



Fraunhofer

AUSTRIA

EXOSKELETTE IN PRODUKTION UND LOGISTIK

Grundlagen,
Morphologie und
Vorgehensweise zur
Implementierung



In Kooperation:

TÜV
AUSTRIA

ewvb

INHALT

1	MOTIVATION: WARUM EXOSKELETTE?	4
2	GESUNDHEIT UND KRANKHEITSURSACHEN	5
	2.1 Demografischer Wandel in Österreich	5
	2.2 Risikofaktor körperliche Arbeit	6
	2.3 Krankenstände als Resultat in Österreich	7
3	EXZELLENZ IN DER ARBEITSGESTALTUNG	8
	3.1 Nachhaltige Arbeitsgestaltung	9
	3.2 Innovationstrends der Arbeitsgestaltung	10
	3.3 Assistenzsysteme im Arbeitssystem der Zukunft	11
4	TECHNOLOGIE EXOSKELETT	13
	4.1 Technische Funktions- und Wirkweisen und sowie Grundkonzepte	13
	4.2 Marktübersicht	13
	4.3 Morphologie	14
	4.4 Fazit zur Anwendung von Exoskeletten in der Industrie	15
5	SAFETY UND SECURITY	17
	5.1 Normen und Richtlinien	17
	5.1.1 Übersicht der Normen und Richtlinien für Exoskelette	17
	5.1.2 Anforderungen an die Entwicklung von Exoskeletten	18
	5.1.3 Anforderungen für Anwender von Exoskeletten	18
	5.2 Gefährdungsbeurteilung und Methoden zur Absicherung	19
	5.2.1 Kompatibilität mit Persönlicher Schutzausrüstung (PSA)	19
	5.2.2 Arbeitsplatzgestaltung	19
	5.2.3 Security in Design und Anwendung	20
6	EINSATZ UND ANWENDUNG	21
	6.1 Use-Case-Analyse in ausgewählten Unternehmen	22
	6.1.1 HARTL HAUS Holzindustrie GmbH	24
	6.1.2 ENGEL AUSTRIA GmbH	26
	6.1.3 WACKER NEUSON SE	28
	6.2 Fazit zu den Exoskeletten	30
	6.2.1 Fazit Exoskelett Paexo Shoulder der Firma Ottobock	30
	6.2.2 Fazit Exoskelett Laevo	30
	6.3 Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken	31
	6.4 Vorgehen und Empfehlungen zur Einführung	31
7	QUICK-CHECK ZUR INDUSTRIELLEN POTENZIALBESTIMMUNG	33
8	FAZIT UND AUSBLICK	36
9	LITERATURVERZEICHNIS	37

EXOSKELETTE IN PRODUKTION UND LOGISTIK

Grundlagen, Morphologie und Vorgehensweise zur
Implementierung

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Hold
Fabian Ranz MSc.
Fabian Holly BSc.

Fraunhofer Austria
GESCHÄFTSBEREICH PRODUKTIONS- UND LOGISTIKMANAGEMENT
GESCHÄFTSBEREICH ADVANCED INDUSTRIAL MANAGEMENT

Dipl.-Ing. Merim Cato
Dipl.-Ing. Alexandra Markis
Ing. Andreas Oberweger

TÜV AUSTRIA
Geschäftsfeld Industry & Energy

Ing. Wolfgang M. Baumann

awb Schraubtechnik- und Industriebedarf GmbH

MOTIVATION: WARUM EXOSKELETTE?

Automatisierung, Roboter, Digitalisierung. Diese Schlagwörter sind allgegenwärtig in der Industrie, und vielerorts erleichtern neuen Technologien bereits die Aufgaben am Arbeitsplatz. Anstrengende manuelle Tätigkeiten nehmen jedoch noch immer einen großen Anteil in Produktion und Logistik ein. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Unternehmen werden vor diesem Hintergrund zunehmend direkt mit neuen Assistenzsystemtechnologien, den sogenannten Exoskeletten, ausgerüstet. Diese am Körper getragenen Stützstrukturen reduzieren durch elektrische oder mechanische Unterstützung die auf den Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wirkende Belastung und verringern Gefahren von Verletzungen durch körperliche Beanspruchungen.

Exoskelette haben sich als hochtechnische Hilfsmittel in der Rehabilitation etabliert. Doch zunehmend setzt sich die Technologie auch in der Arbeitswelt der Produktion durch. In Produktions-, aber auch in Logistikbereichen sorgen Exoskelette dafür, dass körperliche Aktivitäten erleichtert werden. In der Produktion und Logistik ist die physische Belastung auf Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter oft sehr hoch. Diese gefährdet langfristig nicht nur die Gesundheit, sondern auch die Produktivität und Effizienz der Mitarbeiter. Besonders leistungsgewandelte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter überschreiten oft ihre Belastungsgrenze, z. B. wenn schwere Gegenstände zu bewegen sind. Durch den Einsatz von Exoskeletten sind vorhandene körperliche Beschwerden besser ausgleichbar, und Haltungsschäden sowie körperliche Verschleißerscheinungen sind von Anfang an auf ein Minimum reduzierbar. Wenn Arbeitsplätze aufgrund örtlicher Gegebenheiten nicht ergonomisch optimierbar sind, hilft das Exoskelett, ein Gleichgewicht herzustellen, indem bestimmte Körperregionen stabilisiert und Kraftanstrengungen verringert werden. Hier gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten.

Nach wie vor befürchtete hohe Anschaffungskosten hindern derzeit Unternehmen, sich dem Thema Exoskelette anzunehmen. Eine Studie der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt (AUVA) aus dem Jahr 2018 zeigte jedoch, dass in Österreich 21,4 % aller Krankenstandstage auf eine Erkrankung des Muskel-Skelett-Systems (MSE) zurückzuführen sind. Durchschnittlich fallen auf jeden Krankenstand 15,8 Krankenstandstage. Vor allem die Beschäftigte und der Beschäftigte der Altersgruppe 50 bis 64 Jahre sind dabei betroffen. Das entspricht einem Drittel aller Ausfälle.

Laut David Minzenmay, Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Produktions- und Automatisierungstechnik (IPA), summieren sich Krankenstände aufgrund von MSE in Deutschland auf rund 125 Mio Tage pro Jahr, was einen Wertschöpfungsverlust von rund 22,7 Mrd € verursacht. Unter Berücksichtigung dieser Zahlen relativiert sich die Investition für den Arbeitgeber. Eine Studie von ABI Research prognostiziert für das Jahr 2025 ein potenzielles Marktvolumen für Exoskelette von 1,8 Mrd \$.

Was lange Zeit nur Science-Fiction war, findet zunehmend seinen Weg in die Realität. Neue Technologien im Bereich der Sensorik sowie der Digitalisierung ermöglichen eine Kombination aus Roboter und Mensch und schaffen neue Anwendungen auch in Produktion und Logistik. Im industriellen Bereich befinden sich die Exoskelette noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Doch erste Systeme haben bereits Serienreife erlangt, und erste Industrieunternehmen beginnen, diese Systeme im laufenden Betrieb einzusetzen.

In diesem Whitepaper wird aufgezeigt, in welchen Anwendungsbereichen Exoskelette bereits einsetzbar sind, was bei der Implementierung und Nutzung vor allem im Hinblick auf das Thema Safety und Security zu berücksichtigen ist und welche Erfahrungen erste Anwendungsunternehmen im Rahmen einer Kurzstudie gesammelt haben. Es hilft vor allem Klein- und Mittelbetrieben, einen effizienten Einstieg in das Thema Exoskelette in Produktion und Logistik zu finden.

GESUNDHEIT UND KRANKHEITS- URSACHEN

Einen der zentralen Trends in Europa stellt der demografische Wandel dar, welcher im Folgenden auf die Entwicklung der Strukturen von Altersgruppen, sowie das Verhältnis von Geschlechtern bezogen wird. Statistik Austria zeigte auf, dass sich das Durchschnittsalter in Österreich allein in den letzten zehn Jahren um 1,6 Jahre erhöht hat. Folgerichtig führt diese Entwicklung auch zu einem höheren Durchschnittsalter Beschäftigter in österreichischen Industrieunternehmen (Quelle: Statistik Austria, 2019a). Bereits heute ist der Begriff des sogenannten leistungsgewandelten Mitarbeiters weit verbreitet. Dieser Begriff beschreibt nach Adenauer (2004) Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, welche aufgrund körperlicher-, verletzungs- oder altersbedingter Einschränkungen ihre Arbeitsaufgabe gar nicht mehr oder nur teilweise ausführen können). Der Zusammenhang zwischen dem Demografischen Wandel, der leistungsgewandelten Mitarbeiter sowie der hohen Anzahl der Krankheitsfälle, vor allem aufgrund von Muskel-Skeletterkrankungen in Österreich, wird vor dem Hintergrund der Notwendigkeit ergonomischer Arbeitssystemgestaltung im Folgenden dargestellt.

2.1 Demografischer Wandel in Österreich

Aktuelle demografische Untersuchungen in Österreich zeigen auf, dass die Durchschnittsbevölkerung in Österreich auch in den kommenden Jahren stetig älter wird. Von 2011 bis 2060 wird der Prozentsatz der über 45-Jährigen von 36,1 % auf 41,8 % ansteigen.

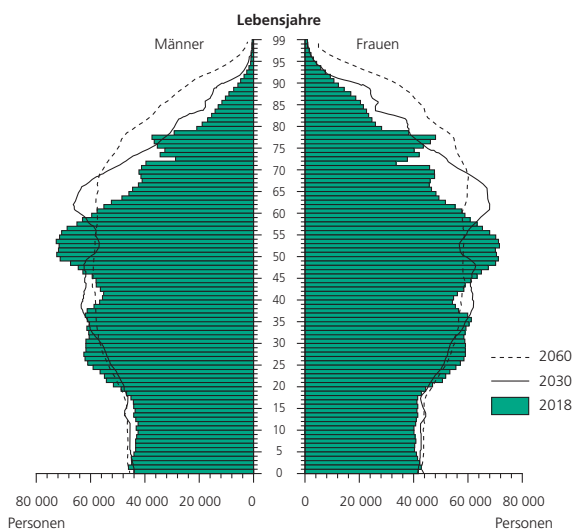


Abbildung 1: Bevölkerungspyramide 2018, 2030, 2060 (Quelle: Statistik Austria, 2019b).

Diese Entwicklung hat einen signifikanten Einfluss auf die erwerbstätige Bevölkerung. Betrug im Jahr 2011 der prozentuale Anteil

aller Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer im Alter zwischen 30 und 44 Jahren noch 38,9 %, wird dieser Anteil bis zum Jahr 2050 auf 35,4 % gesunken sein, während sich der Anteil aller erwerbstätigen Personen über 45 Jahre von 36,1 % im Jahr 2011 auf 41,8 % im Jahr 2050 erhöhen wird (Quelle: Statistik Austria, 2019c).

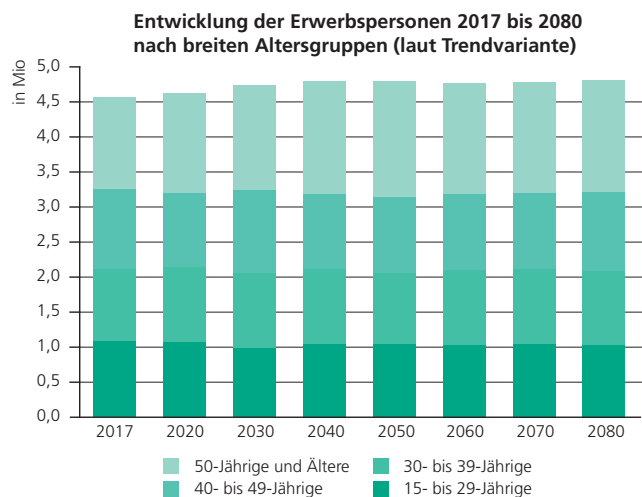


Abbildung 2: Erwerbsprognose 2018 (Quelle: Statistik Austria, 2019c).

FAZIT

Es ist als zentraler Einfluss auf österreichische Produktionsunternehmen festzuhalten, dass mit stetig steigender Zunahme des Anteils älterer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Betrieb zu rechnen ist, wodurch das Potenzial der gesamten Belegschaft stärker von entscheidender Bedeutung sein wird, als es heute der Fall ist.

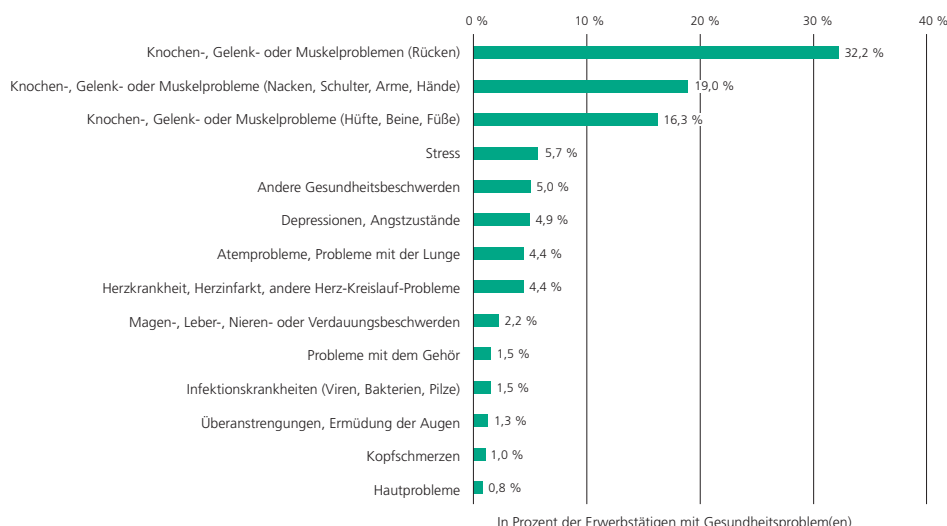
GESUNDHEIT UND KRANKHEITS- URSACHEN

2.2 Risikofaktor körperliche Arbeit

42,5 Stunden leisten vollbeschäftigte Österreicher durchschnittlich pro Woche (Eurostat, 2018). Allein dieser erbrachte Zeitaufwand macht die Arbeitswelt zu einem der zentralsten Lebensbereiche des Menschen und prägt seine Lebensgestaltung erheblich. Die im Beruf vorherrschenden Arbeitsbedingungen schaffen somit eine signifikante Grundlage nicht nur für das mentale Wohlergehen, sondern auch für die körperliche Gesundheit des Menschen. Arbeitsbedingte Belastungen haben jedoch auch das Potenzial, sich negativ auf die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auszuwirken. Die Konsequenzen reichen von der Entwicklung psychischer Probleme bis hin zu körperlichen Erkrankungen.

Eine Mikrozensus-Arbeitskräfteerhebung der Statistik Austria im Jahr 2013 ergab, dass etwa 80 % aller Erwerbstätigen am Arbeitsplatz einem Gesundheitsrisiko ausgesetzt sind (Statistik Austria, 2013). So gaben etwa sieben von zehn Erwerbstätigen an, körperlichen Risiken und vier von zehn Erwerbstätigen, psychischen Risiken am Arbeitsplatz ausgesetzt zu sein. Die häufigsten körperlichen Erkrankungsrisiken sind hierbei Überanstrengung der Augen, ergonomische Risiken und

Unfallgefahren. Schmerzen im Bereich des Rückens stellen mit Abstand das größte Gesundheitsproblem dar. Fast ein Drittel der befragten Personen (32,2 % bzw. 329 100 Personen) gab an, im Jahr vor der Befragung arbeitsbedingte Rückenprobleme gehabt zu haben, 19,0 % (193 600 Personen) berichteten über Probleme mit dem Nacken, den Schultern, den Armen oder Händen und 16,3 % (166 300 Personen) über Probleme mit den Hüften, Beinen oder Füßen. Während Männer häufiger über Rückenprobleme (33,7 % vs. 30,6 % der Frauen) oder Hüft- und Fußprobleme (18,1 % vs. 14,3 % der Frauen) klagten, gaben Frauen deutlich häufiger Probleme mit dem Nacken, den Schultern, den Armen oder Händen an (23,4 % vs. 14,9 % der Männer). Unter den befragten Erwerbstätigen waren mit 26,8 % Land- und Forstwirte/-wirtinnen am häufigsten von arbeitsbedingten Gesundheitsproblemen betroffen, mit 19,5 % folgt die Baubranche sowie mit 18,5 % das Gesundheits- und Sozialwesen. Der Wirtschaftszweig Warenherstellung befindet sich mit 14,7 % auf dem neunten Platz, gereiht nach den Wirtschaftszweigen Dienstleistungen (17,8 %), Beherbergung und Gastronomie (16,7 %), Verkehr und Lagerei (16,3 %), öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung (15,7 %), Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden (14,7 %).



FAZIT

Knochen-, Gelenk- oder Muskelprobleme zählen zu den häufigsten arbeitsbedingten Gesundheitsproblemen auch in Österreich. Diese Gesundheitsprobleme äußern sich vor allem in Form von Rückenschmerzen und weiteren Muskel-Skeletterkrankungen (MSE) von Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Produktionsunternehmen. Zu MSE zählen Erkrankungen der Wirbelsäule, der Gelenke sowie deren muskuläre und sonstige Strukturen. Darüber hinaus hängen sie eng mit physischen Fehlbeanspruchungen beziehungsweise biomechanischen Überlastungen zusammen.

Abbildung 3: Arbeitsbedingte Gesundheitsprobleme (Quelle: Statistik Austria, 2013).

2.3 Krankenstände als Resultat in Österreich

Rückenschmerzen stellen die häufigsten Gesundheitsbeeinträchtigungen dar. Sie gelten auch weltweit als „Global-Burden-of-Disease-Faktor Nr.1“; rund 1,76 Mio Menschen in Österreich litten im Jahr 2014 daran. Dicht dahinter folgen Allergien (rund 1,75 Mio Menschen), Bluthochdruck (rund 1,5 Mio Menschen) und Nackenschmerzen (rund 1,3 Mio Menschen) (BMGF, 2016).

Sowohl Rücken- als auch Nackenschmerzen können durch Muskel-Skeletterkrankungen ausgelöst werden. Darunter werden Erkrankungen des sogenannten Stütz- und Bewegungssystem, sowie die der Muskeln, Gelenke, Sehnen und Bänder verstanden. Zu den arbeitsbedingten Muskel-Skeletterkrankungen zählen unter anderem (DGUV, 2019):

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

Über alle Altersgruppen hinweg lassen sich 21,4 % aller Krankenstandstage und 15,8 % aller Krankenstände auf eine Erkrankung des Muskel-Skeletts-Systems zurückführen. Ein Drittel aller krankheitsbedingten Ausfälle aufgrund von Muskel-Skeletterkrankungen (MSE) betrifft die Beschäftigte und der Beschäftigte in der Altersgruppe 50 bis 64 Jahre. Nur 10 % der Krankenstandstage aufgrund von MSE fallen auf junge Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer (AUVA, 2019).

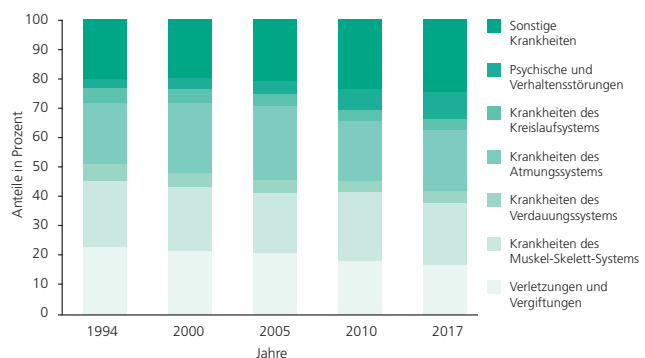


Abbildung 4: Krankenstandstage nach Krankheitsgruppen (WIFO, 2018).

Nach Schätzungen des Bundesministeriums für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz (siehe <https://www.sozialministerium.at/Ministerium/Kontakt/Impressum.html>) und der Statistik Austria betragen 2015 die volks- und betriebswirtschaftlichen Kosten im Zusammenhang mit Unfällen und Krankheiten unselbstständiger Beschäftigter rund 9,1 Mrd €, wobei rund 3,5 Mrd € direkte Kosten (direkte Zahlungen) und rund 5,6 Mrd € indirekte Kosten (Wertschöpfungsverluste, u. a. aufgrund geringerer Produktivität) darstellen (WIFO, 2018). Abbildung 5 verdeutlicht die Krankenstandsquote nach Alter und Geschlecht.

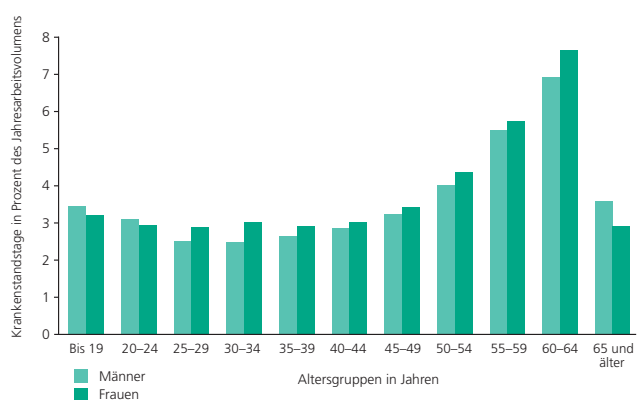


Abbildung 5: Krankenstandsquote nach Alter und Geschlecht (WIFO, 2018).

FAZIT

Ergonomische Arbeitssystemgestaltung beinhaltet somit nicht nur das Potenzial, die „Arbeitsbedingungen für Industrieunternehmen“ zu verbessern, sondern auch die volks- und betriebswirtschaftlichen Kosten zu senken und dadurch die Produktivität zu erhöhen.

EXZELLENZ IN DER ARBEITS- GESTALTUNG

Grundlegend steht der Begriff Arbeitsgestaltung als ein Sammelbegriff für alle Maßnahmen und Strategien zur Gestaltung von Arbeitssystemen, Arbeitsabläufen und Arbeitsbedingungen. Es wird zwischen korrektiver, präventiver, prospektiver, differenzieller und dynamischer Arbeitsgestaltung unterschieden (Ulich, 1994).

Korrektive Arbeitsgestaltung wird notwendig, wenn ergonomische, physiologische, psychologische und sicherheitstechnische Anforderung in der Planung nicht oder nicht angemessen berücksichtigt wurden. Präventive Arbeitsgestaltung beschreibt eine planerische Vorwegnahme möglicher physischer oder psychischer Schädigungen und Beeinträchtigungen am Arbeitsplatz. Wird im Vorfeld die präventive Arbeitsgestaltung ausreichend berücksichtigt, ersetzt dies die korrektive Arbeitsgestaltung weitgehend. Die prospektive Arbeitsgestaltung bezieht sich auf Strategien zur Schaffung von persönlichkeitsförderlichen Arbeitstätigkeiten, respektive das Schaffen von Möglichkeiten der Persönlichkeitsentwicklung im Stadium der Planung von Arbeitssystemen. Differenzielle Arbeitsgestaltung beschreibt das Bilden und Bereitstellen von gleichzeitigen Angeboten verschiedener Arbeitsstrukturen, zwischen denen die Beschäftigten wählen können. Dynamische Arbeitsgestaltung ermöglicht bestehende Arbeitsstrukturen zu erweitern beziehungsweise neue zu schaffen, um einen Lernfortschritt der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu gewährleisten (Ulich, 1994).

Bei allen Maßnahmen und Strategien zur Gestaltung von Arbeitssystemen steht der Mensch neben betriebswirtschaftlichen Aspekten im Zentrum der Betrachtung. Humanität und Betriebswirtschaftlichkeit haben die Aufgabe, im Sinne einer ergonomischen Arbeitsgestaltung synchron miteinander zu agieren. Zentrale Kriterien humaner Arbeitsgestaltung wurden bereits von Rohmert (1984), von Bachmann (1978) und von Hacker (1980) aufgezeigt. Dabei stehen folgende Kriterien im Zentrum: Ausführbarkeit, Erträglichkeit, Schadlosigkeit, Zumutbarkeit, Belastbarkeit, Beeinträchtigungsfreiheit, Zufriedenheit, Einstellungs- und Persönlichkeitsförderlichkeit.

Nach Zwart et al. (1996) hängen physische Beanspruchungen von Körperhaltungen, den angewandten Kräften, den wirkenden Arbeitsbedingungen, physischen Arbeitsbelastungen und von den individuellen Entscheidungsfreiräumen ab. Die aus den Beanspruchungen resultierenden gesundheitlichen Auswirkungen führen, wie das Altern, zu einer Änderung des physischen Arbeitsvermögens. Folgende Grafik stellt diese Zusammenhänge dar.

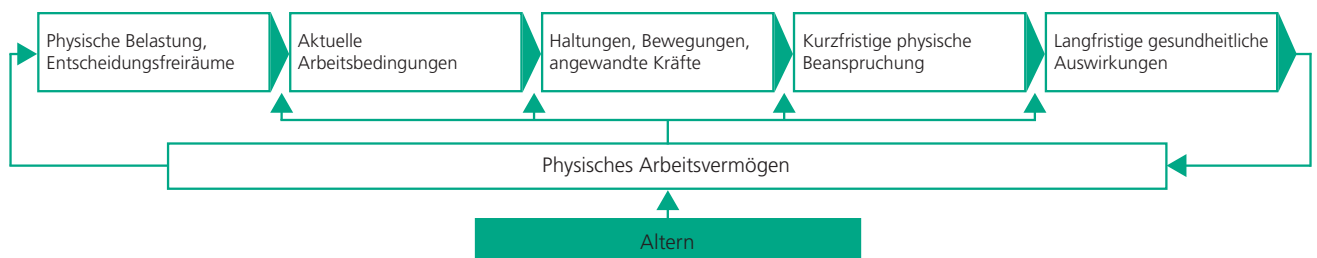


Abbildung 6: Zusammenhänge zwischen Altern und physischen Arbeitsbelastungen (Zwart et al., 1996).

Auf welcher Grundlage eine nachhaltige Arbeitsgestaltung basiert, sowie welche technischen Innovationen und Assistenzsysteme, zu denen auch Exoskelette gehören, einen nach-

haltigen Beitrag für eine humane und gleichzeitig betriebswirtschaftliche Arbeitsgestaltung liefern, ist im Folgenden dargestellt.

3.1 Nachhaltige Arbeitsgestaltung

Nachhaltige Arbeitsgestaltung folgt einem nachhaltigen Produktivitätsmanagement. Dieses wiederum folgt der Annahme, dass erfolgreiche Unternehmen sich unter sonst gleichen Bedingungen kaum durch die Qualität der Ressourcen Technologie, Betriebsmittel und Rohstoffe, jedoch grundlegend durch die Qualität der Ressource Mensch (die Beschäftigte und der Beschäftigte) und die Wirksamkeit der sie unterstützenden Organisation unterscheiden. Die Produktivitätsdefinition im klassischen Sinne ist demnach insofern Mittel zum Zweck, als dass sie kein betriebswirtschaftliches Letztziel, jedoch ein Mittel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Profitabilität und Wettbewerbsfähigkeit ist (Bokranz, 2012).



Abbildung 7: Erklärungsmodell Produktivität (Bokranz, 2012).

Wie Abbildung 8 darstellt, ist der Mensch neben Technik und Organisation das zentrale Stellglied zur Realisierung von Produktivität in Produktionsunternehmen. Dieser Zusammenhang wird durch das sogenannte MTO (Mensch-Technik-Organisation)-Konzept verdeutlicht. Das MTO-Konzept ist als soziotechnisches Analyse-, Bewertungs- und Gestaltungskonzept zu verstehen, in welchem Mensch, Technik und Organisation im Hinblick auf die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe in einer abhängigen Wechselwirkungsbeziehung zueinander stehen. Die Arbeitsaufgabe verknüpft dabei den sozialen mit dem technischen Teil eines Arbeitssystems und verbindet den Menschen mit organisatorischen Strukturen. Der Arbeitsaufgabe kommt dabei eine zentrale Rolle zu, indem diese das soziale und technische Teilsystem sowie den Menschen mit den organisato-

rischen Strukturen verknüpft. Das MTO-Konzept stellt den zentralen Bezugsrahmen zur Gestaltung von Arbeitssystemen dar. Durch das MTO-Konzept wird verdeutlicht, dass die Ge-

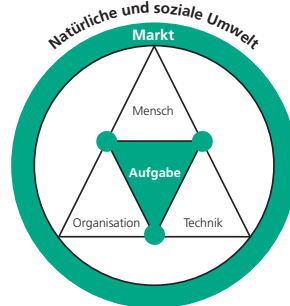


Abbildung 8: Das MTO-Konzept: Mensch, Technik und Organisation in einer Wechselwirkungsbeziehung.

gestaltung von Arbeitssystemen in Produktionsunternehmen ausschließlich dann zum angestrebten Erfolg führt, wenn menschliche, technische und organisatorische Aspekte in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Dabei werden folgende Schnittmengen unterschieden:

- **Mensch und Technik:** Diese Schnittmenge adressiert die Mensch-Maschine-Interaktion beziehungsweise die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine.
- **Mensch und Organisation:** Diese Schnittmenge adressiert die Rolle des Menschen im Arbeitssystem der Montage.
- **Technik und Organisation:** Diese Schnittmenge adressiert das soziotechnische System. Dies bedeutet die Organisation von Menschen (Werkern) und mit diesen verknüpften Technologien im Arbeitssystem der Montage, welche in einer bestimmten Weise strukturiert sind, um ein spezifisches Ergebnis zu produzieren.

FAZIT Bei der Gestaltung von Arbeitssystemen ist für synchroner Steigerungen von humanorientierten und betriebswirtschaftlichen Produktivitätseffekten stets das MTO-Konzept zu beachten. Dieses gilt ergänzend als Design-Grundsatz für die Implementierung und Nutzung innovativer Technologien in Arbeitssystemen der Zukunft.

EXZELLENZ IN DER ARBEITSGESTALTUNG

3.2 Innovationstrends der Arbeitsgestaltung

Durch steigende Produktindividualisierung wird in der produzierenden Industrie vermehrt das Konzept der sogenannten Mixed-Model-Montage verfolgt, mit dem Ziel kapazitätsauslastend, flexibel und wandlungsfähig eine Vielzahl gleichartiger Produkte einer Produktfamilie, aber auch vermehrt unterschiedliche Produkte verschiedener Produktfamilien zu montieren. Hierdurch resultiert eine zunehmende Komplexität in Bezug auf die Koordination von Informations- und Materialflüssen. Vielfach geht mit dieser Form der Montagegestaltung ein hoher Anteil von Montagetätigkeiten einher, deren Automatisierung nicht wirtschaftlich ist und vom Menschen durchgeführt wird. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter müssen den Anforderungen nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Konzepts der „Mixed-Model-Montage“ folgen, woraus ein erhöhtes Risiko für kognitive, psychische aber auch physische Belastungen bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern resultiert. Die Integration von Assistenzsystemen wirkt diesen Herausforderungen entgegen (Fast-Berglund et al., 2013).

Die allgemeine Zielsetzung von Assistenzsystemen ist, die Diskrepanz zwischen der menschlichen Leistungsfähigkeit sowie -fertigkeit und der von einer Arbeitsaufgabe geforderten Anforderung zu minimieren – mit dem Ziel, sowohl die Produktivität der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter als auch die des gesamten Arbeitssystems nachhaltig zu sichern. Assistenzsysteme verfügen vor diesem Hintergrund über eine Art Regelfunktion, indem sie die von einer Aufgabe geforderten Anforderungen mit der individuellen menschlichen Leistungsfähigkeit ausgleichen (Spillner, 2015). Allgemein werden im Kontext der Montage zwei grundlegende Arten von Assistenzsystemen unterschieden: zum einen eine technische Assistenz, z. B. in Form kooperierender oder auch kollaborierender Robotersysteme, und zum anderen in Form einer digitalen Assistenz (Informationsassistenz), welche den Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Wesentlichen durch die Repräsentation von Informationen sowie durch elektronische Absicherung

bei qualitätskritischen Prozessen unterstützt. Die Integration von Assistenzsystemen in klassische Montagesysteme führt zu einem steigenden Digitalisierungs- und Vernetzungsgrad, wodurch Assistenzsystemen eine zentrale Rolle im Kontext Cyber-physische Montagesysteme zukommt. Exoskelette gliedern sich dabei in den Kontext von Assistenzsystemen ein. Durch künstliche Exoskelette werden dabei vor allem anspruchsvolle individuelle Lösungen möglich, mit deren Hilfe leistungsgeminderte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter Unterstützung erhalten. Die Forschung und Entwicklung zu Exoskeletten ist vor allem in den USA und Japan fortgeschritten, in den USA auch für den militärischen Bereich (acatech, 2016).

Cyber-physische Systeme (CPS) realisieren eine Verbindung zwischen der physikalischen und der digitalen Welt. Dabei bauen CPS auf eingebettete Systemen auf (engl. embedded systems), welche über einen Sensor Daten einer physikalischen Umgebung erfassen, diese mittels eines Mikroprozessors verarbeiten und über Aktuatoren auf physikalische Vorgänge einwirken. Sie sind mittels digitaler Netze miteinander verbunden und können auf weltweit verfügbare Daten und Dienste zugreifen. CPS sind als (technisch) nicht abgeschlossene Systeme definiert und sind durch einen hohen Grad der Vernetzung zwischen der physischen, sozialen und virtuellen Welt gekennzeichnet (Geisberger et al., 2012). Durch die Integration von CPS in Montagesystemen entstehen sogenannte Cyber-physische Montagesysteme (CPMS). Es wird vorausgesagt, dass CPMS in der Lage sind, Herausforderungen volatiler Märkte wirtschaftlich zu begegnen und gleichzeitig auf ergonomische sowie im Hinblick auf eine alters- und altersgerechte Arbeitsgestaltung einzugehen (Dombrowski et al., 2013).

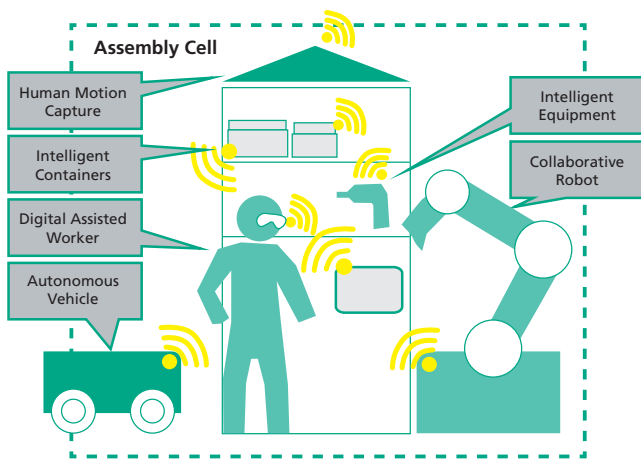


Abbildung 9: Aspekte eines Cyber-physischen Montagesystems (Erol et al., 2016).

FAZIT Assistenzsysteme werden in Arbeitssystemen der Zukunft einen zentralen Gestaltungsgegenstand einnehmen. Neben digitalen, informatischen Assistenzsystemen finden bereits heute vielfältige technische Assistenzsysteme, wie z. B. in Form von kooperativen und kollaborativen Robotiksystemen, Einzug in Produktionsunternehmen. Durch Exoskelette als weitere Form technischer Assistenzsysteme wird die Mensch-Maschine-Interaktion auf eine neue Stufe gehoben.

3.3 Assistenzsysteme im Arbeitssystem der Zukunft

Die Bandbreite von Auswahlmöglichkeiten an digitalen (Hold, 2017) und technischen (Ranz, 2018) Assistenzsystemen für die Produktion ist groß. Sie reicht vom Einsatz intelligenter Informationssysteme mit Darstellungsformen, wie Augmented Reality, bis hin zu intelligenten Mensch-Roboter-Interaktionen in Fertigung, Montage und Logistik. Die Art des Assistenzsystems variiert dabei je nach Anforderungsniveaus der Arbeitsaufgaben, welche grundlegend wie folgt eingeteilt werden (BMAS, 2018):

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

Darüber hinaus lassen sich Assistenzsysteme in Wahrnehmungsassistenzsysteme, Entscheidungsassistenzsysteme und Ausführungsassistenzsysteme einteilen (Klocke, 2017):

- **Wahrnehmungsassistenzsysteme sind:** Arbeitshilfen, welche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mithilfe von Augmented Reality unterstützen (z. B. Datenbrillen oder Pick-by-Voice-Systeme).

EXZELLENZ IN DER ARBEITS- GESTALTUNG

- **Entscheidungsassistenzsysteme** verwenden Echtzeitdaten und erstellen so Prognosen bezüglich Prozessverhalten bzw. Prozessergebnissen.
- **Ausführungsassistenzsysteme** haben das Ziel, Arbeitsbelastungen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu reduzieren, und assistieren somit auch in ergonomischer Hinsicht. Mit dieser Art der Unterstützung lässt sich neben der Ergonomie auch die Ausführungsgeschwindigkeit sowie die Präzision der Tätigkeit beeinflussen.

In Arbeitsumgebungen, in denen viel gehoben, getragen oder über Kopf gearbeitet wird und technische Hilfsmittel wie Stapler oder Kräne aus technischen Gründen nicht anwendbar sind, stellt der Einsatz von Exoskeletten eine Möglichkeit dar, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bei der Arbeit zu entlasten. Dieses Ausführungsassistenzsystem ist eine am Körper getragene Stützstruktur, die durch eine (elektro-)mechanische Unterstützung die Belastung auf den Körper oder auf Teile des Körpers reduziert und somit die Gefahr von Verletzungen verringert. Exoskelette als technische Assistenzsysteme eröffnen dabei die Möglichkeit einer Verbesserung der Arbeitssicherheit, besonders bei Tätigkeiten, bei denen aufgrund der Spezifik der Arbeitssituation, (z. B. Zugänglichkeit des Arbeitsbereichs, Art des Arbeitsmittels bzw. Arbeitsgegenstands) bisher keine oder nur unzureichende technische Hilfsmittel, z. B. beim Heben schwerer Lasten oder bei Arbeiten in Zwangshaltung, eingesetzt werden können. Exoskelette ermöglichen eine stärkere Entlastung des Muskel-Skelett-Systems bei spezifischen Tätigkeiten. Einschlägige wissenschaftliche Begleitstudien, z. B. in den Bereichen Arbeitsmedizin, Biomechanik/Arbeitsphysiologie, Sicherheitstechnik, stehen jedoch erst am Anfang (Ottobock, 2018). Doch ähnlich wie bei digitalen und robotergestützten Assistenzsystemen ist die Vielfalt des Marktangebots bereits stark ausgeprägt und stellt Produktionsunternehmen vor die Herausforderung, das richtige System, eine geeignete Aufgabe und die richtigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Bezug auf die richtige Unterstützung zu identifizieren.

FAZIT

Exoskelette werden unaufhaltsam als Assistenzsysteme in Arbeitssystemen der Zukunft Einzug halten. Die Diversität dieser Systeme wird Produktionsunternehmen genauso wie digitale und robotergestützte Assistenzsysteme vor die Herausforderung stellen, das richtige System für die richtigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Bezug auf die richtige Unterstützung zu identifizieren. Dabei gilt es, die Frage richtig zu beantworten, was bei der Auswahl von Exoskeletten von zentraler Bedeutung ist und wie dabei vorgegangen werden kann, um humanorientierte und betriebswirtschaftliche Ziele gemeinsam zu erreichen.

TECHNOLOGIE EXOSKELETT

Bei Exoskeletten handelt es sich um mechanische Gerüste, bestehend aus Streben, Gelenken und Achsen, sowie – bei aktiven Exoskeletten – Achsantrieben. Diese ahmen den menschlichen Körperbau nach und werden vom Menschen wie ein Anzug angezogen oder ein Rucksack umgeschlallt. Das Gewicht der Stützstruktur lastet dabei, mit Ausnahme von aktiven Ganzkörperausführungen, zur Gänze am Träger. Deshalb kommen hauptsächlich leichte Materialien wie Kunststoffe oder Aluminium zum Einsatz.

4.1 Technische Funktions- und Wirkweisen und sowie Grundkonzepte

Grundsätzlich lassen sich Exoskelette hinsichtlich ihrer Art der Kraftunterstützung in zwei Typen unterteilen: passive und aktive Exoskelette. Passive Exoskelette unterstützen den Träger anhand mechanischer Hilfsmittel wie z. B. durch Feder- oder Seilzugsysteme. Energie wird mechanisch mittels Federn gespeichert, wobei die potenzielle Energie, mit der die Federn bei einer bestimmten Bewegung eines Körperteils vorgespannt werden, in weiterer Folge den Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bei der Gegenbewegung unterstützt. Auftretende Belastungen werden somit wie durch eine Art Gegengewicht aufgefangen, Bewegungen werden in der Belastungsrichtung infolgedessen erleichtert und der Komfort am Arbeitsplatz wird erhöht. Da diese Assistenzsysteme ohne den Einsatz von Motoren, Sensorik sowie deren Stromversorgung arbeiten, ist deren Aufbau meist deutlich einfacher als jener von aktiven Exoskeletten.

Aktive Exoskelette bieten dem Anwender eine aktive mechanische Kraftunterstützung bei einzelnen oder kombinierten physischen Belastungsfaktoren. Da sie pneumatisch oder durch Motoren betrieben werden, über eine Stromversorgung verfügen und meist modular aufgebaut und erweiterbar sind, weisen sie eine wesentlich höhere Komplexität auf. Die Mechanismen wirken an den Gelenken oder anderen neuralgischen Punkten des Trägers und erlauben daher einen weitgehend höheren Unterstutzungsgrad. Jedoch erhöht der kompliziertere Aufbau das Eigengewicht des Anzugs stark. Die Energieversorgung erfolgt bei aktiven Exoskeletten meist elektrisch. Entweder befindet sich

ein integrierter Akku in der Stützstruktur oder das Exoskelett ist direkt am Stromnetz angeschlossen. Darüber hinaus kann der Antrieb auch pneumatisch erfolgen. Ähnlich wie bei elektrisch betriebenen Varianten gibt es auch hierbei eine Unterteilung in stationäre (Druckluftsystem) und instationäre (Gasflaschen) Versorgungen.

4.2 Marktübersicht

Der globale Markt für Exoskelette wächst kontinuierlich. Während derzeit erst etwa 7 000 Exoskelette weltweit (Stand 1. Februar 2019) im Einsatz sind, wird für die kommenden Jahre ein rasantes Absatzwachstum prognostiziert. Der Absatz von 2015 bis 2017 stieg um jährlich etwa 40 % – von 2 500 Einheiten im Jahr 2015 auf etwa 5 000 verkaufte Einheiten im Jahr 2017. 2025 sollen voraussichtlich bereits 1 100 000 Exoskelette verkauft werden (Statista, 2016).

Die Abbildung 10 gibt einen Einblick in das geschätzte Absatzwachstum.

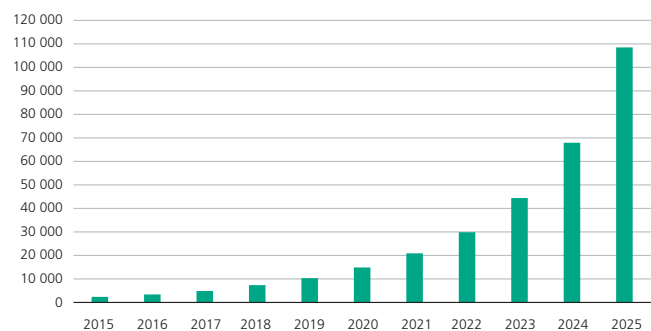


Abbildung 10: Absatz von Exoskeletten bis 2025 (Statista, 2016).

TECHNOLOGIE EXOSKELETT

Eine Weiterentwicklung der zunächst primär für militärische Anwendungen und den Einsatz in der Weltraumrobotik entwickelten Exoskelette fand für die Rehabilitation und Unterstützung bewegungseingeschränkter Menschen statt. Deshalb bedient derzeit eine große Anzahl der sich auf dem Markt befindenden Hersteller von Exoskeletten den Gesundheitssektor. Erst in jüngster Vergangenheit wurden Exoskelette auch für Unternehmen der produzierenden Industrie interessant. Hier sind vor allem leicht anwendbare Exoskelette, wie z. B. der „Chairless Chair“ der Firma noonee oder das Gurtsystem „rakunie“ von Morita bereits in großer Zahl im Einsatz.



Abbildung 11: Technologie- und Marktübersicht passiver und aktiver Exoskelette.

Abbildung 11 zeigt diverse Hersteller, eingeteilt in die Bereiche Medizin, Militär und Industrie. Nach eigenen Angaben brachte Anfang 2018 der Augsburger Robotikspezialist German Bionic als erster deutscher Hersteller ein aktives Exoskelett in Serienfertigung. Das German Bionic Cray X wurde speziell für die manuelle Handhabung von schweren Gütern und Werkzeugen

konzipiert. Eine weitere Vorreiterrolle im Bereich industriell einsetzbarer Exoskelette übernimmt die ursprünglich mit Prothesen und orthopädischen Produkten bekannt gewordene Firma Ottobock mit Sitz in Duderstadt. Das im Oktober 2018 in Serie gegangene passive Exoskelett Paexo Shoulder unterstützt Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vor allem bei anstrengenden Überkopfarbeiten in der Produktion und in der Montage.



© German Bionic Cray X



© Paexo Shoulder der Firma Ottobock

Abbildung 12: Beispiele für aktives und passives Exoskelett.

Unterschiedlichen Konzipierungen, Funktionen, Anwendungsbereiche und technische Ausprägungen von Exoskeletten werden im folgenden Abschnitt Morphologie deutlich.

4.3 Morphologie

Der Aufbau des Exoskeletts ist von der Anwendung sowie der zu unterstützenden Körperregion abhängig. Hierbei sind Exoskelette in Bezug auf ihre Kraftunterstützung in zwei Typen zu unterteilen – passive und aktive Exoskelette. Abgesehen von der Unterscheidung zwischen diesen beiden Typen sind Exoskelette nach dem aktuellen Kenntnisstand weiter zu unterteilen.

- **Antrieb:** Während aktive Exoskelette ihre Kraftunterstützung elektrisch oder pneumatisch erbringen, passiert dies bei

den passiven Varianten mechanisch, z. B. mittels Federn oder Seilsystemen.

■ **Energieversorgung:** Passive Exoskelette benötigen keine externe Energieversorgung. Bei aktiven Exoskeletten wird zwischen mitzutragenden Elementen wie Akkus oder Gasflaschen und stationären Versorgungsungen wie Stromnetz oder Druckluftsystemen unterschieden.

■ **Unterstützte Körperregionen:** Bereits erhältliche Exoskelette gibt es für Hände, Arme, Schultern, Rumpf sowie Beine.

■ **Unterstützungsart:** Exoskelette werden je nach ihrer Unterstützungsfunktion unterteilt: die zur Kraftunterstützung, die zur Erhöhung der Ausdauer des Trägers und die für eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit.

■ **Gewicht:** Aktive Exoskelette wiegen aufgrund ihres komplexen Aufbaus (Sensorik, Motoren, Leitungen etc.) deutlich mehr als die passiven. So wiegt z. B. das passive Exoskelett „rakunie“ von Morita nur 0,25 Kilogramm, das aktive Torso-Modul „Active Trunk“ von Robo-Mate mit 11 Kilogramm hingegen mehr als das 40-Fache.

■ **Einsatzbereich:** In Industrie und Produktion können Exoskelette bei verschiedensten Tätigkeiten angewandt werden. Typische Einsatzbereiche sind einerseits die Fertigung sowie die Montage, andererseits die Logistik und der Versand. Auch zu Schulungszwecken wie z. B. beim Training der richtigen Körperhaltung bei schweren Hebetätigkeiten (siehe Anwendungsgrund) eignen sich Exoskelette.

■ **Anwendungsgrund:** Leichte, passive Exoskelette dienen häufig zur Haltungskorrektur (beim Heben oder in Zwangspositionen) oder als Abstützung des Gewichts von Werkzeugen bei Überkopparbeiten (siehe Paexo Shoulder von Ottobock). Aktive Exoskelette bieten die Möglichkeit, den Träger bei Hebearbeiten zu entlasten.

DIMENSION	AUSPRÄGUNG				
Grundprinzip					
	Aktiv		Passiv		
Antrieb					
	Elektrisch	Pneumatisch		Mechanisch	
Energieversorgung/ speicherung					
	Akku	Druckluft	Stromnetz	Feder	
Unterstützte Körperregion					
	Arme	Hände	Beine	Schultern	Rumpf
Unterstützungsart					
	Kraft		Ausdauer	Geschwindigkeit	
Eigengewicht					
	< 2,5 kg	2,5–5 kg		> 5 kg	
Einsatzbereich					
	Fertigung	Montage	Logistik	Versand	Schulung
Anwendungsgrund					
	Haltungskorrektur		Überkopparbeit	Hebeunterstützung	

Abbildung 13: Morphologie passiver und aktiver Exoskelette für den Einsatz in Produktion und Logistik.

4.4 Fazit zur Anwendung von Exoskeletten in der Industrie

Die Anwendung von Exoskeletten in Produktion und Logistik bewirkt eine Verbesserung der Arbeitssicherheit, insbesondere bei Tätigkeiten, welche schweres Heben, Zwangspositionen oder lang andauernde Überkopparbeiten fordern, und bei denen aufgrund ihrer Arbeitssituation bis dato keine oder nur bedingt technische Hilfsmittel eingesetzt werden konnten. Exoskelette reduzieren vor allem jene auf den Körper des Anwenders wirkenden Belastungen, welche zu arbeitsbedingten Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems (MSE) führen (Ottobock, 2018). Gerade diese sind in Europa der häufigste Grund für Arbeitsunfähigkeit und somit ein bedeutender Kos-

TECHNOLOGIE EXOSKELETT

tenfaktor für Unternehmen und Gesundheitssysteme (WIFO, 2018). Im Gegensatz zur Anwendung von Exoskeletten im medizinischen Bereich befinden sich Exoskelette im industriellen Bereich noch in einer Einführungsphase. Einschlägige wissenschaftlich belegte Langzeitstudien stehen noch aus.

Die folgende Tabelle zeigt Vor- und Nachteile von Exoskeletten unter Beachtung des MTO-Konzepts (siehe oben).

	VORTEILE	NACHTEILE
Mensch	<ul style="list-style-type: none"> Leicht anwendbar Reduktion der Belastung auf den Körper Positive Auswirkung auf Gesundheit und Arbeitsfähigkeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhte Verletzungsgefahr bei Stolper-, Sturz- und Rutschunfällen Einsatz an Drehmaschinen, Fräsmaschinen, etc. ggfs. wegen absteigender Komponenten nicht möglich
Technik	<ul style="list-style-type: none"> Individuelle Anpassungsfähigkeit an die menschliche Anthropometrie und die auszuführende Tätigkeit Flexibler als andere technische Hilfsmittel, wie Stapler oder Kräne 	<ul style="list-style-type: none"> Noch keine standardisierte Gefährdungsbeurteilung, da die Risiken nicht ausreichend untersucht sind
Organisation	<ul style="list-style-type: none"> Geringere ungünstige Belastungen reduzieren die krankheitsbedingte Ausfallszeit Gleichbleibende, etablierte Arbeitsprozesse werden nicht beeinträchtigt Erhöhte Produktivität durch steigende Motivation und geringeren Fehlzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe technologische Diversität führt zu Problemen in der Planung Derzeit noch keine Langzeitstudien verfügbar

Um das Potenzial der Anwendung eines Exoskeletts voll ausschöpfen zu können und das Vertrauen in die Technologie herzustellen, ist eine sichere Gestaltung des Arbeitssystems unabdingbar.

In Anbetracht der intensiven physischen Interaktion zwischen Mensch und Exoskelett ist es essenziell, in der Produktentwicklungsphase, wie auch bei der Integration die möglichen Safety-und-Security-Gefährdungen, die für den Träger entstehen können, sorgfältig zu analysieren und mögliche Restrisiken auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. ProduktHersteller von Exoskeletten sollten dazu bestimmte Assistenzleistung, bestimmte Funktionalitäten und begrenzte Tätigkeiten im Sinne einer sicheren Entwicklung berücksichtigen. Die eigentliche betriebliche Tätigkeit und das gesamte Umfeld des Arbeitsplatzes, sollten vom Betreiber und Anwender sicher gestaltet werden.

Während Safety die sicherheitstechnischen Anforderungen der funktionalen Sicherheit beschreibt, adressiert die Security potenzielle Gefährdungen der eingesetzten IT-Systeme. Bei der Betrachtung der funktionalen Sicherheit entstehen bei aktiven und passiven Exoskeletten aufgrund ihrer unterschiedlichen Bau- und Funktionsweisen unterschiedliche Anforderungen. Passive Exoskelette unterstützen den Träger mithilfe von Feder- oder Seilzugsystemen, wobei die gespeicherte Energie genutzt wird. Aktive Exoskelette hingegen besitzen eine mechatronische Kraftunterstützung, welche kabelgebunden ist oder durch eine Batterie versorgt wird. Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung in Unternehmen werden aktive Exoskelette oftmals in das Unternehmensnetzwerk integriert, um z. B. die Verfügbarkeit überwachen und optimieren zu können. Diese Integration hat wesentlichen Einfluss auf die IT-Security des Unternehmens und allem voran auf die des Exoskeletts – und damit zwangsläufig auch auf die physische Sicherheit des Trägers. Eine drastische Auswirkung eines Security-Lecks wäre die Einflussnahme auf die Bewegungssteuerung selbst. Weitere Auswirkungen wären der Zugriff auf die Verfügbarkeit von Nebenfunktionen, wie die Ferndiagnose des Energiehaushalts, die Lokalisierung des Produkts und damit des Anwenders. Dies

führt infolge auch zu Anforderungen an den Datenschutz, weil mit diesen sicherheitsrelevanten Daten auch solche mit Personenbezug entstehen und verarbeitet werden müssen. Bei der Einflussnahme auf die ursächlichen Funktionen des aktiven Exoskeletts kommen sowohl unberechtigter lokaler Zugriff (falsche Berechtigungen, zugängliche Schnittstellen) als auch die Einflussnahme über das Netzwerk selbst als Angriffsvektoren infrage. Daher sollten entsprechende Maßnahmen durch ein Sicherheitskonzept, welches Safety und Security integrativ betrachtet, definiert werden.

5.1 Normen und Richtlinien

Aktuell stehen nur wenige grundlegende gesetzliche Anforderungen und noch weniger unterstützende Normen und Richtlinien zur Verfügung, um Exoskelette sicher zu entwickeln und anzuwenden. Prinzipiell wird bei der Betrachtung unterschieden, ob man Hersteller oder Betreiber ist und ob es sich um ein aktives oder passives Exoskelett handelt.

5.1.1 Übersicht der Normen und Richtlinien für Exoskelette

Derzeit existiert keine gültige Produktnorm, die ausschließlich oder dezidiert den Einsatz von Exoskeletten behandelt. Im Rahmen eines kurzen Abschnitts werden aktive Exoskelette in der EN ISO 13482 „Roboter und Robotikgeräte – Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter“ erwähnt. Die Norm setzt voraus, dass die Konstruktion inhärent sicher ist oder mittels technischer Schutzmaßnahmen so sicher gestaltet ist, dass die resultierenden Restrisiken ohne Weiteres akzeptiert werden können.

Es obliegt dem Hersteller, nach der Risikobeurteilung aus einer Reihe von sinngemäß anwendbaren Grundnormen passende

technische Lösungen zu extrahieren und im Konstruktionsprozess anzuwenden.

5.1.2 Anforderungen an die Entwicklung von Exoskeletten

Hersteller von Maschinen im industriellen Umfeld, zu denen auch aktive Exoskelette zählen, müssen die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG erfüllen, um ein Produkt in Europa auf den Markt bringen zu dürfen. Dadurch wird sichergestellt, dass Betreiber nur sichere Exoskelette erwerben können und infolge sicher einsetzen können.

Ergänzend zu den maschinellen Anforderungen stellt die EMV-Richtlinie 2014/30/EU und bei eingebautem Funkmodul, wie z. B. WLAN, die RED-Richtlinie 2014/53/EU Anforderungen an die Produktgestaltung. In Abhängigkeit von der Betriebsspannung eines aktiven Exoskeletts kann zusätzlich noch die Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU anzuwenden sein.

Letzten Endes muss der Hersteller von aktiven Exoskeletten deren CE-Konformität untersuchen und durch eine Konformitätserklärung bescheinigen.

Passive Exoskelette hingegen fallen nicht in die EU-Produkttrichtlinie und müssen daher nicht zwingend CE-konform entwickelt werden. Zum Schutz des Anwenders sind daher auch nicht zwangsläufig alle sicherheitsrelevanten Informationen über das Produkt und seine Verwendung verfügbar (Mindestinhalte von Betriebsanleitungen) und ohne Konformitätserklärung gibt es für den Betreiber keine Gewährleistung, dass das Produkt auch tatsächlich sicherheitsgerichtet entwickelt und gebaut wurde. Damit fällt dem Betreiber eines passiven Exoskeletts die größere Aufgabe und Verantwortung zu, nämlich die Durchführung einer detaillierten Arbeitsplatzevaluierung.

Da ein Exoskelett wie ein Anzug am Körper anliegt, ist die ergonomische Anpassungsfähigkeit an die jeweilige Körper-

größe der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter enorm wichtig. Die bereits tendenziell leichten, passiven Exoskelette sind gemäß EN ISO 13482 so auszulegen, dass es z. B. zu keinen Quetschungen, Schnittwunden oder Abschnürungen durch Riemen und Gurte kommt. Beim An- und Ablegen des Exoskeletts dürfen keine unkontrollierten Bewegungen durch die gespeicherte Energie der vorgespannten Federn entstehen. Dies kann risikofrei durch z. B. Haken, Klettverschlüsse o. Ä. sichergestellt werden. Außerdem sollte auf den sachgemäßen Gebrauch seitens des Herstellers hingewiesen werden.

Bei den konstruktionsbedingt schwereren aktiven Exoskeletten muss auch die auf den Träger zusätzlich wirkende Belastung berücksichtigt werden. Eine wesentliche Anforderung bei aktiven Exoskeletten ist, dass sie während des An- bzw. Ablegens nicht unerwartet starten.

5.1.3 Anforderungen für Anwender von Exoskeletten

Aus nationaler Sicht müssen Arbeitgeberinnen und Arbeitgeber in Österreich unabhängig von der Technologie und dem Assistenzumfang eines Exoskeletts das ArbeitnehmerInnenschutzgesetz (ASchG) mit § 33 und § 35 und infolge die dazugehörigen Verordnungen, wie die Arbeitsmittelverordnung (AM-VO), berücksichtigen, um Gefährdungen für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer durch den Einsatz von Exoskeletten zu verhindern. Die Kernaussage daraus ist, dass nur sichere Produkte (CE-Kennzeichnung, wo zutreffend) verwendet werden dürfen und die Arbeit durch die Arbeitgeberin oder den Arbeitgeber sicher gestaltet und laut ASchG § 4 eine Arbeitsplatzevaluierung durchgeführt werden muss.

Die Einhaltung der Vorschriften fordert vom Betreiber eines Arbeitsmittels eine entsprechende sicherheitstechnische Arbeitsplatzevaluierung. Um eine Arbeitsplatzevaluierung sauber und korrekt durchführen zu können, bedarf es einschlägigen Know-hows in den Bereichen Safety sowie Security und fundierte Kenntnis über die Funktionsweise der eingesetzten Technologie.

5.2 Gefährdungsbeurteilung und Methoden zur Absicherung

Als Verfahrensnorm für die Gefährdungsbeurteilung bei der Produktentwicklung eignet sich die EN ISO 12100, die auch bei der Maschinenkonstruktion vorgesehen ist. Mit deren Gefährdungslisten können die meisten Gefährdungen erkannt und mit den Anforderungen aus den entsprechenden geltenden Verordnungen wie z. B. mit der EMF-Verordnung (EMF: elektromagnetische Felder) abgeglichen werden. Bedingt durch das Alter der Norm werden jedoch nicht alle heute bekannten Gefährdungen und genutzten Technologien behandelt und auch nur solche beschrieben, die unmittelbar mit dem Arbeitsmittel oder der Tätigkeit am Arbeitsmittel zusammenhängen. Hier gilt es durch entsprechende Expertise, Anpassungen und Erweiterungen bei der Gefährdungsbeurteilung vorzunehmen.

Neben der vorgesehenen betrieblichen Tätigkeit mit dem Exoskelett ist ergänzend die Betrachtung all jener Vorgänge durch eine Arbeitsplatzevaluierung erforderlich, die während der Zeit der Verwendung auch noch vernünftigerweise vorkommen können. Das beginnt mit der Verwahrung und den Vorkehrungen beim An- und Ablegen des Exoskeletts und endet nicht bei der Evakuierung und Vorkehrungen gegen Sturz und Fall. Darüber hinaus gilt es im Sinne der ganzheitlichen Sicherheitsbetrachtung Safety und Security und aufgrund der Wechselwirkung zwischen der das Exoskelett tragenden Person und alle anderen Aspekten des ArbeitnehmerInnenschutzes (von der Arbeitsstätte über technische Sicherheitsaspekte bis hin zur Persönlichen Schutzausrüstung), diese sorgfältig zu betrachten.

5.2.1 Kompatibilität mit Persönlicher Schutzausrüstung (PSA)

Exoskelette als Assistenzsystem bietet aus ergonomischer Sicht einen deutlichen Vorteil für die physische Entlastung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Allerdings kann der Einsatz auch zu potenziellen Gefährdungen führen, wenn die Kompatibilität mit der PSA und ihren unterschiedlichen Eigenschaften

(eng anliegend, isolierend etc.) nicht gegeben ist. Die PSA muss daher gegebenenfalls angepasst werden, damit sie weiterhin ihren Zweck erfüllt, ohne die Bewegungsfreiheit des Anwenders zu beeinträchtigen. Vorgaben diesbezüglich bietet die PSA-Verordnung (PSAV). Sinngemäß Gleiches gilt auch für spezielle Arbeitskleidung, wie z. B. dicke Hosen und Jacken, Schürzen oder Overalls.

5.2.2 Arbeitsplatzgestaltung

Weitere Einflussfaktoren für die Sicherheit und die korrekte Funktion sind der Platzbedarf, das Arbeitsumfeld und der Einsatzort von Exoskeletten.

Während passive Exoskelette gut beherrschbare Anforderungen an die Arbeitsplatzgestaltung stellen, sind aktive Exoskelette im Vergleich zu passiven größer und stellenweise sperriger, wodurch die Interaktionsmöglichkeit mit Maschinen oder eine unpassende Arbeitsraumgestaltung zu Problemen bei der Durchführung der Tätigkeiten führen kann. Zudem muss das zusätzliche Gewicht des Exoskeletts als Belastung für den Benutzer während seiner Anwendung, bei einem Sturz oder Fall sowie beim Aufstehen berücksichtigt werden.

Bei Bedarf muss der Fluchtweg entsprechend gestaltet werden, falls das Exoskelett nicht abgelegt werden kann, damit auch mit geringerer Gehgeschwindigkeit oder größeren Konturen in der vorgesehenen Zeit ein sicherer Ort erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang müssen bei kabelgebundenen Systemen entsprechende Maßnahmen getroffen werden. Für kabelgebundene und kabellose aktive Exoskelette müssen zudem die Einsatzdauer, die Energieversorgung und die Maßnahmen bei Störung der Energieversorgung entsprechend dem Anwendungszweck evaluiert und berücksichtigt werden.

Die Gewährleistung der Funktionalität des Exoskeletts hängt in erster Linie von den Witterungs- und Umgebungsbedingungen ab, wie z. B. Feuchtigkeit und Staub. Des Weiteren muss der Kontakt mit Arbeitsstoffen und die dadurch möglicherweise

SAFETY UND SECURITY

entstehenden Verunreinigungen und Beschädigungen oder ein Ausfall berücksichtigt werden.

5.2.3 Security in Design und Anwendung

Die damit behandelbaren Gefährdungen der – im weitesten Sinne – funktionalen Sicherheit bzw. Safety reichen allein nicht aus. Aktive Exoskelette, die in das Unternehmensnetzwerk

integriert sind, müssen mithilfe der IEC 62443 „Industrielle Kommunikationsnetze – IT Sicherheit für Netze und Systeme“ sicher entwickelt und implementiert werden. Dadurch soll verhindert werden, dass unautorisierte Personen auf das Exoskelett zugreifen und dieses manipulieren können und damit die physische Sicherheit des Werkers gefährden.

Anforderungen für Anwender	ARBEITSPLATZEVALUIERUNG				PE AE	
	Keine Beeinträchtigung in Gefahrensituationen	PE AE	Abstimmung von Design bzw. Ergonomie auf die/den jeweiligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	PE AE	Kompatibilität mit Schutzausrüstung	PE AE
	BERÜCKSICHTIGUNG SPEZIFISCHER EIGENSCHAFTEN FÜR DEN ENTSPRECHENDEN ANWENDBEREICH				PE AE	
	Freiheitsgrade	PE AE	Eigengewicht	PE AE	Betriebsdauer	AE
	Elektromagnetische Felder	AE	Resistenz gegen Arbeitsstoffe	PE AE	Hygiene	PE AE
	ABSICHERUNG VON INFORMATIONSSYSTEMEN GEMÄß IEC 62443				AE	
Anforderungen für Hersteller	RISIKOBEURTEILUNG NACH EN ISO 12100				PE AE	
	CE-KONFORMITÄTSERKLÄRUNG GEMÄß MASCHINENRICHTLINIE 2006/42/EG UND EMV-RICHTLINIE 2014/30/EU				AE	
	SICHERHEITANFORDERUNGEN FÜR ROBOTER UND ROBOTIKGERÄTE NACH EN ISO 13482				AE	
	Inhärent sichere Konstruktion	PE AE	Technische Schutzmaßnahmen	PE AE	Benutzerinformationen	PE AE
	SICHERSTELLUNG DER VERFÜGBARKEIT, INTEGRITÄT UND VERTRAUHLICHKEIT DER DATEN				AE	
PE – passives Exoskelett AE – aktives Exoskelett						



























Abbildung 14: Grundlegende Anforderungen für Anwender und Hersteller.

EINSATZ UND ANWENDUNG

Einsatz und Anwendungsbereiche von Exoskeletten in der Produktion und in der Logistik sind vielfältig. Sowohl aktive als auch passive Exoskelette bieten eine Möglichkeit zur Verbesserung der Sicherheit und insbesondere auch der Gesundheit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Arbeitsplatz. Das gilt vor allem für schwere Hebe- sowie Tragetätigkeiten, aber auch für besondere Arbeitssituationen, die eine Zwangshaltung erfordern.

Anwendungsbeispiele reichen von Überkopfarbeiten in der Montage über Heben von schweren Gegenständen in der Kommissionierung bzw. im Versand bis hin zu Möbelauslieferung oder zum Transport von Patientinnen und Patienten im Rettungsdienst. Der Einsatz von körpergetragenen Assistenzsystemen kann jedenfalls dann empfohlen werden, wenn aus platztechnischen oder organisatorischen Gründen Unter-

stützungssysteme wie Gabelstapler, Lastenkräne, etc. nicht möglich sind. Darüber hinaus können Exoskelette in Zuge des betrieblichen Eingliederungsmanagements zur Anwendung kommen. Dieses hat das Ziel, Beschäftigte nach deren Arbeitsunfähigkeit wieder erfolgreich einzugliedern, erneuter Arbeitsunfähigkeit vorzubeugen und den Arbeitsplatz der betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu erhalten.

PAEXO SHOULDER					
DIMENSION	AUSPRÄGUNG				
Grundprinzip					
	Aktiv		Passiv		
Antrieb					
	Elektrisch	Pneumatisch	Mechanisch		
					
Energieversorgung/speicherung	Akku	Druckluft	Stromnetz	Feder	
Unterstützte Körperregion					
	Arme	Hände	Beine	Schultern	Rumpf
Unterstützungsart					
	Kraft		Ausdauer		
Eigengewicht					
	< 2,5 kg		2,5–5 kg		
Einsatzbereich					
	Fertigung	Montage	Logistik	Versand	Schulung
Anwendungsgrund					
	Haltungskorrektur		Überkopfarbeit		
					
			Hebeunterstützung		

Symbole in weiß = zutreffend



























LAEVO					
DIMENSION	AUSPRÄGUNG				
Grundprinzip					
	Aktiv		Passiv		
Antrieb					
	Elektrisch	Pneumatisch	Mechanisch		
					
Energieversorgung/speicherung	Akku	Druckluft	Stromnetz	Feder	
Unterstützte Körperregion					
	Arme	Hände	Beine	Schultern	Rumpf
Unterstützungsart					
	Kraft		Ausdauer		
Eigengewicht					
	< 2,5 kg		2,5–5 kg		
Einsatzbereich					
	Fertigung	Montage	Logistik	Versand	Schulung
Anwendungsgrund					
	Haltungskorrektur		Überkopfarbeit		
					
			Hebeunterstützung		

Abbildung 15: Morphologische Einordnung der Exoskelette Paexo Shoulder der Fima Ottobock und Laevo.

EINSATZ UND ANWENDUNG

© Fraunhofer IPA, Rainer Bez

Zur Darstellung konkreter Einsatzbereiche und zu einer ersten Darstellung von Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken von Exoskeletten in Produktion und Logistik werden im Folgenden praxisorientierte sowie labororientierte Use Cases dargestellt. Darauf aufbauend werden zentrale Aussagen zum Einsatz von Exoskeletten dargestellt und Handlungsempfehlungen zu deren Einsatzmöglichkeiten ausgesprochen. Innerhalb der Use Cases sind zwei unterschiedliche Typen von Exoskeletten zum Einsatz gekommen. Zum einen fand das von Ottobock entwickelte Exoskelett Paexo Shoulder Anwendung. Dieses System unterstützt Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vor allem im Bereich der Produktion bei Überkopfarbeit. Mit mechanischer Seilzugtechnik wird das vom Menschen getragene Gewicht bei erhobenem Arm auf die Hüfte abgeleitet. Dadurch werden Muskeln und Gelenke im Schulterbereich entlastet. Das Paexo Shoulder ist ein passives Exoskelett, das keine Energiezufuhr benötigt. Es wird relativ eng am Körper getragen und ermöglicht in der Regel volle Bewegungsfreiheit. Zum anderen wurde das Exoskelett Laevo der Firma Laevo BV. angewandt. Es ist eine tragbare Brust- und Rückenstütze, die sich jeder Körperhaltung anpasst. Das Laevo überträgt die Kraft von der Ruhephase auf die Oberschenkel. Durch die Hebelwirkung ist die Beanspruchung durch die Kraftbelastung auf der Brust zehnmal geringer. Die Belastung wird auf die Oberschenkel umgeleitet, deren Beanspruchungstoleranz höher ist. Der kritische Pfad der angewandten Exoskelette ist in Abbildung 15 dargestellt.

6.1 Use-Case-Analyse in ausgewählten Unternehmen

Die beiden Exoskelette Paexo Shoulder und Laevo sind den Anwendungsbereichen Kommissionierung, Montage, Lackierung und Maskierung sowie in einem Anwendungsbereich in der Intralogistik bei den Firmen Hartl Haus, Engel Austria und Wacker Neuson SE zum Einsatz gekommen. Insgesamt wurden die Exoskelette an 19 Probanden getestet, welche nach der Anwendung des Exoskeletts einen standardisierten Fragebogen zur Gebrauchstauglichkeit des Systems beantwor-

teten. Zur Messung wurde die sogenannte System Usability Scale (SUS) angewandt. Dabei handelt es sich um einen technologieunabhängigen Fragebogen als etablierte Methode zur quantitativen Analyse (Brook, 1996). Folgende Fragen konnten mit den Noten 0 bis 4 (0: geringe Ausprägung; 4 hohe Ausprägung) bewertet werden:

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

Außerdem wurden bei den Use Cases erste Safety Checks durch den TÜV AUSTRIA durchgeführt. Diese stellen keine vollständigen Arbeitsmittelprüfungen oder Arbeitsplatz-evaluierungen seitens TÜV AUSTRIA dar, sondern dienen als erste Abschätzung, um den weiteren Implementierungsprozess an den jeweiligen Arbeitsplätzen zu gestalten.



EINSATZ UND ANWENDUNG

© HARTL HAUS

6.1.1 HARTL HAUS Holzindustrie GmbH

HARTL HAUS ist Österreichs ältestes Fertighausunternehmen mit eigener Tischlerei. Am Firmensitz in Echtsenbach im Waldviertel werden pro Jahr in etwa 300 Hauseinheiten gefertigt, welche schließlich international zu einem Haus zusammengesetzt werden. Produktivität, Effizienz und höchste Qualität zeichnen HARTL HAUS aus – fordern gleichzeitig aber auch ein striktes Projekt- und Zeitmanagement. Gemeinsam mit HARTL HAUS hat Fraunhofer Austria mit freundlicher Unterstützung der Firma AWB das passive Exoskelett der Firma Ottobock – Paexo Shoulder – in zwei manuell geprägten Tätigkeitsanwendungen im Bereich des Wandverputzens in der linienorientierten Vormontage sowie im Bereich der Deckenmontage auf der Baustelle mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern getestet und die Ergonomie des Arbeitssystems analysiert.



Beschreibung der Tätigkeit: Der Aufbau beziehungsweise die Montage eines Fertighauses folgt einem strikten Zeitmanagement, nach dem die einzelnen Tätigkeiten ausgerichtet werden müssen. Hierbei gilt es, Synergieeffekte möglichst optimal zu nutzen. Vor diesem Hintergrund erstreckt sich die Tätigkeit der Deckenplattenmontage je nach Größe des Hauses auf ca. 1,5 Tage zu je 7,7 Stunden. In dieser Zeit werden entsprechende Platten zugeschnitten und mittels eines Druckluftnaglers an der Deckenunterkonstruktion befestigt. Diese Tätigkeit nimmt in etwa 75 % der Gesamtarbeitszeit in Anspruch, in welcher die Monteure eine stark ausgeprägte Überkopparbeit ausführen. Die Tätigkeit wird auf der Baustelle durchgeführt und erfolgt in der Regel durch zwei Monteure.

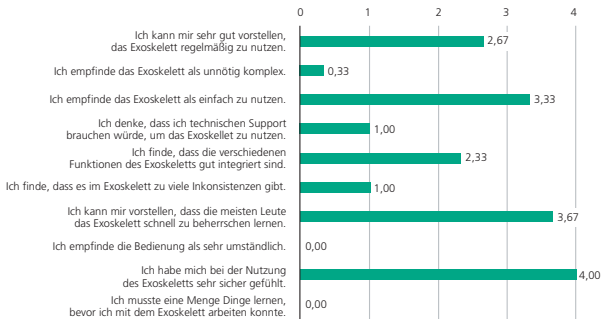
Ausgangssituation – Hohe Belastungen als Ergebnis der Leitmerkmalmethode: Durch die auszuführende Tätigkeit wirken auf die Monteure, vor allem auf den Schulter-Nacken-Bereich hohe Belastungen. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, was durch Anwendung der Leitmerkmale verdeutlicht wird. Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Einsatz technologischer Sondersysteme, zur Unterstützung der Monteure, nur begrenzt sinnvoll. Die Abbildung unten verdeutlicht das Ergebnis.

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

Soll-Situation | Impressionen:



Soll-Situation | System-Usability-Skalenauswertung der Anwender:



Die **SUS-Analyse** zeigt, dass das Tragen des Exoskeletts mit einem hohen Sicherheitsgefühl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verbunden ist. Darüber hinaus ist das richtige Anwenden des Exoskeletts schnell zu erlernen und die richtige Nutzung ist einfach. Nach Angaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist die Vorstellung, das Exoskelett regelmäßig zu nutzen, mit Integration (Anwendung) der Funktionen in den Tätigkeitsprozess nur mittelmäßig ausgeprägt. Wenige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gaben an, dass das Exoskelett mit Inkonsistenzen verbunden ist und dass es einen spezifischen Support zur Anwendung bedarf.

Beschreibung der Tätigkeit: Zur baustellengerechten Vorbereitung von Hauswänden gehört das Auftragen des Außenputzes der Wände. Die entsprechenden Tätigkeiten des Verputzens erfolgt bei HARTL HAUS innerhalb einer getakteten Fließmontage, wobei die vorbereiteten Wände auf Kranführungen bewegt werden. Zum Verputzen geben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter manuell einen entsprechend vorbereiteten Putz auf eine Kelle und tragen diesen anschließend auf der Wandfläche auf. In der eigentlichen Verputzungstätigkeit arbeiten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter durchschnittlich zu 50 % über Herzhöhe und zu 50 % unter Herzhöhe, wobei von diesen Tätigen wiederum die Hälfte im gebückten Zustand erfolgt.

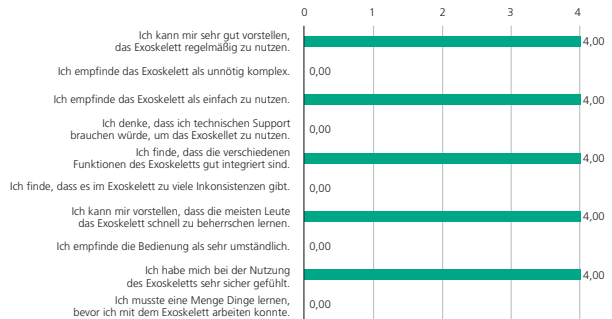
Ausgangssituation – Hohe Belastungen als Ergebnis der Leitmerkmalmethode: Durch die auszuführende Tätigkeit wirken auf die Monteure, vor allem auf den Schulter-Nacken-Bereich hohe Belastungen. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, was durch Anwendung der Leitmerkmale verdeutlicht wird. Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Einsatz technologischer Sondersysteme, zur Unterstützung der Monteure, nur begrenzt sinnvoll. Die Abbildung unten verdeutlicht das Ergebnis.

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

Ist-Situation | Soll-Situation | Impressionen:



Soll-Situation | System-Usability-Skalenauswertung der Anwender:



Die **SUS-Analyse** zeigt starke Ausprägungen auf. So gaben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an, dass das Tragen des Exoskeletts mit einem hohen Sicherheitsgefühl verbunden war sowie das richtige Anwenden des Exoskeletts schnell zu lernen und die richtige Nutzung einfach ist. Die Bereitschaft, das Exoskelett regelmäßig zu nutzen, ist vorhanden und die Integration (Anwendung) der Funktionen des Exoskeletts in den Tätigkeitsprozess ist einfach. Alle restlichen Fragen wurden mit der Ausprägung 0 bewertet.

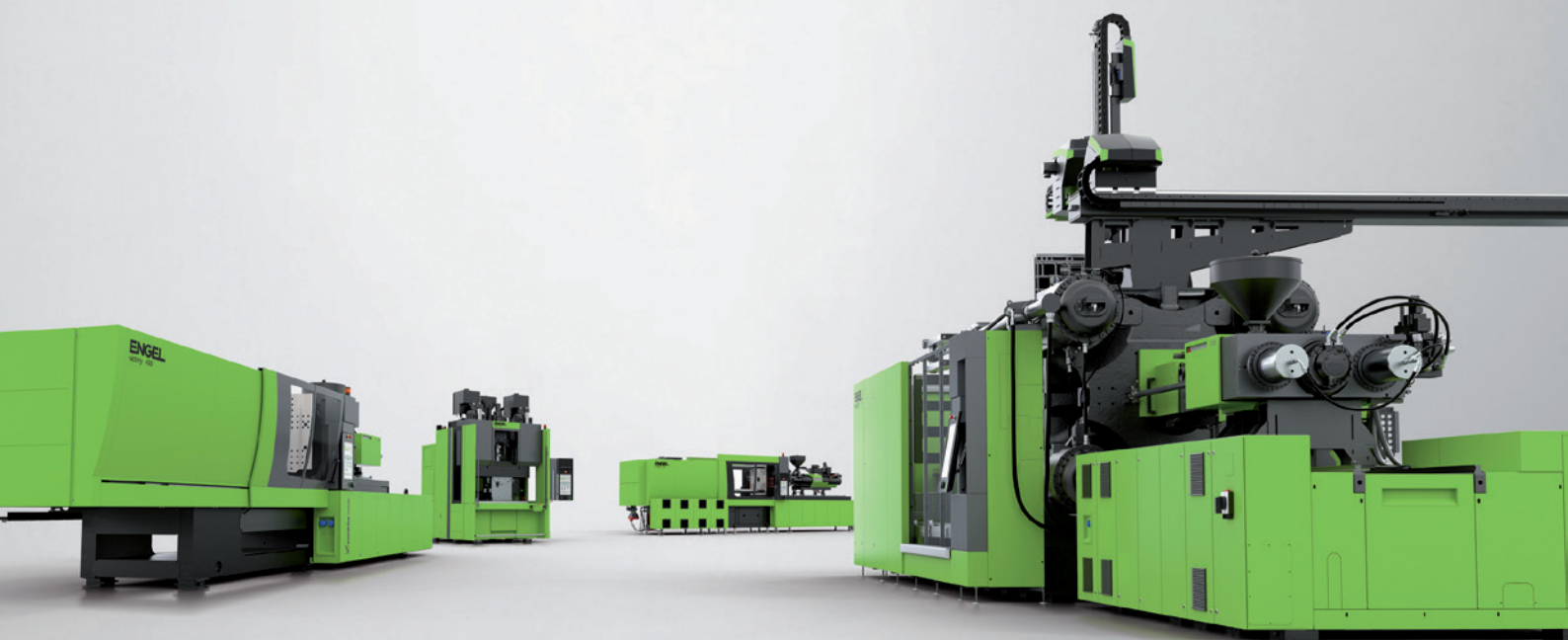
Ein erster **Safety Check** durch den **TÜV AUSTRIA** kam zu folgendem Resultat: In beiden Use Cases ist die Bandbreite an Tätigkeiten eingeschränkt bzw. gleichförmig, das Platzangebot am Arbeitsplatz so groß, dass das Exoskelett zu keiner Einschränkung der Bewegungsfreiheit führt und verwendete Arbeitsmittel keine Restriktionen/Anforderungen an z. B. eng anliegende Arbeitskleidung stellen. Des Weiteren erfordert die Fluchtwegsituation keine speziellen Vorkehrungen, da das Exoskelett die Fluchtmöglichkeit nicht einschränkt. Bei beiden Tätigkeiten ist weder spezielle Arbeitskleidung noch eine Persönliche Schutzausrüstung (PSA) erforderlich, wodurch es zu keinen Kompatibilitätsproblemen des Exoskeletts mit der PSA kommt. Es ist zu erwarten, dass das Exoskelett genauso wie die Arbeitskleidung insbesondere mit dem Verputz als Arbeitsstoff verunreinigt wird. Diesbezügliche Reinigungsvorgänge wurden nicht betrachtet. Seitens des Herstellers sind lediglich Staub und Schweiß berücksichtigte Verschmutzungen. Es ist anzunehmen, dass die Anpassung der Arbeitsplatzevaluierung eine Reduktion der Belastungen ohne neue Gefährdungen ergeben wird.

EINSATZ UND ANWENDUNG

© ENGEL AUSTRIA GmbH

6.1.2 ENGEL AUSTRIA GmbH

Das familiengeführte Unternehmen ENGEL bietet weltweit Spritzguss-Komplettlösungen aus einer Hand an. Als einer der führenden Spritzgießmaschinenhersteller steht ENGEL für eine zukunftsweisende Entwicklung und Produktion von Spritzgießmaschinen und deren Automatisierung. Mit innovativen Technologien, modernen Produktionsanlagen und nachhaltigem Service und Support ermöglicht die Firma ENGEL ihren Kunden, wettbewerbsfähig und erfolgreich zu sein. Gemeinsam mit ENGEL hat Fraunhofer Austria mit Unterstützung der Firma AWB sowohl das passive Exoskelett Laevo der Firma Laevo im Bereich der Kommissionierung als auch das passive Exoskelett der Firma Ottobock – Paexo Shoulder – im Bereich der Lackierung mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern getestet und die Ergonomie des Arbeitssystems analysiert.



Beschreibung der Tätigkeit: Im Kommissionierprozess bei der Firma ENGEL werden aus einem hochmodernen automatisierten Hochregallager die entsprechend zu kommissionierenden Materialien zunächst ausgelagert und über Rollbänder an die Mitarbeiterin oder den Mitarbeiter herangeführt. Darauf wird zunächst die Kiste und anschließend das zu kommissionierende Material gescannt. Nach diesem Vorgang wird das zu kommissionierende Material aufgenommen und in eine parallel zu der Entnahmestelle stehenden Kiste hineingelegt. Hierzu dreht sich die Mitarbeiterin oder der Mitarbeiter um 180 Grad und legt durchschnittlich 1,5 Meter bis 2,0 Meter Wegstrecke zurück. Die Gewichte der Materialien variieren zwischen 15 und 25 Kilogramm. Durchschnittlich erfolgen pro Tag und Mitarbeiterin/Mitarbeiter ca. 1 000 solcher Kommissionierprozesse.

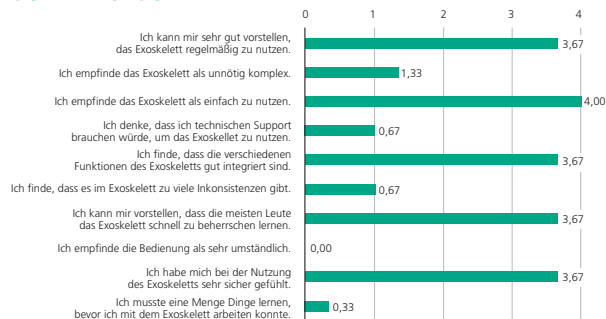
Ausgangssituation – Hohe Belastungen als Ergebnis der Leitmerkalmethode: Durch die auszuführende Tätigkeit resultieren hohe Belastungen, vor allem im Bereich des Rückens, auf die Monteure. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, was durch Anwendung der Leitmerkmale verdeutlicht wird. Der Einsatz technologischer Sondersysteme zur Unterstützung der Monteure ist wirtschaftlich gesehen nur begrenzt sinnvoll. Die Abbildung unten verdeutlicht das Ergebnis.

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

Soll-Situation | Impressionen:



Soll-Situation | System-Usability-Skalenauswertung der Anwender:



Die **SUS-Analyse** zeigt stark, dass das Tragen des Exoskeletts mit einem hohen Sicherheitsgefühl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verbunden ist, das richtige Anwenden des Exoskeletts schnell zu lernen und die richtige Nutzung einfach ist. Nach Angaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist die Bereitschaft, das Exoskelett regelmäßig zu nutzen, mit Integration (Anwendung) der Funktionen in den Tätigkeitsprozess stark ausgeprägt. Wenige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gaben mit einer geringen Ausprägung an, dass das Exoskelett mit Inkonsistenzen verbunden bzw. unnötig komplex ist und dass es eines spezifischen Supports zu Anwendung bedarf.

Ein erster **Safety Check** durch den TÜV AUSTRIA kam zu folgendem Resultat: In diesem Use Case ist die Bandbreite an Tätigkeiten eingeschränkt bzw. gleichförmig, das Platzangebot am Arbeitsplatz ist gering und die Bewegungswege sind relativ kurz. Durch Anlehnen an die Lagertechnik kann das Exoskelett hängen bleiben. Weitere Einschränkungen bei den betrieblichen Tätigkeiten sind nicht zu erwarten. Die Situierung der Verkehrs- und Fluchtwege erfordert eine uneingeschränkte Beweglichkeit des Trägers; das Exoskelett muss für diese Bewegung (durch Betätigung zweier Handhebel) deaktiviert werden. Danach ist die Flucht uneingeschränkt möglich. Für die beschriebene Tätigkeit ist keine spezielle Arbeitskleidung erforderlich. Als PSA werden Sicherheitsschuhe und leichte Arbeitshandschuhe verwendet, wodurch es zu keinen Kompatibilitätsproblemen des Exoskeletts mit der PSA kommen sollte. Besondere Verschmutzung und ein daraus resultierender Reinigungsbedarf sind nicht zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass die Anpassung der Arbeitsplatzevaluierung eine deutliche Reduktion der Belastungen ergeben wird, aber es werden auch aufgrund neuer Anforderungen an die Arbeitsplatzgestaltung passende Lösungen notwendig sein.

Beschreibung der Tätigkeit: Bei der Lackierung der Firma ENGEL geht es um höchste Präzision und Qualität. Die Variantenvielfalt der unterschiedlichen Maschinenbauteile und -elemente macht unter anderem eine manuell geführte Lackierung nötig. Die betreffenden Bauteile und -elemente besitzen unterschiedliche Größen und werden mittels einer Kranführung bereitgestellt. Dadurch müssen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter grundsätzlich mit weit ausgestreckten Armen und zu 75 % über Herzhöhe die Lackierpistole führen, um einen gleichmäßigen Lackierprozess ausführen zu können. Die Feinlackierstaubbelastung erfordert, dass MitarbeiterInnen in der Lackierung eine spezielle PSA, vor allem Mundschutz und Lackieranzug, tragen.

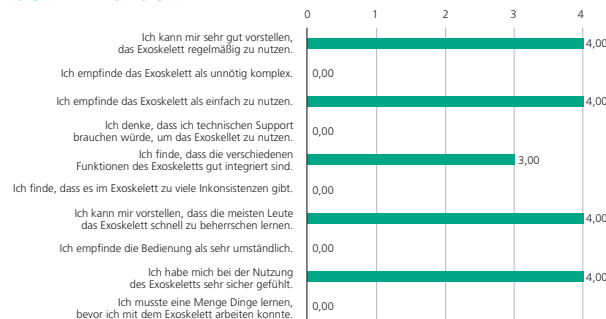
Ausgangssituation – Hohe Belastungen als Ergebnis der Leitmerkalmethode: Durch die auszuführende Tätigkeit resultieren hohe Belastungen, vor allem im Schulter-Nacken-Bereich auf die Monteure. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, was durch Anwendung der Leitmerkmale verdeutlicht wird. Der Einsatz technologischer Sondersysteme, zur Unterstützung der Monteure ist wirtschaftlich gesehen nur begrenzt sinnvoll. Die Abbildung unten verdeutlicht das Ergebnis.

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

IST-Situation | Impressionen:



Soll-Situation | System-Usability-Skalenauswertung der Anwender:



Die **SUS-Analyse** zeigt starke Ausprägungen auf. So gaben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an, dass das Tragen des Exoskeletts mit einem hohen Sicherheitsgefühl verbunden ist, das richtige Anwenden des Exoskeletts schnell zu erlernen und die richtige Nutzung einfach ist. Das Exoskelett regelmäßig zu nutzen, ist gut vorstellbar, ebenso wie die Integration (Anwendung) der Funktionen des Exoskeletts in den Tätigkeitsprozess. Alle restlichen Fragen wurden mit der Ausprägung 0 bewertet.

Ein erster **Safety Check** durch den TÜV AUSTRIA kam zu folgendem Resultat: In diesem Use Case ist die Bandbreite an Tätigkeiten eingeschränkt bzw. gleichförmig, das Platzangebot am Arbeitsplatz ist groß und die Bewegungswege sind relativ kurz. Das Exoskelett schränkt weder die Bewegungsfreiheit noch die Fluchtmöglichkeit ein. Zum Schutz gegen die Farbnebel sind Ganzkörperschutzkleidung (Overall) als PSA im Bereich des Kopfs, Arbeitshandschuhe und Sicherheitsschuhe erforderlich. Das Exoskelett wird zum Schutz gegen Verschmutzung und Beschädigung durch den Lack unter dem Overall getragen. Damit ist die Größe des Overalls entsprechend anzupassen, um die Bewegungsfreiheit nicht zu beeinträchtigen. Zeitaufwand bzw. Behinderungen beim Kleidungswechsel sind nicht durch das Exoskelett, sondern durch die betrieblich erforderliche PSA bedingt. Arbeitsmittel oder Werkstücke, an denen man mit dem Exoskelett hängen bleiben könnte, sind nicht vorhanden. Es ist anzunehmen, dass die Anpassung der Arbeitsplatzevaluierung eine Reduktion der Belastungen ergeben wird bei geringen erforderlichen Maßnahmen zur Anpassung der Arbeitsvorbereitung.

EINSATZ UND ANWENDUNG

© Wacker Neuson Linz GmbH

6.1.3 WACKER NEUSON SE

Die WACKER NEUSON Group ist ein weltweit führender Hersteller von hochwertigen Baugeräten und Kompaktmaschinen. Das Leistungsangebot richtet sich an Profi-Anwender in der Bauwirtschaft, im Garten- und Landschaftsbau sowie in der Landwirtschaft und an Kommunen und Unternehmen aus der Industrie wie z. B. dem Recyclingbereich. Die WACKER NEUSON Linz GmbH ist Hersteller von Kompaktmaschinen für die Bauindustrie mit Sitz in Hörsching (Österreich). Der Standort Hörsching ist das konzernweite Forschungs- und Entwicklungs-Kompetenzzentrum für Ketten- und Mobilbagger sowie für Dumper. Im Produktionswerk in Linz werden Kompakt- und Mobilbagger bis maximal 14 Tonnen sowie Raddumper produziert.



Beschreibung der Tätigkeit: Im Bereich eines manuell geführten Kleinteilelagers kommissionieren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter täglich mehrere hundert Teile. Geführt durch eine Kommissionierliste entnehmen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter hierzu entsprechende Kleinladungsträger (KLT) mit einem variierenden Gewicht von 10 bis 20 Kilogramm aus dem Lagerregal, stellen diesen KLT auf einem Tisch ab und kommissionieren die festgelegte Anzahl an Teilen in einen für die Montage spezifischen KLT. Zur Aufnahme und Abstellung der KLT arbeiten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu 50 % über Herzhöhe. Die restlichen 50 % der Entnahme- und Abstellarbeiten erfolgen in gebückter oder hockender Position.

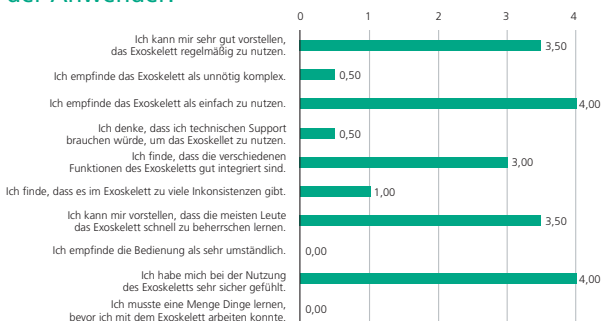
Ausgangssituation – Hohe Belastungen als Ergebnis der Leitmerkalmethode: Durch die auszuführende Tätigkeit resultieren hohe Belastungen, vor allem Schulter-Nacken-Bereich auf die Monteure. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, welche durch Anwendung der Leitmerkalmethode verdeutlicht wird. Der Einsatz technologischer Sondersysteme zur Unterstützung der Monteure ist wirtschaftlich gesehen nur begrenzt sinnvoll. Die Abbildung unten verdeutlicht das Ergebnis.

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

Soll-Situation | Impressionen:



Soll-Situation | System-Usability-Skalenauswertung der Anwender:



Die **SUS-Analyse** zeigt starke Ausprägungen auf. So gaben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an, dass das Tragen des Exosketts mit einem hohen Sicherheitsgefühl verbunden, das richtige Anwenden des Exosketts schnell zu erlernen und die richtige Nutzung einfach ist. Das Exoskelett regelmäßig zu nutzen, ist gut vorstellbar, ebenso wie die Integration (Anwendung) der Funktionen des Exosketts in dem Tätigkeitsprozess. Alle restlichen Fragen wurden mit sehr geringer Ausprägung oder mit der Ausprägung 0 bewertet.

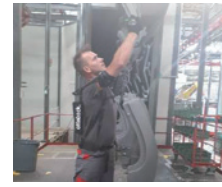
Ein erster **Safety Check** durch den TÜV AUSTRIA kam zu folgendem Resultat: In diesem Use Case hat man bei den Tätigkeiten großen Bewegungsraum, das Platzangebot am Arbeitsplatz ist groß, die Bewegungswege sind lang und mit Überbrückung von Geschosshöhen. Nur bei einem geringen Anteil der Bewegungen tritt eine Unterstützung auf, bei anderen Bewegungen ist mit einer geringen Mehrbelastung zu rechnen. Die zu handhabende Last ist deutlich schwerer als die Unterstützungsleistung. Die Situierung der Verkehrs- und Fluchtwege erfordert eine uneingeschränkte Beweglichkeit des Werkers. In diesem Use Case scheint die Flucht uneingeschränkt möglich zu sein. Es ist keine spezielle Arbeitskleidung erforderlich. Als PSA werden Sicherheitsschuhe und leichte Arbeitshandschuhe verwendet, wodurch es zu keinen Kompatibilitätsproblemen des Exosketts mit der PSA kommt. Besondere Verschmutzung und ein daraus resultierender Reinigungsbedarf sind nicht zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass die Anpassung der Arbeitsplatzevaluierung eine geringe Reduktion der Belastungen ergeben wird.

Beschreibung der Tätigkeit: Im Arbeitsbereich der Maskierung bei WACKER NEUSON bereiten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zunächst sämtliche Stellen an dem zu lackierenden Bauteil vor, indem die Stellen, welche nicht zu lackieren sind, abgeklebt (maskiert) werden. Die Bauteile hängen dabei an einem Führungssystem und werden automatisch nach einer bestimmten Geschwindigkeit durch den Maskierbereich geführt. Die Bereitstellung der Materialien erfolgt am Rande des Arbeitsbereichs. Dabei bewegen sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter um das Bauteil herum, arbeiten zum einen in einer Überkopffosition und zum anderen in einer gebückten Haltung.

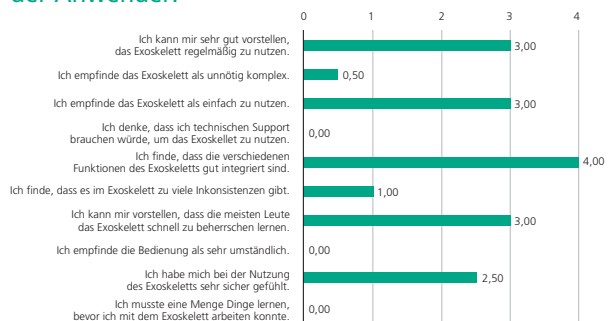
Ausgangssituation – Hohe Belastungen als Ergebnis der Leitmerkalmethode: Durch die auszuführende Tätigkeit resultieren hohe Belastungen, vor allem im Bereich des Schulter-Nacken-Bereichs auf die Monteure. Eine körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich, welche durch Anwendung der Leitmerkalmethode verdeutlicht wird. Der Einsatz technologischer Sondersysteme, zur Unterstützung der Monteure, ist wirtschaftlich gesehen nur begrenzt sinnvoll. Die Abbildung unten verdeutlicht das Ergebnis.

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

IST-Situation | Impressionen:



Soll-Situation | System-Usability-Skalenauswertung der Anwender:



Die **SUS-Analyse** zeigt starke Ausprägungen auf. So gaben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an, dass das Tragen des Exosketts mit einem gut ausgeprägten Sicherheitsgefühl verbunden ist. Dass das richtige Anwenden des Exosketts schnell zu erlernen ist, wurde als überdurchschnittlich gut empfunden. Sehr hoch ausgeprägt zeigte sich der Aspekt, dass das Exoskelett gut in die bestehenden Tätigkeiten integrierbar ist. Ebenso als gut ausgeprägt zeigten sich die Aspekte, dass die Nutzung des Exosketts einfach ist, sowie die Vorstellung, das Exoskelett regelmäßig zu nutzen. Alle restlichen Fragen wurden mit sehr geringer Ausprägung oder mit der Ausprägung 0 bewertet.

Ein erster **Safety Check** durch den TÜV AUSTRIA kam zu folgendem Resultat: In diesem Use Case ist die Bandbreite an Tätigkeiten hoch und mit großem, jedoch durch die Werkstücke eingeschränktem Bewegungsraum verbunden. Die Bewegungswege sind relativ kurz. Nur bei einem geringen Anteil der Bewegungen tritt eine Unterstützung auf; bei anderen Bewegungen ist mit einer ebenso geringen Mehrbelastung zu rechnen. Die Unterstützungskraft liegt im Bereich der Nutzlast. Die Bewegung zwischen den Werkstücken birgt die Gefahr, mit abstehenden Teilen der Kleidung oder des Exosketts anzustreifen bzw. hängen zu bleiben. Es ist keine spezielle Arbeitskleidung erforderlich. Als PSA werden Sicherheitsschuhe und leichte Arbeitshandschuhe verwendet, wodurch es zu keinen Kompatibilitätsproblemen des Exosketts mit der PSA kommt. Besondere Verschmutzung und daraus resultierender Reinigungsbedarf sind nicht zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass die Anpassung der Arbeitsplatzevaluierung eine Reduktion der Belastungen ergeben wird. Die neu entstehenden Gefährdungen sollten dagegen gering sein, bzw. durch Anpassung des Arbeitsumfelds kompensiert werden können.

EINSATZ UND ANWENDUNG

6.2 Fazit zu den Exoskeletten

6.2.1 Fazit Exoskelett Paexo Shoulder der Firma Ottobock

Das Exoskelett Paexo Shoulder von Ottobock zeichnete sich in den dargestellten Use Case durch ein einfaches, unkompliziertes Anlegen – erfolgt in Analogie zu einem Rucksack – aus. Nach dem Anziehen der Schultergurte, sowie dem Schließen des Brustgurts sind noch die Oberarme in den Armschalen zu justieren. „Ich empfinde das Exoskelett als einfach zu nutzen“ und „Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das Exoskelett schnell zu beherrschen lernen“ wurden somit durchschnittlich mit 3,6 von 4,0 möglichen Punkten bewertet. Über die Armschalen nimmt das Exoskelett das Gewicht der Arme sowie eines Werkzeugs auf und leitet es über ein Gelenk und ein Federsystem auf die Hüfte. Die Last wird somit von der Schulter beziehungsweise dem Rücken genommen. Die einfache Handbarkeit spiegelt sich in der Bewertung wider. Die Frage nach der Komplexität des Produktes wurde mit lediglich 0,47 von 4 Punkten bewertet. Keiner der Probanden empfand die Bedienung als sehr umständlich; auch musste kein Vorwissen mitgebracht werden, um mit dem Exoskelett arbeiten zu können. Entwickelt wurde das Exoskelett für längeres Arbeiten im Überkopfbereich; dabei wurde auf eng anliegende Komponenten geachtet, die bei der Tätigkeit nicht stören.

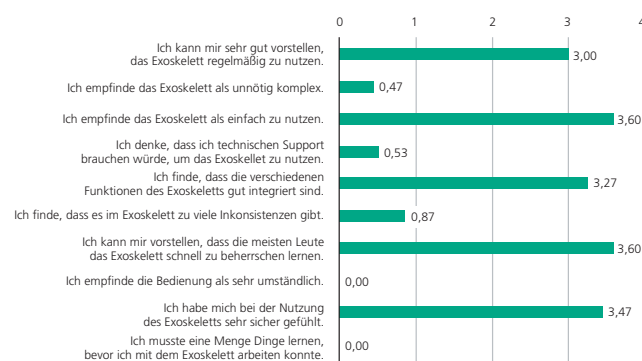


Abbildung 15: System Usability Scale Ottobock Paexo Shoulder.

6.2.2 Fazit Exoskelett Laevo

Das passive Exoskelett Laevo des gleichnamigen niederländischen Herstellers besticht vor allem durch seine einfache Handhabbarkeit. Es wird ähnlich wie ein Arbeitsoverall angezogen und mittels Schnallensystem vor der Brust geschlossen. Im Gegensatz zum Paexo Shoulder befinden sich beim Laevo die Schalen an der Vorderseite der Oberschenkel. Niemand der Befragten empfand die Bedienung als sehr umständlich, auch muss vor der Nutzung nichts erlernt werden. Beim Beugen oder Bücken wird Energie in einem Federsystem gespeichert, sodass in weiterer Folge das Aufrichten erleichtert werden soll. Technischer Support wurde dabei von den Probanden nicht benötigt, und mit 3,75 von 4,0 möglichen Punkten wurden die Fragen nach der guten Integration der Funktionen sowie der Sicherheit bei der Verwendung bewertet. Auch bei diesem Exoskelett wurde insbesondere darauf geachtet, dass alle Komponenten flach am Körper anliegen, um nicht in den Arbeitsbereich hineinzuragen.

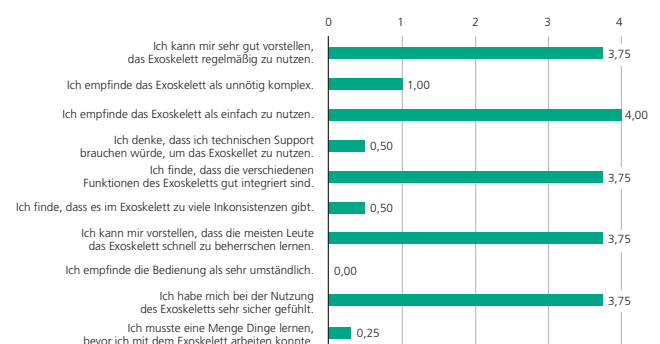


Abbildung 16: System Usability Scale Laevo.

6.3 Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken

Die größten Stärken und Hauptanwendungsgründe für den Einsatz von Exoskeletten sind die Verbesserung ergonomischer Bedingungen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und die Reduktion der auf den Körper des Trägers wirkenden Belastungen beziehungsweise die Unterstützung der Bewegungen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Verglichen mit anderen Hebeunterstützungen, wie Gabelstapler, Lastenkräne etc., lassen sich Exoskelette schnell und leicht einsetzen und am Arbeitsplatz in vorhandenen Strukturen integrieren. Aufgrund seiner Neuheit gibt es für dieses Assistenzsystem jedoch noch keine Erkenntnisse zu Langzeitfolgen sowie standardisierte Gefährdungsbeurteilung. Außerdem sind die arbeitssicherheitstechnischen Anforderungen

für den jeweiligen Arbeitsplatz spezifisch und können nicht für Exoskelette pauschal definiert werden. Trotz Exoskelett ist es möglich, dass Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an ihrer Belastungsgrenze arbeiten, wenn die Lastgewichte erhöht werden. Bei gleichbleibenden Lastgewichten besteht die Gefahr von muskulären Dysbalancen. Außerdem könnten Veränderungen im Bewegungsverhalten des Trägers hervorgerufen werden. Bei nicht sachgerechter Anwendung kann es zu Quetschungen und Druckstellen kommen. Chancen des Einsatzes von Exoskeletten am Arbeitsplatz sind einerseits die Erhöhung des Arbeitskomforts, die Reduktion von Fehlzeiten, sowie die Steigerung von Produktivität und Qualität. Andererseits bieten sich auch Einsatzmöglichkeiten bei bereits leistungsgewandelten Mitarbeitern und auch bei Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die nach einer Verletzung wieder in den Berufsalltag eingegliedert werden sollen (ASU, 2018).

STÄRKEN (STRENGTHS)	SCHWÄCHEN (WEAKNESSES)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbesserung ergonomischer Bedingungen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ■ Reduktion der Belastung auf den Körper ■ Bewegungen unterstützen/stärken ■ Vorbeugung von Muskel-Skeletterkrankungen ■ Schnell und leicht anwendbar ■ Hoher Produktreifeegrad ■ Gut integrierbar in Tätigkeiten ■ Gutes Sicherheitsgefühl ■ Anpassbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Noch keine Aussagen und Erkenntnisse zu Langzeitfolgen ■ Entwicklung stark technologiegetrieben ■ Arbeitssicherheitstechnische Anforderungen arbeitsplatzspezifisch ■ Dokumentations- und Unterweisungspflicht ■ Noch keine standardisierte Risiko- bzw. Gefährdungsbeurteilung ■ Schlechte Nutzerakzeptanz bei Diskomfort ■ Gewichtsbelastung der Tragenden ■ Lastumverteilung (bei passiven Exoskeletten)
RISIKEN (TREATHS)	CHANCEN (OPPORTUNITIES)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Muskuläre Dysbalancen ■ Keine Beachtung physischer Aspekte in der Nutzung ■ Verlust der Selbstwirksamkeitserwartung ■ Trotz Exoskelett arbeiten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an der Belastungsgrenze, wenn Lastgewichte erhöht werden ■ Veränderung des Bewegungsverhaltens ■ Auftreten neuer menschlicher Beanspruchungen ■ Druckstellen ■ Gefahren von Quetschen, Scheren, Schneiden (bei aktiven Exoskeletten) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Reduktion von Fehlzeiten ■ Positive Auswirkung auf Mitarbeitermotivation ■ Erhöhung des Arbeitskomforts ■ Steigerung von Produktivität und Qualität ■ Steigerung der Einsatzmöglichkeiten leistungsgewandelter Mitarbeiter ■ Unterstützung in der beruflichen Wiedereingliederung oder Inklusion

6.4 Vorgehen und Empfehlungen zur Einführung

Der Einsatz von Exoskeletten ist arbeitsplatzspezifisch zu planen bzw. zu evaluieren. In Bereichen, in denen schwere

körperliche Arbeit oder Tätigkeiten in Zwangshaltungen zu leisten sind, ermöglicht die Verwendung von Exoskeletten eine ergonomische Verbesserung der Beschäftigten oder des Beschäftigten. Exoskelette kommen besonders dort infrage, wo andere Assistenzsysteme wie Stapler, Kräne etc. nicht verwen-

EINSATZ UND ANWENDUNG

det werden können. Das ist in der Regel bei nicht stationären Arbeitsplätzen oder aus Platzgründen der Fall. Die körperliche Entlastung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter trägt zu einer Reduktion von Unfallrisiken und arbeitsbedingten Krankheiten und somit zu einer Reduktion von Krankenstandszeiten bei. Um die körperliche Belastung zu reduzieren, sollte das erste Bestreben in der Arbeitsplanung jedoch die ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes und somit der Einsatz von Lastenmanipulatoren, Vakuumheber etc. sein.

Die Sinnhaftigkeit einer Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz lässt sich erst nach einer genauen Analyse des Arbeitsumfelds inklusive erster Praxistests beurteilen. Bei Verwendung von Exoskeletten am Arbeitsplatz ist gemäß Arbeitsschutzgesetz der Arbeitgeber verpflichtet, für die Vermeidung von Gefährdungen, die Sicherheit, die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung sowie die Ableitung und Umsetzung von wirksamen Schutzmaßnahmen Sorge zu tragen (BGHM, 2017). Die Abbildung 17 bietet eine kurze Roadmap für die Einführung von Exoskeletten am Arbeitsplatz.

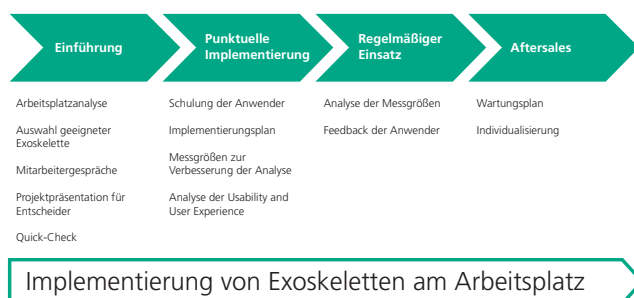


Abbildung 17: Vorgehensweise zur Implementierung von Exoskeletten am Arbeitsplatz.

In der Einführungsphase folgt nach einer groben Einschätzung des Arbeitsplatzes die Auswahl geeigneter Exoskelette. Ein Quick-Check zur Auswahl sowie zur Bestimmung des Potenzials wird in Kapitel 7 erläutert. In der zweiten Phase wird das Assistenzsystem punktuell angewandt und am Arbeitsplatz analysiert. Nach dem Erstellen eines Implementierungsplans und der Festlegung von Messgrößen zur Verbesserung der Analyse folgt

die dritte Phase der Implementierung. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter werden intensiv geschult und Überprüfungen finden statt. Danach werden Exoskelette regelmäßig am Arbeitsplatz eingesetzt.

Entsprechend der aufgezeigten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken sind folgende SWOT-Strategien (SWOT: Analysis of strengths, weakness, opportunities and threats) identifiziert worden:

S-O-Strategien: Ausbauen | Verfolgen von Chancen, welche zu den Stärken passen

- Reduktion der Fehlzeiten durch Vorbeugung von Muskel-Skelett-Erkrankungen
- Erhöhung des Arbeitskomforts durch Reduktion der Belastung auf die Anwenderin und den Anwender

W-O-Strategien: Ausgleichen | Schwächen eliminieren, um Chancen zu nutzen

- Beachtung des Themenfelds Exoskelette durch die Arbeitswissenschaft
- Implementierung von Exoskeletten mit arbeitsmedizinischer Begleitung

S-T-Strategien: Absichern | Stärken nutzen, um Risiken abzuwehren

- Genau auf die jeweiligen Körpermaße einstellen, um Druckstellen zu vermeiden
- Die Unterstützungskraft anpassen, um muskulären Dysbalancen vorzubeugen

W-T-Strategien: Vermeiden | Schwächen nicht zum Ziel von Risiken machen

- Sicherheitstechnische Aspekte möglichst schon in der Einführungsphase berücksichtigen
- Die rechtliche Grundlage hängt vom jeweiligen Einsatz ab – PSA-Verordnung

QUICK-CHECK ZUR INDUSTRIELLEN POTENZIAL- BESTIMMUNG

Der folgende Quick-Check dient zur Bestimmung des Potenzials von Exoskeletten am Arbeitsplatz sowie zur Auswahl eines geeigneten Exoskeletts. Die ersten beiden Fragen beziehen sich auf allgemeine Informationen zum Arbeitsplatz sowie grobe Informationen zum Arbeitsprozess. Je nachdem welcher Anwendungsfall ausgewählt wird, folgt in Punkt 3 eine weitere, spezifischere Abfrage. In Prozent werden Fragen nach der Körperhaltung, nach Lastgewichten oder Ausführungsbedingungen beantwortet. Die letzte Frage behandelt die eigenen Erwartungen an Exoskelette.

1. ALLGEMEINE INFORMATIONEN

1.1 Abteilung: _____

- Fertigung
 Montage
 Kommissionierung
 Verpackung/Versand
 Lackiererei
 Schulung
 andere Abteilung: _____

1.2 Anzahl Arbeitsplätze/Stationen in der Abteilung:

1.3 Takt: ___ s Takteinhaltung zwingend erforderlich (z. B. wegen Folgeprozess)

1.4 Schichtmodell ja nein

1.5 Schutzkleidung erforderlich ja nein

1.6 Eng anliegende Kleidung erforderlich ja nein

1.7 Hallenbetrieb ja nein

1.8 Außeneinsatz ja nein

2. PROZESSINFORMATIONEN

2.1 Anwendungsfall:

- Überkopfarbeit
 Hebeunterstützung
 Haltungskorrektur

2.2 Gewicht des zu verwendenden Werkzeugs:

- < 1 kg
 1–2 kg
 > 2 kg
 kein Werkzeug

2.3 Gewicht des Werkstücks:

- < 5 kg
 5–15 kg
 > 15 kg
 kein Werkstück

2.4 Notwendige Unterstützungsart:

- Kraft
 Ausdauer
 Geschwindigkeit

2.5 Körperhaltung beim Arbeitsprozess:

- Oberkörper aufrecht, nicht gedreht
 Geringes Vorneigen oder Verdrehen des Oberkörpers
 Tiefes Beugen oder weites Vorneigen
 Geringe Vorneigung und Verdrehen des Oberkörpers
 Weites Vorneigen und Verdrehen des Oberkörpers
 Eingeschränkte Haltungsverstabilität beim Stehen
 Hocken oder Knien
 Last am Körper
 Last körperfern
 Last über Schulterhöhe

QUICK-CHECK ZUR INDUSTRIEL- LEN POTENZIAL- BESTIMMUNG

3. WEITERE PROZESSRELEVANTE INFORMATIONEN

NUR BEI ÜBERKOPFARBEIT AUSZUFÜLLEN

In Prozent am Arbeitsplatz je Spalte

Zeitlicher Anteil an Überkopfarbeit im Arbeitsprozess			
%			
Überkopfarbeit unter Last (z. B. Verwendung eines Werkzeuges)			
%			
Körperhaltung			
<ul style="list-style-type: none"> ■ Oberkörper aufrecht, nicht verdreht ■ Last körpernah 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geringes Vorneigen oder Verdrehen des Oberkörpers ■ Last körpernah 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weites Vorneigen oder ■ Geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers ■ Last körperfern 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers ■ Last körperfern ■ Eingeschränkte Haltungsstabilität beim Stehen
%			
Ausführungsbedingungen (Bewegungsfreiheit)			
Gute Bedingungen (z. B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ausreichend beleuchtet)	Einschränkung der Bewegungsfreiheit (z. B. Bewegungsraum durch zu geringe Höhe eingeschränkt)	Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit	
%			
Ausführungsbedingungen (Ergonomie)			
Gute Bedingungen (z. B. ebener, rutschfester Boden, gute Griffbedingungen)	Ungünstige ergonomische Bedingungen (z. B. Standsicherheit durch unebenen, weichen Boden eingeschränkt)	Instabilität des Lastschwerpunktes (z. B. Patiententransfer)	
%			

NUR BEI HEBEUNTERSTÜTZUNG AUSZUFÜLLEN

In Prozent am Arbeitsplatz je Spalte

Anteil an Hebe- oder Umschlagvorgängen im Arbeitsprozess		
%		
Gewicht der zu hebenden Last		
< 5 kg	5–15 kg	> 15 kg
%		
Körperhaltung beim Heben		
<ul style="list-style-type: none"> ■ Oberkörper aufrecht, nicht verdreht ■ Last am Körper 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geringes Vorneigen oder Verdrehen des Oberkörpers ■ Last am Körper oder körpernah 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tiefes Beugen oder weites Vorneigen ■ Geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers ■ Last körperfern oder über Schulterhöhe
%		
Ausführungsbedingungen (Bewegungsfreiheit)		
Gute Bedingungen (z. B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ausreichend beleuchtet)	Einschränkung der Bewegungsfreiheit (z. B. Bewegungsraum durch zu geringe Höhe eingeschränkt)	Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit
%		
Ausführungsbedingungen (Ergonomie)		
Gute Bedingungen (z. B. ebener, rutschfester Boden, gute Griffbedingungen)	Ungünstige ergonomische Bedingungen (z. B. Standsicherheit durch unebenen, weichen Boden eingeschränkt)	Instabilität des Lastschwerpunktes (z. B. Patiententransfer)

4. ERWARTUNGEN AN EXOSKELETTE FÜR PRODUKTION UND LOGISTIK

Welche Zielsetzungen und Potenziale verbinden Sie mit dem Einsatz von Exoskeletten in Produktion und Logistik?

Zielsetzung		Potenzial		
Physische Entlastung von Mitarbeitern	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Örtliche Flexibilität steigern	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Handling vereinfachen	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Produktqualität steigern	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Anlernzeiten reduzieren	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Mitarbeiterzufriedenheit steigern	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Nacharbeitskosten reduzieren	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Ausführungsfehler reduzieren	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Montagefehler reduzieren	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Mitarbeiterausfallzeiten reduzieren	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch
Sonstiges Ziel:		gering	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	hoch

Verfügen Sie bereits über Exoskelette in Ihrem Unternehmen?

Unterstützung der Arme	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:
Unterstützung der Hände	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:
Unterstützung der Beine	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:
Unterstützung der Schultern	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:
Unterstützung des Rumpfes	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:
Kombiniertes Exoskelett	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:
Sonstiges	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Wenn ja, Typ?:

Der aufgezeigte Quick-Check steht unter <https://www.umfrageonline.com/s/exo> zur Anwendung zur Verfügung. Das Team von Fraunhofer Austria wird sich nach dem elektronischen Versand des Quick-Checks mit Ihnen in Verbindung setzen. Finden Sie heraus, in welchen Prozessen Ihr Unternehmen vom Einsatz von Exoskeletten profitiert.

FAZIT UND AUSBLICK

Das vorliegende White Paper verdeutlicht, dass passive Exoskelette bereits heute auf eine überdurchschnittlich gute Resonanz bei Werkern in den betrachteten Use Cases stoßen. Die Ergebnisse der durchgeführten SUS-Analysen lassen darauf schließen, dass die Usability dieser Systeme mit guter Motivation und guter Akzeptanz der Anwender einhergeht.

In Österreich verbrachten im Jahr 2017 die Beschäftigten und die Beschäftigten im Jahresverlauf durchschnittlich 12,5 Kalendertage im Krankenstand (Fehlzeitenreport, 2018). Die fünf häufigsten Krankheitsgruppen verursachen nach Angaben der Autoren des Reports über 80 % aller Krankenstände (Fehlzeitenreport, 2018) und mehr als 70,5 % der Krankenstandstage (Versicherungen, 2015). Laut Statistik Austria beträgt die durchschnittliche Dauer eines Krankenstandes für Muskel- und Skeletterkrankungen, sowie Erkrankungen des Bindegewebes 15,4 Tage. Die durchschnittliche Zahl an Krankenstandstagen pro erwerbstätiger Person liegt bei Muskel- und Skeletterkrankungen, sowie Erkrankungen des Bindegewebes bei 2,7 Tagen (Quelle: Statistik Austria, 2018). Eine Arbeitsstunde in Österreich kostet den Arbeitgeber im Durchschnitt, inklusive Lohnnebenkosten rund 35,00 € (Kurier, 2017).

In Arbeitssystemen, in welchen eine gesundheitsbeeinträchtigende Arbeit durchzuführen ist, die das Risiko einer Muskel- und Skeletterkrankungen birgt, ist bei einer durchschnittlichen täglichen Arbeitszeit von acht Stunden mit 4 312,00 € Kosten (15,4 Tage x (acht Stunden/Tag x 35,00 €) für den Arbeitgeber zu rechnen. Diese Kosten sind vereinfacht dargestellt und berücksichtigen keine zusätzlichen Kosten, wie das Zurverfügungstellen von Ersatzarbeitskräften, wie z. B. von Leiharbeitern. Bei einer durchschnittlichen Investition von 10 000,00 € für ein geeignetes Exoskelett ergibt sich, pessimistisch gerechnet, eine Amortisationszeit von ca. 2,3 Jahren. Im Falle, dass die Tätigkeit durch eine Vertretungsperson oder durch einen Leiharbeiter durchzuführen ist, würden sich die Kosten für den Arbeitgeber verdoppeln und 8 624,00 € betragen, womit die Amortisationszeit sich auf < 1,15 Jahre halbieren würde. Gegenwärtig lassen sich Amortisationszeiten wie bei passiven Exoskeletten im Hinblick auf die Verwendung aktiver Systeme noch nicht erzielen. Hierzu bedarf es weiterer spezifischer Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten.

Auch aktuelle anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zu passiven Exoskeletten zeigen gegenwärtig noch keine arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse in Form methodengestützter, ergonomischer Bewertungsverfahren von Exoskeletten auf, mittels deren Aussagen möglich sind, in welcher Form (quantitativ bewertbar) eine arbeitende Person durch Verwendung eines passiven Exoskeletts entlastet wird. Operativ verwendbare Methoden, wie die Leitmerkalmethode (LMM) oder Methoden wie das European Assembly Worksheet (EAWS) adressieren gegenwärtig keine Arbeitsplatzevaluierung unter Verwendung eines Exoskeletts.

In Bezug auf passive Exoskelette gilt es, weitere Anwendungsbeispiele zu identifizieren, in denen der Einsatz von Exoskeletten mit Vorteilen für Mensch und Produktivität des Arbeitssystems einhergeht. Dabei stehen mittel- und langfristige Studien zur Anwendung dieser Systeme noch aus. Erkenntnisse zur Usability and User Experience von Anwendern passiver Exoskeletten sind über weitere Studien zu gewinnen. Eng mit dem Thema Usability and User Experience ist auch die Frage nach einer Quantifizierung möglicher Produktivitätseffekte auf Anwender und das Arbeitssystem zu stellen. Hierbei stehen im Vordergrund Fragen nach spezifischen Erkenntnissen über Einflüsse, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Mensch, Technologie und Organisation.

Ein weiterer wesentlicher Faktor in Bezug auf die Anwendung und Entwicklung von Exoskeletten ist die Sicherheit. Diese sollte durch das Anwenden einer Risikobeurteilung auf Normkonformität beurteilt und die zwei wichtigsten Aspekte enthalten nämlich die funktionale Sicherheit und die IT-Sicherheit. Mithilfe eines integrierten Safety-und-Security-Konzepts, können diese Aspekte gleichzeitig erfasst und beurteilt werden. Dies führt letzten Endes zu einem sicheren Produkt für den Hersteller oder einer sicheren Anwendung für den Benutzer.

LITERATUR- VERZEICHNIS

- Statistik Austria (2019a). Anzahl der Erwerbstätigen in Österreich nach Altersgruppen von 2008 bis 2018. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/823860/umfrage/erwerbstaetige-in-oesterreich-nach-altersgruppen/>
- Adenauer (2004). Die (Re-)Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in den Arbeitsprozess. Das Projekt FILM bei Ford Köln. *Angewandte Arbeitswissenschaft* 181, S. 1–18
- Statistik Austria (2019b). Bevölkerungsprognosen. Abgerufen 17. Dezember 2019, von http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demografische_prognosen/bevoelkerungsprognosen/index.html
- Statistik Austria (2019c). Erwerbsprognosen. Abgerufen 11. Oktober 2019, von http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demografische_prognosen/erwerbsprognosen/index.html
- Eurostat (2018). Durchschnittlich geleistete Stunden pro Woche. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180125-1>
- Statistik Austria (2013). Gesundheitsrisiko Arbeitsplatz. Abgerufen 11. Oktober 2019, von https://www.gesundearbeit.at/cms/V02/V02_7.12.a/1342553505324/service/aktuelles/gesundheitsrisiko-arbeitsplatz-acht-von-zehn-erwerbstaetigen-gesundheitlich-belastet
- BMGF (2016). Österreichischer Gesundheitsbericht 2016. Berichtszeitraum 2005–2014/15. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <https://goeg.at/sites/goeg.at/files/2018-01/gesundheitsbericht2016.pdf>
- DGUV (2019). Muskel-Skeletterkrankungen. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <https://www.dguv.de/de/versicherung/berufskrankheiten/muskel-skelett/index.jsp>
- AUVA (2019). Arbeitsbedingte Muskel- und Skeletterkrankungen – eine zeitlose Herausforderung ohne Lösung? Abgerufen 11. Oktober 2019, von https://wien.arbeiterkammer.at/service/veranstaltungen/rueckblicke/Julia_Lebersorg-Likar_29.1.2019.pdf
- WIFO (2018). Fehlzeitenreport 2018. Krankheits- und unfallbedingte Fehlzeiten in Österreich – Präsentismus und Absentismus. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <http://www.hauptverband.at/cdscontent/load?contentid=10008.665179&versi on=1543824555>
- Ulich (1994). *Arbeitspsychologie* (3. Aufl.). Stuttgart: Schäffer-Poeschel Rohmert, Walter, und Klaus Martin (1984). *Arbeitswissenschaftliche Begleitforschung für das Projekt AEG*. Karlsruhe: Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik.
- Bachmann (1978). *Handbuch für den Gesundheits- und Arbeitsschutz*. Berlin (DDR)
- Hacker, Richter (1980). *Psychologische Bewertung von Arbeitsgestaltungsmaßnahmen. Ziele und Bewertungsmaßstäbe*. Berlin: VEP Deutscher Verlag der Wissenschaften
- Zwart, Frings-Dresen, Dijk (1996). Physical workload and the ageing worker: a review of the literature. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 68, S. 1–12.
- Bokranz, Landau (2012). *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM*. Bd. 2: Anwendung. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel
- Fasth-Berglund, Stahre (2013). Cognitive Automation Strategy for Reconfigurable and Sustainable Assembly Systems. *Assembly Automation* 33, Nr. 3 (26. Juli 2013): S. 294–303
- Spillner (2015). Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. München: Utz, Herbert
- Acatech (2016). *Acatech Impuls. Innovationspotenziale der Mensch-Maschine-Interaktion*. Abgerufen 11. Oktober 2019, von https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_IMPULS_Mensch-Maschine-Interaktion_WEB.pdf
- Geisberger, Broy (2012). Hrsg. *agendaCPS*. Bd. 1. *acatech STUDIE*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Dombrowski, Wagner, und Riechel (2013). Concept for a Cyber Physical Assembly System. S. 293–96. IEEE
- Erol, Jäger, Hold, Ott, und Sihm (2016). Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP* 54: S. 13–18.
- Hold, Erol, Reisinger, und Sihm (2017). Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. *Procedia Manufacturing* 9: S. 143–50
- Ranz, Komenda, Reisinger, Hold, Hummel, und Sihm (2018). A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly. *Procedia CIRP* 72: S. 99–104
- BMAS (2018). Forschungsbericht 502. Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. Abgerufen 11. Oktober 2019, von https://www.bmas.de/Shared-Docs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb502-einsatz-von-digitalen-assistenzsystemen-im-betrieb.pdf;jsessionid=B993983A7C67A319A01A2EFC9BD DD20F?__blob=publicationFile&v=1
- Klocke, Bassett, Bönsch, Gärtner, Holsten, Jamal, Jurke, Kamps, Kerzel, Mattfeld, Shirobokov, Stauder, Stautner, Trauth (2017). Assistenzsysteme in der Produktionstechnik. In: Brecher, Klocke, Schmitt, Schuh, Günther (Hrsg.). *Internet of Production für agile Unternehmen*. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017: 18. bis 19. Mai 2017. Aachen: Apprimus Verlag
- Ottobock (2018). *Exoskelette: Definition und Vorteile im industriellen Einsatz*. Abgerufen 11. Oktober 2019, von https://www.ottobock.com/media/local-media/press/_media-information/paexo/files/hintergrundinformationen-exoskelette.pdf
- Statista (2016). Absatz von Exoskeletten weltweit in den Jahren von 2015 bis 2025. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/796472/umfrage/absatz-von-exoskeletten-weltweit/>
- Brooke (1996). SUS: a 'quick and dirty' usability scale. In *Usability Evaluation in Industry*. Taylor and Francis
- ASU (2018). Chancen und Risiken für den Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. Abgerufen 11. Oktober 2019, von <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/chancen-und-risiken-fuer-den-einsatz-von-exoskeletten/chancen-und-risiken-fuer-den-einsatz-von>
- BGHM (2017). Einsatz von Exoskeletten an (gewerblichen) Arbeitsplätzen. Abgerufen 11. Oktober 2019, von https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Fachinformationen/Fachinformationen/FI-0059_Einsatz-von-Exoskeletten-an-gewerblichen-Arbeitsplaetzen.pdf
- Kurier (2017). Lohnnebenkosten: Österreich auf Platz 7 in der EU. Abgerufen 17. Dezember 2019, von <https://kurier.at/wirtschaft/lohnnebenkosten-oesterreich-auf-platz-7-in-der-eu/282.412.486>
- Versicherungen (2015). Die häufigsten Gründe, warum Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer krank sind. Abgerufen 17. Dezember 2019, von <https://www.versicherungen.at/news/die-haeufigsten-gruende-warum-arbeitnehmer-krank-sind/>
- Statistik Austria (2018). Krankenstandsfälle, -dauer und -tage 2018 nach Geschlecht und Diagnose. Abgerufen 17. Dezember 2019, von http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/gesundheit/gesundheitszustand/krankenstandstage/121708.html

IMPRESSUM

Herausgeber

Fraunhofer Austria Research GmbH

Theresianumgasse 27

1040 Wien

Redaktionsanschrift wie Herausgeber

+ 43 1 5046906

presse@fraunhofer.at

Geschäftsführer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr.-Ing. e. h. Dieter Fellner

Univ.-Prof. Dr.-Ing. DI Prof. e. h. Dr. h. c. Wilfried Sihn

Redaktion

Tinea Beronja BA

Grafik

Elisabeth Windisch

Werbegrafik

Untere Augartenstraße 2/2/4

1020 Wien

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich. Wir haben dieses Whitepaper mit der größtmöglichen Sorgfalt erstellt. Übermittlungs-, Satz- und Druckfehler können wir dennoch nicht ausschließen.

Fraunhofer Austria legt einen großen Wert auf eine ausgewogene Darstellung der geschlechterspezifischen Bezeichnungen. Sollten im Text vereinzelt männliche Bezeichnungen gewählt worden sein, so ist dies aus Gründen der besseren Lesbarkeit geschehen.

© Fraunhofer Austria, September 2020

Bildquellen

Titelbild: © Ottobock

Besuchen Sie uns online unter www.fraunhofer.at

Innovative Lösungen für das Heute von Morgen!

Fraunhofer Austria Research GmbH
Theresianumgasse 27
1040 Wien



www.fraunhofer.at

TÜV AUSTRIA Group
TÜV AUSTRIA Platz 1
2345 Brunn am Gebirge



www.tuv.at/i40