

Evaluation des Einflusses des Exoskelettes „Chairless Chair“ auf das Bewegungsverhalten des Menschen beim Gehen

Ralph HENSEL¹, Norman HOFMANN², Fabienne PETERS³

¹ *Industrial Engineering Methoden & Standardisierung, AUDI AG
Ettinger Straße, D-85045 Ingolstadt*

² *Institut für Mechatronik
Reichenhainer Straße 88, D-09126 Chemnitz*

³ *Deutsche Sporthochschule Köln
Am Sportpark Müngersdorf 6, D-50933 Köln*

Kurzfassung: In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Auswirkungen des passiven Beinexoskelettes Chairless Chair auf die Bewegungstrajektorien in den einzelnen Phasen des Gangzyklus vorgestellt. Dazu mussten zehn Probanden bei einer standardisierten Geschwindigkeit von 4 km/h für jeweils 15 Minuten mit und ohne Exoskelett auf einem Laufband gehen. Sprunggelenk, Kniegelenk und Hüftgelenk zeigten hochsignifikante Unterschiede in Flexion und Extension beim Gehen mit Exoskelett im Vergleich zum Gehen ohne Exoskelett. Die Bewegungsamplituden von Sprung- und Kniegelenk waren bei Nutzung des Exoskeletts reduziert, wohingegen es beim Hüftgelenk keine Veränderung zu verzeichnen war. Schrittlänge und Schrittfrequenz zeigten keinen signifikanten Unterschied.

Schlüsselwörter: Exoskelett, Motion Capturing, Beinunterstützung, Ganganalyse

1. Einleitung

Exoskelette stellen eine vielversprechende Technologie dar, durch deren Einsatz als personenbezogene Maßnahme sich zukünftig Arbeitsbelastungen von Mitarbeitern in Industrieunternehmen potenziell reduzieren ließen, wenn technische und organisatorische Gestaltungsmaßnahmen ausgeschöpft sind. Überdies bergen sie als augmentierende Assistenzsysteme auch das Potenzial, Mitarbeiter mit Leistungseinschränkungen bei der Inklusion oder der Wiedereingliederung zu unterstützen, indem diese gezielt besonders beanspruchte Körperregionen entlasten. Der Chairless Chair stellt ein solches mechanisches Unterstützungssystem dar und trägt nachgewiesenermaßen zur Entlastung der Beine bei Stehtätigkeiten bei, womit er beispielsweise potenziell leistungsgewandelte Mitarbeiter mit venösen Erkrankungen die Inklusion im Arbeitsalltag ermöglichen kann (Wall et al. 2016). In einer kombinierten Labor- und Feldstudie (Hensel & Steinhilber 2018) erfolgte die subjektive und objektive Evaluation des Beinexoskelettes, wobei neben der entlastenden Wirkung auch eine Lastumverteilung nachgewiesen wurde. Arbeitstätigkeiten in der Automobilindustrie sind von einer hohen Dynamik geprägt und erfordern einen taktbedingten Wechsel von Arbeitshaltungen, insbesondere ein ständiges Aufstehen und Absetzen sowie Gehen, beispielsweise um Material aufzunehmen oder verschiedene Verbauorte am zu montierenden Fahrzeug aufzusuchen. Hierbei muss sichergestellt sein, dass der Chairless Chair den Mitarbeiter nicht behindert und dieser in der Lage ist, seine Arbeitstätigkeit trotz Nut-

zung des Exoskelettes innerhalb der gesetzten Taktzeit auszuführen. Zu diesem Zwecke wurde im Rahmen einer Laborstudie mit zehn Probanden der Einfluss des Chairless Chairs auf das menschliche Bewegungsverhalten beim Aufstehen und Absetzen sowie dem Gehen mithilfe eines Motion-Capturing-Systems und digitaler Bewegungsrekonstruktion untersucht.

2. Methoden

An der dem vorliegenden Beitrag zugrundeliegenden Laborstudie nahmen zehn freiwillige Testpersonen, davon sieben männliche und drei weibliche, im Alter zwischen 18 und 40 Jahren teil. Um die Einstellbarkeit des Beinexoskelettes auf die anthropometrischen Maße der Probanden zu gewährleisten, mussten diese entsprechend der Herstellervorgaben eine Körpergröße zwischen 1,50 m und 1,95 m aufweisen. Die durchschnittliche Körpergröße lag bei 1,75m (SD = 0,09 m) und das durchschnittliche Körpergewicht bei 73,90 kg (SD = 12,19 kg) mit einem daraus resultierenden mittleren BMI von 24,04 (SD = 3,12). Die Studienteilnehmer hatten keine Vorerfahrung in der Nutzung des untersuchten Exoskelettes.

Mit dem Ziel des Vergleichs der Bewegungsausführung zwischen dem natürlichen menschlichen Gangmuster der Testpersonen auf dem Laufband mit dem Bewegungsmuster bei der Nutzung des Beinexoskelettes wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Die Schrittlänge ist bei Nutzung des Beinexoskelettes signifikant kürzer als ohne Exoskelett.
2. Die Schrittfrequenz ist bei Nutzung des Beinexoskelettes signifikant höher als ohne Exoskelett.
3. Der Bewegungsumfang des Sprunggelenks bei Dorsalextension und Palmarflexion ist beim Gehen mit Beinexoskelett gegenüber dem Gehen ohne Exoskelett eingeschränkt.
4. Der Bewegungsumfang des Kniegelenks bei Flexion und Extension ist beim Gehen mit Beinexoskelett gegenüber dem Gehen ohne Exoskelett eingeschränkt.
5. Der Bewegungsumfang des Hüftgelenks bei Flexion und Extension ist beim Gehen mit Beinexoskelett gegenüber dem Gehen ohne Exoskelett eingeschränkt.

Am Institut für Mechatronik (IfM) wurde ein Versuchsaufbau realisiert, bei dem die Testpersonen die erforderliche Bewegungssequenz des Gangzyklus auf einem Laufband absolvierten, mit dem Ziel, den Einfluss der Nutzung des Beinexoskelettes beim Gehen gegenüber dem natürlichen Gangmuster zu analysieren. Zu diesem Zwecke mussten die zehn Probanden bei einer standardisierten Geschwindigkeit von 4 km/h für jeweils 15 Minuten mit und ohne Exoskelett auf dem Laufband gehen. Die beiden Versuchsbedingungen wurden hinsichtlich ihrer Reihenfolge randomisiert. Da die Probanden keine Vorerfahrungen bei der Nutzung des Chairless Chairs hatten, bekamen sie vor Versuchsbeginn die Gelegenheit, sich mit dessen Nutzung vertraut zu machen.

Zur Analyse des Gangmusters wurden die Bewegungstrajektorien der Körpersegmente der Probanden mithilfe des optischen Motion-Capturing-Systems der Firma ART (Advanced Realtime Tracking, München/Deutschland) aufgezeichnet. Zu diesem Zwecke wurden die Probanden mit 17 Markerclustern an den Körpersegmenten ausgestattet. Die Aufzeichnung erfolgte mithilfe von acht Infrarotkameras im Raum. Auf Basis der gewonnenen Bewegungstrajektorien konnte, mit dem am IfM entwickelten Menschmodell Dynamicus eine Bewegungsrekonstruktion (Inverse Kinematik) berechnet werden. Im Resultat der Berechnung, liegt die digitalisierte Bewegung des

Probanden vor, aus der es möglich ist, die biomechanischen Parameter zu exportieren. Dazu zählen beispielsweise Winkel und Bewegungsgeschwindigkeiten des Menschmodells. Die statistische Datenanalyse erfolgte mit dem Softwaresystem Matlab (The Mathworks, Michigan/USA).

3. Ergebnisse

Die Schrittlänge differiert nur geringfügig zwischen den beiden Versuchsbedingungen mit Chairless Chair (CC) ($\bar{x} = 1,24$ m, SD = 0,14 m) und ohne Chairless Chair (w/o_CC) ($\bar{x} = 1,28$ m, SD = 0,08 m) und zeigt keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,44$). Demzufolge muss die erste Hypothese abgelehnt werden. Die Korrespondenz der beiden Schrittlängen führt bei identischer, auf dem Laufband voreingestellter Gehgeschwindigkeit auch zur gleichen Schrittfrequenz. Vor diesem Hintergrund muss auch die zweite Hypothese abgelehnt werden.

Entsprechend Tabelle 1 zeigte der Sprunggelenkwinkel für alle zehn Probanden zwischen beiden Versuchsbedingungen hochsignifikante Unterschiede ($p < 0,01$). Sowohl der Flexions- als auch der Extensionswinkel waren bei Nutzung des Chairless Chairs niedriger als beim Gehen ohne Exoskelett, was zu einen durchschnittlich um 6,8% reduzierten Bewegungsumfang im Sprunggelenk führt. Die dritte Hypothese konnte damit bestätigt werden.

Tabelle 1: Flexions- und Extensionswinkel [°] von Sprunggelenk, Knie und Hüfte mit (CC) und ohne Chairless Chair (w/o_CC); * - signifikant

Winkel	Sprunggelenk		Knie		Hüfte	
	CC	w/o_CC	CC	w/o_CC	CC	w/o_CC
Flexion	9.731*	10.607*	60.241*	63.553*	22.616*	25.850*
Extension	-18.734*	-19.932*	-2.513	-2.569	-20.921*	-17.818*

Für die Flexion zeigten auch die Kniewinkel hochsignifikante Unterschiede zwischen den beiden Versuchsbedingungen ($p < 0,01$), wobei der maximale Flexionswinkel bei Nutzung des Chairless Chairs durchschnittlich um circa drei Bogengrad niedriger war, als beim Gehen ohne Beinexoskelett (Tabelle 1). Da der Extensionswinkel keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Versuchsbedingungen aufwies, kann die Hypothese 4 indes nur mit Einschränkungen angenommen werden.

Auch der Hüftwinkel zeigt gemäß Tabelle 1 sowohl für Flexion als auch Extension hochsignifikante Unterschiede zwischen beiden Versuchsbedingungen ($p < 0,01$). Bei Nutzung des Chairless Chairs war ein größerer Extensionswinkel zu beobachten, während beim Gehen ohne Beinexoskelett ein größerer Flexionswinkel nachgewiesen werden konnte. Der Bewegungsumfang liegt in beiden Versuchsbedingungen bei circa 43,5°, sodass auch die fünfte Hypothese abgelehnt werden muss.

Abbildung 1 veranschaulicht die Veränderungen im Gangmuster anhand der aufgenommenen Gelenkwinkelunterschiede.

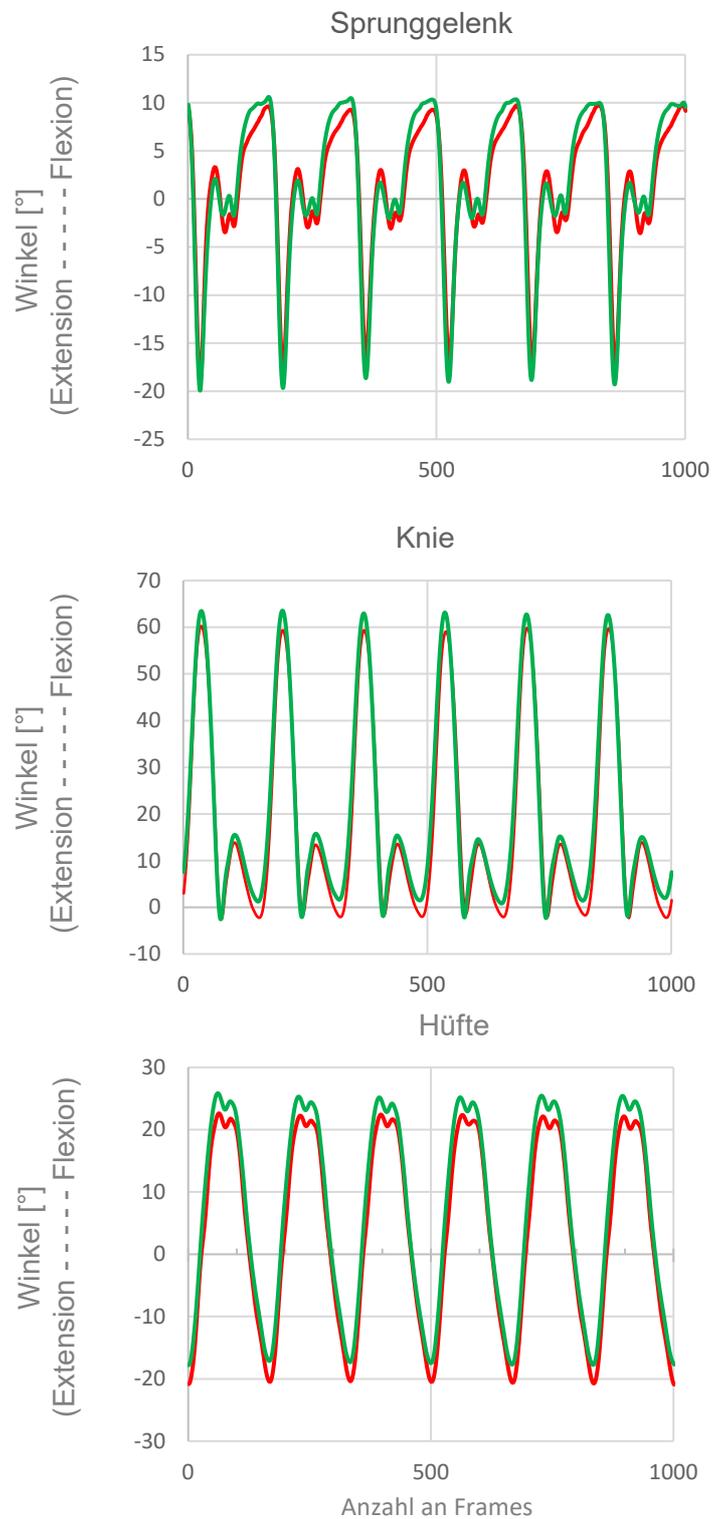


Abbildung 1: Durchschnittliche Flexions- und Extensionswinkel von Sprunggelenk (oben), Hüfte (mitte) und Knie (unten) aller zehn Probanden über jeweils sechs Gangzyklen (minütlich aufgezeichnet) für beide Versuchsbedingungen (rot: CC, grün: w/o_CC)

Eine veränderte Rotation des Beckens konnte nicht beobachtet werden, weder um die z-Achse, noch eine Auf- und Abwärtsbewegung um die x-Achse oder eine Kippung um die y-Achse

4. Diskussion

Wie erwartet, konnten Bewegungseinschränkungen der unteren Extremitäten beim Gehen unter Nutzung des Chairless Chairs - und damit eine Veränderung des Gangmusters - nachgewiesen werden, die durch die erforderlichen Befestigungselemente an Hüfte, Oberschenkeln sowie Sprunggelenken verursacht werden.

Die Konstanz der Schrittlänge bei eingeschränktem Flexionsumfang in Sprung- und Kniegelenk resultiert maßgeblich aus einem größeren Extensionswinkel und damit einhergehend einem verlängerten Abdruck, um den Schrittlängenverlust über die Gelenkette der unteren Extremitäten zu kompensieren und mit der voreingestellten Geschwindigkeit des Laufbandes Schritt halten zu können. Unter normalen Arbeitsbedingungen würde der Nutzer des Chairless Chairs aufgrund der Bewegungsrestriktionen vermutlich kleinere Schritte ausführen und demzufolge mit verminderter Geschwindigkeit gehen. Vor diesem Hintergrund ist in der Betriebspraxis damit zu rechnen, dass der Nutzer für Laufwege an der Arbeitsstation, etwa zwischen Verbauorten oder zur Materialaufnahme, mehr Zeit benötigt, was eine höhere Leistungshergabe erfordern könnte, um die Arbeitsinhalte dennoch innerhalb der Taktzeit zu erledigen.

Auf einen unsichereren Gang konnte aus der Rotation des Beckens nicht geschlossen werden, was jedoch den subjektiven Rückmeldungen der Probanden bei Nutzung des Chairless Chairs auf dem Laufband entgegensteht. Der Statistik des betrieblichen Unfallgeschehens zufolge sind 32,9% aller Betriebsunfälle auf Stolper-, Rutsch- und Sturzunfälle zurückzuführen (DGUV 2017). Der Chairless Chair könnte dem subjektiven Feedback der Testpersonen auf dem Laufband eine potenzielle Gefahrenquelle für Sturz- und Stolperunfälle darstellen. Besondere Aufmerksamkeit sollte nach der Implementierung des Chairless Chairs an industriellen Arbeitsplätzen daher dem betrieblichen Unfallgeschehen bezüglich der Zunahmen von Sturz- und Stolperunfällen gewidmet werden. Die beschriebene subjektive Wahrnehmung der Bewegungsunsicherheit kann jedoch auch aus dem Versuchsaufbau resultieren, da die Lauffläche des Laufbandes von circa 50 x 150 cm² insbesondere den Bewegungsfreiraum größerer Probanden und damit auch deren Bewegungssicherheit subjektiv einschränkte. Darin ist die größte Limitation des Versuchsaufbaus zu sehen, die darüber hinaus auch Auswirkungen sowohl auf die Schrittlänge als auch die Winkelmaße der relevanten Gelenke der unteren Extremitäten haben könnte.

Fraglich ist überdies, ob die ermittelten Veränderungen des Gangmusters nur psychomotorisch bedingt sind, sich nach längerer Gewöhnungsphase normalisieren und sich bedingt durch Lerneffekte wieder das natürliche Gangmuster einstellt. Ferner sollten die untersuchten Parameter in Längsschnittstudien weiterführend analysiert werden, um langfristige Auswirkungen der regelmäßigen Nutzung des Chairless Chairs auf das Bewegungsverhalten des Gehens zu eruieren und negative, gesundheitsschädliche Effekte ausschließen zu können.

5. Literatur

- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (2017) Statistik Unfallgeschehen 2016. Berlin: DGUV.
- Hensel R, Steinhilber B (2018) Bewertung von Exoskeletten für industrielle Arbeitsplätze. Mehrwert durch eine kombinierte Evaluation mittels Laboruntersuchung und Felderprobung. In: Weidner R, Karafillidis A (Hrsg.) Tagungsband 3. Transdisziplinäre Konferenz Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen, S.107-115. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität.
- Wall R, Seibt R, Steinhilber B (2016) Steharbeit - Risiken und Lösungsansätze mittels quantitativer Methoden. Medizinisch Orthopädische Technik, Vol. 136 (1), 12-17.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit HUMAINE gestalten

67. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie (WiPs)
Ruhr-Universität Bochum

Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)
Ruhr-Universität Bochum

3. - 5. März 2021

GfA-Press

Bericht zum 67. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 3. - 5. März 2021

**Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie, Ruhr-Universität Bochum
Institut für Arbeitswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2021
ISBN 978-3-936804-29-4

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2021 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de