

BGHW-Studie Exo@Work

Bewertung exoskelettaler Systeme in der Arbeitswelt

Abschlussbericht – Kurzfassung

Innsbruck, im April 2022

Beteiligte Hochschulen/Forschungsinstitute:

Leopold-Franzens-Universität Innsbruck
Fakultät für Technische Wissenschaft, Institut für Mechatronik, Professur für Fertigungstechnik
Technikerstraße 13, A - 6020 Innsbruck
<https://www.uibk.ac.at/mechatronik/fertigungstechnik/>

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
Alte Heerstraße 111, D - 53757 Sankt Augustin
<https://www.dguv.de/ifa>

Ansprechpartner:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner

Robert.Weidner@uibk.ac.at
+43-512-507-62800 (Österreich)
+49-40-6541-3342 (Deutschland)

Autorinnen und Autoren:

Von Seiten der UIBK: L. Ralfs, N. Hoffmann, C. Linnenberg, V. Edwards, B. Reimeir,
M. Calisti, G. Prokop, J. Waniek, R. Weidner
Von Seiten des IFA: U. Glitsch, K. Heinrich, J. Johns, C. Werner, T. Bömer, M. Liedtke

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Einleitung	5
2 Grundlagen	6
2.1 <i>Prävention und Gefährdung</i>	<i>6</i>
2.1.1 Relevanz und Prävention arbeitsbedingter MSE.....	6
2.1.2 TOP-Prinzip des Arbeitsschutzes.....	6
2.1.3 Gefährdungsbeurteilung	7
2.2 <i>Physische Belastungen an gewerblichen Arbeitsplätzen</i>	<i>8</i>
2.2.1 Physische Belastungsarten	8
2.2.2 Betrachtete Arbeitsprozesse und Arbeitstätigkeiten	9
2.2.3 Merkmale zur Charakterisierung von Tätigkeitsprofilen	10
2.3 <i>Exoskelette für gewerbliche Arbeitsplätze</i>	<i>10</i>
2.3.1 Voraussetzungen	10
2.3.2 Unterstützungsformen für industrielle Exoskelette.....	11
2.3.3 Aufbau und Unterstützungsprinzipien von Exoskeletten.....	11
3 Ansätze und Methoden zur Evaluation von Exoskeletten	13
3.1 <i>Strukturierte Experteninterviews</i>	<i>13</i>
3.2 <i>Biomechanische Analyse der Unterstützungswirkung von Exoskeletten</i>	<i>14</i>
3.3 <i>Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit bei Exoskeletten.....</i>	<i>15</i>
4 Studienkonzeption für Labor- und Feldumgebung	16
4.1 <i>Studiendesigns in Laborumgebung.....</i>	<i>16</i>
4.2 <i>Testparcours zur Evaluation von Exoskeletten in Laborumgebung</i>	<i>16</i>
4.3 <i>Studiendesigns für Feldumgebung.....</i>	<i>18</i>
5 Ergebnisse der Evaluation von Exoskeletten	19
5.1 <i>Erkenntnisse aus durchgeführten Laborstudien</i>	<i>19</i>
5.1.1 Analyse von Exoskelett-Unterstützungskennlinien	20
5.1.2 Analyse der Entlastungswirkung mittels Elektromyographie	22
5.1.3 Analyse von Bewegungsmustern mittels Motion Capture	23
5.1.4 Analyse von Gelenkmomenten und Kompressionskräften mittels biomechanischer Modellierung	24
5.1.5 Analyse physiologischer Parameter durch Herzschlagfrequenzmessung und Spiroergometrie.....	25
5.1.6 Untersuchung der Durchblutung mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIRS).....	25
5.1.7 Messung der Druckverteilung an den Interaktionsflächen mittels hochauflösender Druckmessfolie	25
5.1.8 Messung der Interaktionskräfte an den Interaktionsflächen mittels Sechskomponenten Kraftsensor	26
5.1.9 Analyse der Posturographie mittels Kraftmessplatte	27
5.1.10 Analyse des Einflusses von Exoskeletten auf das menschliche Gangbild	28
5.1.11 Analyse des subjektiven Belastungsempfindens mittels Borg-Skala.....	28

5.2	<i>Erkenntnisse aus durchgeführten Feldstudien</i>	29
5.2.1	Untersuchungen in gewerblichen Betrieben	29
5.2.2	Anwenderworkshops	31
5.2.3	Untersuchungen zur Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit	31
6	7-Phasen-Modell zur Evaluation von Exoskeletten	33
7	Handlungsempfehlungen zu Einsatz und Evaluation von Exoskeletten	34
7.1	<i>Empfehlungen in Bezug auf den Einsatz von Exoskeletten</i>	34
7.2	<i>Empfehlungen in Bezug auf Nutzbarkeit und Akzeptanz</i>	34
7.3	<i>Empfehlungen in Bezug auf die Evaluation</i>	34
8	Leitfaden zur Evaluation von Exoskeletten	35
9	Zusammenfassung und Ausblick	36
	Literaturverzeichnis und weiterführende Literatur	37
	Indexverzeichnis	40

1 Einleitung

In dem Projekt Exo@Work wurden die Bewertungsmöglichkeiten exoskelettaler Systeme in der Arbeitswelt untersucht. Zentral wurde dafür ein Leitfaden mitsamt Handlungsempfehlungen entwickelt. Dieser soll die Grundlage dafür schaffen, um Exoskelette zukünftig zielgerichtet(er) an gewerblichen Arbeitsplätzen einsetzen bzw. evaluieren zu können.

Nachdem Exoskelette ursprünglich vornehmlich für Anwendungen in Militär, Rehabilitation und Landwirtschaft entwickelt wurden, werden entsprechende Systeme auch zunehmend für die Unterstützung der Belegschaft bspw. in der Logistik, dem Handel und der industriellen Produktion eingesetzt. Eine zunehmend größere Zahl an Exoskeletten wird derzeit in der gewerblichen Praxis getestet bzw. in ersten Betrieben auch längerfristig eingesetzt. So liegt aktuell ein Potenzial in der Unterstützung der Entscheidenden bzw. Evaluierenden bei der Durchführung einer Eignungsbewertung von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Entsprechend ist eine Systematik zur Evaluation von Exoskeletten dringend erforderlich. Die dafür zentralen Arbeitspakete aus Exo@Work sind in Abbildung 1 dargestellt.

Zielstellung

Anwendungsgebiete

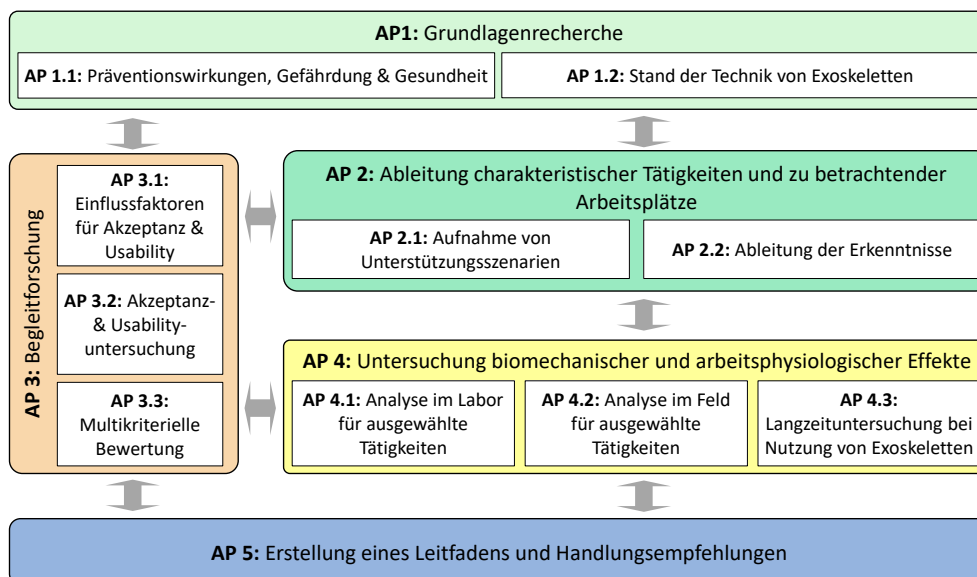


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete des Projekts Exo@Work¹

Der Schwerpunkt in Exo@Work lag auf der multikriteriellen Bewertung von Exoskeletten mit gewerblicher Nutzungsabsicht. So wurden im Rahmen des Projekts exemplarische Anwendungsfälle an gewerblichen Arbeitsplätzen der industriellen Produktion, der Logistik, dem industriellen Handwerk und dem Handel betrachtet. Die Auswahl der Tätigkeiten erfolgte dabei so, dass zum einen Tätigkeiten mit dem größten Unterstützungsbedarf untersucht und zum anderen Tätigkeiten berücksichtigt wurden, die technisch eine problemgerechte Unterstützung durch Exoskelette ermöglichen.

Untersuchungsschwerpunkt

¹ Aufgrund der Covid-19-Pandemie war die Bearbeitung des Arbeitspakets 4.3 zu Langzeituntersuchungen mit Exoskeletten im Feld nicht in angestrebtem Umfang möglich. Dafür wurden zusätzliche Laborstudien durchgeführt.

2 Grundlagen

Die Norm DIN EN ISO 13482:2014 bezeichnet ein Exoskelett als „am Körper fixierten bewegungsunterstützenden Roboter, der während der Anwendung an einer Person befestigt ist“. Aktuell gibt es sowohl auf deutscher als auch auf europäischer und internationaler Ebene laufende Aktivitäten zu spezifischen Normen und Richtlinien für Exoskelette.

Definition

2.1 Prävention und Gefährdung

Als Maxime des Arbeitsschutzes steht bei der Prävention die proaktive, nicht reaktive Arbeitsgestaltung im Vordergrund. Die Berücksichtigung und Umsetzung sicherheitsrelevanter und gesundheitserhaltender Maßnahmen spielt dabei eine zentrale Rolle [DGUV17].

Prävention

Von einem Exoskelett, welches mit der nutzenden Person direkt in Kontakt steht, können verschiedene Gefährdungen und Gesundheitsauswirkungen ausgehen. Bislang gibt es für den europäischen Raum keine für Exoskelette spezifischen gesetzlichen Vorgaben bzw. verbindlichen Standards, sondern nur die allgemeinen gesetzlichen EU-Regelungen. Jedoch wurden bereits erste Richtlinien bzw. Empfehlungen an die Hersteller und Anwender von Exoskeletten erarbeitet und kontinuierlich evaluiert [BGHM17, DGUV18, FHBL 2018]. Dies geschieht bisher noch individuell mit unterschiedlichen Schwerpunkten und ohne gesetzlichen Standard, ein einheitlicher Prüfstandard für Exoskelette existiert bisweilen nicht. Für die Prävention ist daher die Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen auch für fokussierte Arbeitsplätze vorgeschrieben und zweckmäßig [BGBI96].

Gefährdungsrichtlinien

2.1.1 Relevanz und Prävention arbeitsbedingter MSE

Muskuloskelettale Belastungen am Arbeitsplatz und deren Folgen waren der Grund für mehr als 85.000 frühzeitige Rentenzugänge in den Jahren 2016-2019 [BAuA20]. Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) verursachten anteilig ca. 25% der Arbeitsunfähigkeitstage. Allgemein wird davon ausgegangen, dass ein Teil dieser MSE durch physische Belastungen bei der Arbeit verstärkt wird und mit ungünstigen Arbeitsbedingungen und hohen Arbeitsbelastungen verbunden ist. Während Schulungen zur Verhaltensprävention oder die ergonomische Anpassung von Arbeitsplätzen oft wirksam eingesetzt werden, sind diese Maßnahmen nicht an allen Arbeitsplätzen umsetzbar oder ausreichend [Abd08]. Speziell gewerbliche Arbeitsplätze mit Körperzwangshaltungen und solche, welche die nicht stationäre manuelle Handhabung schwerer Objekte oder Werkzeuge erfordern, stellen eine Gefahrenquelle für die Entstehung akuter und chronischer Erkrankungen dar [BMAS06].

Muskel-Skelett-Erkrankungen

2.1.2 TOP-Prinzip des Arbeitsschutzes

Als Methode der Prävention sieht der Arbeitsschutz eine menschengerechte Gestaltung des Arbeitsumfeldes inkl. Arbeitsplätzen und -abläufen nach dem TOP-Prinzip vor [DGUV17]. So schreibt der vierte Paragraph des Arbeitsschutzgesetzes vor, bestehende Gefahren an ihrer Quelle anzugehen und anhand einer Rangfolge der Schutzmaßnahmen zu beseitigen. Demnach sind personenbezogene Schutzmaßnahmen wie Exoskelette gegenüber technischen und organisatorischen Ansätzen nachrangig zu verfolgen [BGBI96].

TOP-Prinzip

Ein Exoskelett kann als technisches Hilfsmittel, medizinisches Hilfsmittel oder als persönliche Schutzausrüstung (PSA) angesehen werden [Lie19]:

Personenbezogene

- Rein als technisches Hilfsmittel (Arbeitsmittel) kann ein Exoskelett die Arbeit erleichtern oder effizienter machen, ohne dass dabei gesundheitlich relevante Aspekte betroffen sind. In diesem Kontext liefert die Richtlinie 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie) zu beachtende Schutzziele [MAS06].
- Im Rahmen einer beruflichen Wiedereingliederung wäre die europäische Richtlinie 93/42/EWG für Medizinprodukte bzw. das Medizinproduktegesetz (MPG) heranzuziehen [MPG93].
- Bei konkret vorliegenden Gefährdungen am Arbeitsplatz wie z. B. dem manuellen Heben schwerer Lasten könnten Exoskelette auch als Persönliche Schutzausrüstung nach der europäischen PSA-Verordnung (EU) 2016/425 zum Einsatz kommen [PSA16]. Weitere Informationen können dem Anhang II entnommen werden.

Eine Einordnung als PSA ist dabei erst möglich, wenn der Arbeitgeber gemäß der Hierarchie an Schutzmaßnahmen (vgl. TOP-Prinzip) bereits sämtliche anderen technischen oder organisatorischen Möglichkeiten zur Verbesserung des Arbeitsplatzes ausgeschöpft hat [FBHL18]. Ob Exoskelette als PSA gelten oder nicht, wird noch häufig und in verschiedenen Kreisen diskutiert. Ebenfalls unwahrscheinlich ist die Einordnung des Exoskelettes als Medizingerät, weil für den Einsatz eine ärztliche Verordnung vorliegen müsste. In Bezug auf die beiden letzten Punkte fehlen allerdings bislang wissenschaftliche Nachweise, die eine medizinische Wirksamkeit (i.S. der Primär-, Sekundär- oder Tertiärprävention) von industriellen Exoskeletten belegen [Ste20].

2.1.3 Gefährdungsbeurteilung

Nach den allgemeinen Grundsätzen des Arbeitsschutzes (§4 ArbSchG) ist bei der Arbeitsgestaltung auf eine Gefährdung der Beschäftigten in Bezug auf ihre physische und psychische Gesundheit zu achten. Dazu muss der Arbeitgeber im Rahmen der „Beurteilung der Arbeitsbedingungen“ (§ 5 ArbSchV) auch eine Gefährdungsbeurteilung durchführen. Sollen anschließend nach Abwägung aller nach ArbSchV vorrangiger Maßnahmen (TOP-Prinzip) Exoskelette eingesetzt werden, so ist eine zweite Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Darüber hinaus hat er auch entsprechend der „Grundpflichten des Arbeitgebers“ (§ 3 ArbSchV) seine Maßnahmen auf Wirksamkeit zu überprüfen und erforderlichenfalls sich ändernden Gegebenheiten anzupassen. Außerdem ist er verantwortlich für die sichere Bereitstellung und Benutzung der im Unternehmen verwendeten Arbeitsmittel (§ 3 Betriebssicherheits-Verordnung). Dabei entbindet das Vorhandensein einer CE-Kennzeichnung am Arbeitsmittel nicht von der Pflicht zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung.

Artikel 6 der EU-Verordnung 2016/425 (Artikel 3, Abs. 1. a) verweist hinsichtlich der Anforderungen an die Verwendung von PSA auf die EU-PSA-Benutzerrichtlinie 89/656/EWG. Dort wird der Arbeitgeber verpflichtet sicherzustellen, dass PSA immer

- „Schutz gegenüber den zu verhütenden Risiken bieten, ohne selbst ein größeres Risiko mit sich zu bringen,“
- „für die am Arbeitsplatz gegebenen Bedingungen geeignet sein,“
- „den ergonomischen Anforderungen und den gesundheitlichen Erfordernissen des Arbeitnehmers Rechnung tragen“ und
- „dem Träger nach erforderlicher Anpassung passen.“

Hinsichtlich der Gefährdungsbeurteilungen macht diese EU-Richtlinie Vorgaben, die sinngemäß den hier schon geschilderten aus dem ArbSchG gleichen und diese um weitere Pflichten z.B. hinsichtlich der Kompatibilität mit anderen Ausrüstungen oder der Dauer des Einsatzes spezifiziert.

Für die Beurteilung sollten u.a. Themen wie die Arbeitsschutzorganisation, der geplante Einsatzbereich sowie potentielle Gefährdungen durch Exoskelette untersucht werden [DGUV20]. Als relevante Gefährdungen durch ein Exoskelett werden in der DIN EN ISO 13482 u.a. folgende Aspekte aufgeführt: Einschalten des Roboters und Wiederaufnahme des normalen Betriebs, elektrostatisches Potential, Form und Bewegung des Roboters, Stress, Körperhaltung und Benutzung, Haltbarkeit, Autonomie von Entscheidungen und Handlungen sowie gefährdende Umgebungsbedingungen. Speziell für aktive Exoskelette liegen mögliche zusätzlich Gefährdungen im Zusammenhang mit dem Laden der Batterie sowie durch Energiespeicherung und -versorgung.

Daher muss im Einzelnen bei der Beurteilung eines Exoskeletts geprüft werden, ob mechanische Gefährdungen vorliegen. Dies können zum Beispiel Teile mit gefährlichen Oberflächen oder ungeschützte bewegliche Teile sein. Bei aktiven Exoskeletten, die mit einem Antriebssystem ausgestattet sind, müssen je nach Antriebsart u.a. elektrische oder fluidtechnische Gefährdungen sowie mögliche Explosionsgefährdungen betrachtet werden.

Da ein Exoskelett direkt am Körper getragen wird, sind ebenso spezielle Anforderungen hinsichtlich der Hygiene, aber auch zur Umhüllung der nutzenden Personen zu beachten. Biologische Gefahrstoffe wie Pilze oder Bakterien dürfen über die gesamte Nutzungsdauer keinen negativen Einfluss auf die Gesundheit der Beschäftigten haben.

Für die Gefährdungsbeurteilung müssen aber nicht nur die Einwirkungen des Exoskeletts auf den Beschäftigten bzw. die Beschäftigte, sondern auch die Interaktion der nutzenden Personen mit dem gesamten Arbeitsumfeld und PSA bewertet werden. Hierbei geht es zum Beispiel um die Fragestellung, ob das Exoskelett durch Maschinenteile eingezogen oder mitgerissen werden kann.

Weiterhin muss es für die nutzenden Personen in Notfallszenarien möglich sein, mit einem Exoskelett Rettungswege, Notausgänge und, wenn nötig, Treppen bei einer Evakuierung ohne Einschränkungen benutzen zu können.

Gerade bei der erstmaligen Verwendung eines Exoskeletts spielen die psychischen Gefährdungen eine wichtige Rolle und müssen in der Gefährdungsbeurteilung berücksichtigt werden. Um möglichen Gefährdungen durch den falschen Umgang mit Exoskeletten vorzubeugen, müssen notwendige Unterweisungen durchgeführt und in festgelegten Intervallen wiederholt werden.

Um die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung für den Einsatz von Exoskeletten zu erleichtern, hat das IFA eine Checkliste [IFA19] erstellt, die als Vorlage für eine Gefährdungsbeurteilung verwendet werden kann.

2.2 Physische Belastungen an gewerblichen Arbeitsplätzen

Im Rahmen von Exo@Work wurden vorrangig physische Belastungen an gewerblichen (bzw. bei Laborstudien gewerbsnahen) Arbeitsplätzen der Branchen bzw. Einsatzbereiche Logistik, Warenumschlag und Kommissionierung, Gepäck- und Paketverladung sowie Produktion untersucht.

2.2.1 Physische Belastungsarten

Zur Beurteilung der Gefährdung des Muskel-Skelett-Systems durch physische Belastungen können diese in sechs Kategorien unterteilt werden [BAuA19a]:

Gefährdungsarten

Mechanische Gefährdungen

Hygieneanforderungen

Mensch-Technik-Interaktion

Notfallszenarien

Psychische Gefährdungen

Gefährdungsbeurteilung

Physische Belastungsarten

- manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten,
- manuelles Ziehen und Schieben von Lasten,
- manuelle Arbeitsprozesse,
- Ganzkörperkräfte,
- Körperzwangshaltungen sowie
- die Körperfortbewegung.

Zusätzlich können Belastungen zu Kombinationsbelastungen überlagert sein. Zu jeder der physischen Belastungsarten existiert eine gesonderte Leitmerkmal-methode zur operationalisierten Beurteilung (physischer) Belastungen. Diese an Arbeitsplätzen auftretenden physischen Belastungsarten stellen die Grundlage für die studienbasierten Untersuchungen in Exo@Work dar. Die Erfüllung der Schutzziele von Exoskeletten wurden in diesem Zusammenhang näher untersucht.

Leitmerkmal- methoden

2.2.2 Betrachtete Arbeitsprozesse und Arbeitstätigkeiten

Die an gewerblichen Arbeitsplätzen zu verrichtenden Tätigkeiten sind vielfältig. Typische Aktivitäten sind z.B. die Handhabung von Lasten, die Durchführung von Aufgaben in oder über Kopfhöhe oder auch die Montage von Bauteilen unterschiedlicher Größe. Eine Zusammenfassung prinzipieller Konstellationen zwischen physischer Belastungsart und belasteter Körperregion für jeweils exemplarische Anwendungsszenarien zeigt Abbildung 2.

Arbeits- tätigkeiten

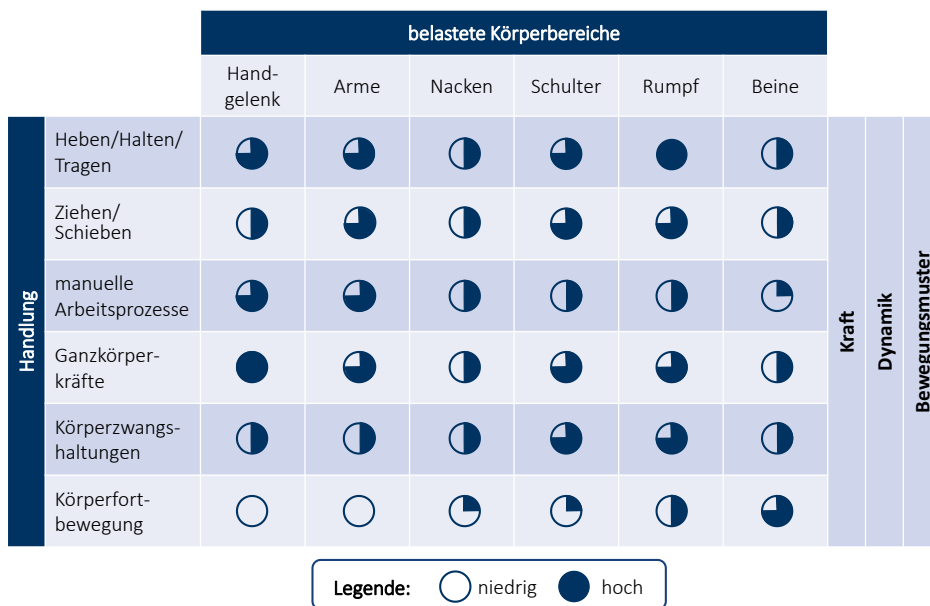


Abbildung 2: Zentrale belastete Körperregionen je physischer Belastungsart

In Arbeitssituationen treten mitunter deutliche Abweichungen von der hier gezeigten Konstellation auf, da die Belastungsarten heterogen ausgeprägt sind. Zu den Arten nach MEGAPHYS (Abschnitt 2.2.1) wurden dazu für exemplarische Tätigkeiten die Belastungen auf unterschiedliche Körperregionen qualitativ bewertet. Beispielhaft wurden dazu die nachfolgenden Tätigkeiten bzw. Anwendungsszenarien für Exoskelette näher in Exo@Work untersucht:

Anwendungs- szenarien

- die (manuelle) Lastenhandhabung – Heben und Halten von Lasten (insbesondere in gebeugter Haltung),
- das Tragen und Halten (aufrecht) als problematischer Fall,
- die Arbeit über Kopfhöhe (Zwangshaltung Arme),

- Zwangshaltungen des Rumpfes (z.B. Rumpfvorbeuge) sowie
- (wichtige) Nebentätigkeiten, die nicht eingeschränkt werden dürfen (z.B. Gehen, Sitzen auf einem Stuhl, Bücken, Zugang zu Taschen der Arbeitskleidung, Treppen steigen oder Fahren von Flurförderzeugen).

Dabei wurden sowohl Haupttätigkeiten untersucht als auch die Effekte bei Nebentätigkeiten bewertet, die das Exoskelett im Gegensatz zu erstgenannten nicht einschränken soll. Um die Tätigkeitsvariationen im Projekt einzugrenzen, wurde auf das Arbeitsschutzgesetz, Arbeitsrichtlinien und -verordnungen (u.a. [BAuA19b]) und verschiedene Ergonomieleitfäden (u.a. [Kar77], [Wak09], [BAuA19a]) berufen.

2.2.3 Merkmale zur Charakterisierung von Tätigkeitsprofilen

Zur Charakterisierung von Tätigkeitsprofilen lassen sich verschiedene Unterscheidungsmerkmale ableiten, die relevant für die Charakterisierung von Tätigkeiten an gewerblichen Arbeitsplätzen sind (in absteigender Priorisierung): Körperhaltungen, das Bewegungsausmaß, dynamische und statische Tätigkeiten, die (Wiederhol-)Häufigkeit, Varianz der Tätigkeitsaufgaben, die Handhabung von Lastgewichten und Werkzeugen, Gewichte der handzuhabenden Lasten und Werkzeuge, der Bewegungsspielraum / -freiraum, die ein- oder beidhändige Tätigkeitsausführung, die Ausführungsgeschwindigkeit sowie auftretende Prozesskräfte/Interaktionskräfte. Die Relevanz der genannten Charakterisierungsmerkmale unterscheidet sich dabei jedoch je nach Unterstützungssituation und sollte stets situationsgerecht gewählt werden.

Tätigkeitsmerkmale

2.3 Exoskelette für gewerbliche Arbeitsplätze

Nachdem zuvor die Tätigkeitsprofile mitsamt resultierenden physischen Belastungen am gewerblichen Arbeitsplatz charakterisiert worden sind, wird anschließend der Stand der Technik zu Exoskeletten zusammengefasst.

Gewerbliche Arbeitsplätze

2.3.1 Voraussetzungen

Vor dem Hintergrund des vielfältigen und komplexen Bewertungsvorhabens gilt es zentrale rahmengebende Voraussetzungen zu berücksichtigen. Die nachstehenden Prämissen liegen den weiteren Beschreibungen zugrunde:

Voraussetzungen

- Der Einsatz von Exoskeletten darf nicht im Konflikt mit vorhandenen Arbeitsplatzregularien laut gesetzlichen und betrieblichen Vorgaben (z.B. Regelungen zum Arbeitsschutz) stehen.
- Der Einsatz von Exoskeletten ist kein Allheilmittel. Vor der Anwendung personenbezogener Maßnahmen müssen nach dem TOP-Prinzip (Technisch - Organisatorisch - Personenbezogen) zunächst technische und arbeitsorganisatorische Maßnahmen verfolgt werden.
- Exoskelette dienen als Präventionsmaßnahme. Sie werden in diesem Leitfaden als ein personenbezogenes, individuelles System zur Unterstützung am gewerblichen Arbeitsplatz und nicht als medizinisches Hilfsmittel betrachtet.
- Der Umfang und die Bereitschaft eines Einsatzes von Exoskeletten im gewerblichen Kontext hängen neben der technischen Eignung auch entscheidend von der Akzeptanz der nutzenden Personen, der Gebrauchstauglichkeit des Exoskeletts und möglicher Vorurteile im betrieblichen Umfeld ab.
- Grundsätzlich ist vor dem Einsatz eines Exoskeletts an einem Arbeitsplatz die Gefährdungsbeurteilung nach Arbeitsschutzgesetz hinsichtlich der Systemnutzung zu erweitern.

Die durchgeführten Studien mitsamt abgeleiteten Erkenntnissen sind daher stets vor dem Hintergrund dieser Voraussetzungen zu beurteilen.

2.3.2 Unterstützungsformen für industrielle Exoskelette

In Bezug auf den Einsatz an gewerblichen Arbeitsplätzen ermöglichen Exoskelette primär eine Bewegungsunterstützung durch das Erleichtern, Stabilisieren oder Hinzufügen von Bewegungen. Die genannten Bewegungsformen können dabei wie folgt charakterisiert werden [Wei18]:

- Bewegungen *erleichtern*: Exoskelette, die die natürlichen menschlichen Bewegungen unterstützen. Sie schaffen eine ergonomische Entlastung und erleichtern so die Bewegung.
- Bewegungen *stabilisieren*: Exoskelette, die Körpersegmente oder menschliche Gelenke während der Verrichtung von Tätigkeiten stabilisieren (z.B. während eines Schweißvorganges).
- Bewegungen *hinzufügen*: Exoskelette mit neuer, direkter (ggf. auch lösbarer) Verbindung zum Werkzeug, die neue Bewegungsmöglichkeiten ergänzen (z.B. Dritte-Arm-Lösungen).

Weitere Formen im nicht-gewerblichen Kontext sind das Ermöglichen (speziell Rehabilitation) und Verstärken (militärischer Kontext) von Bewegungen.

2.3.3 Aufbau und Unterstützungsprinzipien von Exoskeletten

Je nach Antriebsart (aktiv/passiv/hybrid) bestehen Exoskelette im Aufbau aus unterschiedlichen Komponenten. Wie Abbildung 3 zeigt, umfassen Exoskelette grundlegend

- eine mechanische Struktur zur Kraftleitung mit i.d.R. Freiheitsgraden in Form von Gelenken oder Nachgiebigkeiten,
- Schnittstellen zur Mensch-Technik-Interaktion und Kraftübertragung, z.B. am Becken, am Oberarm oder an den Oberschenkeln,
- ein Bedienelement bspw. zum An- und Ausschalten von aktiven Systemen oder zur Einstellung und Regelung der Unterstützungsleistung,
- Aktuatorik zur technischen Realisierung der Bewegungsunterstützung (z.B. mittels mechanischer Federsysteme oder aktiver Antriebe)

sowie bei aktiven Systemen zusätzlich einen Energiespeicher, eine Steuerung und Sensorik.

Das Unterstützungsprinzip eines Exoskeletts ist dabei u.a. von der Antriebsart abhängig. Es wird zudem durch folgende Faktoren bestimmt:

- Morphologie, gemäß derer bei Exoskeletten grundlegend zwischen rigiden Strukturen und weichen Materialien sowie der Gestalt (eng anliegende oder ausladende Struktur) unterschieden werden können. So können Systeme bspw. mit starrgliedriger Struktur oder mit elastischen Bändern bzw. Seilzügen konstituiert sein.
- Kraftfluss, der entsprechend der Struktur eine Ab- bzw. Umleitung von Kräften und Drehmomenten entlang des menschlichen Muskel-Skelett-Systems erwirkt. So kann bei Exoskeletten mit elastischen Bändern und einer Wirkrichtung parallel zur Muskulatur entstehen, z.B. eine zusätzliche Zugwirkung entlang des MSS, die eine Entlastung der Muskulatur, aber auch zusätzliche Kompressionskräfte bewirkt. Auch die Distanz zum Körper (körpernah vs. körperfern) nimmt einen Einfluss auf die Ausgestaltung des Kraftflusses.
- unterschiedliche Freiheitsgrade in Bezug auf Typ (rotatorisch, linear) und mögliche Aktuierung.

**Unterstützungs-
formen**

Aufbau

**Unterstützungs-
prinzipien**

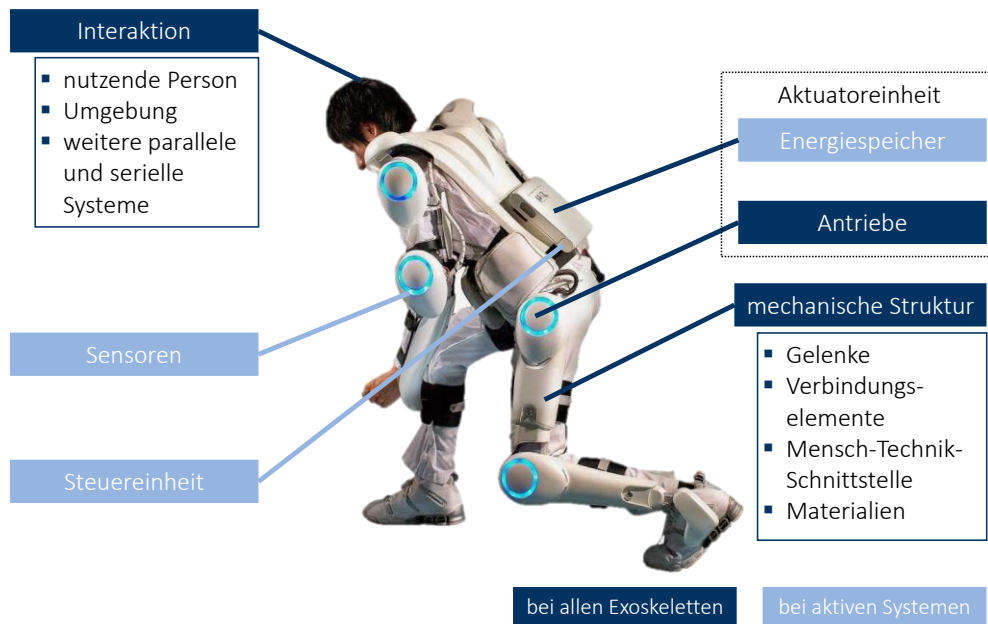


Abbildung 3: Zentrale Module und Elemente bei heutigen Exoskeletten
(illustriert anhand exemplarischen Exoskeletts der Firma Cyberdyne [Kos09])

3 Ansätze und Methoden zur Evaluation von Exoskeletten

Durch Recherche und Analyse des Standes der Technik im Projekt zeigte sich, dass es aktuell keine einheitliche oder gar ideale Methode gibt, um Exoskelette nach standardisiertem Schema zu evaluieren. Zudem fehlen bislang entsprechende Evidenznachweise zur biologischen/medizinischen Wirksamkeit von industriellen Exoskeletten [Ste20]. Im Ergebnis sind Exoskelette untereinander oft nur schwer vergleichbar, entscheidende Systemeffekte bleiben mitunter in den durchgeführten Evaluationen unberücksichtigt. Entsprechend wurden im Projekt Exo@Work die nachfolgenden Ansätze verfolgt, um eine mannigfaltige Perspektive der Evaluation von Exoskeletten zu ermöglichen.

3.1 Strukturierte Experteninterviews

Arbeitspaketübergreifend wurden Telefoninterviews auf Basis eines halbstandardisierten Gesprächsleitfadens durchgeführt (nach [Kai14]), aufgezeichnet und im Anschluss qualitativ ausgewertet. Ziel der Interviews war es, das Expertenwissen auf verschiedene Themenbereiche zu bündeln. Die Interviews wurden im Zeitraum zwischen Januar und April 2019 durchgeführt. Die Erfahrungen von 18 Expertinnen und Experten aus verschiedenen Personen- und Berufsgruppen (darunter vier Ingenieure, sechs betriebliche Anwender, drei Biomechaniker, ein Ergonomieexperte mit medizinischem Fachhintergrund, ein Unternehmensberater, ein Soziologe, ein Unfallversicherer sowie ein Mitarbeiter eines Exoskelettherstellers) konnten so zusammengeführt und miteinander verglichen werden (Abbildung 4, detaillierte Ergebnisse in [Wei20b]).

Experteninterviews

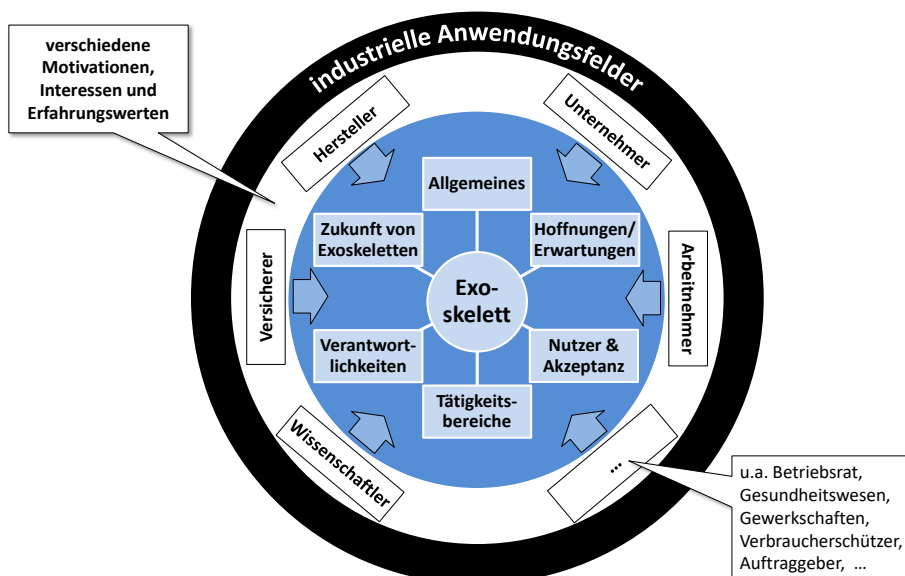


Abbildung 4: Interessensgruppen und Querschnittsthemen für Exoskelette

Zusammenfassend waren Hersteller und Ingenieure der Ansicht, dass die Erwartungen von den vorhandenen Exoskeletten aktuell nicht erfüllt werden können, die Unterstützungstechnologie jedoch Potential besitzt (z.B. in Bezug auf reduzierte Krankheitstage, gesteigerte Arbeitsgenauigkeit oder Reintegration von Beschäftigten). Generell wurde zudem auf einen Mangel an Langzeitstudien hingewiesen, in denen negative wie auch positive Effekte der Nutzung von Exoskeletten nachgewiesen werden könnten. Vor diesem Hintergrund empfahlen die Interviewten nur temporäre Einsätze von Exoskeletten.

Stoßrichtungen

Für alle Expertinnen und Experten war entscheidend, dass das Exoskelett mit den Rahmenbedingungen am Arbeitsplatz kompatibel ist, unterschiedliche Nebentätigkeiten (u.a. Aufheben von Gegenständen, Schuhe binden, Hinsetzen) nicht behindert und kein erhöhtes Unfallrisiko für die nutzende Person induziert. Vor der betrieblichen Einführung sollte letztlich auch immer ein Betriebsarzt hinzugezogen werden.

Das Nutzerfeedback vor allem für passive Systeme fiel überwiegend negativ aus. Bemängelt wurden unter anderem die Unterstützungsleistung und der Tragekomfort. Einige Expertinnen und Experten bemängelten, dass Hersteller unausgereifte Systeme an den Markt bringen und damit die Erwartungshaltungen der Kunden nicht erfüllen würden. Es wurde unter anderem eine organisatorische und rechtliche Klarheit für die Nutzung von Exoskeletten gewünscht sowie einen Anwendungskatalog mit zugehörigen Pflichtangaben für die jeweiligen Anwendungen (z.B. zur maximalen Tragedauer oder zu Inspektions- und Wartungsintervallen). Hinsichtlich der Evaluation wurden grundsätzlich wiederholt dieselben Methoden angeführt, zu denen auch im Nachgang Erkenntnisse aus der Evaluation exemplarischer Exoskelette beschrieben sind. Deren Eignung und Evaluationsziel wurden aber kontrovers diskutiert. Die Ergebnisse der Experteninterviews sind in Abbildung 5 zusammengefasst.

Handlungsbedarfe

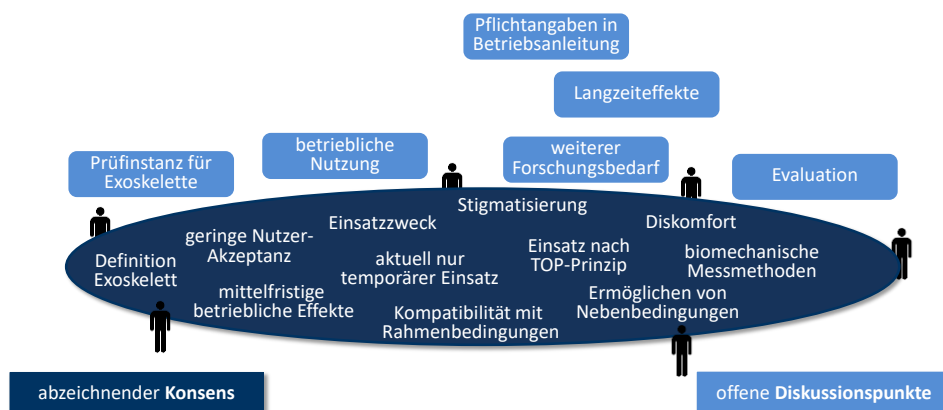


Abbildung 5: Ergebnisse aus Experteninterviews

3.2 Biomechanische Analyse der Unterstützungswirkung von Exoskeletten

Die entlastende Wirkung von Exoskeletten auf das Muskel-Skelett-System kann i.d.R. nicht direkt gemessen werden. Daher muss anhand theoretischer biomechanischer Modellbildung die Entlastungswirkung ausgehend von äußeren Lasten in Verbindung mit der Krafteinwirkung des Exosketts auf das Muskel-Skelett-System im Sinne eines mehrgliedrigen Kettenmodells (z.B. nach [Gli20], [Jäg01]) für die inneren Belastungsgrößen wie Gelenkmomente, Muskelkräfte bis hin zu Kompressionskräften an den Gelenken (Abbildung 6a) ermittelt werden.

Biomechanische Modellierung

Wesentliche Grundlage für diesen Modellansatz bildet die Drehmoment-Winkel-Kennlinie (kurz: Kennlinie) des Exosketts. Bei passiven Systemen können diese Kennlinien experimentell an Prüfständen mit kombinierter Kraft-Winkel-Messung oder direkt mit Miniatur-Kraftaufnehmern an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen während isolierter Beuge-Streckbewegungen ermittelt werden (Abbildung 6b). Bei aktiven Systemen kann – soweit

Kennlinie

vorhanden – die interne Sensorik genutzt werden oder es müssen experimentell Kennlinien-Sets für die einzelnen Systemzustände ermittelt werden.

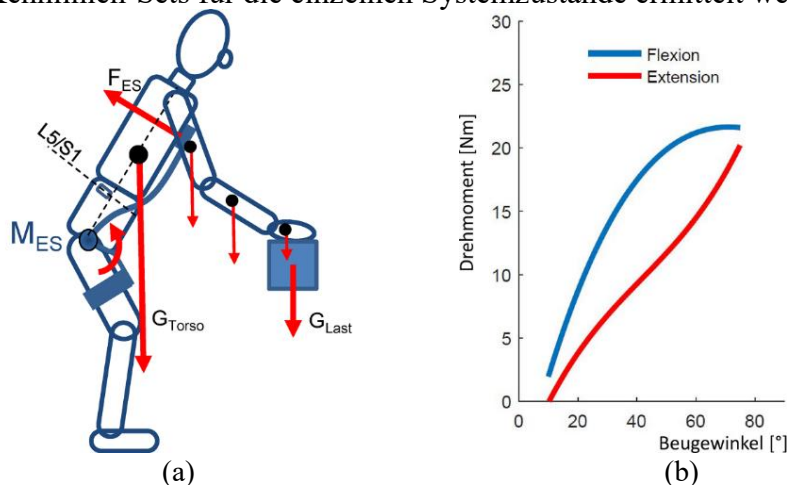


Abbildung 6: (a) Biomechanisches Kettenmodell zur Bestimmung lumbaler Gelenkmomente bei Einsatz eines Exoskeletts (nach [Gli20]). (b) Beispielhafte Kennlinie des Rückstellmoments eines Exoskeletts bei Flex- und Extension (M_{ES}).

3.3 Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit bei Exoskeletten

Bei der Durchführung von Studien mit Ziel des Erkenntnisgewinns bzgl. Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit ist die Anwendung subjektiver Evaluationsmethoden essentiell, um das Belastungsempfinden der Nutzerinnen und Nutzer von Exoskeletten aufzunehmen. Die Studie zur Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit wurde grundsätzlich dreigeteilt gestaltet, um auch Lernprozesse abfragen zu können. Die Fragebögen greifen dabei in Teilen das Gedankengut, den Aufbau und typische Fragestellungen von den folgenden Fragebögen auf:

- User Experience Questionnaire [Sch18],
- interaktionsbezogene Technikaffinität [Kot12], [Fra18],
- Belastungsmerkmale: Nasa Load Index [Har88] sowie
- physische Beschwerdebilder: Körperschema und Einschätzung von Beschwerden mittels Nordischem Fragebogen [INQA19].

Dabei erfolgte ein Zuschnitt auf den fachbezogenen Kontext. Die erste Befragung erfolgte vor dem Kontakt mit bzw. der Nutzung des Exoskeletts. Sie diente dazu, eine unbeeinflusste Datengrundlage zu erheben und beinhaltete Fragen zur Belastung eines normalen Arbeitstages, zur persönlichen Technikaffinität sowie zu physischen Beschwerdebildern und Belastungsempfinden im Berufsalltag. Die zweite Befragung wurde nach dem ersten Arbeitstag mit einem Exoskelett ausgefüllt. Dieser Fragebogen ermittelte eine allgemeine Einschätzung bzw. einen ersten Eindruck zur Nutzung des Exoskeletts. Auch wurden mögliche veränderte Beschwerdebilder erfragt. Der dritte und letzte Fragebogen wurde am Ende der (testweisen) Nutzung des Exoskeletts ausgefüllt. Inhaltlich wurden erneut das Belastungsempfinden am Arbeitstag bei Unterstützung durch das Exoskelett, physische Beschwerdebilder, der allgemeine Eindruck zum System sowie die Nutzungserfahrungen abgefragt. In weiteren Studien wurden zudem ergänzend weitere Kurzbefragungen der Testpersonen zur Gebrauchstauglichkeit durchgeführt.

Fragebogen

4 Studienkonzeption für Labor- und Feldumgebung

Zur Studienkonzeption wurden zunächst die zu vermessenden Wirkungsbe-
reiche festgelegt. Dabei wurde zwischen Auswirkungen auf muskuloskelettale
Strukturen innerhalb der vom Exoskelett umschlossenen Körperteile (mögli-
che Entlastung der betroffenen Strukturen (z.B. Muskeln)) und Auswirkungen
außerhalb dieser (ungeschützte Bereiche, evtl. höher belastet, evtl. erhöhte
Gefährdung) unterschieden. Im Fokus stand auch die Einwirkung von Kräften
und Drehmomenten an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen (z.B. Druck-
und Scherkräfte mit resultierender Druckverteilung).

4.1 Studiendesigns in Laborumgebung

Vorzugsweise wurden die Exoskelettstudien als Interventionsstudie mit dem
intraindividuellen Vergleich der Bedingungen „mit Exoskelett“ und „ohne
Exoskelett“ angelegt, um die Varianz bei den Ergebnisgrößen zu verkleinern
und andere mögliche Störeinflüsse zu vermeiden. Dieser Ansatz erforderte al-
lerdings eine ausreichende Randomisierung der verschiedenen Teststufen im
Versuchsdesign zur Vermeidung von unkontrollierten Interaktionseffekten.
Bei der Auswahl der Testpersonen war zu bedenken, dass es meist schwierig
ist, qualifizierte Fachkräfte mit entsprechender Tätigkeitserfahrung für Stu-
dien in einem spezifischen Parcours zu gewinnen. Daher wurden die Anfor-
derungen hinsichtlich Aufgabenkomplexität und Ausdauer gegenüber realen
Arbeitsplätzen entsprechend reduziert. Insbesondere bei Akzeptanzstudien ist
die Übertragbarkeit von Ergebnissen in die reale Praxis problematisch, wenn
nicht das betreffende Klientel analysiert wurde. Generell wurde bei der Sele-
ktion der Testpersonen auf eine hinreichende Alters- und Anthropometrie-
Bandbreite geachtet, damit zumindest eine gewisse Ähnlichkeit zum desig-
nierten Nutzerkreis der Erwerbsbevölkerung erreicht werden konnte. Auch
wurden immer beide Geschlechter berücksichtigt, da geschlechtsspezifische
Effekte bei den meisten Tests nicht ausgeschlossen werden können.

Ausgesprochen vorteilhaft sind Studien, die eine Kombination von Labor- und
Feldtest vorsehen. Dabei können vielfach Synergieeffekte entstehen, die den
erforderlichen Aufwand und die Ergebnisqualität begünstigen. Im Labor kön-
nen unter sehr kontrollierten Bedingungen vielfältige Tests auch mit größeren
Stichprobenumfängen durchgeführt werden. Auf dieser Erkenntnisgrundlage
können Feldtests zielgerichtet und auch mit einer geringeren Anzahl an Test-
personen aussagekräftig i.S. einer Validierungsstudie durchgeführt werden.

4.2 Testparcours zur Evaluation von Exoskeletten in Laborumgebung

Testparcours sind ein geeigneter Ansatz, um die Evaluation von Exoskeletten
nach definiertem Schema durchzuführen (u.a. [Bos19], [Hef19], [Koz20],
[Nab18]). Grundsätzlich können diese drei unterschiedlichen Kategorien zu-
geordnet bzw. aus Elementen dieser Kategorien zusammengesetzt sein.

Primär gilt es das Ausmaß und die Charakteristik der Unterstützungswirkung
in der Zielregion des Muskel-Skelett-Systems bei designierten elementaren
Tätigkeiten wie z.B. dem Anheben von Lasten oder dem Halten der Arme über
Schulterniveau zu ermitteln. Bei der Rumpfunterstützung sind dies insb. das
Anheben, Absetzen und Halten von Lastgewichten in unterschiedlichen Vari-
ationen, während in Bezug auf die Schulterunterstützung das Halten der Arme
mit und ohne Zusatzgewicht im Vordergrund steht.

Studiendesign Labor

Testparcours

Elementare Testszenarien

Der zweiten Kategorie sind Szenarien zugeordnet, die einfache Tätigkeitsabfolgen (z.B. Heben, Halten und Tragen) mit praxisnahen Variationen (Arbeitshöhe, Lastgewichte) bis hin zu originalen Nachbauten von realen Arbeitsplätzen umfassen. Zusätzlich zu den Elementartätigkeiten lassen sich so Unterstützungseffekte von Exoskeletten bei industrienahen Tätigkeiten (mehrheitlich in quantitativer Beurteilung) sowie die Gebrauchstauglichkeit von Exoskeletten (mehrheitlich in qualitativer Beurteilung) untersuchen.

Allgemeine Testszenarien

In der dritten Kategorie wird die allgemeine Gebrauchstauglichkeit (z.B. An/Ablegen), Sicherheitsaspekte sowie Nebentätigkeiten (z.B. Gehen, Sitzen) untersucht. Entsprechend des Fokus von Exo@Work weisen die Szenarien einen Bezug zu gewerblichen Arbeitsplätzen auf. So werden zentrale Tätigkeiten in der Untersuchungssystematik berücksichtigt (Tabelle 1). Im Fokus stehen vor allem Überkopfarbeiten oder die Lastenhandhabung von Objekten.

Aufgabenspezifische Testszenarien

Tabelle 1: Übersicht zur Systematisierung von Tätigkeiten im Testparcours (nach [Ral21])

Charakteristik			Aufgabenbeschreibung		Variationsparameter						
Belastung (s, d)	Granularität (f, g)	Händigkeit (1, 2)	ID	Tätigkeit	Arbeitshöhe	Räumliche Orientierung	Objektgröße/-gewicht	Werkzeugnutzung	Bearbeitungsreihenfolge	Distanz/Bewegungsbereich	Objektanzahl
s, d	f	1, 2	IT01	Überkopf schrauben/bohren	X	X		X			X
d	g	2	IT02	Decken/Wände schleifen	X	X		X		X	
s, d	f, g	1, 2	IT03	Objekte aufhängen	X		X		X		X
s, d	f, g	1, 2	IT04	Rohre klemmen	X	X	X		X		
s	f	1, 2	IT05	Stifte setzen	X	X	X		X		X
s	f	2	IT06	Objekte umlagern	X		X		X	X	X
d	f, g	2	IT07	Objekte ein- und auslagern	X		X			X	X
d	g	2	IT08	Objekte heben/tragen			X	X		X	X
d	g	1, 2	IT09	Materialwagen schieben			X	X		X	
			ITXX*	Aufgabe in Zwangshaltung							
Legende:											
Belastung während Tätigkeitsausführung: s = statisch, d = dynamisch											
Granularität: f = Feinarbeit, g = Grobarbeit											
Händigkeit: 1 = einhändige Tätigkeitsausführung, 2 = beidhändige Tätigkeitsausführung											

In Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit von Exoskeletten werden insbesondere 20 Kriterien näher evaluiert, anhand derer die (eigenständige) Handhabung von Systemen, eine mögliche Einschränkung der Motorik und Verrichtung von Nebentätigkeiten sowie sicherheitsrelevante Aspekte zur allgemeinen Betriebsfähigkeit untersucht werden (Abbildung 7). Insgesamt kann durch eine geringe Diversität der jeweiligen Testparcours eine hohe praktische Repräsentativität und somit Aussagekraft gewährleistet werden.

Gebrauchstauglichkeit

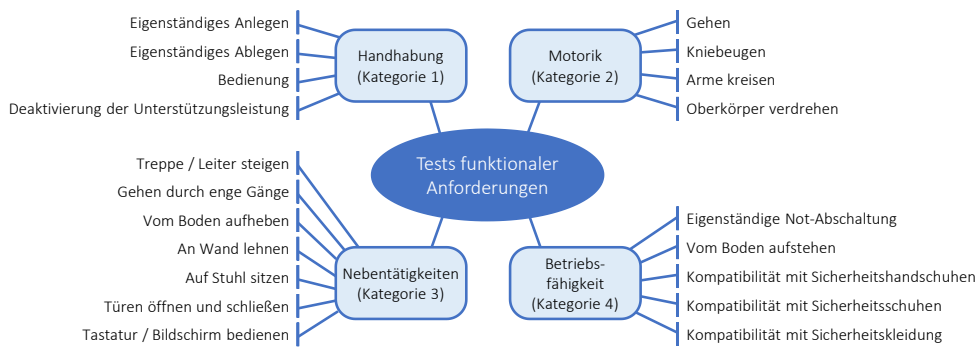


Abbildung 7: Tests operativer Anforderungen zur Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Exoskeletten (nach [Ral21])

4.3 Studiendesigns für Feldumgebung

Ein Ziel der Felduntersuchungen ist es, die im Labor in kontrollierter Versuchsumgebung gewonnen Erkenntnisse an realen Tätigkeitsprofilen und unter realen Arbeitsbedingungen zu überprüfen bzw. zu ergänzen.

Wie auch bei den Laborstudien ist das Versuchsdesign als Interventionsstudie angelegt. Eine Schwierigkeit von Studien im Feld ist es, dass die Arbeitsbedingungen mitunter häufig wechseln. Damit wird die Vergleichbarkeit zwischen Ergebnissen mit und ohne Exoskelett als auch zwischen Personengruppen erschwert. Um den Effekt zu minimieren, müssen die Messwerte über einen längeren (mehrstündigen) Zeitabschnitt oder eine Schicht erfasst werden. Außerdem bietet es sich an, mit einer zweiten Person als Klon gleichzeitig am gleichen Arbeitsplatz in komplementärer Versuchsanordnung zu testen. Zentrale Messverfahren sollten dabei die Bewegungsanalyse in Kombination mit der Elektromyographie sein. Die Bestimmung der Entlastungswirkung kann mittels des biomechanischen Modells anhand der zuvor im Labor ermittelten Kennlinie erfolgen. Komplettiert werden die Arbeitsplatzmessungen durch eine unmittelbar anschließende Befragung zum subjektiven Be-/Entlastungsempfinden und möglichen Diskomfort durch das Exoskelett (ähnlich [Cor76])

Zusätzlich zu den unmittelbaren Arbeitsplatzanalysen eignen sich auch anwenderspezifische Workshops zur Evaluation von Exoskeletten:

- zur Sammlung von (ersten) Erfahrungen mit Exoskeletten im Unternehmen bzw. an ausgewählten Arbeitsplätzen sowie Abschätzung einer grundsätzlichen Eignung des Systems auf Basis des getesteten Szenarios.
- zur Erklärung des Themas sowie der möglichen Effekte eines Einsatzes von Exoskeletten in Bezug auf eine potentielle Unterstützung der Beschäftigten sowie deren ergonomische Entlastung.
- zur Aufnahme von anwendungsspezifischen Systemanforderungen durch die Beschäftigten.
- zur Klärung eines grundsätzlichen Interesses an einer weiteren Nutzung von Exoskeletten sowie an einer weiteren Kooperation mit Fokus auf einer wissenschaftlichen Begleitung der betrieblichen Einführung bzw. Pilotierung von Exoskeletten.

In diesen Workshops haben die Beschäftigten von Betrieben i.d.R. die Möglichkeit, verschiedene Exoskelette auszuprobieren und testweise in unterschiedlichen Anwendungsszenarien einzusetzen.

**Studiendesign
Feld**

**Studiendesign
Workshops**

5 Ergebnisse der Evaluation von Exoskeletten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studien erkenntnisorientiert und anhand ausgewählter Beispiele zu den jeweiligen Messverfahren zusammenfasst. Generell sind dabei die Ergebnisse der verschiedenen Analysemethoden mehr in Kombination zu betrachten als denn einzeln und isoliert, da die Ergebnisgrößen in gegenseitiger Wechselwirkung/-beziehung (z. B. Kinetik, Kinetik, EMG) untereinanderstehen und eine vollständige Darstellung erfordern. Insgesamt sind in den Studien und der anschließenden Erstellung des Leitfadens 16 am Markt verfügbare und zwei eigens entwickelte prototypische Exoskelette getestet und mit verschiedenen Messmethoden untersucht worden. Die Tests wurden sowohl im Labor als auch an realen gewerblichen Arbeitsplätzen durchgeführt. Dabei kamen knapp 80 Testpersonen zum Einsatz, welche sich in Geschlecht, Alter, Körpergröße und -gewicht, Erfahrung mit Exoskeletten und Erfahrung mit den Testaufgaben unterschieden.

5.1 Erkenntnisse aus durchgeführten Laborstudien

In den Testparcours wurden ausgewählte Exoskelette testweise eingesetzt und in der Hinsicht auftretender Effekte beim Einsatz bewertet. Dabei wurden schwerpunktmäßig Exoskelette zur Rücken- und Schulterunterstützung sowie zusätzlich ein System zur Greifunterstützung eingesetzt (Tabelle 2).

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung, die nicht aus der Anwendung spezifischer Messverfahren resultieren:

- Bei allen untersuchten Tätigkeiten erreichen sowohl passive als auch aktive Exoskelette immer nur eine Teilunterstützung in der Wirkregion. Je nach Tätigkeit schwankt die erzielbare Unterstützung und die Eignung für unterschiedliche Kontexte (z.B. Haupt- und Nebentätigkeiten).
- Derzeitig verfügbare Exoskelette sind auf wenige spezifische Anwendungsfälle (Teiltätigkeiten) ausgerichtet und liefern nur in einem sehr beschränkten Arbeitsbereich eine signifikante Unterstützung.
- Exoskelette erreichen bei Frauen und Männern generell ähnliche Unterstützungsleistungen. Dennoch kann es bei einzelnen Systemen zu geschlechtsspezifisch signifikanten Unterschieden kommen.
- In der Regel weisen aktive Exoskelette durch eine tendenziell leichter mögliche Anpassung der Unterstützungsleistung die Möglichkeit einer differenzierteren Unterstützung während Verrichtung einer Tätigkeit auf (insb. bei Tätigkeiten mit erhöhter Varianz).
- Passive Systeme eignen sich vor allem für quasi-statische Tätigkeiten im optimalen Wirkungsbereich (Arbeitsbereich) des Exoskeletts mit nur geringer Variation. Speziell für Tätigkeiten ohne große Laständerung haben sich passive Systeme als tauglich erwiesen.
- Zur Bewertung von Exoskeletten ist allein die maximale Unterstützungsleistung nicht ausreichend. Vielmehr ist die situative Unterstützungsleistung von Interesse.
- Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass sich die Verwendung von Exoskeletten auf die Tätigkeitsdauer auswirken kann. Je nach verwendetem System kann dabei eine merkliche Reduzierung oder auch Verlängerung auftreten.

**Ergebnisse
Laborstudien**

**Erkenntnisse
Testparcours**

Tabelle 2: Übersicht über verwendete Exoskelette in Laborstudien

Exoskelette Laborstudien

System	Körper-region			Aktu- ierung		Studie/Untersuchungsgegenstand									
	Rücken	Schulter	Hand	passiv	aktiv	Testparcours	EMG	Motion Capture	Feinmotorik	HF / Spiroergometrie	NIRS	Interaktionskräfte	Posturographie	menschl. Gangbild	Belastungsempfinden
Apex (HeroWear)	X			X		X						X			X
BackX (SuitX)	X			X		X	X	X				X		X	X
Bionic.Back (hTrius)	X			X		X	X	X		X					X
Chairless Chair (Noonee)	X			X		X									X
Cray X (German Bionic)	X				X	X	X	X		X		X		X	X
ExoSuit (HSU)	X				X	X	X	X				X	X		X
Japet.W (Japet)	X				X	X	X	X	X						X
Laevo v2 (Laevo)	X			X		X	X	X				X	X	X	X
LiftSuit (Auxivo)	X			X		X									X
Rakunie (N-Ippin)	X			X		X	X	X		X			X	X	X
SoftExo (Hunic)	X			X		X	X	X	X	X			X	X	X
Airframe (Levi-tate)		X		X		X				X		X	X	X	X
Lucy (HSU)		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mate (Comau)		X		X		X	X	X			X				X
Paexo Shoulder (Ottobock)		X		X		X	X	X		X	X	X	X	X	X
ShoulderX (SuitX)		X		X		X	X	X				X			X
Skelex 360 (Skelex)		X		X		X	X	X			X	X	X	X	X
Ironhand (Bio-servo)			X		X	X	X		X	X					X

5.1.1 Analyse von Exoskelett-Unterstützungskennlinien

Mittels Kraftmessungen wurden typische Drehmoment-Winkelverläufe der Exoskelette bestimmt. Zentrale Ziele waren die Erstellung von Kennlinien der Exoskelett-Unterstützung und die Aufnahme von Drehmomentkurven.

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Exoskelette können in unterschiedlichem Umfang und mit unterschiedlicher Charakteristik unterstützen. Einen zentralen Einfluss hierauf

Kennlinie

Erkenntnisse Kennlinien

haben die Aktuatorik, die Systemmorphologie und (bei aktiven Systemen zusätzlich) die steuerungstechnische Umsetzung der Vorgaben.

- Selbst bei elementaren Tätigkeiten konzentriert sich die größte Unterstützungswirkung der Exoskelette auf einen kleinen Teil-/Zeitbereich der Bewegung, wenn das Exoskelett im optimalen Arbeitsbereich ist. Dies ist i.W. durch die Kennlinie des Exoskeletts begründet.
- Passive Exoskelette können antriebsbedingt nur eine beschränkte und voreingestellte Unterstützungsleistung erbringen. Hierbei ist der grundsätzlich vorhandene geringere Unterstützungseffekt bei der Rückgewinnung der gespeicherten Energie (Hysterese-Effekt) wesentlich. Typisch sind hierbei um 50 % verringerte Rückstellmomente.
- Auch aktive Systeme erreichen nur eine Teilunterstützung, da diese jederzeit von der nutzenden Person überwindbar sein müssen. Allerdings kann die Steuerung in besonders belastenden Phasen wie dem Anheben von Lasten zusätzliche Unterstützungsleistung liefern, die in systembedingten zeitlichen Verzögerungen der Aktivierung resultieren können.
- Als eine geeignete Möglichkeit hat sich die Anpassung der Kennlinie des Systems in Abhängigkeit zum muskulären Kraftverlauf des unterstützten Gelenks gezeigt. So kann die Kennlinie stets an die unterstützungsbedürftige Situation angepasst werden (z.B. höhere Unterstützungswirkung beim Heben als beim Senken des Armes). Entsprechend ist je nach Arbeitsaufgabe eine richtungsabhängige Kennlinie von Vorteil.
- Neben der erzielbaren Kraftwirkung unterscheiden sich Aktuatoren auch hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften (Form der Kennlinie und ggf. Geschwindigkeitsabhängigkeit, Abbildung 8). Bei aktiven Antrieben ist außerdem das zugehörigen Regelungssystem entscheidend.
- Ein wesentlicher Punkt ist die Einstellbarkeit der Unterstützungshöhe bzw. des wirksamen Arbeitsbereichs des Exoskeletts. Dies wird seitens der Hersteller sehr unterschiedlich gehandhabt und betrifft neben der generellen Einstellbarkeit auch die Bedienungsfreundlichkeit (in Abbildung 8 dargestellte Kennlinien daher nur beispielhaft).

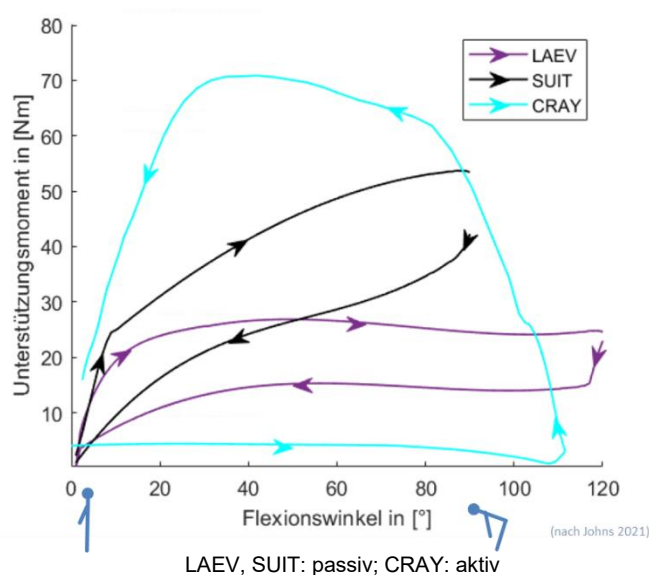


Abbildung 8: Beispielhafte Kennlinien unterschiedlicher Exoskelette (nach [Joh21])

5.1.2 Analyse der Entlastungswirkung mittels Elektromyographie

Im Rahmen von Laboruntersuchungen wurden verschiedene Messungen der Muskelaktivitäten mittels der Oberflächenelektromyographie durchgeführt. Ziel war die Untersuchung der Entlastungswirkung auf Muskelgruppen.

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Bei zweckmäßigem Einsatz können Exoskelette sowohl in der Spitze als auch im Durchschnitt eine Reduktion der muskulären Aktivität in der adressierten Muskelgruppe bewirken (Abbildung 9).
- Exoskelette unterstützen nicht während der gesamten Ausführung einer Tätigkeit. Wie beispielhaft in Abbildung 9 illustriert, konnte eine reduzierte Muskelaktivität für das exemplarische passive und speziell das aktive Exoskelett in den Phasen eins und fünf festgestellt werden, in denen die tiefe Hebe- und Absetzbewegung im Vordergrund stand. Während des Tragens von Objekten vor dem Körper (Phasen zwei bis vier) konnte jedoch keine signifikante muskuläre Entlastung ermittelt werden.
- Die Nutzung von Exoskeletten kann eine Reduzierung bzw. Verlangsamung der muskulären Ermüdung bewirken.
- Die idealisierten und modellierten Bewegungen im Labor zeigen im Feld häufig eine größere Variation in der Dynamik und Bewegungsausführung, wodurch es zu einer veränderten Muskelaktivität kommen kann.
- Laborstudien eignen sich für eine standardisierte Beurteilung der Muskelaktivität eines Auszugs einer Bewegung mit festgelegten absoluten Parametern wie Kraft und Ausführungsgeschwindigkeit (Abbildung 9).

Für eine praxisnahe Gesamtbilanz der Exoskelett-Einwirkung auf die elektrophysiologische Muskelaktivität braucht es jedoch stets Messungen im Feld. In den Betriebsmessungen konnten die punktuellen Entlastungswirkungen in den optimalen Unterstützungssituationen nachvollzogen werden. Allerdings konnte mit rückenunterstützenden Exoskeletten weder über einen längeren Arbeitszeitraum (> 1 Stunde) noch über den isolierten Zeitraum aller Hebetätigkeiten eine signifikante Entlastung nachgewiesen werden. Dies betrifft sowohl das 90. Perzentil wie auch der Median der Rückenstrecker-EMG.

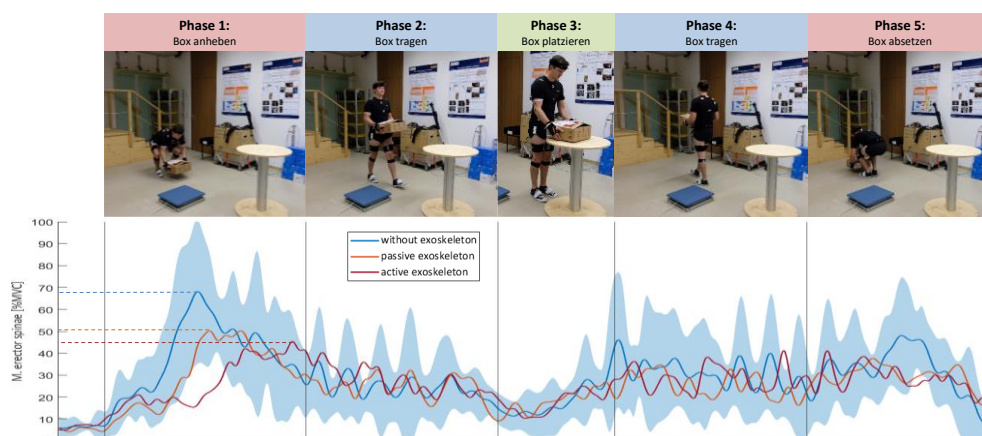


Abbildung 9: Beispielhafte Muskelaktivitätsverläufe für den Rückenstreckmuskel während einer logistiktischen Tätigkeit (blau gefärbter Bereich zeigt Standardabweichung der Muskelaktivität für Szenario ohne Exoskelett-Unterstützung)

**Elektro-
myographie**

**Erkenntnisse
Elektro-
myographie**

5.1.3 Analyse von Bewegungsmustern mittels Motion Capture

Motion Capture ist eine Methode, um den Einfluss von Exoskeletten auf menschliche Bewegungsmuster (Bewegungstreue, Geschwindigkeit etc.) zu untersuchen. Veränderte Bewegungsmuster können auch für mögliche Langzeiteffekte aus der Nutzung von Exoskeletten wertvolle Informationen liefern. Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

Motion Capture

**Erkenntnisse
Motion Capture**

- Sowohl passive als auch aktive Exoskelette verändern das Bewegungsverhalten meist nur leicht, aber dennoch signifikant, indem bspw. rumpfunterstützende Systeme eine aufrechtere Rumpfhaltung bzw. geringere Hüftbeugewinkel beim Anheben von Lastgewichten um etwa 10° provozieren [Gli20]. Der Effekt hängt von dem jeweiligen Exoskelett ab und variiert mit Morphologie und Funktionsweise (Abbildung 10).
- In Bezug auf die Kniewinkel wird dagegen in Abbildung 10 eine größere resultierende Streuung durch die Nutzung der Exoskelette als beim Hüftwinkel ersichtlich. Hier wurde im Umkehrpunkt je nach Exoskelett eine Änderung des Kniewinkels von bis zu 30° festgestellt.
- Die Abweichungen in den Gelenkwinkeln für unterschiedliche Bewegungen und Bewegungsrichtungen unterscheiden sich zwischen den Exoskeletten (Abbildung 10). So weichen die Gelenkwinkel für diese Beispiele beim Absetzen (in der Gravitations- und entgegen der beabsichtigten Wirkrichtung des Exoskeletts) stärker als beim Heben der Box (entgegen der Gravitations- und in beabsichtigter Wirkrichtung) ab.

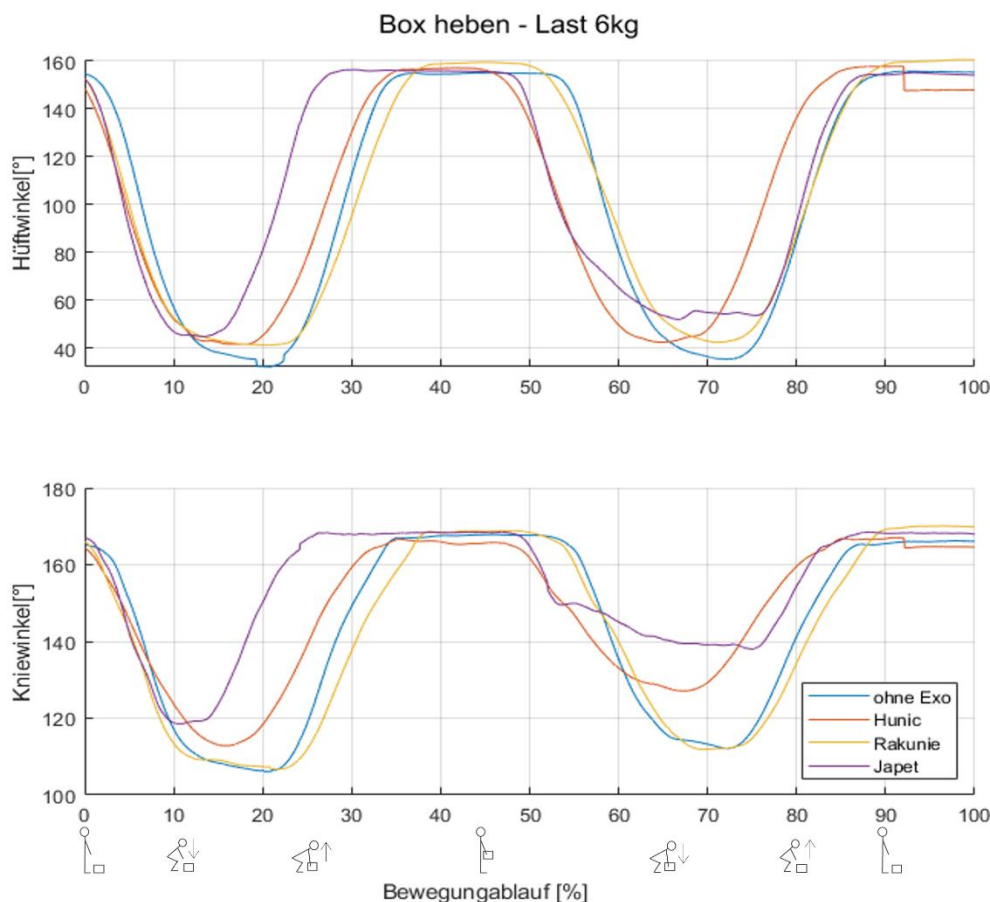


Abbildung 10: Beispielhafte Winkelverläufe für Hüft- und Kniewinkel bei verschiedenen Szenarien während einer Logistiktätigkeit

- Weiche Exosuits bewirken tendenziell eine geringere Änderung des Bewegungsverhaltens (Abbildung 10), da sie keine parallel zum Körper agierenden Gelenke besitzen, wobei sie jedoch Bewegungen auf andere Art und Weise (i.d.R. durch Zugkräfte) unterstützen können.
- Die kinematische Analyse – hier insbesondere die Gelenkwinkelverläufe (inkl. der des Exoskeletts) weisen die Phasen aus, in denen Exoskelette überhaupt nur unterstützend wirken können. Meist liegen die Zeitanteile auch bei monoton belastenden Tätigkeiten unter 20% der Arbeitszeit.

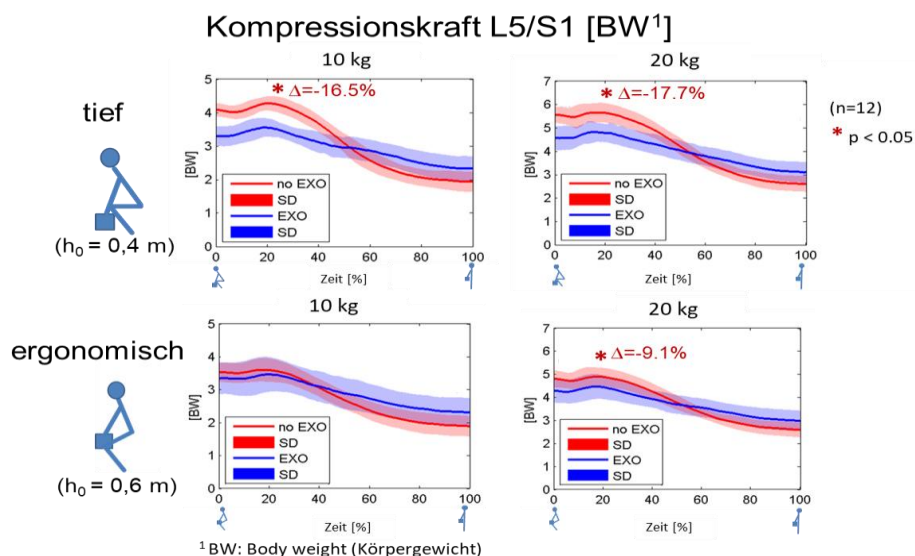
5.1.4 Analyse von Gelenkmomenten und Kompressionskräften mittels biomechanischer Modellierung

Als weiterer Aspekt zur Untersuchung der Entlastungswirkung wurden die Auswirkungen des Exoskeletts auf Gelenkmomente und Kompressionskräfte untersucht, zentral die mechanische Entlastung des Muskel-Skelett-Systems. Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Aktive und passive Exoskelette liefern nur in ihrem spezifizierten Arbeitsbereich (deutliche Rumpfvorbeuge, angehobene Arme) eine mögliche Unterstützung des Muskel-Skelett-Systems in der Zielregion.
- In ergonomischen Arbeitshaltungen (z.B. aufrechter Oberkörper) kann i.d.R. keine Unterstützung geleistet werden (Abbildung 11). Insbesondere beim Tragen manueller Lasten ist dies der Fall.
- Die Gelenkmomente zeigen vornehmlich die Entlastung der betreffenden Muskulatur an, was aber nicht immer mit den EMG-Analysen korrespondiert (z.B. bei starker Rumpfbeuge, wo passive Strukturen der Wirbelsäule einen großen Anteil der Gelenkmoments kompensieren).
- Die Kompressionskräfte zeigen die Belastungen des Stützapparates in der Kombination von externen Lasten und muskulären Kräften an.
- Selbst bei isolierten Tätigkeiten, für die ein Exoskelett konzipiert wurde, fällt die Gesamtbilanz der mechanischen Entlastung oft deutlich niedriger aus als nach dem Spitzenwert zu vermuten wäre (Abbildung 11).

Biomechanische Modellierung

Erkenntnisse biomechanische Modellierung



Anheben für zwei Lastgewichte aus zwei Anfangshöhen mit (EXO) und ohne Exoskelett (no EXO), inkl. Standardabweichung (SD)

Abbildung 11: Beispielfhafte mittlere Kompressionskraftverläufe an der Lendenwirbelsäule (L5/S1)

5.1.5 Analyse physiologischer Parameter durch Herzschlagfrequenzmessung und Spiroergometrie

Zur Analyse der physiologischen Parameter lassen sich verschiedene Methoden wie die Herzschlagfrequenzmessung oder die Spiroergometrie anwenden. Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Die Nutzung von Exoskeletten während der Verrichtung von Tätigkeiten kann sich auf den Sauerstoffverbrauch auswirken. So kann sich ein abweichender Sauerstoffverbrauch im Vergleich zur jeweiligen Baseline zeigen. Je nach Exoskelett und Tätigkeitsprofil muss nicht eine reduzierte, sondern kann auch eine höhere Beanspruchung resultieren.
- Der Effekt des abweichenden Sauerstoffverbrauchs ist je nach tätigkeitsbezogenen Faktoren (z.B. Grad der Belastung und folglich der Beanspruchung der nutzenden Personen, Dauer der Tätigkeitsausführung) unterschiedlich stark ausgeprägt.
- Oftmals weicht der momentane Sauerstoffverbrauch nicht bloß in wenigen Zeitpunkten ab, sondern über Großteile des Arbeitszyklus.
- Die Nutzung eines Exoskeletts kann sich auf den Energieumsatz (Watt) auswirken. So konnte u.a. eine Verschiebung der Energiebereitstellung in Richtung des aeroben Stoffwechsels festgestellt werden.
- Zwischen der Herzschlagfrequenz und dem Sauerstoffverbrauch kann auch im Szenario der Nutzung von Exoskeletten eine Korrelation festgestellt werden. Eine höhere Beanspruchung der Testpersonen äußerte sich entsprechend auch in einer höheren Herzschlagfrequenz.

5.1.6 Untersuchung der Durchblutung mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)

Durch NIRS ist es möglich, Rückschlüsse auf die Durchblutung distal zu Mensch-Technik Schnittstellen zu ziehen, um so etwaige Einschränkungen durch Abschnürungen oder starke Kompressionen zu verdeutlichen.

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Bei Nutzung eines Exoskeletts mit umlaufender Schnittstelle treten vasculäre Symptome früher auf als ohne. Dies deutet auf eine negative Auswirkung auf das neurovaskuläre Versorgungssystem des Arms hin.
- Je nach Design der Schnittstelle überschreitet der in der Armschnittstelle auftretende Druck systematisch die Schwelle für eine angemessene Blutversorgung und kann daher langfristig schädlich sein.
- Die Effekte in der Armschnittstelle weisen in Abhängigkeit der Belastung während der Tätigkeitsausführung (statisch vs. dynamisch) merkliche Unterschiede auf.

Für weiterführende und detailliertere Ergebnisse wird an dieser Stelle auf eine aus dem Projekt entstandene Veröffentlichung verwiesen [Lin22].

5.1.7 Messung der Druckverteilung an den Interaktionsflächen mittels hochauflösender Druckmessfolie

Die Messung von Interaktionskräften in Schnittstellen kann verschiedene Dimensionen des subjektiv empfundenen Tragekomforts objektiv bewertbar machen. Hierfür wurde bspw. eine hochauflösende Druckmessfolie verwendet.

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Die Druckverteilung zeigt keine gleichmäßige Verteilung des Drucks über die Schnittstelle, sondern das Auftreten von lokalen Spitzen

Spiroergometrie

**Erkenntnisse
Spiroergometrie**

**Erkenntnisse
Herzschlagfrequenzmessung**

NIRS

**Erkenntnisse
NIRS**

Druckmessung

**Erkenntnisse
Druckmessung**

(Abbildung 12). Bezogen auf den durchschnittlich auftretenden Druck wurden als maximale Werte das Zehnfache dessen gemessen.

- Der erzeugte Druck ist meist an den Rändern von Schnittstellen größer als im Zentrum der Schnittstelle (Abbildung 12).
- Der Druck zwischen Schnittstellen und der angebundenen Körperregion wird durch den Aufbau, die Struktur des verwendeten Materials sowie die Unterstützungskraft und Veränderung der Muskelform infolge von Kontraktionen bei dynamischen Bewegungen beeinflusst.
- Eine größere Kontaktfläche zum Körper führt zu einer besseren Druckverteilung mit geringeren maximalen Druckpeaks (Abbildung 12), kann allerdings im Gegenzug in Abhängigkeit von der Körperregion und Bewegungsumfang auch einschränkend wirken.
- Eine Polsterung von Schnittstellen sowie eine Anpassung der Form an die entsprechende Körperregion resultiert in geringeren Druckpeaks.

Ein Vergleich mit ähnlicher Literatur zeigt, dass die Druckempfindlichkeit als Maß für den Komfort stark vom Ort der Druckeinwirkung abhängt und sehr individuell ist. Entsprechend wirkt sich der auftretende Druck an Schnittstellen auf den Tragekomfort aus.

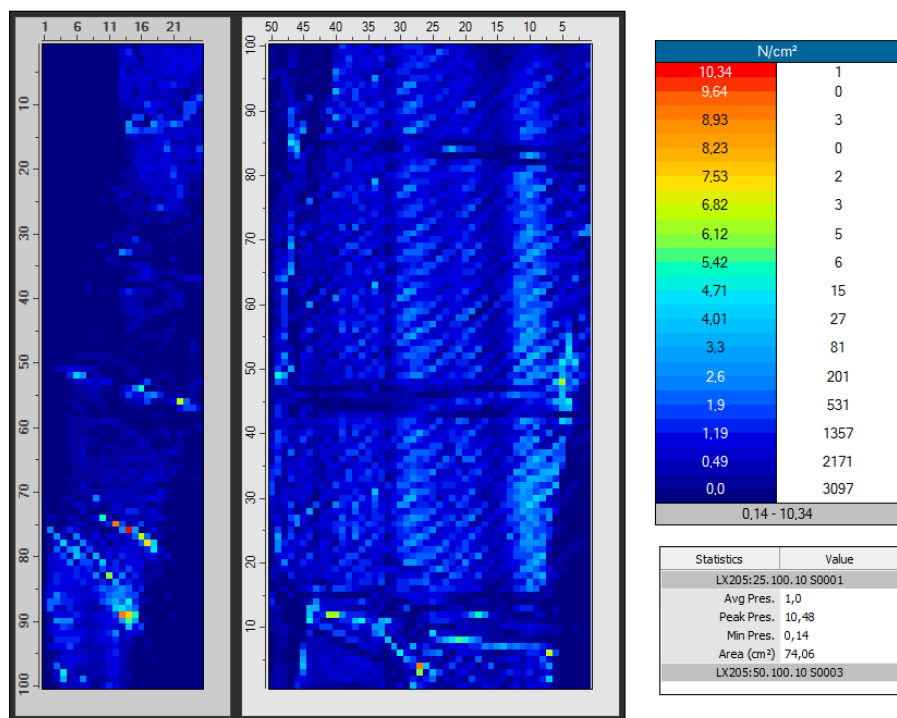


Abbildung 12: Momentaufnahme einer Messung der Druckverteilung unter einem Schultergurt (links) und einer Beinschnittstelle (rechts)

5.1.8 Messung der Interaktionskräfte an den Interaktionsflächen mittels Sechs-Komponenten Kraftsensor

Interaktionskräfte an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen können die komplexe dynamische Interaktion des Exoskeletts mit dem Muskel-Skelett-System quantifizierbar machen. Dies erlaubt insbesondere über Scherkräfte Einblicke bzgl. der Passform für die nutzende Person und deren Tragekomfort.

Interaktionskräfte

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- An der zentralen Fixierungsschnittstelle, wo auch das Eigengewicht des Exoskeletts auf den Menschen übertragen wird (z. B. Hüftgurt bei rückenunterstützenden Exoskeletten), können die zwangsläufigen Reaktionskräfte durch die Aktuatorik erfasst werden. In den Scherkraftkomponenten spiegelt sich neben dem Eigenwicht auch hier die von der Dynamik beeinflusste Passform des Exoskeletts wider. Dies hat erkennbare Auswirkungen auf den Tragekomfort.
- Aus den Druckkräften an den proximalen (oberen) und distalen (unteren) Kontaktflächen kann in Verbindung mit der Bewegungsanalyse die Kennlinie des Exoskeletts ermittelt werden. Hierbei zeichnen sich deutlich Hysteresse-Effekte zwischen Beugung und Streckung ab.
- Auftretende Scherkräfte weisen auf ein Verschieben und damit eine unzureichende Passform des Exoskeletts hin (Abbildung 13).

Erkenntnisse Interaktions- kräfte

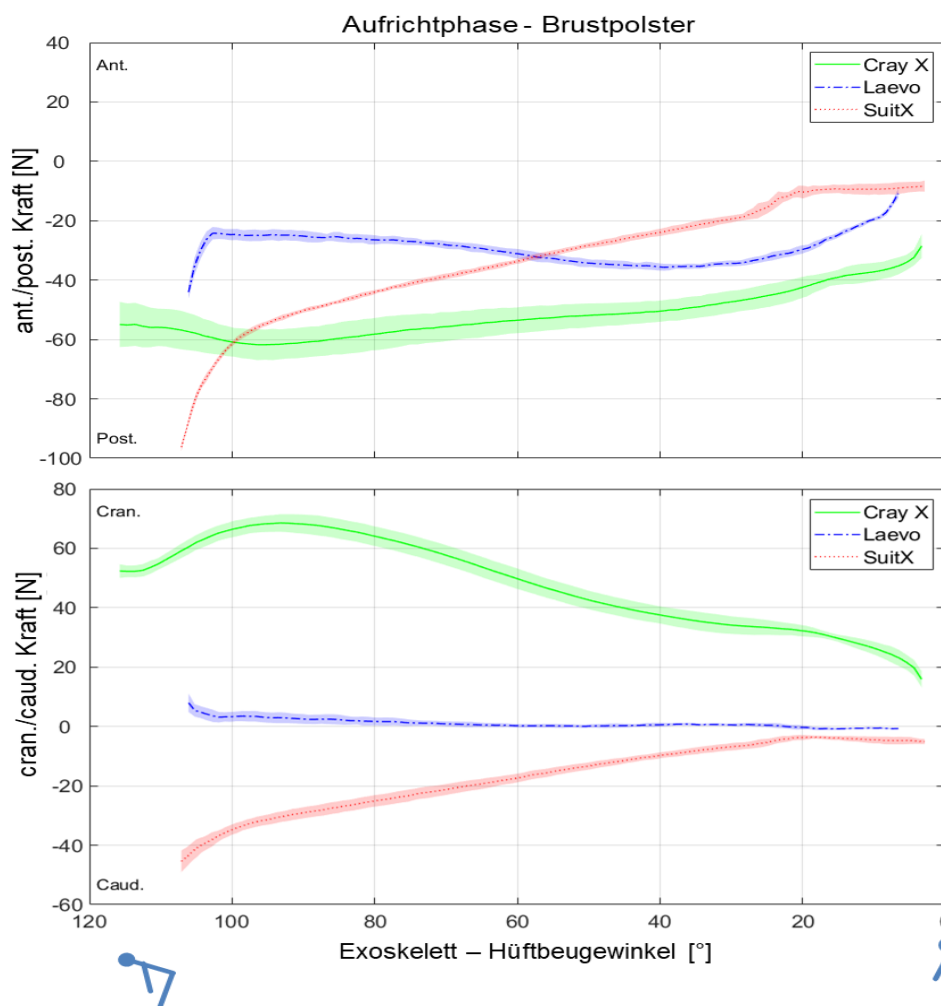


Abbildung 13: Exemplarische Darstellung der Druck- (oben) und Scherkräfte (unten) am Brustpolster beim Anheben einer Last von 10 kg

5.1.9 Analyse der Posturographie mittels Kraftmessplatte

Die Posturographie ermöglicht eine Analyse der Verlagerung des Körperschwerpunkts durch die Nutzung von Exoskeletten. Wie Erfahrungen zeigten, kann das Exoskelett durch sein Eigengewicht, Systemschwerpunkt und die Bewegungsunterstützung einen Einfluss auf die posturale Stabilität haben.

Posturographie

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Exoskelette können aufgrund ihres Eigengewichts und der Gewichtsverteilung durch das Tragen am menschlichen Körper einen Einfluss auf die Körperschwankung nehmen.
- Eine schlechte Gewichtsverteilung (z.B. als Folge eines großen Abstands der Massenschwerpunkte zwischen Mensch und System) kann infolge der notwendigen Ausgleichsbewegungen zu einem größeren Schwan-
kungsbereich und einer erhöhten Schwankungsgeschwindigkeit führen.
- Durch eine längere Eingewöhnung bzgl. der Nutzung des Exoskeletts kann sich der Effekt der Körperschwankung verringern.
- Ein unerwartetes Auftreten bzw. eine unerwartete Höhe des Unterstüt-
zungsmoments (z.B. steile und hohe Kennlinien) führt zu merklich grö-
ßeren Schwankungen.

**Erkenntnisse
Posturographie**

5.1.10 Analyse des Einflusses von Exoskeletten auf das menschliche Gangbild

Neben der posturalen Stabilität wurde auch der Einfluss der Nutzung von Exoskeletten durch sein Eigengewicht und das Gewicht der Aktuatorik auf das menschliche Gangbild untersucht. Dabei wurde insbesondere eine mögliche Veränderung der Bodenreaktionskräfte in den Untersuchungen betrachtet.

Ganganalyse

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- In den vertikalen Bodenreaktionskräften spiegelt sich das zusätzliche Lastgewicht durch das Exoskelett wider.
- Die plantare Druckverteilung kann sich aufgrund des Systemgewichts eines Exoskeletts verändern. Dies zeigen erhöhte Druckpeaks.
- Infolge der Gewichtsverteilung des Exoskeletts und den hervorgerufenen veränderten Körperschwankungen können sich Gangparameter wie die Spurbreite oder die Gangvariabilität verändern. Es sind die Maxima wie auch der Mittelwert betroffen.
- In der Schwungphase kann die maximale Hüftbeugung durch die einset-
zende Aktivierung des Exoskeletts verringert sein.
- Die mittlere Gehgeschwindigkeit kann bei schweren Exoskeletten bzw. bei nicht abgeschalteter Aktuatorik (Bremsung) leicht verringert sein.
- Aufgrund des apparativen Aufwands ist eine detaillierte Ganganalyse im Feld kaum möglich. Dagegen können subjektive Einschätzungen nach längeren Gehstrecken (> 1 Minute) durchaus informativ sein.

**Erkenntnisse
Ganganalyse**

5.1.11 Analyse des subjektiven Belastungsempfindens mittels Borg-Skala

Häufig wurden die objektiven Messmethoden zur physischen Entlastung durch Exoskelette mit subjektiven Messungen wie der Borg-Skala zur Ab-
frage des subjektiven Belastungsempfindens gekoppelt, um die objektiven Messergebnisse mit subjektiven Eindrücken abzugleichen. Auch konnten so weiche Faktoren und ggf. eine körperliche Gesamtwahrnehmung abgebildet werden. Vor allem eine Abfrage der körperlichen Anstrengung der Testperso-
nen lieferte wichtige Informationen zur wahrgenommenen Unterstützungslei-
stung und dem Empfinden der nutzenden Person.

Borg-Skala

**Subjektives
Belastungs-
empfinden**

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- Bei der Nutzung eines Exoskeletts sinkt bei ausreichender Unterstüt-
zungskraft die subjektiv empfundene körperliche Anstrengung.
- Die subjektive Anstrengung unterscheidet sich in Abhängigkeit der Be-
wegungsaufgaben, der zu bewegendenden Gewichtslasten sowie der

**Erkenntnisse
Borg-Skala**

empfundenen Entlastung mit dem Exoskelett. Entscheidend ist auch dabei die eingestellte Unterstützungsleistung.

- Der empfundene Unterstützungseffekt korreliert nicht immer mit dem gemessenen Effekt aus EMG-Messungen.
- Bei höherer sofort spürbarer Unterstützung ist zunächst das subjektive Entlastungsempfinden höher. Dies ändert sich jedoch nach einer gewissen Zeit – besonders bei passiven Systemen – sichtbar, da auf Dauer das „gegen das System arbeiten“ als belastend empfunden wird.

5.2 Erkenntnisse aus durchgeführten Feldstudien

Nachfolgend werden Untersuchungen im Feld beschrieben, die in Form von Studien oder Workshops zur testweisen Nutzung von Exoskeletten in gewerblichen Betrieben durchgeführt worden sind (Tabelle 3).

**Ergebnisse
Feldstudien**

Tabelle 3: Übersicht der herangezogenen Systeme bei Feldmessungen

**Exoskelette
Feldstudien**

System	Körper-region		Aktuierung		Umgebung		Messmethode			
	Rücken	Schulter	passiv	aktiv	Feldmessung	Anwenderworkshop	EMG	Motion Capture	Herzschlagfrequenz	Belastungsempfinden
Chairless Chair (Noonee)	X		X			X				X
BackX (SuitX)	X		X		X		X	X		X
Laevo v2 (Laevo)	X		X		X		X	(X)		X
Rakunie (N-Ippin)	X		X			X				X
SoftExo (Hunic)	X		X			X	X	X	X	X
Cray X (German Bionic)	X			X	X		X	X	X	X
Airframe (Levitate)		X	X		X	X	X			X
Paexo Shoulder (OttoBock)		X	X		X	X	X	(X)		X
ShoulderX (SuitX)		X	X		X		X	X		X
Skelex 360 (Skelex)		X	X		X	X		(X)		X
Lucy (HSU)		X		X	X		X	X		X

5.2.1 Untersuchungen in gewerblichen Betrieben

Ziel der Felduntersuchungen war es, die im Labor in kontrollierter Versuchsumgebung durchgeführten Messungen für reale Tätigkeitsprofile und unter realen Arbeitsbedingungen (z.B. an Kommissionierarbeitsplätzen oder im Warenumschlag) durchzuführen. Für ein konkretes Untersuchungsdesign wurden dabei in diesem Kontext insbesondere die Elektromyographie, das Motion-Capture-Verfahren sowie die Herzschlagfrequenzmessung angewendet und um die Abfrage des subjektiven Belastungsempfindens ergänzt.

Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen aus der Anwendung:

- EMG-Messungen im Feld konnten grundsätzlich entlastende Effekte der unterstützten Gelenke bestätigen. Dennoch fielen die Effekte aufgrund der methodisch unterschiedlichen Vorgehensweise (Ablauf) zu den Labormessung geringer aus. Gründe dafür sind:
 - Der Arbeitsablauf und Gewichtsbelastungen konnten nicht oder nur eingeschränkt standardisiert werden.
 - Es wurden – im Hinblick auf den Unterstützungsbereich durch das Exoskelett – viele Nebentätigkeiten oder Unterbrechungen während der Arbeit mitgemessen.
 - Bewegungen mit dem größten Unterstützungspotential des jeweiligen Exoskeletts entsprachen oft nur einem geringen Prozentsatz des Arbeitsalltags an den untersuchten Arbeitsplätzen.
- Reale Arbeitsaufgaben belasten – ganzheitlich betrachtet – häufig unterschiedliche Körperbereiche, während Exoskelette i.d.R. nur ausgewählte Körperbereiche adressieren.
- Der Aufbau des Systems und insbesondere das Kraftausmaß, der Zeitpunkt der Wirkung und die Interaktion erwiesen sich bei Nebentätigkeiten teils als hinderlich.
- An beengten Arbeitsplätzen führte ein ausladender Bauraum des Exoskeletts zu erschwerten Arbeitsbedingungen mit resultierender geringer Akzeptanz der nutzenden Personen.

Weitere Studien in der Logistik und dem Warenumsatz führten zu folgenden ergänzenden Erkenntnissen:

- Der Zeitanteil mit signifikanter Exoskelett-Unterstützung ist meist geringer als vor Einsatz des Systems erwartet. Dieser liegt meist unter 20% – oft sogar unter 10% – der Arbeitszeit (Abbildung 14).
- Bereits einfache ergonomische Gestaltungsmaßnahmen des Arbeitsplatzes verringern den effektiven Nutzwert des Exoskeletts erheblich (z.B. Höhenanpassung der Arbeitsfläche).
- Die Gestaltung kurzer Pausen gestaltet sich mit Exoskelett mitunter schwieriger (z.B. An-/Ablegedauern, fehlender Platz für Lagerung).

Tätigkeitsprotokoll: 100 % Heben u. Tragen – Materialumsatz: 1 t/h

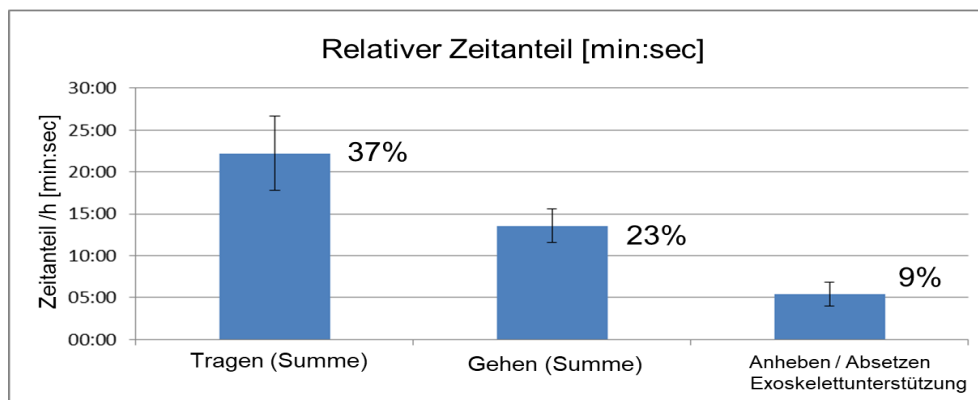


Abbildung 14: Zeitanteile der unterschiedlichen Tätigkeiten in einem Paketverteilzentrum
(weitere Nebentätigkeiten - ohne Belang für die Exoskelettnutzung - wie Stehen oder Scannen der Pakete sind nicht dargestellt)

5.2.2 Anwenderworkshops

Neben Feldversuchen wurden zudem auch Workshops mit heterogenen Anwendungspartnern und -szenarien (z.B. aus Automobilzulieferindustrie, Containerumschlag, Logistik) durchgeführt.

Folgende Erkenntnisse und erkennbare Tendenzen zeigten sich in den durchgeführten Anwenderworkshops:

- Nicht alle Systeme waren für den Einsatz an jedem Arbeitsplatz geeignet, so variierten die Unterstützungseffekte zwischen den Exoskeletten.
- Während der Einsatz einiger Systeme in einer spürbaren Entlastung resultierte, schränkten andere Exoskelette die nutzenden Personen in ihrer Bewegung ein.
- Die herrschenden Arbeits- (z.B. schmutzige oder beengte Umgebung) und Umgebungsbedingungen (z.B. Kompatibilität mit PSA) nahmen einen zentralen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit eines Systems.

5.2.3 Untersuchungen zur Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit

Im Rahmen der Durchführung von Workshops und Feldstudien in Betrieben wurden auch Studien zur Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit von verschiedenen aktiven und passiven Exoskeletten durchgeführt. Die Befragten hatten unterschiedliche Berufserfahrungen sowie verschiedene persönliche Einstellungen und Empfindungen im Umgang mit Exoskeletten.

Wie sich in den Studien gezeigt hat, haben insbesondere die Eigenschaften von Exoskeletten, deren Integration in das Arbeitsumfeld und die grundsätzliche Herangehensweise bei der Vorbereitung und Durchführung von Studien bzw. dem Einsatz einen wahrnehmbaren Einfluss auf die Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit von Exoskeletten:

- Die Eigenschaften von Exoskeletten und deren physische und optische Erscheinung können die Akzeptanz zusätzlich beeinflussen.
- In Bezug auf die Integration in das Arbeitsumfeld nehmen nachfolgende Punkte eine entscheidende Rolle ein: die Abstimmung der Systeme auf räumliche und klimatische Gegebenheiten, die Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Systeme auch in „rauen“ Arbeitsumgebungen, die Kombinierbarkeit mit vorgeschriebenen Ausrüstungen der Arbeitssicherheit (PSA) sowie die Kombinierbarkeit mit Arbeitsmitteln.
- Auch das Vorgehen der betrieblichen Einführung kann maßgeblich eine weitere Systemnutzung durch die Belegschaft beeinflussen und einer Stigmatisierung entgegenwirken, indem u.a. die Beschäftigten über die Funktionsweise, die Wirksamkeit und den Nutzen der Systeme aufgeklärt werden, Führungskräfte die betriebliche Einführung positiv begrüßen und einen aktiven Einsatz der Systeme im Arbeitsalltag fördern, eine freiwillige Nutzung bestärkt und kommuniziert wird sowie eine offene und innovative Unternehmenskultur gelebt wird.
- Die Beschäftigten haben oft eine falsche Vorstellung und überschätzen den unmittelbar spürbaren Unterstützungseffekt. Zusätzlich dazu lehnen überdurchschnittlich viele nutzende Personen ein System nach nur wenigen Stunden grundsätzlich ab, da sie plötzlich in eine andere Körperhaltung „gezwungen“ werden.

Entsprechend lassen sich aus den Studien übergeordnete Erkenntnisse zur Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit von Exoskeletten ableiten:

**Anwender-
workshops**

**Erkenntnisse
Anwender-
workshops**

Akzeptanz

**Gebrauchs-
tauglichkeit**

**Ergebnisse
Akzeptanz**

**Ergebnisse
Gebrauchs-
tauglichkeit**

- Das Aufklären der Belegschaft über Nutzen und technische Wirkungsweise der Systeme kann die Systemakzeptanz erhöhen.
- Die körperliche Wahrnehmung und der Selbstwert nehmen einen Einfluss auf den Einsatz des Systems, weil die nutzende Person möglicherweise mit eigenen Erkrankungen bzw. körperlichen Schwächen beim Einsatz konfrontiert wird.
- Das „soziale Ansehen“ der nutzenden Person oder der befürwortenden Führungskraft im Unternehmen kann die Entscheidung über eine Nutzung des Systems beeinflussen.

Grundsätzlich war es von Vorteil, wenn es vor Ort eine verfügbare Ansprechperson und für das Exoskelett allgemein verständliche Hinweise für den Einsatz gab. Als hilfreich erwies sich in diesem Zusammenhang auch ein Informationsaustausch zwischen Exoskeletthersteller und nutzendem Betrieb.

6 7-Phasen-Modell zur Evaluation von Exoskeletten

Aufbauend auf (studienbasierten) Erfahrungen zur Anwendung und Evaluation von Exoskeletten wurde das 7-Phasen-Modell als generische Vorgehensweise zur Bewertung von Exoskeletten entwickelt. Es sieht sieben aufeinander abgestimmte Phasen vor (Abbildung 15), die jedoch je nach Fragestellung nicht alle zwingend durchlaufen werden müssen, und ist ein als Kreislauf gestaltetes Modell zur „kompletten“ Evaluation.

7-Phasen-Modell

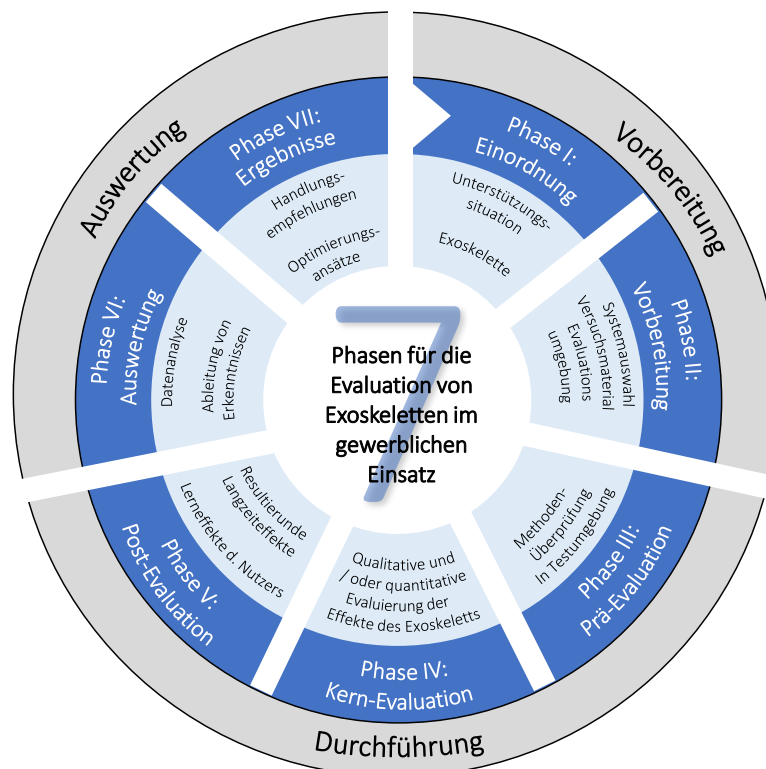


Abbildung 15: 7-Phasen-Modell zur Evaluation von Exoskeletten (nach [Ral21])

- Phase I dient der Analyse der Unterstützungssituation sowie aller relevanter Rahmenbedingungen.
- Phase II dient der Auswahl eines oder mehrerer geeignet erscheinender Exoskelette für die Evaluierung sowie der Vorbereitung der Evaluationsumgebung (u.a. Testparcours, Fragebögen, Messmethoden).
- Phase III dient einer ersten Erprobung hinsichtlich eines Tests der Evaluationsumgebung inklusive der Mess- und Bewertungsmethode, jedoch ohne dabei bereits auf konkrete Ergebnisse abzielen.
- Phase IV dient der eigentlichen Durchführung der Evaluation, bei welcher Exoskelette durch Testpersonen bei realitätsnahen Tätigkeiten getestet und durch Mess- und Analysemethoden begleitet werden.
- Phase V dient der Evaluation von Langzeiteffekten durch Exoskelette. Das Vorgehen aus Phase IV wird ein- oder mehrmalig nach definierten Zeiträumen von mehreren Wochen bis wenigen Monaten wiederholt.
- Phase VI dient der Auswertung aller gesammelten Messdaten und Bewertungen sowie der Ableitung von Erkenntnissen aus der Evaluation.
- Phase VII dient der Ableitung von Handlungsempfehlungen, die einsatzspezifische Maßnahmen berücksichtigen.

7 Handlungsempfehlungen zu Einsatz und Evaluation von Exoskeletten

In der Folge wurden aus dem gesammelten Erfahrungsschatz zu z.B. dem Stand der Technik, Testszenarien sowie Projektergebnissen und abgeleiteten (Studien-)Erkenntnissen übergeordnete Handlungsempfehlungen in Bezug auf den Einsatz, die Nutzbarkeit und Akzeptanz sowie die Evaluation von Exoskeletten formuliert. Diese werden nachfolgend kategorisiert benannt.

Handlungsempfehlungen

7.1 Empfehlungen in Bezug auf den Einsatz von Exoskeletten

Nachfolgend werden zunächst Empfehlungen benannt, die sich auf den generellen Einsatz von Exoskeletten beziehen:

- TOP-Prinzip des Arbeitsschutzes beachten,
- Gefährdungsbeurteilung durchführen,
- Herstellerinformationen beachten,
- Exoskelette adressieren meist nur eine Körperregion,
- Exoskelette unterstützen nur Teile der Tätigkeiten,
- Bewegungsbereiche beachten,
- Nebentätigkeiten beachten,
- Anforderungen an Dynamik beachten und
- sicherheitsrelevante Aspekte beachten.

Bei der Auswahlentscheidung eines geeigneten Exoskeletts zur Unterstützung der Beschäftigten bei einer gegebenen Tätigkeit kann ein schrittweises Vorgehen unterstützen (siehe [Ral22]).

7.2 Empfehlungen in Bezug auf Nutzbarkeit und Akzeptanz

Weitere Leitlinien können die Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit erhöhen. Diese werden u.a. durch die folgenden Punkte adressiert:

- individuelle Unterschiede beachten,
- Bewegungstreue beachten,
- gute Passform garantieren,
- Drehmoment-Kennlinie des Exoskeletts beachten,
- Systemeinführung und Testphase planen und
- transparente Kommunikation fördern.

7.3 Empfehlungen in Bezug auf die Evaluation

Des Weiteren konnten in dem Projekt noch weitere Hilfestellungen abgeleitet werden, die sich auf die Planung, Durchführung und Auswertung einer Evaluation von Exoskeletten beziehen.

- Wahl geeigneter Messmethoden sicherstellen,
- Messmethoden korrekt anwenden,
- qualitative und quantitative Messmethoden kombinieren,
- standardisierte und charakteristische Bewegungsfolgen beachten,
- Evaluation in regelmäßigen Abständen wiederholen,
- arbeitsmedizinische Vorsorge ermöglichen und
- Vorgehensweise zum Effektnachweis beachten.

Für eine ausführlichere Beschreibung der Leithilfen wird auf den im Projekt entstandenen Leitfaden verwiesen.

8 Leitfaden zur Evaluation von Exoskeletten

Leitfaden

Der Leitfaden zur Evaluation von Exoskeletten umfasst ein mehrstufiges Vorgehen und adressiert vorrangig Praktikerinnen und Praktiker in gewerblichen Betrieben. Das Kernziel des Leitfadens ist es, Betrieben eine strukturierte Evaluation von Exoskeletten zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, Exoskelette als personenbezogene Schutzmaßnahme zur Unterstützung der Beschäftigten an gewerblichen Arbeitsplätzen einzusetzen. Aufbauend werden den Betrieben dafür mit dem Leitfaden Handlungshilfen an die Hand gegeben, die eine zielgerichtete Analyse biomechanischer, kognitiver sowie arbeitsphysiologischer Effekte ermöglichen sowie die Bewertung der grundsätzlichen Eignung im Anwendungsfall erleichtern können. Konkret sind dies

- Checklisten zur Analyse von Tätigkeiten, des Arbeitsumfelds oder der Unternehmenskultur,
- eine Kriterien-Methoden-Matrix zur Empfehlung geeigneter Messmethoden für relevante Evaluationskriterien,
- Leitfragen in Bezug auf die Eignung von Exoskeletten,
- Testszenarien für die Evaluation von Exoskeletten,
- Fragebögen zur Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit sowie für Betriebsmessungen mit Exoskeletten sowie
- eine mögliche Vorgehensweise zum Nachweis von Effekten aus der Nutzung von Exoskeletten.

Zentral sind zudem die Handlungsempfehlungen, die aus den Erkenntnissen des Projekts abgeleitet und zusammenfassend dargestellt sind (siehe auch vorangehender Abschnitt 7). Dazu ist der Leitfaden nach dem 7-Phasen-Modell gegliedert. Zusammenfassend ist der Leitfaden zur Evaluation von Exoskeletten so gestaltet, dass er anwendende Personen unabhängig ihres fachlichen Backgrounds und ihrer Vorkenntnisse kontrolliert durch eine Selbstevaluation führt. Dabei ist der Leitfaden so konzipiert, dass eine Evaluation nicht nur einmalig bei der Einführung oder Tests neuer Systeme, sondern auch wiederholt während des dauerhaften Einsatzes von Exoskeletten zur Anwendung kommen kann.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Fokus von Exo@Work lag auf der Untersuchung und Benennung geeigneter Vorgehensweisen zur Evaluation von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Dazu wurden 18 Exoskelette (davon 16 kommerziell erhältliche Systeme und zwei eigens in der Arbeitsgruppe entwickelte Prototypen) mit unterschiedlicher Morphologie und Funktionsweise in exemplarischen gewerblichen Anwendungsfällen betrachtet. Dazu wurden die Studien sowohl in Laborumgebung als auch an gewerblichen Arbeitsplätzen mit knapp 80 Testpersonen durchgeführt. Abbildung 16 fasst insgesamt die zentralen Inhalte des Projekts Exo@Work und aufbauenden Ergebnisse zusammen.

Zusammenfassung

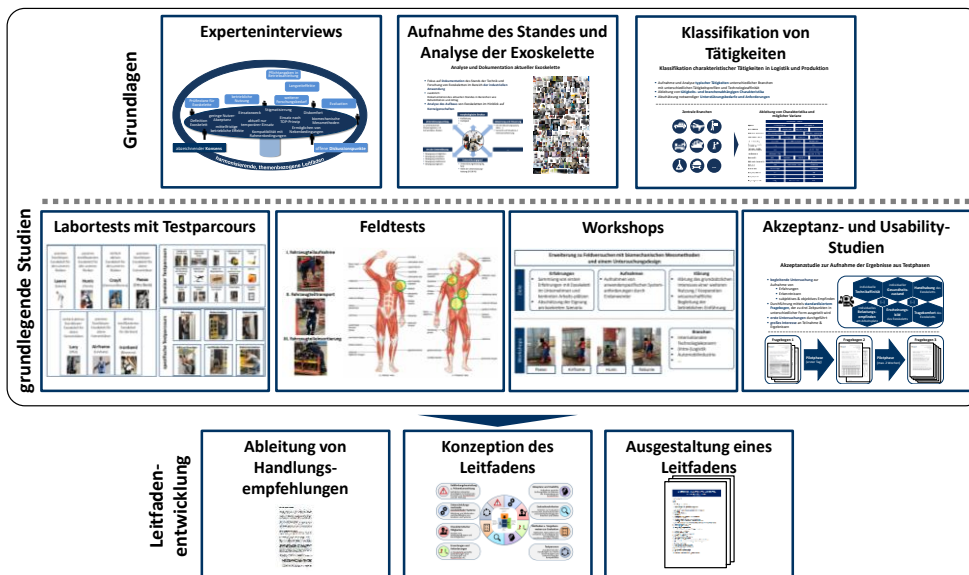


Abbildung 16: Synopsis zur Zusammenfassung des Vorgehens in Exo@Work

Pandemiebedingt konnten die Feldmessungen in Exo@Work nicht in der gewünschten Breite durchgeführt werden. Entsprechend bedarf es in Zukunft speziell noch weiterer Untersuchungen in Bezug auf die generelle Akzeptanz und die Praxistauglichkeit von Exoskeletten. Schließlich müssen die Langzeitwirkungen von Exoskeletten beim Einsatz an gewerblichen Arbeitsplätzen noch viel eingehender untersucht werden, um Nutzen und mögliche Folgen nach einer länger andauernden Nutzung der Exoskelette genauer beschreiben zu können.

Insgesamt konnte jedoch gezeigt werden, dass der Einsatz von Exoskeletten bei ausgewählten Tätigkeiten zu einer Unterstützung von nutzenden Personen im Allgemeinen bzw. Beschäftigten im speziellen gewerblichen Anwendungsfall führen kann. Der Leitfaden mitsamt Handlungsempfehlungen kann Betrieben eine Hilfestellung dazu geben, einen zweckmäßigen Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen zu fördern sowie die Durchführung einer zielgerichteten Evaluation unter Anwendung geeigneter Kriterien und Messmethoden zu befähigen.

Literaturverzeichnis und weiterführende Literatur

- [Abd08] M. Abdoli-E, J.M. Stevenson: The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clinical Biomechanics*, 23 (3), 372-380, 2008.
- [BAuA19a] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Band 1, 1. Auflage, 2019.
- [BAuA19b] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Lasthandhabungsverordnung Heben, Halten, Tragen, 2019.
- [BAuA20] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - Berichtsjahr 2019. Unfallverhütungsbericht Arbeit, 1. Auflage, 2020.
- [BGBl96] Bundesgesetzblatt I: § 4 ArbSchG, Allgemeine Grundsätze, 1996. <https://arbschg.net/paragraph-4>, letzter Aufruf: 10.03.2022.
- [BGHM17] Berufsgenossenschaft Holz und Metall: Einsatz von Exoskeletten an (gewerblichen) Arbeitsplätzen, Fach-Information Nr. 0059, 2017.
- [BMAS06] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Berufskrankheiten-Verordnung - Merkblätter zu Berufskrankheiten, Bundesarbeitsblatt 10-2006, Berufskrankheit 2108, 2006.
- [Bos19] R. Bostelman, Y.S. Li-Baboud, A. Virts, S. Yoon, M. Shah: Towards Standard exoskeleton Test Methods for Load Handling. Wearable Robotics Association Conference (WearRacon), 2019.
- [Cor76] E.N. Corlett, R.P. Bishop: A technique for assessing postural discomfort. *Ergonomics*, 19 (2), 175–182, 1976.
- [DGUV17] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: DGUV Information 211-042 – Sicherheitsbeauftragte, 2017.
- [DGUV18] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: FBHL-006 „Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen“, 2018.
- [DGUV20] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: FBHL-020 „Checkliste für den betrieblichen Einsatz von Exoskeletten“, 2020.
- [Fra18] T. Franke, C. Attig, D. Wessel: Affinity for Technology Interaction (ATI) Scale, 2018.
- [Gli20] U. Glitsch, I. Bäuerle, L. Hertrich, K. Heinrich, M. Liedtke: Biomechanische Beurteilung der Wirksamkeit von rumpfunterstützenden Exoskeletten für den industriellen Einsatz. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 74, 294–305, 2020.
- [Har88] S. G. Hart, L. E. Staveland: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Human Mental Workload*, 139–183, 1988.
- [Hef19] M. Hefferle, M. Lechner, K. Kluth, M. Christian: Development of a Standardized Ergonomic Assessment Methodology for Exoskeletons Using Both Subjective and Objective Measurement Techniques. In: J. Chen (Hrsg): *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*, 962, 49-59, 2019.
- [Hof21a] N. Hoffmann, G. Prokop, R. Weidner: Methodologies for Evaluating Exoskeletons with Industrial Applications. *Ergonomics* 65 (2), 1-38, 2021.
- [Hof21b] N. Hoffmann, L. Ralfs, R. Weidner: Leitmerkmale und Vorgehen einer Implementierung von Exoskeletten: Zentrale Aspekte bei Nutzung von Exoskeletten in industrieller Anwendung. In: *Zeitschrift für Wirtschaftlicher Fabrikbetrieb* 116, Heft 7-8, 525-528, 2021.

- [IFA19] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Gefährdungsbeurteilung für Exoskelette – Version 1.1, 2019.
- [INQA19] Initiative Neue Qualität der Arbeit (INQA): Fragebogen über Beschwerden am Bewegungsapparat (Nordischer Fragebogen), 2019. http://www.rueckenkompass.de/download_files/doc/Fragen-Nordischer.pdf, letzter Abruf: 12.10.2019.
- [Jäg01] M. Jäger, A. Luttmann, R. Göllner, W. Laurig: The Dortmunder - Biomechanical Model for Quantification and Assessment of the Load on the Lumbar Spine. Society of Automotive Engineers. Inc., 9, 2163-2171, 2001.
- [Joh21] J. Johns, K. Heinrich, U. Glitsch: Biomechanische Analyse der Unterstützungswirkung von rumpfunterstützenden Exoskeletten bei manueller Lasthandhabung, Beitrag A.1.11. In: 67. GfA-Frühjahrskongress – Arbeit HUMAINE gestalten, 2021.
- [Kai14] R. Kaiser: Qualitative Experteninterviews - Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung, 2014.
- [Kar77] O. Karhu, P. Kansu, I. Kuorinka: Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. Applied Ergonomics, 8 (4), 199–201 (1977).
- [Kot12] O. D. Kothgassner, A. Felnhofe, N. Hauk, E. Kastenhofer, J. Gomm, I. Kryspin-Exner: TUI Technology Usage Inventory Manual, ICRUS Research Team, 2012.
- [Kos09] J. Kosok: Bald von der Stange: der Cyberdyne HAL Robotic Suit, 2009. <https://www.engadget.com/de-2009-04-11-bald-von-der-stange-der-cyberdyne-hal-robotic-suit.html>, letzter Aufruf: 08.04.2022.
- [Koz20] Z. Kozinc, S. Baltrusch, H. Houdijk, N. Šarabon: Reliability of a Battery of Tests for Functional Evaluation of Trunk Exoskeletons. Applied Ergonomics, 86, 2020.
- [Lie19] M. Liedtke, U. Glitsch, K. Heinrich, T. Bömer, C. Werner: Exoskelette – Aspekte der Gefährdungsermittlung. In: DGUV Report 2/ Fachgespräch Ergonomie 2019, 2019.
- [Lin22] C. Linnenberg, R. Weidner: Industrial Exoskeletons for overhead work: Circumferential pressures on the upper arm caused by the physical human-machine-interface. Applied Ergonomics, 101, 2022.
- [MAS06] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), EU Nr. L 157, 2006.
- [MPG93] Richtlinie 93/42/EWG des Rates vom 14. Juni 1993 über Medizinprodukte, EU Nr. L 169, 1993.
- [Nab18] C. Nabeshima, K. Ayusawa, C. Hochberg, E. Yoshida: Standard Performance Test of Wearable Robots for Lumbar Support. IEEE Robotics and Automation Letters, 3 (3), 2182-2189, 2018.
- [PSA16] Verordnung (EU) 2016/425 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG des Rates, EU Nr. L 81, 2016.
- [Ral21] L. Ralfs, N. Hoffmann, R. Weidner: Method and Test Course for the Evaluation of Industrial Exoskeletons. Applied Sciences, 11 (20), 2021.
- [Ral22] L. Ralfs, N. Hoffmann, R. Weidner: Approach of a Decision Support Matrix for the Implementation of Exoskeletons in Industrial Workplaces. In: Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021, 165-176, 2022.
- [Sch18] M. Schrepp: User Experience Questionnaire Handbook, Version 6, 2018.

- [Ste20] B. Steinhilber, T. Luger, P. Schwenkreis, S. Middeldorf, H. Bork, B. Mann, A. von Glinski, Thomas A. Schildhauer, S. Weiler, M. Schmauder, K. Heinrich, G. Winter, G. Schnalke, P. Frener, R. Schick, S. Wischniewski, M. Jäger: AWMF-Leitlinie: „Einsatz von Exoskeletten im beruflichen Kontext zur Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von arbeitsassoziierten muskuloskelettalen Beschwerden“, 1. Auflage, 2020.
- [Wak09] J. Wakula, K. Berg, K. Schaub, R. Bruder, U. Glitsch, R. P. Ellegast: Der montagespezifische Kraftatlas. 3. BGIA-Report, 2009.
- [Wei18] R. Weidner, A. Karafillidis: Distinguishing Support Technologies. A General Scheme and Its Application to Exoskeletons. In: Developing Support Technologies – Integrating Multiple Perspectives to Create Assistance that People Really Want, 85-100, 2018.
- [Wei20a] R. Weidner, C. Linnenberg, N. Hoffmann, G. Prokop, V. Edwards: Exoskelette für den industriellen Kontext: Systematisches Review und Klassifikation. In: 66. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften: Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch, 2020.
- [Wei20b] R. Weidner, C. Linnenberg, N. Hoffmann, G. Prokop: Exoskelette im industriellen Anwendungsfall: Eine multikriterielle Betrachtung aus verschiedenen Perspektiven. In: 66. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften: Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch, 2020.

Indexverzeichnis

7-Phasen-Modell	33
Akzeptanz	15, 31
Arbeitsschutz	
Arbeitsschutzgrundsätze.....	7
Benutzerrichtlinien	7
Persönliche Schutzausrüstung	7
TOP-Prinzip	6
Belastungen	
Leitmerkmalmethoden	9
Muskel-Skelett-Erkrankungen	6
Physische Belastungsarten	8
Exoskelette	
Anwendungsgebiete	5
Aufbau	11
Definition	6
Exoskelette Feldstudien.....	29
Exoskelette Laborstudien	20
Handlungsbedarfe.....	14
Stoßrichtungen	13
Unterstützungsformen	11
Unterstützungsprinzipien	11
Voraussetzungen	10
Gebrauchstauglichkeit	15, 17, 31
Gefährdungsbeurteilung	8
Gewerbliche Arbeitsplätze	10
Anwendungsszenarien.....	9
Arbeitstätigkeiten	9
Tätigkeitsmerkmale	10
Handlungsempfehlungen	34
Leitfaden	35

Messmethoden

Biomechanische Modellierung.....	14, 24
Borg-Skala.....	28
Druckmessung	25
Elektromyographie	22
Fragebogen	15
Ganganalyse	28
Herzschlagfrequenzmessung.....	25
Interaktionskräfte	26
Interview.....	13
Kennlinie	14, 20
Motion Capture	23
Nahinfrarotspektroskopie	25
Posturographie.....	27
Prüfstand.....	14
Spiroergometrie	25

Prävention

Studien

Anwenderworkshops	31
Ergebnisse Akzeptanz	31
Ergebnisse Feldstudien.....	29
Ergebnisse Gebrauchstauglichkeit	31
Ergebnisse Laborstudien	19
Studiendesign Feld	18
Studiendesign Labor.....	16
Studiendesign Workshops	18

Subjektives Belastungsempfinden

Testparcours

Allgemeine Testszenarien	17
Aufgabenspezifische Testszenarien	17
Elementare Testszenarien.....	16