

Schlussbericht der Deutschen Sporthochschule Köln für das Vorhaben



**Lernende roboterassistierte Systeme für das neuromuskuläre
Training - RoSylerNT**

Teilvorhaben: Entwicklung eines neuromuskuloskelettalen Modells als Basis für die
Interaktionsfähigkeiten autonomer Assistenzsysteme

Förderkennzeichen: 16SV7853
Laufzeit: 01.08.2016 - 31.07.2021

Korrespondierender Autor:

Fabian Göll
Deutsche Sporthochschule Köln
Am Sportpark Müngersdorf 6
50933 Köln

Gefördert vom:



Projektträger:



Projektkonsortium



Autoren

Fabian Göll¹

Wissenschaftlicher Mitarbeiter für das
Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaften

Bjoern Braunstein^{1,2,3,4}

Projektleitung für das
Institut für Biomechanik und Orthopädie

Kirsten Albracht^{1,5}

Projektleitung für das
Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaften

¹ Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaft, Deutsche Sporthochschule Köln

² Institut für Biomechanik und Orthopädie, Deutsche Sporthochschule Köln

³ Deutsches Forschungszentrum für Leistungssport, Deutsche Sporthochschule Köln

⁴ Zentrum für integrative Physiologie im Weltraum (ZiP), Deutsche Sporthochschule Köln

⁵ Fachbereich Medizintechnik und Technomathematik, FH Aachen

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Vorhabensvoraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2	Eingehende Darstellung	6
2.1	Ergebnisse	6
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	8
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	8
2.4	Nutzen und Verwertbarkeit	8
2.5	Fortschritt anderer	9
2.6	Veröffentlichungen	9

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die mit Alterung und Pflegenotstand verbundenen Folgen sind von höchster gesellschaftlicher Relevanz. Die damit zusammenhängenden Nachteile für einzelne Personen sowie die Gesellschaft als gesamtes können durch robotische Assistenzsysteme und effektives körperliches Training abgemildert werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden drei Robotersysteme aus den Bereichen des neuromuskulären Widerstandstraining, der Mobilitätsunterstützung und der Assistenz bei der Handhabung von Gegenständen deshalb dazu befähigt, aktiv und sicher mit Menschen zu interagieren (vgl. Abbildung 1). Durch die Mehrzahl an Robotern konnten die dazu notwendigen Fertigkeiten, Perzeption des Menschen, Sicheres Verhalten und eine lernende adaptive Regelung, evaluiert und ihre Übertragbarkeit nachgewiesen werden. Die Grundfertigkeiten basieren auf einer übertragbaren Wissensbasis, die hauptsächlich aus einem allgemeinen an den Benutzer und das Assistenzsystem anpassbaren Modell des Muskel-Skelett-Systems sowie einem Katalog möglicher Interaktionsszenarien besteht.

Die vorrangige Aufgabe dieses Teilvorhabens war die Spezifizierung und Umsetzung dieser integrativen übertragbaren Wissensbasis. Die zweite wesentliche Aufgabe bestand in der Evaluierung der Demonstratoren der drei Assistenzsysteme aus Anwendersicht.



Abbildung 1: Das Gesamtsystem basiert auf einer gemeinsamen übertragbaren Wissensbasis, die im Wesentlichen aus einem allgemeinen Modell des Muskel-Skelett-Systems und einem Katalog mit möglichen Interaktionsszenarien besteht. Das allgemeine Modell wird anhand von anthropometrischen Daten sowie den neuromuskulären Parametern skaliert. Bildnachweis: Die Koordinauten (KO).

1.2 Vorhabensvoraussetzungen

Bereits vor dem Beginn der Förderung wurde gemeinsam mit den Partnern KUKA Roboter GmbH, BEC GmbH und dem Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen Konzepte für ein neuromuskuläres robotergestütztes Training der unteren Extremität erarbeitet und evaluiert, und damit grundsätzlich die Machbarkeit des geplanten Vorhabens gezeigt (Kolditz, Albin et al., 2015; Kolditz, Albin, Albracht, Brüggemann & Abel, 2016; Kolditz, Albin, Brüggemann, Abel & Albracht, 2016; Kolditz, Albracht et al., 2015a, 2015b).

1.3 Planung und Ablauf

Aufbauend auf den Vorhabensvoraussetzungen wurden alle Ziele der einzelnen Arbeitspakete erreicht und ihre Bearbeitung orientierte sich eng am Zeitplan der Vorhabensbeschreibung. Auf Grundlage der in AP0 definierten Schnittstellen und Trainingsszenarien wurde die übertragbare parametrierbare und erweiterbare Wissensbasis konzipiert und umgesetzt, an die drei Assistenzsysteme angepasst und basierend auf Ergebnissen der Validierung angepasst (AP1). Für die kinematische und dynamische Erfassung des Menschen mit 3D Sensorik wurden gemeinsam mit den

Projektpartnern eine robuste und facettenreiche sensorische Erfassung des Menschen konzipiert und implementiert (AP2). Bei der Optimierung der Regelungsstrategien der Assistenzsysteme wurden die Projektpartner mit Expertenwissen und den erlangten Kenntnissen aus AP1 und AP2 unterstützt (AP3). Die Bewegungs- und Arbeitsräume der Systeme wurden analysiert und mögliche Gefährdungssituationen dokumentiert und berücksichtigt. Dem entsprechend wurden gemeinsam die Sicherheitsfunktionalitäten angepasst und integriert (AP4). Das Design und die Integration einer übergreifenden Benutzeroberfläche wurde aus trainingswissenschaftlicher und Anwendersicht unterstützt und deren Usability evaluiert (AP5). Gemeinsam mit dem Konsortialführer wurde eine geeignete Testumgebung für das stationäre System konzipiert, definiert und aufgebaut. Das stationäre System wurde fortlaufend in Tests und auf Grundlage der Validierung angepasst und die Grundfertigkeiten integriert (AP6). Für die Validierung, d.h. die experimentelle Untersuchung der Anwendung aller drei Systeme konnte trotz Schwierigkeiten durch die herrschende Corona Pandemie ein positives Ethikvotum erreicht werden und die Pilotstudie unter Einhaltung strenger Hygienemaßnahmen durchgeführt werden (AP7). Für die Untersuchung der ELS Issues wurden die Projektpartner in Workshops unterstützt (AP8).

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Zuge der Alterung kommt es in der gesamten Skelettmuskulatur zu degenerativen Prozessen (Akima et al., 2001; Lexell, Taylor & Sjöström, 1988), was neben dem Verlust der motorischen Leistungsfähigkeit und einem erhöhten Risiko degenerativer Erkrankungen auch zu verminderter Haltungskontrolle und somit zu einer erhöhten Sturzhäufigkeit und infolgedessen zum Verlust an Autonomie und Lebensqualität führt (Frontera, Hughes, Lutz & Evans, 1991; Lynch et al., 1999). Dem kann regelmäßiges neuromuskuläres Training entgegenwirken, die Bewegungen und Belastungen sollten dabei allerdings überwacht und kontrolliert werden.

Zur Abschätzung der Bewegungen und Belastungen mit nicht-invasiven Verfahren werden häufig Mehrkörpersimulationen von dreidimensionalen neuromuskuloskelettalen Modellen des Menschen genutzt (Delp et al., 2007; Pandy & Andriacchi, 2010). Dieses Verfahren bestehend aus inverser Kinematik und inverser Dynamik ist auch für Echtzeitberechnungen nutzbar (Pizzolato, Reggiani, Modenese & Lloyd, 2016). Dabei können die Modelle von einfacher Skalierung auf Körperhöhe bis hin zu Integration personenspezifischer Knochengometrien individualisiert werden (Delp et al., 2007; Gerus et al., 2013).

Die aktuell auf dem Markt erhältlichen Trainingsgeräte werden den besonderen Anforderungen der Überwachung des Trainings der Nutzer nicht gerecht. Bis Projektstart war kein Trainingssystem bekannt, das die Bewegung und die Belastung des Menschen in Echtzeit erfasst und zur Regelung des Trainings verwendet.

Innerhalb dieses Vorhabens wird beabsichtigt, diese Lücke durch Verwendung innovativer Sensor- und Signalverarbeitungstechnologien sowie eines innovativen Regelungskonzepts zu schließen. Durch die Verwendung einer gemeinsamen Wissensbasis auf Basis von neuromuskulären Modellen und deren Echtzeitsimulation ist es gelungen ein ganzheitliches Training zur Verbesserung der statischen und dynamischen Haltungskontrolle anzubieten.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern unter der Konsortialführung der BEC GmbH durchgeführt. Zudem wurden während der Projektlaufzeit die Möglichkeiten der Teilnahme an, durch das Begleitprojekt ARAIG, dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, organisierten Workshops zu Wissensaustausch und Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Interaktion, genutzt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]. Nähere Informationen zum stationären System sind auf www.robogym.de zu finden.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des Teilvorhabens waren in absteigender Reihenfolge die Personalkosten, Investitionen, Reisekosten und Sachkosten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Folgen einer alternden Bevölkerung haben höchste gesellschaftliche Relevanz, ebenso die Forschung, wie diese Folgen präventiv vermieden oder abgemildert werden können. Robotische Assistenzsysteme nehmen hierbei eine zentrale Rolle ein. Allerdings müssen diese Systeme auch bei direkter physischer Mensch-Roboter-Interaktion unter Austausch signifikanter Kräfte sicher sein.

Hierzu ist es notwendig, Robotersysteme zu entwickeln, die den Menschen in die Regelkreise integrieren. Eine Wissensbasis als Basis und Grundfertigkeiten der Sicherheit, Perzeption und adaptiv lernender Regelungen sind unabdingbare Eigenschaften und Komponenten solcher Assistenzsysteme.

Für diese komplexe Aufgabe sind viele unterschiedliche Expertisen notwendig, weshalb durch bereits bestehende und Knüpfung neuer Kontakte das Projektkonsortium gebildet wurde. Somit konnten die Anforderungen in den Bereichen der Robotik, Regelungs- und Automatisierungstechnik, Biomechanik und Sportwissenschaft, Design und Anwendungsinterfaces sowie ELS Issues abgedeckt werden.

Die Ergebnisse stellen einen wichtigen Schritt in Richtung intelligenter Assistenzsysteme für den Alltag dar und die wissenschaftlichen Ergebnisse werden der Öffentlichkeit in Form von Publikationen zugänglich gemacht.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Im Rahmen des Vorhabens konnten die beteiligten MitarbeiterInnen die bereits bestehende Expertise im Bereich der biomechanischen Analyse des menschlichen Bewegungsapparats und der Analyse der wirkenden Belastungen in Echtzeit als auch im Bereich der physikalischen Mensch-Roboter Interaktion weiter ausbauen.

Die größte wissenschaftlich-technische Herausforderung dieses Teilvorhabens lag in der Echtzeit-Extraktion der individuellen Informationen über den Status des Trainierenden, sowie der Festlegung von Regelstrategien zur Steigerung der Effektivität des Trainings und Minimierung des Risikos für Überbelastungen. Die Ergebnisse dieser wissenschaftlich-technischen Entwicklungen wurden in Teilen bereits veröffentlicht (Göll et al., 2019; Göll et al., 2018, 2020; Ketelhut, Brügge et al., 2020; Ketelhut et al., 2018; Ketelhut, Goll et al., 2019; Ketelhut, Kolditz et al., 2019; Ketelhut, Stogl et al., 2020) und werden weiter im Anschluss an das Vorhaben in Form von Publikationen in Fachzeitschriften sowie in Fachvorträgen an Konferenzen publiziert. Desweiteren kann die entwickelte Echtzeit-Erfassung von mechanischer Belastung auf den menschlichen Körper einen komplett neuen (Forschungs-) Zugang zu Training in Prävention und Rehabilitation eröffnen.

Der Demonstrator des stationären Systems, das RoboGym, welches bereits auf mehreren Veranstaltungen und Messen vorgestellt wurde (siehe Kap. 2.6), bietet die Möglichkeit, die neuartigen roboterbasierten Trainings- und Rehabilitationskonzepte, insbesondere den Menschen im Training mit einem Robotersystem ganzheitlich zu betrachten (Muskelaufbau und Muskelkoordination) und in den Regelkreis zu integrieren, zu vertiefen und im Rahmen wissenschaftlicher Projekte weiterzuentwickeln.

[REDACTED]

2.5 Fortschritt anderer

Während der Durchführung des Vorhabens wurden keine Fortschritte anderer Stellen auf diesem Gebiet bekannt, die für Planung und Durchführung relevant gewesen wären.

2.6 Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen

Konferenz- und Sammelbandbeiträge:

- ◇ Göll, F., Braunstein, B., Ketelhut, M., Abel, D. & Albracht, K., 2018. *Biofeedback for individualized neuromuscular training and rehabilitation based on musculoskeletal models*. in: BMT 2018 - 52nd Annual Conference of the German Society for Biomedical Engineering.
- ◇ Göll, F., Braunstein, B., Ketelhut, M., Abel, D. & Albracht, K., 2019. *Auf muskuloskeletalen Modellen basiertes Biofeedback für individualisiertes neuromuskuläres Training und Rehabilitation*. in: 4. Symposium der Deutschen Gesellschaft für Physiotherapiewissenschaft (DGPTW), 22. und 23.11.2019 in Hildesheim (Vortrag, Tagungsband).
- ◇ Göll, F., Braunstein, B., Ketelhut, M., Abel, D. & Albracht, K., 2020. *A musculoskeletal model for individualized neuromuscular training and rehabilitation on a robotic resistive exercise device*. in: TAR 2020, Technically Assisted Rehabilitation, Leipzig.
- ◇ Ketelhut, M., Stogl, D., Braunstein, B., Bender, N., Benfarah, O., Ben Slama, T., Gerlich, M., Göll, F., von Maltzan, S., Nagel, M., Safronov, K., Weiglein, C., Witt, S., Zimmermann, U., Abel, D., Hein, B. & Albracht, K., 2020. *Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten: Ergebnisse und Forschungsperspektiven des Förderprogramms ARA1*. Tausch, A., Adolph, L. & Jürgensohn, T. (Hrsg.). Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), S. 76-106 31 S.
- ◇ Albracht, K., Ketelhut, M., Göll, F., Braunstein, B., Abel, D. & 2021. *Training with an Industrial Robot: Current Directions to Personalize Neuromuscular Training*. in: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2021): Workshop on Ergonomic Human-Robot Collaboration: Applications and Future Research

Journal Artikel:

- ◇ Ketelhut, M., Göll, F., Braunstein, B., Albracht, K. and Abel, D., 2018. *Comparison of Different Training Algorithms for the Leg Extension Training with an Industrial Robot*. in: Current Directions in Biomedical Engineering 4(1):17-20

- ◇ Ketelhut, M., Göll, F., Braunstein, B., Albracht, K. and Abel, D., 2019. *Iterative Learning Control of an Industrial Robot for Neuromuscular Training*. in: 2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA).
- ◇ Ketelhut, M., Kolditz, M., Göll, F., Braunstein, B., Albracht, K. and Abel, D., 2019. *Admittance Control of an Industrial Robot during Resistance Training*. in: IFAC-PapersOnLine 52(19):223-228.
- ◇ Ketelhut, M., Brügge, G. M., Göll, F., Braunstein, B., Albracht, K. & Abel, D., 2020. *Adaptive Iterative Learning Control of an Industrial Robot during Neuromuscular Training*. in: IFAC-PapersOnLine 53(2):16468-16475.

Abschlussarbeiten:

- ◇ ██████████, 2019. *Einfluss der Rotationsstellung des Fußes auf das externe Adduktionsmoment im Kniegelenk bei neuromuskulärem Training der Beinstrecker in der geschlossenen Kette*. Bachelorarbeit, FH Aachen.
- ◇ ██████████, 2019. *Evaluation of a musculoskeletal model driven by joint parameter data of a Time-of-Flight camera in comparison with marker based motion tracking data for usage with a robotic rollator system*. Masterarbeit, FH Aachen.
- ◇ ██████████, 2020. *Regelung der Gamifizierung des Roboterassistierten Neuromuskulären Trainings.*, Masterarbeit, RWTH Aachen

Teilnahme an Messen und Ausstellungen

Automatica 2018, München

- ◇ [BEC AUF DER AUTOMATICA 2018 - MUNICH/GERMANY](#)

Zukunftskongress 2019, Bonn

- ◇ [DSHS HP: Roboterprojekt RoSylerNT auf dem BMBF-Zukunftskongress](#)
- ◇ [RWTH HP: RoSylerNT beim BMBF Zukunftskongress 2019](#)
- ◇ [Zukunftskongress 2019](#)

FIBO 2020, Köln

- ◇ [BEC GmbH präsentiert RoboGym auf der FIBO DIGITAL 2020](#)

GITEX 2021, Dubai UAE

- ◇ [BEC GmbH präsentiert RoboGym auf der GITEX 2021](#)

Rundfunk-, TV- und Videobeiträge

- ◇ [Interaktives Krafttraining mit dem Roboter: Interview im Deutschlandfunk mit Lukas Benedikt Kohlenbach und Prof. Dr. Kirsten Albracht, 21.06.2019](#)

- ◇ Medica TV: Trainingspartner Roboter – So sieht die Rehabilitation der Zukunft aus [D], 16.08.2019
- ◇ Medica TV: Training partner robot – This is the rehabilitation of the future [ENG], 16.08.2019
- ◇ Filmbeitrag in P.M. Wissen auf ServusTV (ab 29:53 min), 14.10.2021

Artikel in Populärwissenschaftlichen Magazinen

- ◇ Unsere Kraftpakete. Muskeln machen den Körper fit - und stärken dabei sogar Immunsystem, Knochen und Gehirn. von Jörn Auf dem Kampe in: GEO Magazin 04/2021, G+J Verlagsgruppe
- ◇ Unsere Kraftpakete. Muskeln machen den Körper fit - und stärken dabei sogar Immunsystem, Knochen und Gehirn. von Jörn Auf dem Kampe in: Milon Sonderdruck aus GEO Magazin 04/2021, G+J Verlagsgruppe, milon Industries GmbH
- ◇ Muskeln. Wie wir gesund bleiben, wenn wir die Kraftpakete fordern. von Jörn Auf dem Kampe in: P.M. Wissen 08/2021, G+J Verlagsgruppe

Presseberichte & Social Media

Manipulator

- ◇ Heller-Beschnitt, C., 2020. *Selbstversuch bei Kuka: Wie dieser Roboter bald im Alltag helfen könnte.*, Augsburger Allgemeine Zeitung
- ◇ Neuburg, J., 2020. *Finale Projektphase des Roboterprojekts*, Presseportal der Deutschen Sporthochschule Köln

Mobiles System

- ◇ Werth, M., 2020. *Rollator-Roboter im Praxis-Test.*, Presseportal der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Werth, M., 2020. *Rollator-Roboter: Begegnung mit der Zukunft*, Spoho.Blog der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Neuburg, J., Werth, M., 2020. *RoSylerNT - Finale Projektphase: Die intelligenten Trainingspartner der Zukunft im Praxistest.* in IMPULSE 02/2020, Das Wissenschaftsmagazin der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Werth, M., 2020. *Rosy lernt Helfen - Test eines neu entwickelten robotischen Assistenzsystems*, in Kurier 04/2020, Hochschulzeitung der Deutschen Sporthochschule Köln

Stationäres System

- ◇ Neuburg, J., 2018. *Ministerin für Kultur und Wissenschaft besucht die Sporthochschule.*, Presseportal der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Neuburg, J., Werth, M., 2019. *Lernende Roboter als Begleiter durch den Alltag.* in IMPULSE 01/2019, Das Wissenschaftsmagazin der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Theweleit D., 2019. *Revolution im Krafraum*, in Kurier 01/2019, Hochschulzeitung der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Theweleit D., 2019. *Lernende Roboter als Begleiter durch den Alltag*, in FORSCHUNG AKTUELL Nr. 2/2019, Newsletter der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ 03/2019. *Lernender Alltagsbegleiter.*, K-Zeitung, Branchenblatt der Kunststoffindustrie
- ◇ 06/2019. *Robotische Therapiegeräte im Robo-Gym der Zukunft.*, fitness Management
- ◇ Neuburg, J., 2019. *Mit „Rosy“ Gewichte stemmen.*, Presseportal der Deutschen Sporthochschule Köln
- ◇ Schuster, S., 2020. *RoboGym: revolutionary training – not just for top athletes.*, Presseportal KUKA AG
- ◇ Francis, S., 01/2021. *Kuka introduces robot that can be your personal trainer.*, Robotics & Automation News
- ◇ 01/2021. *RoboGym – Das Training für Spitzensportler.*, computer & automation
- ◇ 01/2021. *RoboGym – Revolutionary training not just for top athletes.*, robots-blog

Website Launch

- ◇ RoboGym Website für das stationäre System: <https://www.robogym.de/>

Geplante Veröffentlichungen

Es sind im Nachgang des Projekts Veröffentlichungen der ausgewerteten Ergebnisse der biomechanischen Untersuchungen aus den Validierungsstudien in renommierten Fachzeitschriften geplant.

Literatur

- Akima, H., Kano, Y., Enomoto, Y., Ishizu, M., Okada, M., Oishi, Y., ... Kuno, S. Y. (2001). Muscle function in 164 men and women aged 20-84 yr. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (2), 220–226. doi: 10.1097/00005768-200102000-00008
- Camomilla, V., Cereatti, A., Vannozzi, G. & Cappozzo, A. (2006). An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method. *Journal of Biomechanics*, 39 (6), 1096–1106. doi: 10.1016/j.jbiomech.2005.02.008
- Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., ... Thelen, D. G. (2007). OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54 (11), 1940–1950. doi: 10.1109/TBME.2007.901024
- Ehrig, R. M., Taylor, W. R., Duda, G. N. & Heller, M. O. (2006). A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints. *Journal of Biomechanics*, 39 (15), 2798–2809. doi: 10.1016/j.jbiomech.2005.10.002
- Frontera, W. R., Hughes, V. A., Lutz, K. J. & Evans, W. J. (1991). A cross-sectional study of muscle strength and mass in 45- to 78-yr-old men and women. *Journal of Applied Physiology*, 71 (2), 644–650. doi: 10.1152/jappl.1991.71.2.644
- Gerus, P., Sartori, M., Besier, T. F., Fregly, B. J., Delp, S. L., Banks, S. A., ... Lloyd, D. G. (2013). Subject-specific knee joint geometry improves predictions of medial tibiofemoral contact forces. *Journal of Biomechanics*, 46 (16), 2778–2786. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.09.005
- Göll, F., Braunstein, B., Ketelhut, M., Abel, D. & Albracht, K. (2019, 22.). Auf muskuloskeletalen Modellen basiertes Biofeedback für individualisiertes neuro-muskuläres Training und Rehabilitation. In *4. forschungssymposium physiotherapie* (S. 32–33). Deutsche Gesellschaft für Physiotherapiewissenschaft (DGPTW). (Forschungssymposium Physiotherapie : empirische Forschung und Theorieentwicklung verbinden, FSPT 2019 ; Conference date: 22-11-2019 Through 23-11-2019)
- Göll, F., Braunstein, B., Maike, K., Abel, D. & Albracht, K. (2018). Biofeedback for individualized neuromuscular training and rehabilitation based on musculoskeletal models. *Biomedical Engineering - Biomedizinische Technik*, 63 (S1), S15.
- Göll, F., Braunstein, B., Maike, K., Abel, D. & Albracht, K. (2020). A Musculoskeletal Model For Individualized Neuromuscular Training And Rehabilitation On A Robotic Resistive Exercise Device. *European Conference of Technically Assisted Rehabilitation (TAR) - Leipzig*.
- Hefßling, H. (2019). *Evaluation of a musculoskeletal model driven by joint parameter data of a time-of-flight camera in comparison with marker based motion tracking data for usage with a robotic rollator system*. FH Aachen.
- Ketelhut, M., Brügge, G., Göll, F., Braunstein, B., Albracht, K. & Abel, D. (2020). Adaptive iterative learning control of an industrial robot during neuromuscular training. *IFAC-PapersOnLine*, 53 (2), 16468–16475. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.741
- Ketelhut, M., Goell, F., Braunstein, B., Albracht, K. & Abel, D. (2018). Comparison of Different Training Algorithms for the Leg Extension Training with an Industrial Robot: Current Directions in Biomedical Engineering. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 4 (1), 17–20. doi: 10.1515/cdbme-2018-0005
- Ketelhut, M., Goll, F., Braunstein, B., Albracht, K. & Abel, D. (2019). Iterative Learning Control of an Industrial Robot for Neuromuscular Training. In *Ccta 2019 - 3rd ieee conference on control technology and applications* (S. 926–932). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/CCTA.2019.8920659
- Ketelhut, M., Kolditz, M., Göll, F., Braunstein, B., Albracht, K. & Abel, D. (2019). Admittance control of an industrial robot during resistance training. In (Bd. 52, S. 223–228). Elsevier BV. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.102
- Ketelhut, M., Stogl, D., Braunstein, B., Bender, N., Benfarah, O., Ben Slama, T., ... Albracht,

- K. (2020). Rosylernt – lernende roboterassistierte systeme für das neuromuskuläre training. In A. Tausch, L. Adolph & T. Jürgensohn (Hrsg.), *Autonome roboter für assistenzfunktionen: Interaktive grundfertigkeiten* (S. 76–106). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). doi: 10.21934/baua:bericht20200917
- Kolditz, M., Albin, T., Abel, D., Fasse, A., Brüggemann, G.-P. & Albracht, K. (2015). Simulative analysis of joint loading during leg press exercise for control applications. *IFAC-PapersOnLine*, 28 (20). doi: 10.1016/j.ifacol.2015.10.179
- Kolditz, M., Albin, T., Albracht, K., Brüggemann, G.-P. & Abel, D. (2016). Isokinematic leg extension training with an industrial robot. In *Proceedings of the ieee ras and embs international conference on biomedical robotics and biomechatronics* (Bd. 2016-July). doi: 10.1109/BIOROB.2016.7523750
- Kolditz, M., Albin, T., Brüggemann, G.-P., Abel, D. & Albracht, K. (2016). Robotergestütztes system für ein verbessertes neuromuskuläres aufbautraining der beinstrecker. *at - Automatisierungstechnik*, 64 (11), 905–914. doi: 10.1515/auto-2016-0044
- Kolditz, M., Albracht, K., Fasse, A., Albin, A., Brüggemann, G.-P. & Abel, D. (2015a). Concept of a robotic training system to enhance safety of knee joint structures during rehabilitative strength training. In *Bmt jahrestagung der deutschen gesellschaft für biomedizinische technik (dgbmt)*.
- Kolditz, M., Albracht, K., Fasse, A., Albin, A., Brüggemann, G.-P. & Abel, D. (2015b). Evaluation of an industrial robot as a leg press training device. In *Xv international symposium on computer simulation in biomechanics (isb), edinburgh, uk*.
- Lexell, J., Taylor, C. C. & Sjöström, M. (1988). What is the cause of the ageing atrophy?. Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. *Journal of the Neurological Sciences*, 84 (2-3), 275–294. doi: 10.1016/0022-510X(88)90132-3
- Lynch, N. A., Metter, E. J., Lindle, R. S., Fozard, J. L., Tobin, J. D., Roy, T. A., ... Hurley, B. F. (1999). Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. *Journal of Applied Physiology*, 86 (1), 188–194. doi: 10.1152/jappl.1999.86.1.188
- Pandy, M. G. & Andriacchi, T. P. (2010). *Muscle and joint function in human locomotion* (Bd. 12). doi: 10.1146/annurev-bioeng-070909-105259
- Pizzolato, C., Reggiani, M., Modenese, L. & Lloyd, D. G. (2016). Real-time inverse kinematics and inverse dynamics for lower limb applications using OpenSim. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20 (4), 436–445. doi: 10.1080/10255842.2016.1240789