die Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. Diskussionspapier, S. 1–11.
- Pickel, Susanne; Pickel, Gert; Lauth, Hans-Joachim; Jahn, Detlef (2009): Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft. Neue Entwicklungen und Anwendungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer VS.
- Polunin, K.; Klöckner, M.; Kuhlenkötter, Bernd; Plegge, C. (2016): Beschreibung bestehender Sicherheitsnormen und fachspezifischer Erkenntnisse bei der Entwicklung von Exoskeletten. In: Robert Weidner (Hg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Zweite Transdisziplinäre Konferenz: Hamburg 2016. Hamburg, S. 307–316.
- Pons, J. L.; Ceres, R.; Caldern, L. (2008): Introduction to Wearable Robotics. In: Jos L. Pons und José L. Pons (Hg.): Wearable robots. Biomechatronic exoskeletons. Chichester, England, Hoboken, NJ: Wiley, S. 1–16.
- Qu, Xishuai; Qu, Chenxi; Ma, Tao; Yin, Peng; Zhao, Ning; Xia, Yumeng; Qu, Shengguan (2021): Effects of an industrial passive assistive exoskeleton on muscle activity, oxygen consumption and subjective responses during lifting tasks. In: *PloS one* 16 (1), e0245629. DOI: 10.1371/journal.pone.0245629.

- Raabe, Margaret E.; Chaudhari, Ajit M. W. (2016): An investigation of jogging biomechanics using the full-body lumbar spine model: Model development and validation. In: *Journal of Biomechanics* 49 (7), S. 1238–1243. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2016.02.046.
- Ralfs, Lennart; Hoffmann, Niclas; Weidner, Robert (2022): Approach of a Decision Support Matrix for the Implementation of Exoskeletons in Industrial Workplaces. In: Thorsten Schüppstuhl, Kirsten Tracht und Annika Raatz (Hg.): *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*. 1st ed. 2022. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer (Springer eBook Collection), S. 165–176.
- REFA (Hg.) (1997): *Methodenlehre der Betriebsorganisation*. München: Hanser.
- Robo-Mate (2016a): Intelligent exoskeleton based on human-robot interaction for manipulation of heavy goods in Europe's factories of the future. Project Final Report. Zürich, CHE: Robo-Mate; European Research CORDIS.
- Robo-Mate (2016b): Passive Arms. Features. Online verfügbar unter <https://www.robomate.eu/passive-arms.html>, zuletzt geprüft am 09.05.2023.
- Rogge, T.; Daub, U.; Ebrahimi, A.; Schneider, U. (2016): Der interdisziplinäre Entwicklungsprozess von aktiv angetriebenen, körpergetragenen Exoskeletonen für die oberen Extremitäten am Beispiel des „Stuttgart Exo-Jacket“. In: *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen - Band zur zweiten transdisziplinären Konferenz 2016*, S. 213–222.
- Schatten, Alexander; Demolsky, Markus; Winkler, Dietmar; Biffl, Stefan; Gostischa-Franta, Erik; Oestreicher, Thomas (2010): *Best Practice Software-Engineering. Eine praxiserprobte Zusammenstellung von komponentenorientierten Konzepten, Methoden und Werkzeugen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verl.
- Schick, Ralf (2018): Einsatz von Exoskeletonen in der Arbeitswelt. In: *Zbl Arbeitsmed* 68 (5), S. 266–269.
- Schmalz, T.; Bornmann, J.; Schirrmeister, B.; Schändlinger, J.; Schuler, M. (2019): Prinzipstudie zur Wirkung eines industriellen Exoskeletts bei Überkopfarbeit. In: *Orthopädie Technik* 70 (6), S. 36–41.
- Schmauder, Martin; Spanner-Ulmer, Birgit (Hg.) (2022): *Ergonomie - Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. 2. Auflage. München: Hanser, Carl.
- Schneider, Julian; Gruchmann, Tim; Brauckmann, Alexander; Hanke, Thomas (2019): Arbeitswelten der Logistik im Wandel: Automatisierungstechnik und Ergonomieunterstützung für eine innovative Arbeitsplatzgestaltung in der Intralogistik. In: Hermeier (Hg.): *Arbeitswelten der Zukunft*, Bd. 21. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (FOM-Edition), S. 51–66.

- Schwartz, Mathilde; Theurel, Jean; Desbrosses, Kévin (2021): Effectiveness of Soft versus Rigid Back-Support Exoskeletons during a Lifting Task. In: *International journal of environmental research and public health* 18 (15), S. 8062. DOI: 10.3390/ijerph18158062.
- ISO/IEC 25010:2011-03: Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von Softwareprodukten (SQuaRE) - Qualitätsmodell und Leitlinien.
- Sommerville, Ian (Hg.) (2018): Software Engineering. 10., aktual. Aufl. Hallbergmoos: Pearson Deutschland (Informatik).
- Spada, Stefania; Ghibaudo, Lidia; Gilotta, Silvia; Gastaldi, Laura; Cavatorta, Maria Pia (Hg.) (2017): Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry (11).
- Spada, Stefania; Ghibaudo, Lidia; Gilotta, Silvia; Gastaldi, Laura; Cavatorta, Maria Pia (2018): Analysis of Exoskeleton Introduction in Industrial Reality: Main Issues and EAWS Risk Assessment. In: Ravindra S. Goonetilleke und Waldemar Karwowski (Hg.): Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Physical Ergonomics and Human Factors, 17.-21. Juli 2017, the Westin Bonaventure Hotel, Los Angeles, California, USA, Bd. 602: Springer, S. 236–244.
- Spitzhirn, Michael; Ullmann, Sascha (2019): Untersuchungen zur Bewegungsvarianz bei der Ausführung von Arbeitsprozessen und deren Integration in das Menschmodell ema. In: *GfA-Frühjahrskongress C.4.4*.
- Steinberg, Ulf; Caffier, Gustav; Schultz, Karin; Jakob, Martina; Behrendt, Sylvia (2007): Leitmerkmalmethode Manuelle Arbeitsprozesse. Erarbeitung und Anwendungserprobung einer Handlungshilfe zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Steinhilber, Benjamin; Luger, Tessa; Schwenkreis, Peter; Middeldorf, Stefan; Bork, Hartmut; Mann, Bernhard et al. (2020): Einsatz von Exosketten im beruflichen Kontext zur Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von arbeitsassoziierten muskuloskelettalen Beschwerden. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM).
- Sylla, Nahema; Bonnet, Vincent; Colledani, Frédéric; Fraisse, Philippe (2014): Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 44 (4), S. 475–481.
- ISO/IEC 25040:2011-03: System und Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von System- und Softwareprodukten (SQuaRE) - Bewertungsprozess.
- Tangen, Stefan (Hg.) (2004): Evaluation and revision of performance measurement systems. Stockholm: Department of Production Engineering, Royal Institute of Technology.

- Tomás-Royo, J. A.; Ducun-Lecumberri, M.; Planas-Lara, A. E.; Arias-Matilla, M. (2022): A Methodology to Assess the Effectiveness and the Acceptance of the Use of an Exoskeleton in a Company. In: Juan C. Moreno (Hg.): Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Robotics (WeRob2020), 13. - 16. Oktober 2020, Bd. 27: Springer, S. 571–575.
- Toxiri, Stefano; Näf, Matthias B.; Lazzaroni, Maria; Fernández, Jorge; Sposito, Matteo; Poliero, Tommaso et al. (2019): Back-Support Exoskeletons for Occupational Use: An Overview of Technological Advances and Trends. In: *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7 (3-4), S. 237–249. DOI: 10.1080/24725838.2019.1626303.
- Tröster, M.; Schneider, U.; Beuernhansl, T.; Rasmussen, J.; Andersen, M. S. (2018): Simulation Framework for Active Upper Limb Exoskeleton. Design Optimization Based on Musculoskeletal Modeling. In: Robert Weidner und Athanasios Karafillidis (Hg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Dritte transdisziplinäre Konferenz: Hamburg 2018. Hamburg, Deutschland: Helmut-Schmidt-Universität, S. 345–353.
- van Engelhoven, Logan; Poon, Nathan; Kazerooni, Homayoon; Barr, Alan; Rempel, David; Harris-Adamson, Carisa (2018): Evaluation of an adjustable support shoulder exoskeleton on static and dynamic overhead tasks. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 62 (1), S. 804–808. DOI: 10.1177/1541931218621184.
- Versteegen, Gerhard (Hg.) (2002): Software Management. Beherrschung des Lifecycles. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer (Xpert.press).
- Vogel, Dita; Funck, Barbara Johanna (2017): Immer nur die zweitbeste Lösung? Protokolle als Dokumentationsmethode für qualitative Interviews. *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, Vol 19, No 1 (2018). DOI: 10.17169/fqs-19.1.2716.
- Voilque, A.; Masood, J.; Fauroux, JC.; Sabourin, L.; Guezet, O. (2019): Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator. In: 2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon), 25. - 27.03.2019. Scottsdale, AZ, USA: IEEE, S. 13–20.
- Vries, Aijse Willem de; Krause, Frank; Looze, Michiel Pieter de (2021): The effectivity of a passive arm support exoskeleton in reducing muscle activation and perceived exertion during plastering activities. In: *Ergonomics* 64 (6), S. 712–721. DOI: 10.1080/00140139.2020.1868581.
- Weber, Marc-André; Stowasser, Sascha (2018): Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung unter Einsatz kollaborierender Robotersysteme: Eine praxisorientierte Einführung. In: *Z. Arb. Wiss.* 72 (4), S. 229–238.
- Weidner, Robert (Hg.) (2016): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Zweite Transdisziplinäre Konferenz: Hamburg 2016. Hamburg.

- Weidner, Robert; Karafillidis, Athanasios (Hg.) (2018): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Dritte transdisziplinäre Konferenz: Hamburg 2018. Transdisziplinäre Konferenz Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen; Helmut-Schmidt-Universität. Hamburg, Deutschland: Helmut-Schmidt-Universität.
- Weidner, Robert; Linnenberg, Christine; Hoffmann, Niclas (2020): Exoskelette für den industriellen Kontext: Systematisches Review und Klassifikation. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA) (Hg.): Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Frühjahrskongress. 16.-18.03.2020. Berlin, S. 1–6.
- Weidner, Robert; Redlich, Tobias; Wulfsberg, Jens P. (2015): Ausgewählte Technologien. In: Robert Weidner, Tobias Redlich und Jens Peter Wulfsberg (Hg.): Technische Unterstützungssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 147–184.
- Weßkamp, Vanessa; Seckelmann, Tatjana; Barthelmey, André; Kaiser, Marcus; Lemmerz, Kai; Glogowski, Paul et al. (2019): Development of a sociotechnical planning system for human-robot interaction in assembly systems focusing on small and medium-sized enterprises. In: *Procedia CIRP* 81, S. 1284–1289.
- Yang, C-J; Zhang, J-F; Chen, Y.; Dong, Y-M; Zhang, Y. (2008): A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 222 (8), S. 1599–1612.
- Zanotto, Damiano; Lenzi, Tommaso; Stegall, Paul; Agrawal, Sunil K. (2013): Improving transparency of powered exoskeletons using force/torque sensors on the supporting cuffs. In: *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics* 2013. DOI: 10.1109/ICORR.2013.6650404.
- Zhu, Zhenhua; Dutta, Amrita; Dai, Fei (2021): Exoskeletons for manual material handling – A review and implication for construction applications. In: *Automation in Construction* 122, S. 103493. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103493.

10 Anhang

Anhang 1: Auflistung der im Rahmen der System Usability Scale genutzten modifizierten Fragen nach Gao et al. (2020) in verwendeter Reihenfolge

1	Ich denke, dass ich das Quick-Check-Tool häufig verwenden möchte.
2	Ich fand das Quick-Check-Tool unnötig komplex.
3	Ich dachte, dass Quick-Check-Tool war einfach zu bedienen.
4	Ich denke, dass ich die Unterstützung einer technischen Person brauche, um das Quick-Check-Tool bedienen zu können.
5	Ich fand die verschiedenen Funktionen in dem Quick-Check-Tool waren gut integriert.
6	Ich dachte, dass das Quick-Check-Tool nicht konsistent genug war.
7	Ich würde mir wünschen, dass die meisten Leute sehr schnell lernen würden, das Quick-Check-Tool zu benutzen.
8	Ich fand das Quick-Check-Tool sehr umständlich zu benutzen.
9	Ich habe mich sehr selbstsicher gefühlt, das Quick-Check-Tool zu verwenden.
10	Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem Quick-Check-Tool loslegen konnte.