

Anpassung der Unterstützung eines industriellen Exoskeletts aufgrund des Arbeitsablaufs

Exoskelett-Adaptivität durch Zustandsautomaten

O. Ott, K. Schmermbek, R. Weidner

Um den Menschen bei vielfältigen Tätigkeiten in verschiedenen Arbeitsumgebungen bestmöglich zu unterstützen, muss das Verhalten von Exoskeletten an die wechselnden Anforderungen anpassbar sein. Zur Realisierung wird die Methode eines übergeordneten Reglers nach dem Prinzip der Zustandsautomaten eingeführt. Aufbauend auf Prozesswissen beschreibt der Zustandsautomat den Arbeitsablauf und erlaubt die Betrachtung sowie die Abstimmung der Unterstützung an die Anforderungen einzelner Tätigkeiten.

STICHWÖRTER

Mensch und Technik, Produktionstechnik, Industrie 4.0

Adaptation of the support of an industrial exoskeleton based on the workflow – Finite-State-Machine based exoskeleton adaptivity

To optimally support humans during diverse activities in different work environments, the behaviour of exoskeletons must be adaptable to changing requirements. To enable this adaptation, the method of a superordinate controller based on the principle of state machines is introduced. Building on process knowledge, the state machine describes the workflow and allows the analysis as well as the tuning of the support with respect to the requirements of individual activities.

1 Einleitung

Der Mensch wird trotz zunehmender Digitalisierung und Automatisierung weiterhin einen zentralen Bestandteil in industriellen Wertschöpfungsketten einnehmen, wie zum Beispiel bei Aufgaben in Zwangshaltungen in Montageprozessen oder bei der Handhabung in der Logistik [1, 2]. Einen Ansatz zur physischen Unterstützung stellen Exoskelette dar [2], unter denen mechanische Systeme verstanden werden, die am Körper getragen werden und gezielt belastete Körperregionen, wie den Rücken oder die Schultern, entlasten [3, 4].

Um den Menschen individuell zu unterstützen, benötigt es Ansätze, zum Beispiel adaptive Exoskelette, die auf den Unterstützungskontext angepasst sind [7]. Der Unterstützungskontext ergibt sich aus dem technischen System, der Nutzer:in mit ihren Fähigkeiten, Fertigkeiten und Erfahrungen und der Aktivität, die gegebenenfalls mit einem Werkzeug in einer bestimmten Arbeitsumgebung ausgeführt wird [1, 5, 6]. Erfolgt diese Anpassung durch einen manuellen Eingriff der Nutzer:in oder einer Expert:in gilt das System als anpassbar [7]. Adaptive Systeme hingegen zeichnen sich dadurch aus, dass die Anpassung autonom, also ohne Eingriff der Nutzer:in [7], erfolgt. Trotz der Notwendigkeit für eine sinnvolle und nicht störende Nutzung [8], ist die Implementierung eines adaptiven Systemverhaltens mit einem entsprechend hohen Aufwand verbunden.

Da in vielen Bereichen Arbeitsabläufe prozessbedingt vorgegeben sind, kann diese Kenntnis genutzt werden, um im Kontext von Exoskeletten eine bessere Anpassung der physischen Unterstützung an die gegebenen Anforderungen und damit ein höheres

Maß der Adaptivität in Exoskeletten zu erreichen. Durch das im Folgenden vorgestellte Konzept eines hierarchischen Reglers, der die bestehende Regelung um einen übergeordneten Regler erweitert, wird eine kontext-spezifische Anpassung der Unterstützung ermöglicht. Hierfür sollen in einem ersten Schritt die Grundlagen der Adaptivität industrieller Exoskelette sowie diskrete und mathematische Modellierungsmethoden von Arbeitsabläufen im industriellen Einsatz eingeführt werden. Darauf aufbauend wird das Prinzip des hierarchischen Reglers und das Vorgehen an einem Beispiel veranschaulicht.

2 Grundlagen

2.1 Adaptivität in Exoskeletten

Exoskelette sind im Allgemeinen sowohl an die Nutzer:in, als auch an die Anforderungen der Tätigkeit und des Arbeitsumfelds anzupassen. Neben der Anpassung der Unterstützung an die Tätigkeit ist die Anpassung an die Anthropometrie des Menschen (zum Beispiel Körpergröße oder -form) von hoher Relevanz, die maßgeblich durch den strukturellen Aufbau und Gestalt sowie das verwendete Material beeinflusst wird. Darüber hinaus erfolgt die Anpassung der Unterstützung an die Fähigkeiten, Erfahrungen und physiologischen Voraussetzungen.

Die verwendete Aktorik zur Bereitstellung des Unterstützungsmoments wird hinsichtlich des energetischen Eintrags in passiv, semi-aktiv und aktiv unterteilt und definiert die zu erreichende Höhe und Form der Unterstützung [9]. Während passive Antriebe (zum Beispiel Federzüge, Dämpfer) die Energie aus der Bewegung speichern, dissipieren oder verlagern, nutzen semi-ak-

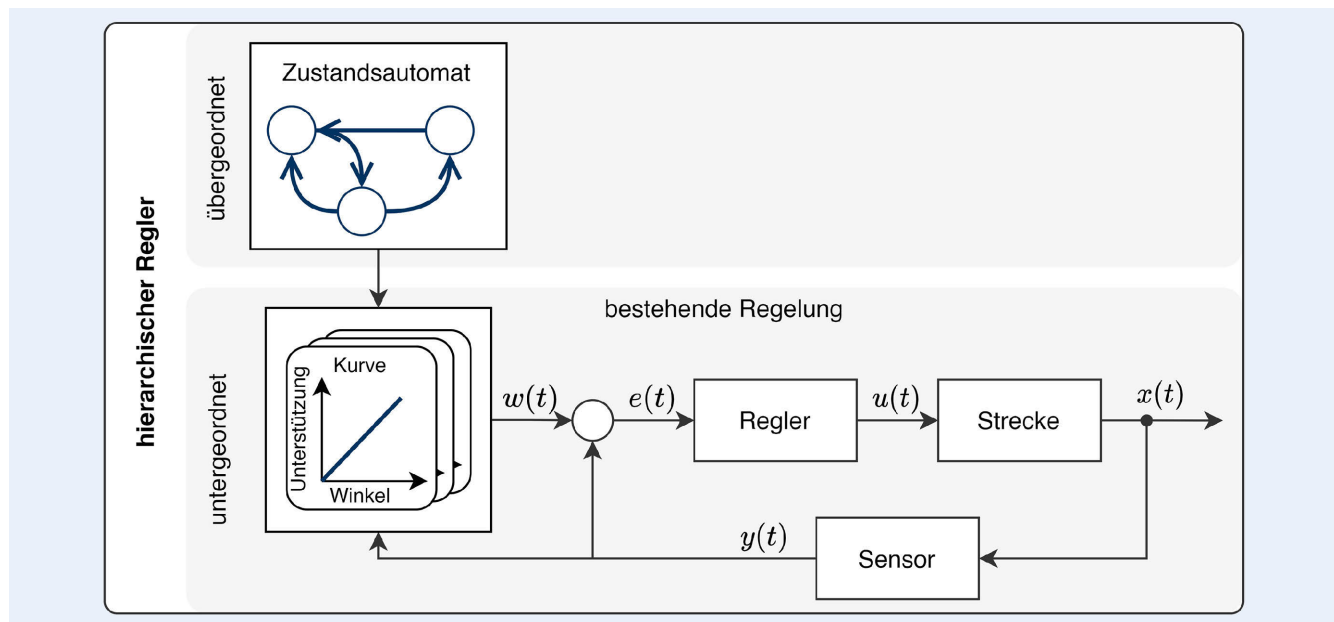


Bild 1. Darstellung des hierarchischen Regelaufbaus. Grafik: PFF / Universität Innsbruck

tive und aktive Antriebe externe, gespeicherte Energie. Diese wird genutzt, um die Unterstützungsmomente anzupassen (semi-aktiv, durch zum Beispiel Gasdruckfeder, magnetorheologische Dämpfer [10]) oder bereitzustellen (aktiv, durch zum Beispiel Elektromotoren, Pneumatik-Aktoren) [9]. Passive Exoskelette sind zumeist nur durch einen manuellen Eingriff nicht während der Arbeit anpassbar. Im Gegensatz dazu stehen semi-aktive und aktive Exoskelette, bei denen der integrierte Regelkreis und Sensorik die Möglichkeit der Adaptivität während der Laufzeit bieten. Bild 6 (dargestelltes Exoskelett 1 und 2 als Use Case) fasst exemplarisch die Unterschiede passiver und aktiver Systemansätze zusammen.

In der Anwendung beschreibt Adaptivität die Anpassung der Unterstützungscharakteristik an die Anforderungen des Unterstützungskontext. So kann die Höhe der bereitgestellten Unterstützung beispielsweise je nach Physiologie oder Präferenzen der Nutzer:in sowie der Anforderungen an die Tätigkeit (zum Beispiel Gewicht des Pakets, Wahl des Werkzeugs) variieren. In der Folge kann die Anpassung der Höhe beispielsweise über ein Bedienelement durch die Nutzer:in selbst oder autonom durch integrierte Systemregler erfolgen.

Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung aktiver Antriebe die Bereitstellung unterschiedlicher Momenten-/Kraftverläufe, sogenannten Momenten-/Kraftkurven (nachfolgend stellvertretend als Unterstützungskurven bezeichnet). Dabei handelt es sich zum Beispiel um ein definiertes Moment, welches von einem Winkel abhängt, und somit eine Anpassung an die Anforderungen einer Tätigkeit durch eine Expert:in ermöglicht [8]. In der Anwendung können unterschiedliche Unterstützungskurven für verschiedene Tätigkeiten (zum Beispiel beidhändiges Handhaben von Paketen in der Logistik oder Überkopfmontage in Zwangshaltung) hinterlegt werden, aus denen die Nutzer:in ihre gewünschte Unterstützung manuell über ein Bedienelement wählen kann [8]. Der Eingriff der Regelung kann aber ebenfalls auch adaptiv durch das Über- oder Unterschreiten eines gemessenen

Wertes (messwertbasiert), durch das Registrieren eines definierten Ereignisses (eventbasiert), wie dem Wechsel des Arbeitsplatzes oder Werkzeugs, oder auf Basis von Modellen (modellbasiert) erfolgen [7]. Hierbei wird die mathematische Beschreibung der Systemdynamik oder der Einsatz von Muskelmodellen genutzt, um die Unterstützung zu ermitteln [11]. Statistische Methoden unterstützen dabei die Optimierung [11] oder bieten einen eigenen Ansatz. So finden Neuronale Netze, Support Vector Machines oder Methoden des Reinforcement Learning ihre Anwendung zur musterbasierten Klassifikation [12]. Daneben bieten auch regelbasierte Klassifikationsmethoden wie Entscheidungsbäume und Zustandsautomaten eine Möglichkeit, um beispielsweise bekannte Arbeitsabläufe zu modellieren [12].

2.2 Zustandsautomaten

Zu Planungs- und Optimierungszwecken können verfahrens- und fertigungstechnische Prozesse oft durch Modellierungsmethoden abgebildet und abstrahiert werden. Methoden wie das Methods-Time Measurement (MTM) unterteilen hierfür einen Gesamtprozess in standardisierte Aktivitäten mit festgelegten Ausführungszeiten [13]. Für die mathematische Modellierung von Prozessen, deren Verhalten durch die Abfolge von Ereignissen oder Zuständen geprägt sind und deren Übergang zwischen Zuständen festgelegt werden kann, eignen sich ereignisdiskrete Modelle wie Petri-Netze oder Zustandsautomaten [14]. Die Verwendung eines Zustandsautomaten ermöglicht somit die Modellierung des Systemverhaltens aus dem Blickwinkel der Zustände. Die Grundbausteine eines Zustandsautomaten sind die Zustände, Aktionen und Ereignisse sowie die Zustandsübergänge, die auch als Transitionen bezeichnet werden. Ein Ereignis, welches eine Transition auslöst, kann durch ein Signal, einen Aufruf oder den Ablauf einer Zeitspanne definiert sein [15].

In der Anwendung bilden Zustandsautomaten beispielsweise die Grundlage für Informationssysteme für die Werkerassistenz

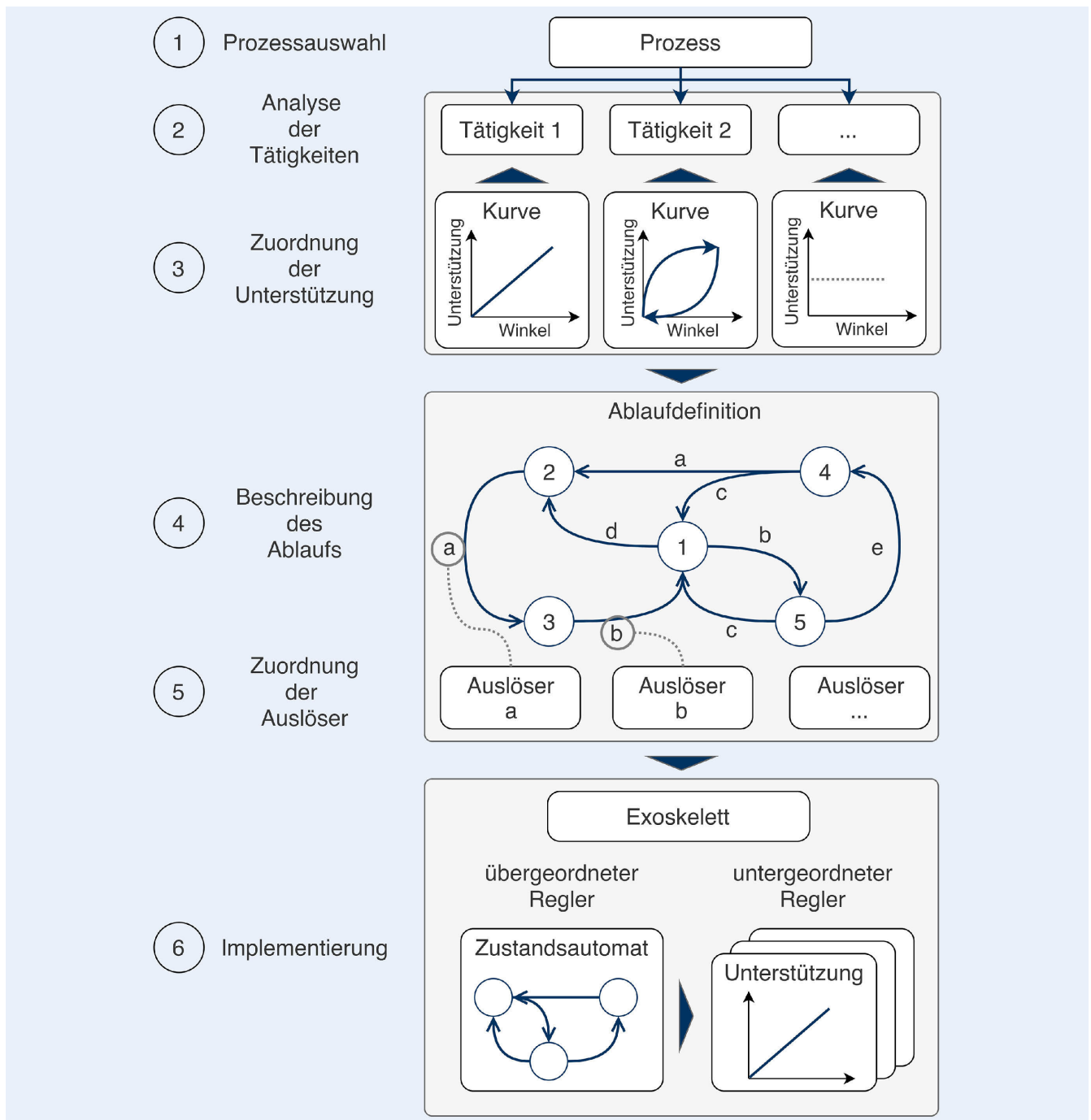


Bild 2. Konzept zur Implementierung eines Zustandsautomaten als übergeordneten Regler. Grafik: PFF / Universität Innsbruck

[16, 17]. Durch die Vorgabe definierter Tätigkeitsabfolgen können Anweisungen mittels Augmented Reality [17] an die Worker:in weitergegeben und so die Fertigung des Produkts unterstützt werden [16]. Darüber hinaus finden Zustandsautomaten in vielen robotischen Applikationen ihre Anwendung, da sie mit einfachen Grundbausteinen komplexe Prozesse abbilden können [18]. Im Bereich der Exoskelette finden Zustandsautomaten ihre Anwendung vor allem im Bereich der Rehabilitation. Hier werden sie beispielsweise verwendet, um den Menschen beim Gehen in unterschiedlichen Gangphasen eine gezielte Unterstützung zukommen zu lassen [12, 19].

3 Zustandsautomat als übergeordneter Regler

Um die Adaptivität des Exoskeletts für variierende Tätigkeiten im Arbeitsablauf zu erreichen, wird der bestehenden Regelung ein Zustandsautomat als übergeordneten Regler hinzugefügt, der die Anpassung der Unterstützungseigenschaften des Exoskeletts an die Anforderungen des Kontexts realisiert (**Bild 1**). Das Vorgehen zur Implementierung dieser hierarchischen Regelung soll nachfolgend eingeführt und an einem praktischen Beispiel veranschaulicht werden.

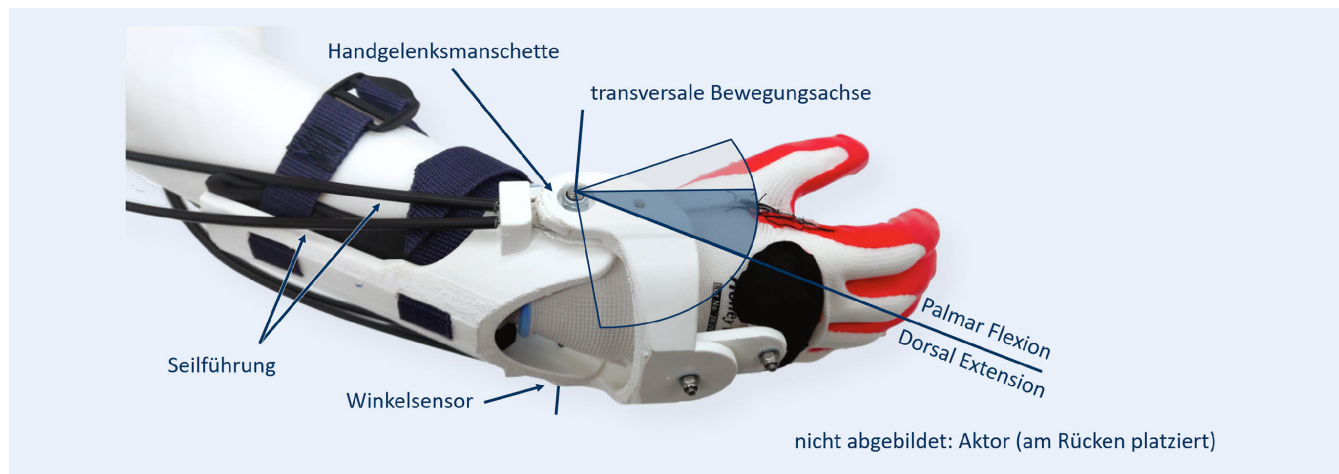


Bild 3. Darstellung der Handgelenksmanschette des Exoskeletts mit unterstütztem Freiheitsgrad. Grafik: PFF / Universität Innsbruck

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Implementierung eines Zustandsautomaten als übergeordneter Regler kann anwendungsübergreifend über ein definiertes Vorgehen erfolgen, welches in **Bild 2** veranschaulicht wird.

1. Auswahl des zu unterstützenden Prozesses. Das Vorgehen baut auf den Kenntnissen über den zu unterstützenden Arbeitsablauf auf (Bild 2, 1.).
2. Zerlegung des Prozesses in einzelne Tätigkeiten, den modellierbaren Automatenzuständen, zum Beispiel nach MTM-Methode. Dies kann je nach Anforderungen und gewünschter Adaptivität auf Bewegungsebene erfolgen (Bild 2, 2.).
3. Abstimmung der Unterstützungscharakteristik an die kontextspezifischen Anforderungen der Automatenzustände durch Expert:innen. Definition spezifischer Unterstützungskurven (Bild 2, 3.). Diese tätigkeitsspezifischen Unterstützungskurven beschreiben das Unterstützungsverhalten des Exoskeletts bei Eintritt des Zustands.
4. Sortieren der Automatenzustände und deren spezifischen Transitionen entsprechend des Arbeitsablaufs und damit der gewünschten Reihenfolge (Bild 2, 4.).
5. Festlegen der Auslöser für eine Transition, wie zum Beispiel einer Veränderung im Bewegungsablauf oder Tätigkeit, welche zum Wechsel der Anforderungen an die Unterstützung führt. (Bild 2, 5.). Mit der entsprechenden Sensorik kann beispielsweise der Wechsel des verwendeten Werkzeugs oder Arbeitsplatz als eventbasierter Auslöser detektiert werden.
6. Implementierung des Zustandsautomaten als hierarchisch-übergeordnetem Regler zur automatischen, kontext-spezifischen Anpassung des Exoskeletts (Bild 2, 6.). Damit wird die Modellierung durch die vollständige Definition der Zustände, ihrer Transitionen und notwendigen Auslösern (übergeordneter Regler) und der einzeln zugewiesenen, kontext-spezifischen Unterstützung (untergeordneter Regler) abgeschlossen.

3.2 Praktische Anwendung

Das Konzept wird am Beispiel eines einfachen, charakteristischen Montageprozesses veranschaulicht. Der betrachtete

Arbeitsablauf besteht darin, eine mit Schrauben befestigte Platte auszutauschen, wobei die Unterstützung durch ein aktives Handgelenks-Exoskelett erfolgt (**Bild 3**). Das gewählte Exoskelett besitzt einen Freiheitsgrad (Palmar Flexion und Dorsal Extension), in dem es die Bewegung des Handgelenks ohne Krafteinwirkung zulassen, aktiv unterstützen oder zur Stabilisierung blockieren kann. Die gewählte Unterstützung wird als Kraft durch das gezielte Ansteuern des pneumatischen Aktors erzeugt und über eine Seilführung als Drehmoment in die Handgelenksmanschette eingeleitet. Als Eingangsgröße des untergeordneten Reglers misst ein Winkelsensor den aktuellen Handgelenkwinkel.

Die Umsetzung des Konzepts des hierarchischen Reglers für diesen Montageprozess ist in **Bild 4** dargestellt. Im ersten Schritt erfolgt die Analyse der involvierten Tätigkeiten (Bild 4, 2.), sowie die Zuordnung der gewünschten Unterstützung für jeden Zustand unter Berücksichtigung der Anforderungen (Bild 4, 3.). Der betrachtete Arbeitsablauf beginnt in der Vorbereitung, in der die Mitarbeiter:in nach dem Schraubenzieher greift (Zustand 1). Während des Vorgangs ist keine Unterstützung erforderlich und die Bewegung soll ohne Krafteinwirkung zugelassen werden. Anschließend folgt die Demontage durch das Lösen der Schrauben (Zustand 2). Dieser Zustand erfordert eine richtungsabhängige Unterstützung, bei der die Handgelenksbewegung entgegen dem Uhrzeigersinn (Flexion) verstärkt wird. Die Rotation in die entgegengesetzte Richtung (Extension) wird nicht unterstützt. Sind alle Schrauben gelöst, wird die Platte ausgetauscht (Zustand 3) und eine Bewegung des Handgelenks zur Stabilisierung blockiert. Durch das erneute Festziehen der Schrauben (Zustand 4) wird der Montageablauf beendet. Hierbei soll die Extension unterstützt und die Flexion ermöglicht werden.

Für die Beschreibung des Arbeitsablaufs (Bild 4, 4.) müssen nun die jeweiligen Transitionen zwischen den einzelnen Zuständen definiert werden (Bild 4, 5.). Eine detaillierte Ausführung wird in **Bild 5** dargestellt. Die Initialisierung des Montageprozesses findet über die manuelle Betätigung eines Tasters (Messwert, a, [Taster_betätigt]) statt, kann aber auch durch Sprachsteuerung erweitert werden. Des Weiteren dient der Taster dem manuellen Eingriff der Nutzer:in in den Arbeitsablauf (zum Beispiel das Zurückspringen im Zustand). Der anschließende Griff zum

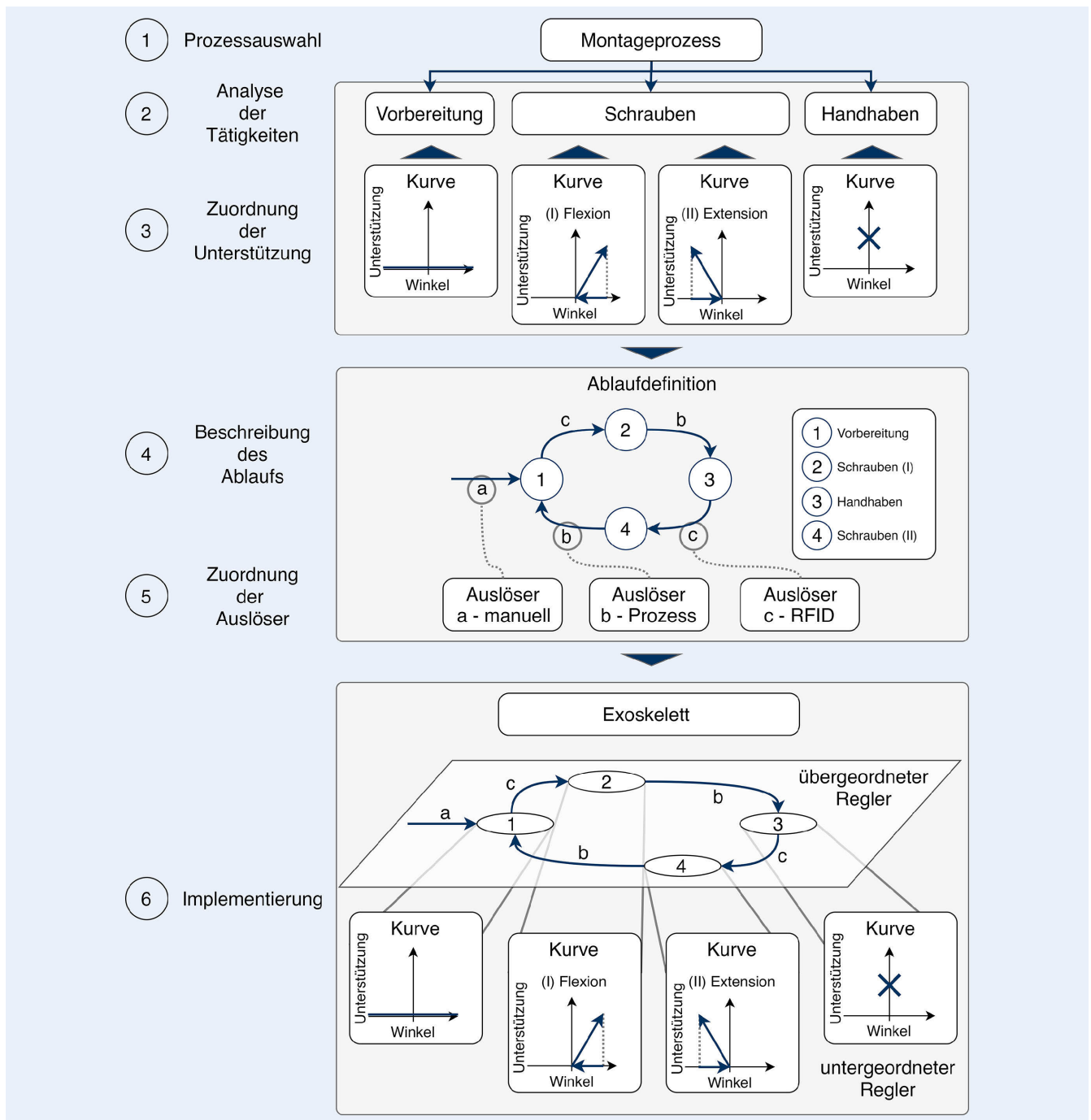


Bild 4. Umsetzung des Konzepts am Beispiel eines einfachen Montageprozesses. Grafik: PFF / Universität Innsbruck

Werkzeug wird mittels RFID-Technologie erkannt (Event, c, [RFID_Check > 0]) und leitet den ersten Schraubprozess ein. Nach einer definierten Anzahl zu lösender Schrauben (Messwert, b, [Anzahl_Moment < 5]) und dem Weglegen des Werkzeugs (Event, c) wird in den Zustand der Handhabung gewechselt. Die Anzahl der bearbeiteten Schrauben wird dabei durch das Auftreten des Anzugsdrehmoment (zum Beispiel Moment > 12 Nm) ermittelt. Der erneute Griff zum Schraubenzieher leitet den finalen Prozesszustand ein (Event, c), welcher nach einer definierten Anzahl zu fixierender Schrauben (Messwert, b) und dem Weglegen des Werkzeugs (Event, c) beendet wird.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Exoskelette mit adaptivem Systemverhalten können ein Ansatz sein, um kontext-spezifisch zu unterstützen. Auch wenn ein hohes Maß an Adaptivität erstrebenswert sein kann [8], ist die Implementierung mit entsprechend hohem Aufwand verbunden. Ein Konzept zur Umsetzung wurde im Beitrag vorgestellt. Das Vorgehen wurde am Beispiel eines einfachen Montageprozesses und der Unterstützung eines Handgelenks-Exoskeletts aufgezeigt.

Der präsentierte Ansatz des Zustandsautomaten als übergeordneten Reglers zur Anpassung der Unterstützung an den Unter-

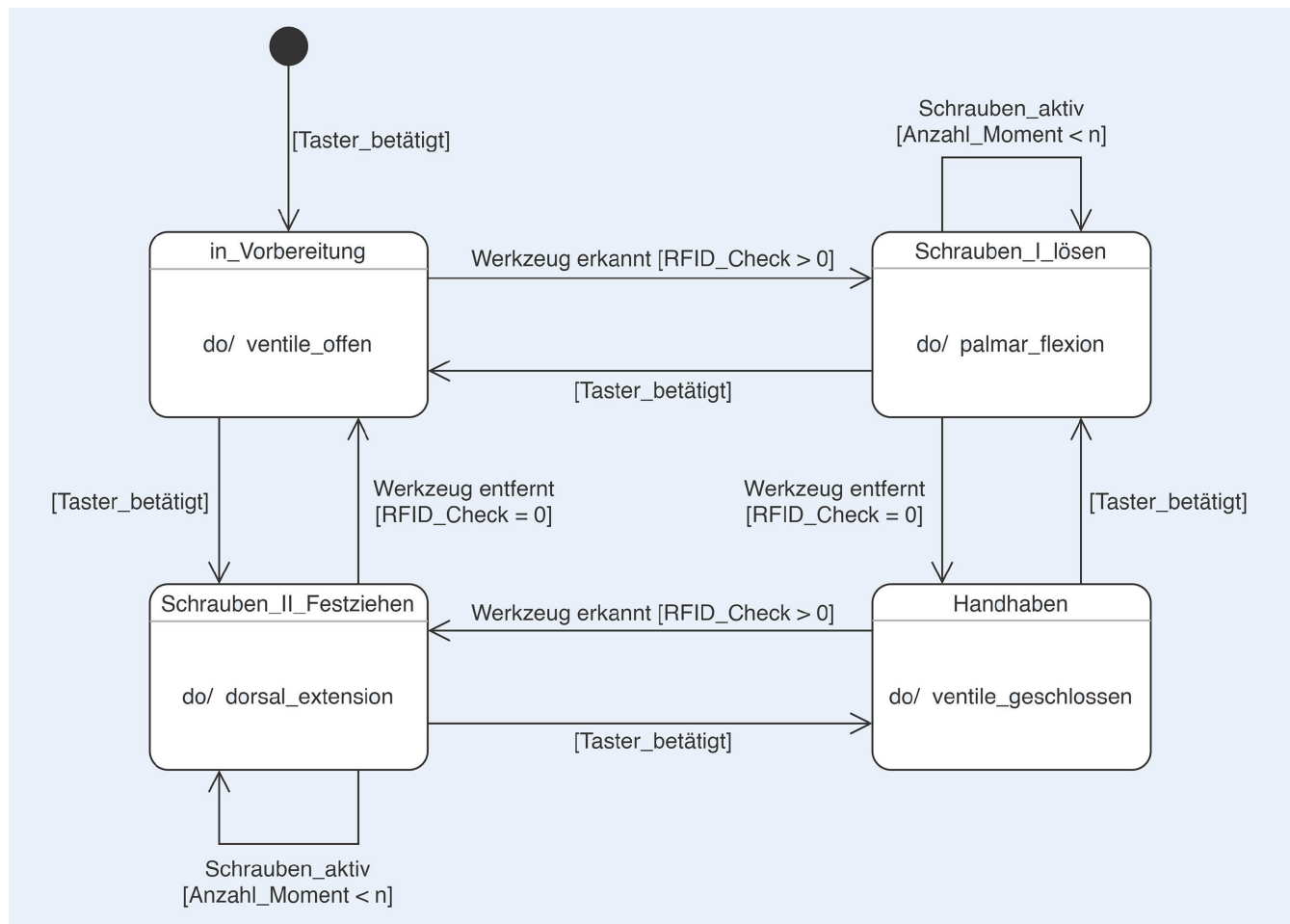


Bild 5. Zustandsautomat des einfachen Montageprozesses. Grafik: PFF / Universität Innsbruck

stützungskontext wird in **Bild 6** mit zwei anderen Exoskelett-Ansätzen verglichen: Exoskelett 1 für ein passives System und Exoskelett 2 als Beispiel für ein aktives System (zum Beispiel das Schulter-Exoskelett „Lucy“ [20] vor der Weiterentwicklung). Ein zentraler Unterschied zwischen dem passiven und den beiden aktiven Ansätzen liegt in der Anpassungsmöglichkeit durch hinterlegte Unterstützungskurven. Über ein Bedienelement kann die Nutzer:in eine Kurve auswählen und das aktive Exoskelett (Exoskelett 2 und 3) an den Kontext anpassen. Exoskelett 3 nutzt den implementierten Zustandsautomaten zudem zur Anpassung auf Systemebene, was zu einer adaptiven Unterstützung führt. Dieser Vorteil soll am Beispiel des Einsortierens von Paketen (2 kg und 5 kg) in ein Regal veranschaulicht werden. Dieser Prozess erfordert eine angemessene Unterstützung, um der Gravitation beim Tragen entgegenzuwirken. Während das passive System eine Form der Unterstützung bietet, kann das aktive Exoskelett 2 zwischen den Tragetätigkeiten manuell durch die Nutzer:in an das Gewicht angepasst werden. Aufgrund des gehaltenen Pakets ist diese Anpassung jedoch während einer Tätigkeit nicht möglich. Hier zeigt sich der Nutzen des Zustandsautomaten deutlich, da er die Unterstützung (ausgewählte Kraftkurven) während der Tätigkeit anpassen kann.

Das vorgestellte Konzept präsentiert eine übersichtliche und einfache Regelungsarchitektur [12], die den Arbeitsablauf in einzelnen Elementen (grafisch) abbildet. Damit erlaubt das Vorgehen die einfache Zuordnung einer Unterstützungscharakteristik

durch Unterstützungskurven des Exoskeletts. Der Zustandsautomat eignet sich insbesondere für bekannte Tätigkeiten mit festgelegten Transitionen und eindeutigen Auslösern. Dies erfordert Kenntnisse des Arbeitsablaufs, welche sich in einem ersten Schritt bereits durch grundlegende Verfahren aus den Arbeitswissenschaften ermitteln lassen (zum Beispiel Strukturierung von Abläufen).

Bei Prozessen mit unterteilbaren, nicht sequenziell festgelegten Tätigkeiten erfordert die Modellierung die Zuordnung eindeutiger Auslöser zu den Transitionen, um deterministisches Verhalten sicherzustellen. Unklare Zustandsübergänge und fehlende eindeutige Transitionen können mithilfe musterbasierter Klassifikationsalgorithmen unterstützt werden. Diese erkennen Muster in sensorischen Daten und erfassen Tätigkeiten mit bestimmter Wahrscheinlichkeit, ohne umfassendes Wissen über den Arbeitsablauf zu benötigen. Jedoch erfordert dies eine breite Datengrundlage und aufwendiges Training der Algorithmen um eine zuverlässige Mustererkennung zu garantieren. Dies führt zu einem deutlich höheren Entwicklungsaufwand.

Die Implementierung eines hierarchischen Reglers basierend auf Kenntnissen des Arbeitsablaufs beschreibt eine vielversprechende Methode, mit der sich die Adaptivität von industriellen Exoskeletten erhöhen lässt. Damit bietet das Vorgehen eine erste Grundlage, mit der sich die Adaptivität mit überschaubarem Aufwand erhöhen lässt und so der Flexibilität und Agilität des Menschen im industriellen Umfelds gerecht wird.

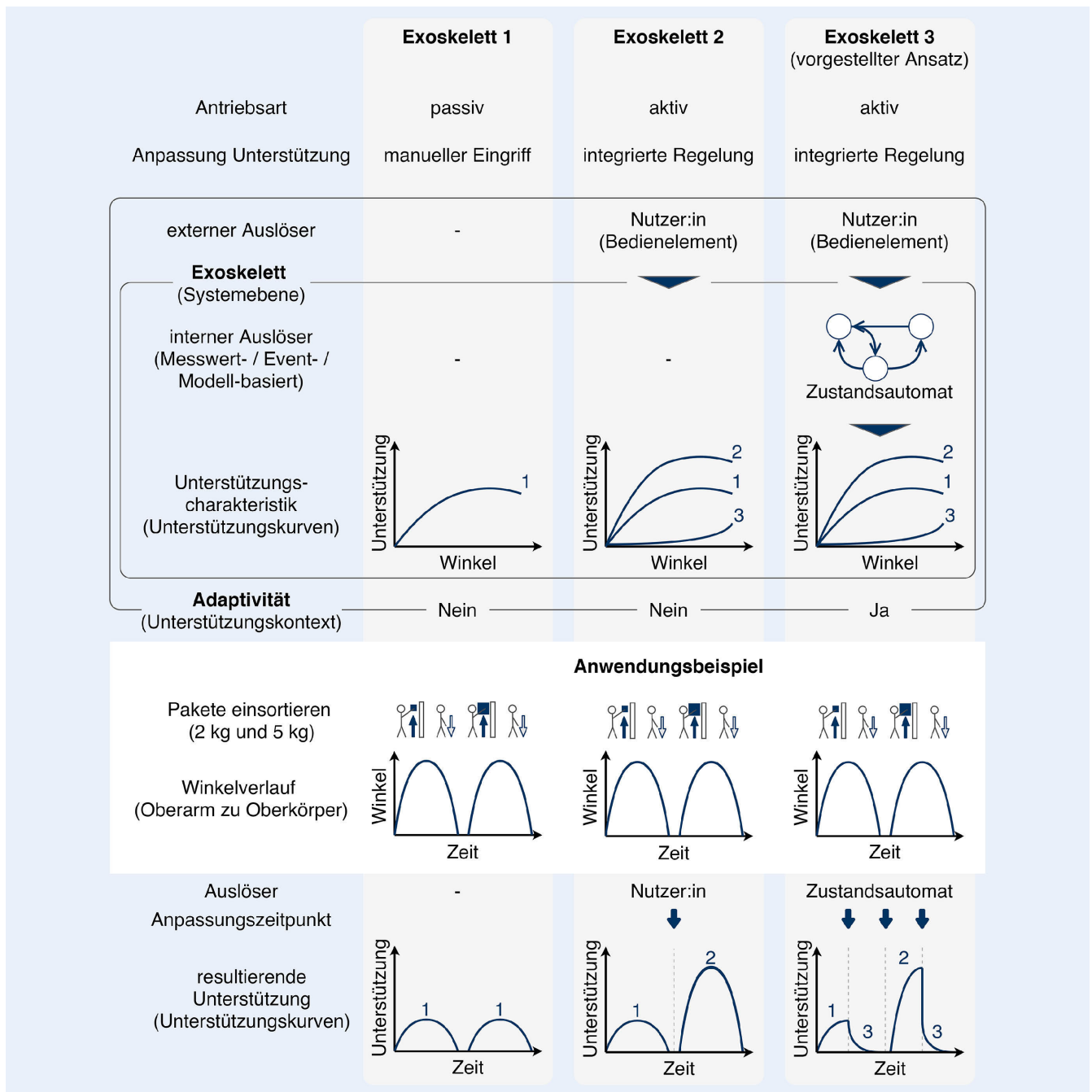


Bild 6. Übersicht der Eigenschaften und Auswirkungen auf die Adaptivität der Unterstützung in unterschiedlichen beispielhaften Exoskeletten.
 Grafik: PFF / Universität Innsbruck

FÖRDERHINWEIS

Die Publikation dieses Beitrags wurde anteilig durch den Publikationsfond der Universität Innsbruck gefördert.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei *Elias Rothleitner* (Universität Innsbruck) für die Unterstützung in der Entwicklung, dem Aufbau und der Programmierung des Handgelenks-Exoskelett.

Literatur

- [1] Casla, P.; Larreina, J.; Fletcher, S. et al.: Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations. For industry practitioners and decision makers at local, regional, national and EU levels (2019)
- [2] Mark, B. G.; Rauch, E.; Matt, D. T.: Systematic selection methodology for worker assistance systems in manufacturing. *Computers & Industrial Engineering* 166 (2022), S. 107982
- [3] Looze, M. P. de; Bosch, T.; Krause, F. et al.: Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59 (2016) 5, pp. 671–681
- [4] Weidner, R.; Hoffmann, N.: Technische Unterstützungssysteme – Menschen gewollt (2020)
- [5] Hoffmann, N.; Ralfs, L.; Weidner, R.: Leitmerkmale und Vorgehen einer Implementierung von Exoskeletten. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 7–8, S. 525–528
- [6] Ralfs, L.; Hoffmann, N.; Weidner, R.: Approach of a Decision Support Matrix for the Implementation of Exoskeletons in Industrial Workplaces. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Raatz, A. (Hrsg.): *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics* 2021. Cham: Springer International Publishing 2022, S. 165–176
- [7] Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Adlon, T. et al.: Adaptivity and adaptability as design parameters of cognitive worker assistance for enabling agile assembly systems. *Procedia CIRP* 97 (2021), S. 224–229
- [8] Ott, O.; Ralfs, L.; Weidner, R.: Framework for qualifying exoskeletons as adaptive support technology. *Frontiers in Robotics and AI* 9 (2022)
- [9] Manna, S. K.; Dubey, V. N.: Comparative study of actuation systems for portable upper limb exoskeletons. *Medical engineering & physics* 60 (2018), pp. 1–13
- [10] Modar H.; Maxwell K.; Keisuke Y. et al.: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway, NJ: IEEE 2019
- [11] Anam, K.; Al-Jumaily, A. A.: Active Exoskeleton Control Systems: State of the Art. *Procedia Engineering* 41 (2012), S. 988–994
- [12] Sun, Y.; Tang, Y.; Zheng, J. et al.: From sensing to control of lower limb exoskeleton: a systematic review. *Annual Reviews in Control* 53 (2022), S. 83–96
- [13] Huebser, L.; Thamm, S.; Hellebrandt, T. et al.: Korrelationsbasierte Erkennung von Montagereihenfolgen mittels 6 DoF-Zeitreihendaten zur Prozessdiagrammerstellung. In: Leyendecker, B. (Hrsg.): *Qualitätsmanagement in den 20er Jahren – Trends und Perspektiven. Bericht zur GQW-Jahrestagung 2020 in Koblenz*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin 2021, S. 120–145
- [14] Schullerus, G.; Krebs, V.: Parameteridentifikation für ereignisdiskrete Systeme (Parameter Identification for Discrete Event Systems). *Parameter Identification for Discrete Event Systems. at – Automatisierungstechnik* 51 (2003) 1, S. 39–48
- [15] Czuchra, W.: UML in logistischen Prozessen. Graphische Sprache zur Modellierung der Systeme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010
- [16] Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.; Engstler, F. et al.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage*. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 9, S. 644–650
- [17] Quint, F.; Loch, F.; Orfgen, M. et al.: A System Architecture for Assistance in Manual Tasks. *The 12th International Conference on Intelligent Environments* (2016)
- [18] Balogh, R.; Obdržálek, D.: Using Finite State Machines in Introductory Robotics. In: Lepuschitz, W.; Merdan, M.; Koppensteiner, G. et al. (Hrsg.): *Robotics in Education*. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 85–91
- [19] Murray, S. A.; Ha, K. H.; Goldfarb, M.: An assistive controller for a lower-limb exoskeleton for rehabilitation after stroke, and preliminary assessment thereof. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference* 2014 (2014), pp. 4083–4086
- [20] Otten, B. M.; Weidner, R.; Argubi-Wollesen, A.: Evaluation of a Novel Active Exoskeleton for Tasks at or Above Head Level. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (2018) 3, S. 2408–2415



Oliver Ott, M. Sc. 

Foto: Autor

Katharina Schmerbeck, M. Sc.

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

Universität Innsbruck
Fakultät für Technische Wissenschaften
Institut für Mechatronik, Professur
für Fertigungstechnik
Innrain 52, 6020 Innsbruck/Österreich
Tel. +43 512 507 / 62805
oliver.ott@uibk.ac.at
www.uibk.ac.at/de/mechatronik/fertigungstechnik

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

Laboratorium Fertigungstechnik
Helmut-Schmidt Universität Hamburg

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)