



Paula Kennel, Exo-Session, 24.09.2025

Evaluation von Rücken-Exoskeletten durch Kombination einer Langzeituntersuchung mit digitaler Menschmodellierung

Agenda

Vortrag – Planung einer Langzeitstudie mit Rücken-Exoskeletten

1. Exoskelett-Forschung am Fraunhofer IPA und der Universität Stuttgart
2. Wissenstand zur Wirkung von Exoskeletten auf das muskuloskelettale System
3. Planung einer Langzeitstudie
 1. Studiendesign
 2. Methodenauswahl
4. Diskussion und Ausblick



1. Exoskelett-Forschung am Fraunhofer IPA und der Universität Stuttgart



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA



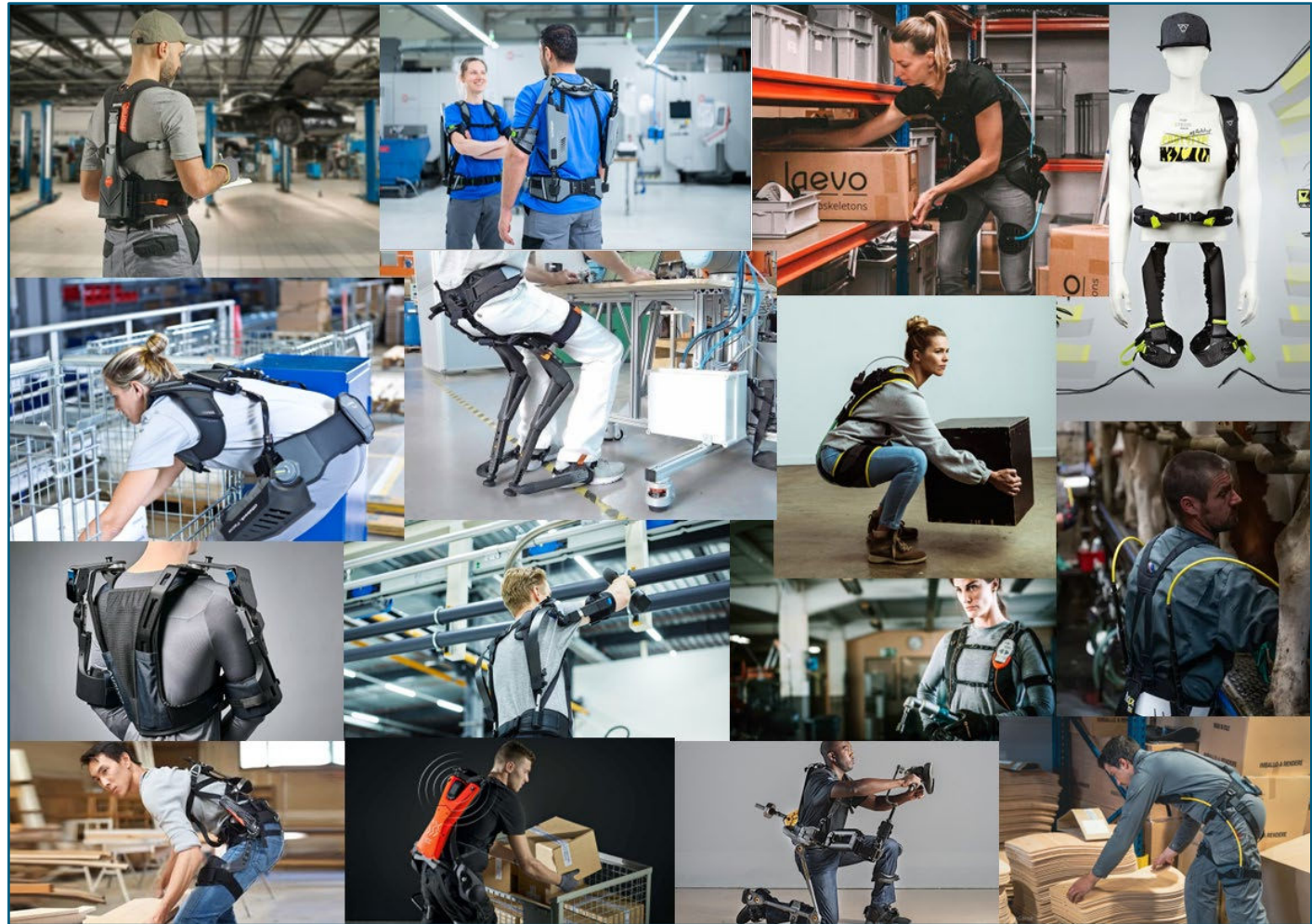
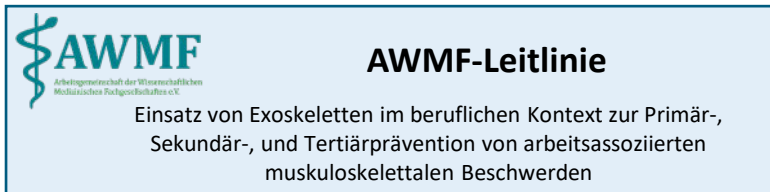
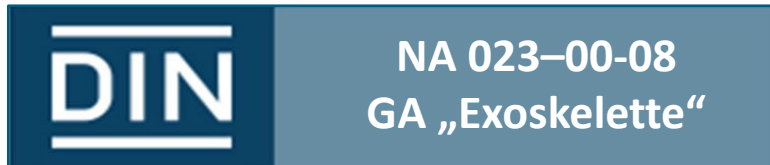
University of Stuttgart
Institute of Industrial Manufacturing
and Management IFF



University of Stuttgart
Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering - GSaME

1. Exoskelett-Forschung und Entwicklung am Fraunhofer IPA

Fraunhofer IPA – Deutschlands größte Forschungseinrichtung im Bereich Exoskelette





1. Exoskelett-Forschung am Fraunhofer IPA

Exoworkathlon



Ergebnisse:



✓ Signifikante Reduzierung der subjektiven Belastung



✓ Signifikante Verbesserung der Schweißnaht-Qualität



✓ Signifikante Reduktion der metabolischen Belastung beim Schweißen



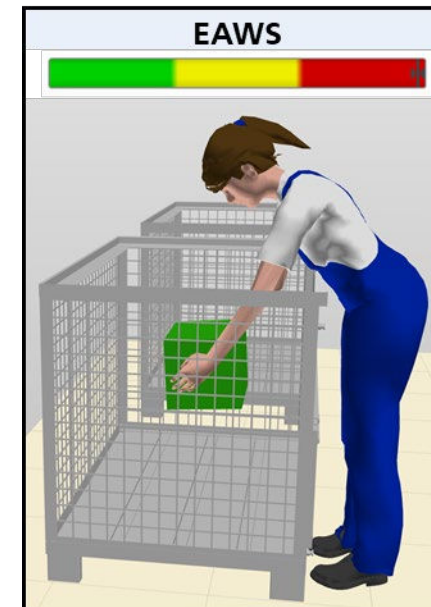
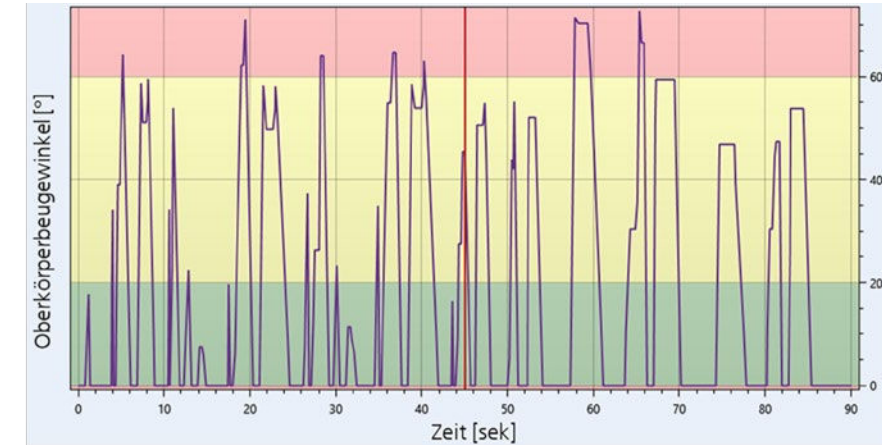
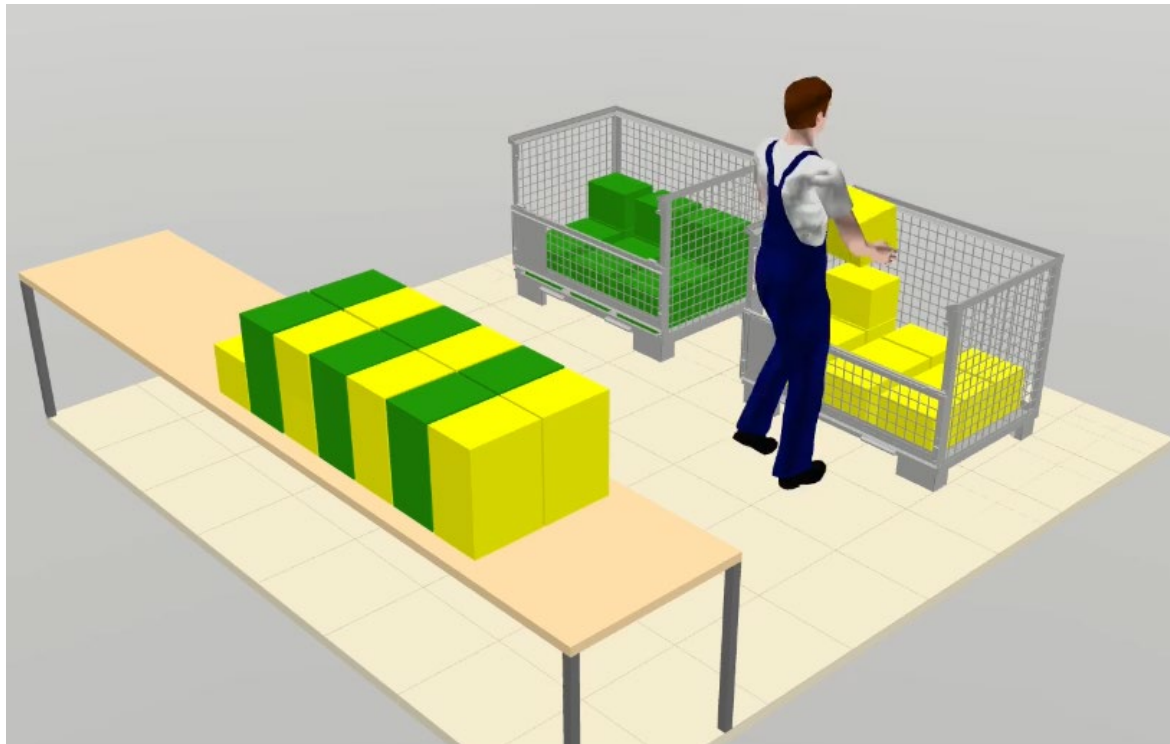
✓ Signifikante Verringerung der Muskelaktivität in den entsprechenden Muskeln

Kopp, V., Holl, M., Schalk, M., Daub, U., Bances, E., García, B., Schalk, I., Siegert, J. & Schneider, U. (2022). Exoworkathlon: A prospective study approach for the evaluation of industrial exoskeletons.



1. Exoskelett-Forschung am Fraunhofer IPA

Digitale Ergonomie-Bewertung mit emdWD



Tröster, M., Holl, M., Rack, R., Daub, U., Schneider, U., Bauernhansl, T. & Müller, G. (2024). Digitale Arbeitsmodelle und Methoden/Digital work models and methods – Transparency for the use of occupational exoskeletons as an ergonomic measure.

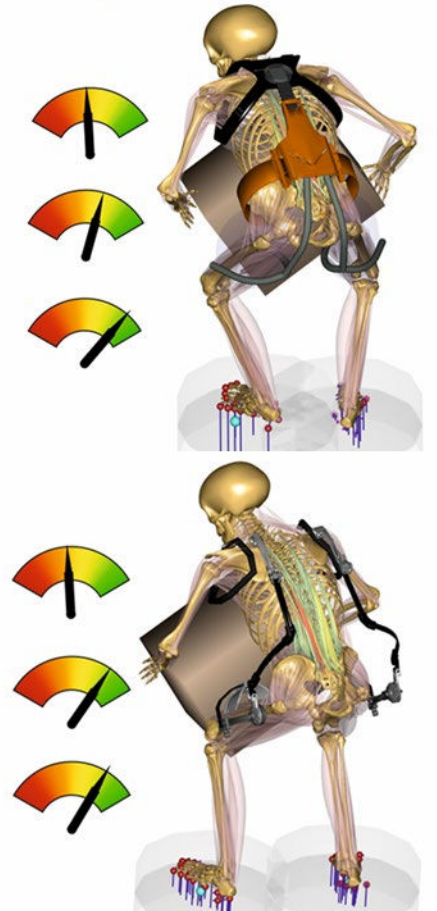


1. Exoskelett-Forschung am Fraunhofer IPA

Biomechanische Menschmodellierung mit AnyBody

Biomechanical Body Heat Map

All workers - mean values			5 kg			10 kg			15 kg			Thresholds
Region	Parameter	Side	without exoskeleton	Exo 1	Exo 2	without exoskeleton	Exo 1	Exo 2	without exoskeleton	Exo 1	Exo 2	
L4L5	compression force [N]		3796 ± 830	3221 ± 751	3438 ± 1054	4241 ± 661	3577 ± 783	3837 ± 892	4724 ± 686	3854 ± 926	4420 ± 1125	[2000, 3000, 4000]
	shear force [N]		858 ± 187	719 ± 169	728 ± 205	971 ± 150	805 ± 173	814 ± 174	1079 ± 157	875 ± 207	966 ± 221	[500, 750, 1000]
Hip joint	normalized resultant force [% BW]	left	461 ± 118	444 ± 83	492 ± 131	377 ± 24	358 ± 41	406 ± 58	332 ± 72	357 ± 86	318 ± 65	[180, 271, 361]
		right	185 ± 49	191 ± 63	160 ± 71	282 ± 70	279 ± 53	238 ± 54	411 ± 100	379 ± 48	434 ± 32	[180, 271, 361]
		mean	323 ± 42	318 ± 29	326 ± 32	330 ± 35	318 ± 43	322 ± 21	372 ± 46	368 ± 60	376 ± 19	[180, 271, 361]
Back	muscle activity [%]		25 ± 9	18 ± 6	23 ± 9	29 ± 11	21 ± 6	27 ± 11	32 ± 13	22 ± 6	30 ± 11	[30, 60, 80]
Abdomen	muscle activity [%]		3 ± 1	3 ± 2	4 ± 2	3 ± 1	3 ± 2	3 ± 1	3 ± 2	3 ± 1	5 ± 2	[30, 60, 80]
Trunk	extensor muscle activity [%]		38 ± 14	28 ± 8	35 ± 14	43 ± 17	31 ± 9	40 ± 16	48 ± 19	33 ± 8	45 ± 16	[30, 60, 80]
	flexor muscle activity [%]		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	[30, 60, 80]
	rotator muscle activity [%]		3 ± 1	5 ± 4	6 ± 3	4 ± 1	4 ± 3	4 ± 1	4 ± 2	5 ± 2	8 ± 4	[30, 60, 80]
Hip	flexor muscle activity [%]	left	1 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	1 ± 1	0 ± 0	1 ± 1	[30, 60, 80]
		right	2 ± 1	2 ± 2	1 ± 1	0 ± 0	1 ± 1	0 ± 0	0 ± 0	1 ± 1	0 ± 0	[30, 60, 80]
		mean	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1	0 ± 0	1 ± 1	0 ± 0	1 ± 0	0 ± 0	1 ± 0	[30, 60, 80]
	extensor muscle activity [%]	left	17 ± 9	17 ± 10	19 ± 10	12 ± 5	11 ± 6	13 ± 5	9 ± 3	9 ± 4	8 ± 3	[30, 60, 80]
		right	4 ± 2	4 ± 2	3 ± 2	9 ± 7	8 ± 4	7 ± 4	14 ± 11	13 ± 7	15 ± 8	[30, 60, 80]
		mean	11 ± 6	11 ± 6	11 ± 5	10 ± 5	10 ± 5	10 ± 4	11 ± 6	11 ± 5	12 ± 5	[30, 60, 80]
Hip joint	flexion moment exo on [Nm]	right	70 ± 13	61 ± 22	58 ± 26	125 ± 16	123 ± 19	107 ± 24	184 ± 42	170 ± 38	189 ± 59	
		left	202 ± 86	194 ± 68	205 ± 93	176 ± 53	161 ± 37	181 ± 63	148 ± 38	143 ± 22	131 ± 27	
		mean	136 ± 49	127 ± 45	131 ± 59	150 ± 34	142 ± 28	144 ± 43	166 ± 40	156 ± 30	160 ± 43	



2. Wissenstand zur Wirkung von Exoskeletten auf das muskuloskelettale System



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA



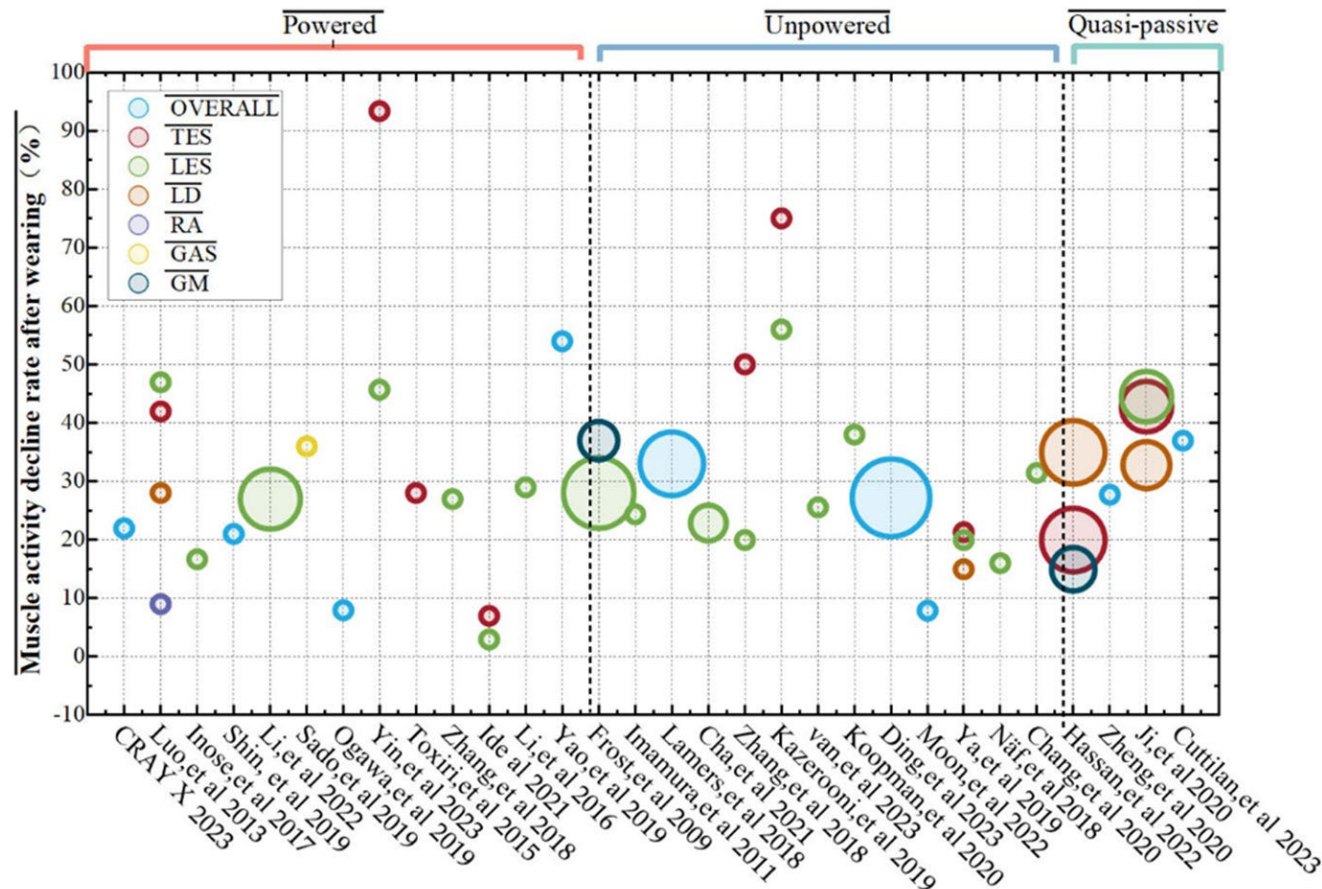
University of Stuttgart
Institute of Industrial Manufacturing
and Management IFF



University of Stuttgart
Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering - GSaME

2. Wissenstand zur Wirkung von Exoskeletten auf das muskuloskelettale System

Wirkung von Rücken-Exoskeletten – EMG



Ergebnisse:

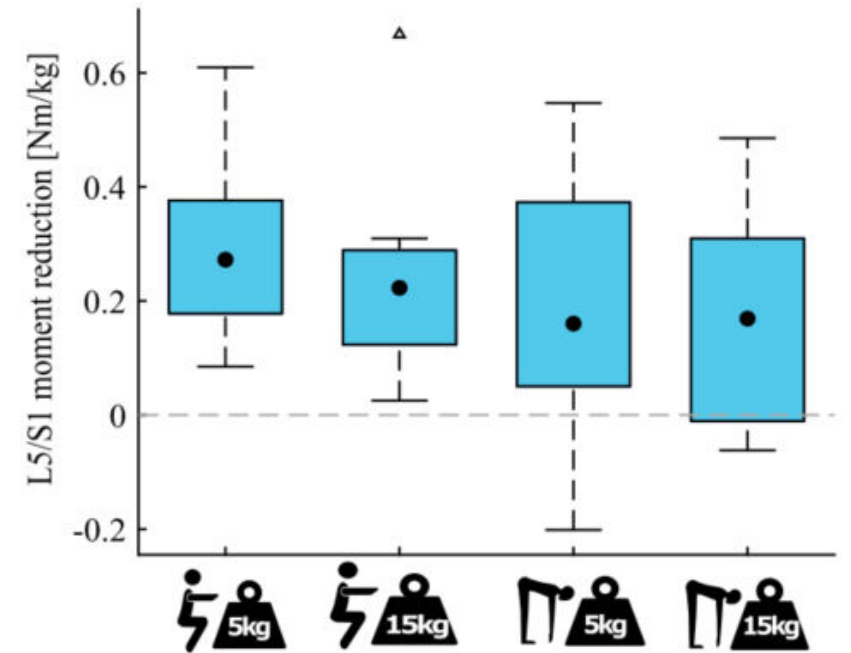
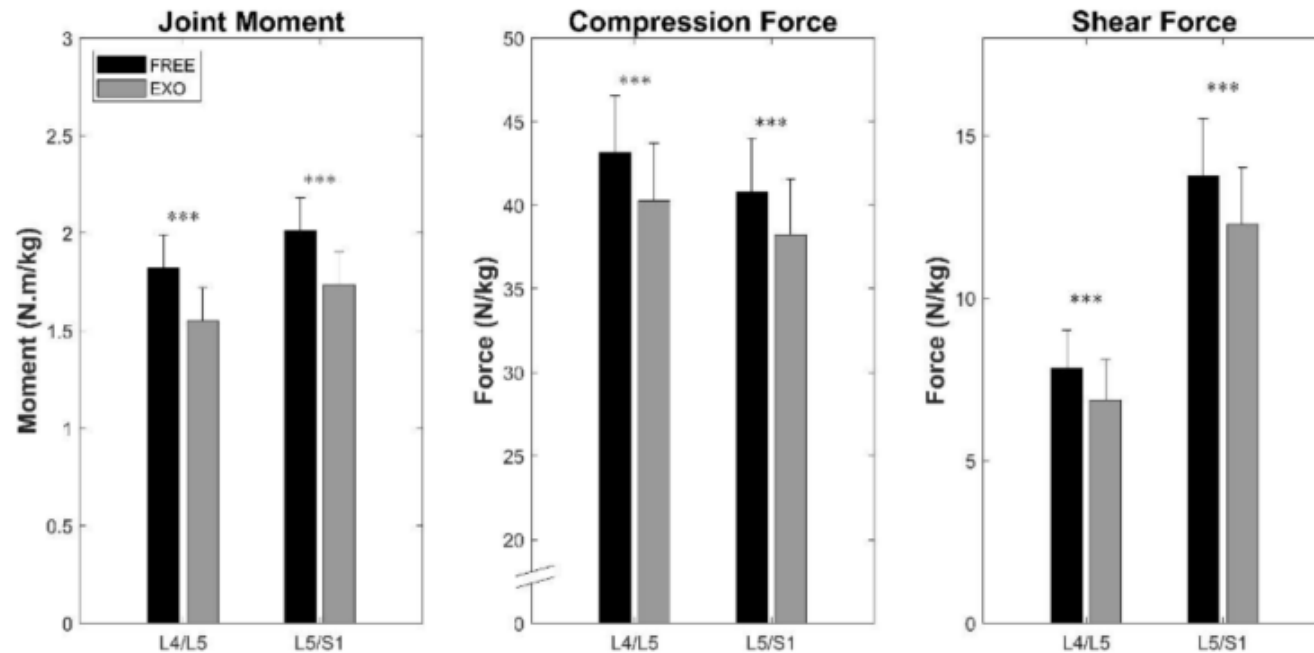
- Durchgängige Reduktion der betrachteten Muskulatur durch Rücken-Exoskelette
- Bereiche um ca. 30 %
- Starke Unterschiede zwischen den Untersuchungen

Kermavnar, T., Vries, A. W. de, Looze, M. P. de & O'Sullivan, L. W. (2021). Effects of industrial back-support exoskeletons on body loading and user experience: an updated systematic review.

Qu, Y., Wang, X., Tang, X., Liu, X., Hao, Y., Zhang, X., Liu, H. & Cheng, X. (2025). A Review of Wearable Back-Support Exoskeletons for Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders.

2. Wissenstand

Wirkung von Rücken-Exoskeletten – Kinetik unterer Rücken



Ergebnisse:

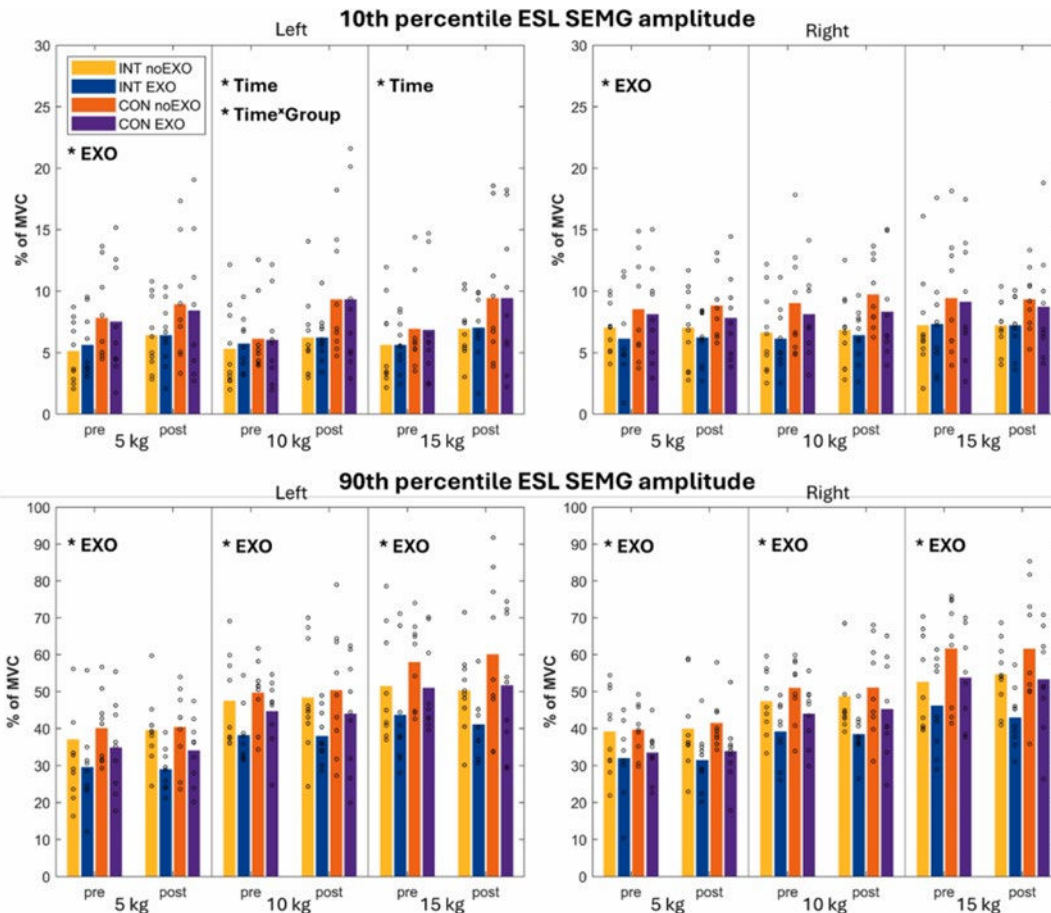
- Reduktion der Drehmomente und Kräfte in den untersuchten Bereichen der Wirbelsäule

Favennec, A., Moissenet, F., Frère, J. & Mornieux, G. (2024). Effects of a soft back exoskeleton on lower lumbar spine loads during manual materials handling: a musculoskeletal modelling study.

Moya-Esteban, A., Durandau, G., van der Kooij, H. & Sartori, M. (2023). Real-time lumbosacral joint loading estimation in exoskeleton-assisted lifting conditions via electromyography-driven musculoskeletal models.

2. Wissenstand

Langfristige Auswirkung von Rücken-Exoskeletten



Ergebnisse:

- Durchgehend signifikante Reduktion der Aktivität der Rücken-Muskulatur vor und nach 24 Wochen Exoskelett-Nutzung
- **Keine verstärkte Reduktion** nach 24 Wochen
- Erhöhte Nutzung von Exoskeletten nach 24 Wochen (3 Probanden stoppten Nutzung)

Schrøder Jakobsen, L., Samani, A., Desbrosses, K., Zee, M. de, Steinhilber, B. & Madeleine, P. (2025). Effects of 24-weeks in-field use of a back-supporting exoskeleton on biomechanics, work intensity and musculoskeletal discomfort: A randomized controlled trial among logistic workers.

3. Planung einer Langzeitstudie



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA



University of Stuttgart
Institute of Industrial Manufacturing
and Management IFF



University of Stuttgart
Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering - GSaME

3. Forschungsfrage

Zusammenhang Exoskelette und muskuloskelettale Beschwerden

Welche Auswirkungen hat das regelmäßige Tragen von Rücken-Exosketten bei rückenbeanspruchenden Tätigkeiten auf das muskuloskelettale System?

Biomechanische Ebene: Kinematik und Kinetik des Rumpfes

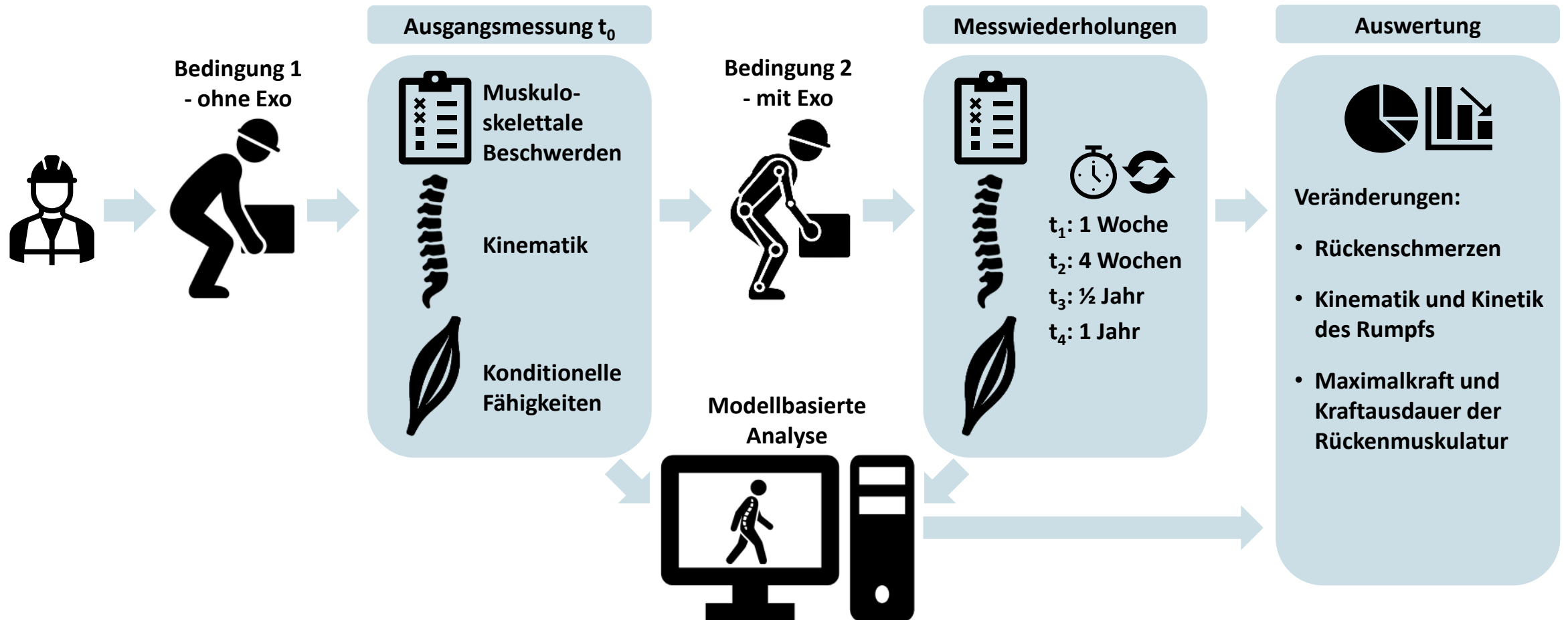
Funktionale Ebene: Konditionelle Fähigkeiten (Maximalkraft und Kraftausdauer) der Rückenmuskulatur

Klinische Ebene: Häufigkeit des Auftretens und Schweregrad von Rückenschmerzen



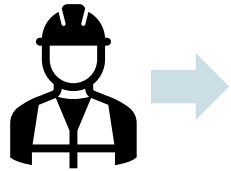
3. Zielstellung

Langzeitstudie zur Auswirkung von Rücken-Exoskeletten auf das muskuloskelettale System



3. Methodik

Teilnehmende



Studienpopulation und Rahmenbedingungen

Einschlusskriterien:

- Arbeiter*innen > 1 Jahr in aktueller Tätigkeit
- Ohne Exoskelett-Erfahrung
- Anthropometrische Maße innerhalb der Herstellerangaben des Exoskeletts
- Keine diagnostizierten muskuloskelettalen Erkrankungen (ausgenommen sind Beschwerden wie vorübergehende Rückenschmerzen ohne ärztliche Diagnose)

Rekrutierung:

- Über Arbeitgeber als Kooperationspartner
- 25 Probanden in rückenbeanspruchender Tätigkeit



Hopewell, S., Chan, A.-W., Collins, G. S., Hróbjartsson, A., . . . Boutron, I. (2025a). CONSORT 2025 explanation and elaboration: updated guideline for reporting randomised trials.

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A. & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: tests for correlation and regression analyses.



3. Literatur-Exkurs

Standards für klinische Untersuchungen



Core outcome measurement instruments for clinical trials in nonspecific low back pain.

Core outcome domain	Instrument	Free of charge?	Availability
Physical functioning	Oswestry Disability Index version 2.1a (ODI 2.1a)	Yes for not funded academic users; no for funded academic and commercial users	https://eprovide.mapi-trust.org/instruments/oswestry-disability-index
	24-item Roland Morris Disability Questionnaire (RMDQ-24)	Yes	http://www.rmdq.org/download.htm
Pain intensity	Numeric Rating Scale (NRS)*	Yes	Appendix 1
Health-related quality of life	Short Form Health Survey 12 (SF12)	No, costs are established on a per study basis	https://campaign.optum.com/optum-outcomes/what-we-do/health-surveys/sf-12v2-health-survey.html
	10-item PROMIS Global Health (PROMIS-GH-10)	Yes	http://www.healthmeasures.net/administrator/components/com_instruments/uploads/Global%20Health%20Scale%20v1.2%2008.22.2016.pdf
No. of deaths	A simple statement on the number of deaths occurring in the trial	Yes	

* A consensus was achieved on a Numeric Rating Scale version that refers to average low back pain intensity over the past week in the introductory statement, as presented in Appendix 1, available online as supplemental digital content at <http://links.lww.com/PAIN/A511>.

Chiarotto, A., Boers, M., Deyo, R. A., Buchbinder, R., Corbin, T. P., Costa, L. O. P., Foster, N. E., Grotle, M., Koes, B. W., Kovacs, F. M., Lin, C.-W. C., Maher, C. G., Pearson, A. M., Peul, W. C., Schoene, M. L., Turk, D. C., van Tulder, M. W., Terwee, C. B. & Ostelo, R. W. (2018). Core outcome measurement instruments for clinical trials in nonspecific low back pain.

3. Methodik

Datenerfassung – Fragebogen zu muskuloskelettalen Beschwerden



RMDQ-24

1. Wegen meiner Rückenschmerzen bleibe ich den größten Teil des Tages zu Hause.
2. Ich wechsele häufig meine Körperhaltung, um meinen Rücken zu entlasten.
3. Ich gehe wegen meiner Rückenschmerzen langsamer als sonst.
4. Wegen meiner Rückenschmerzen erledige ich keine der Arbeiten, die ich sonst im Haushalt erledige.
5. Wegen meiner Rückenschmerzen halte ich mich beim Treppensteigen am Geländer fest.
6. Wegen meiner Rückenschmerzen lege ich mich häufiger als sonst zum Ausruhen hin.
7. Wegen meiner Rückenschmerzen muss ich mich an etwas abstützen, um aus einem Polstersessel hochzukommen.
8. Wegen meiner Rückenschmerzen bitte ich andere Menschen, etwas für mich zu erledigen.
9. Wegen meiner Rückenschmerzen brauche ich zum Ankleiden länger als sonst.
10. Wegen meiner Rückenschmerzen achte ich darauf, nur kurze Zeit zu stehen.
11. Wegen meiner Rückenschmerzen achte ich darauf, mich so wenig wie möglich zu bücken oder niederzuknien.
12. Wegen meiner Rückenschmerzen fällt es mir schwer, von einem Stuhl aufzustehen.

NRS

How would you rate your average low back pain intensity over the last week?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

No pain

Worst imaginable pain

PROMIS-GH-10

	Excellent	Very good	Good	Fair	Poor
In general, would you say your health is:	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
In general, would you say your quality of life is:	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
In general, how would you rate your physical health?	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1

Weitere Fragen - IPAQ

1) An wie vielen der **vergangenen 7 Tage** haben Sie **anstrengende** körperliche Aktivitäten wie schweres Heben, Graben, Aerobic, schnelles Fahrradfahren verrichtet.

1

☐

Tage pro Woche

☐

Keine anstrengenden körperlichen Aktivitäten

→ Springen Sie weiter zu Frage 3

Roland, M. & Morris, R. (1983). A Study of the Natural History of Back Pain: Part I: Development of a Reliable and Sensitive Measure of Disability in Low-Back Pain.

Downie, W., Leatham, P., Rhind, V., Wright, V., Branco, J. & Anderson, J. (1978). Studies with pain rating scales.

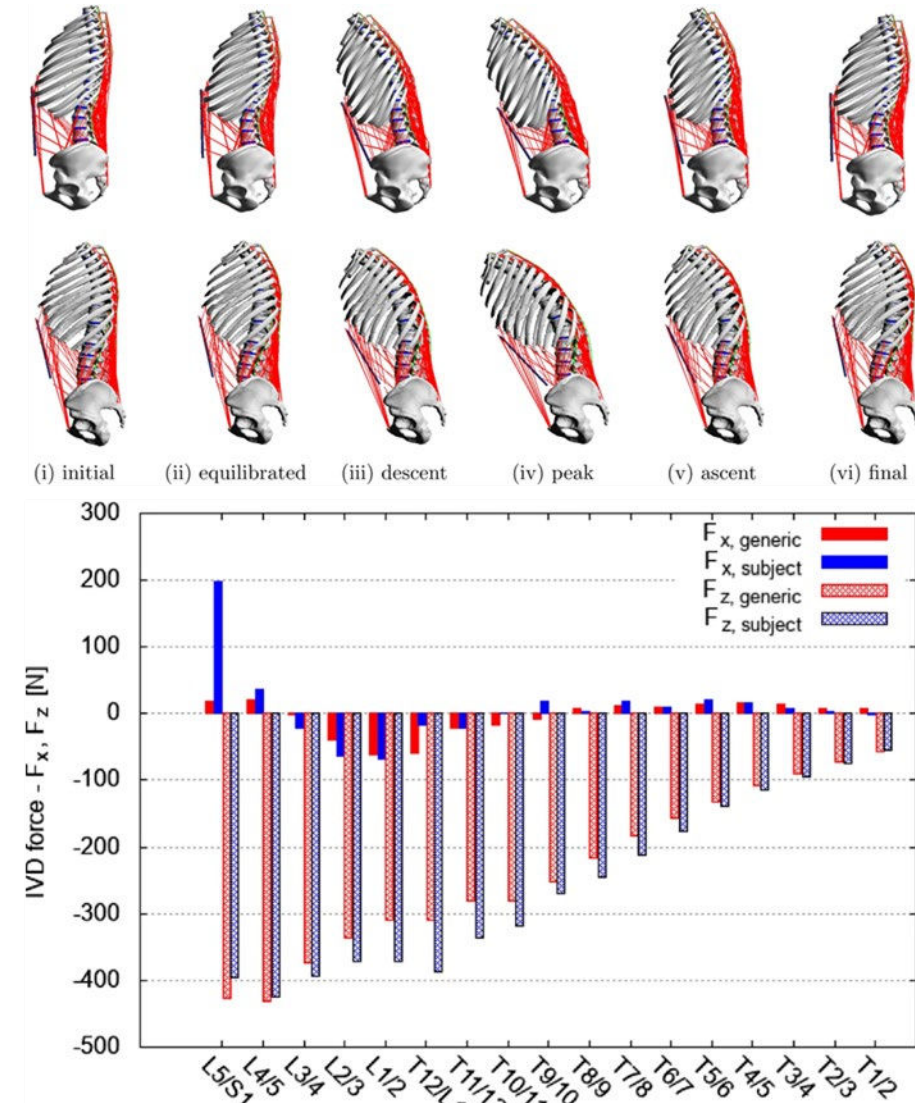
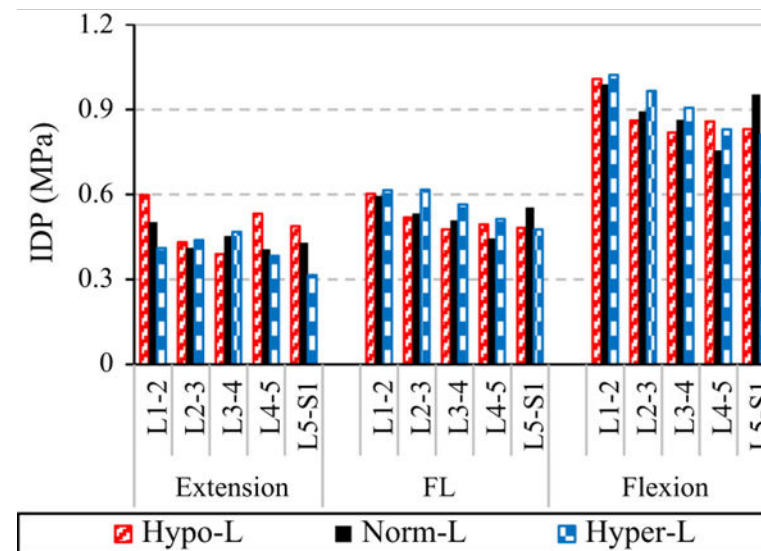
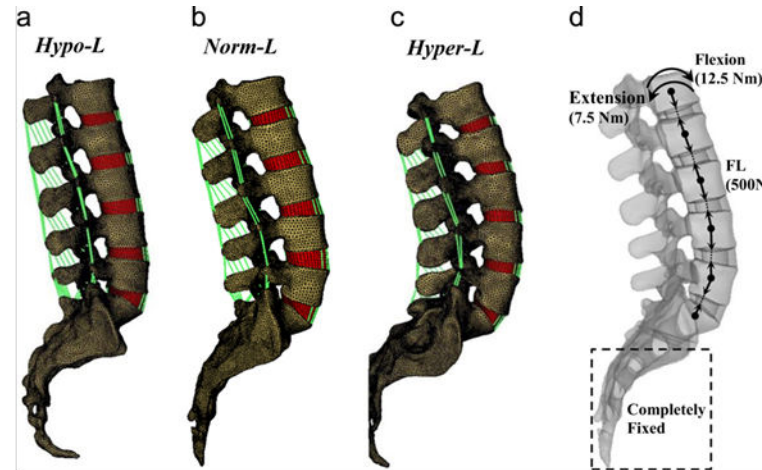
HealthMeasures. PROMIS Scale v1.2 - Global Health.

Sjostrom, M., Ainsworth, B. E., Bauman, A., Bull, F. C., Hamilton-Craig, C. R. & Sallis, J. F. (2005). Guidelines for data processing analysis of the International Physical Activity Questionnaire (IPAQ) - Short and long forms.



3. Literatur-Exkurs

Personalisierte Modellierung



Meszaros-Beller, L., Hammer, M., Riede, J. M., Pivonka, P., Little, J. P. & Schmitt, S. (2023). Effects of geometric individualisation of a human spine model on load sharing: neuro-musculoskeletal simulation reveals significant differences in ligament and muscle contribution

Naserkhaki, S., Jaremko, J. L. & El-Rich, M. (2016). Effects of inter-individual lumbar spine geometry variation on load-sharing: Geometrically personalized Finite Element study



3. Methodik

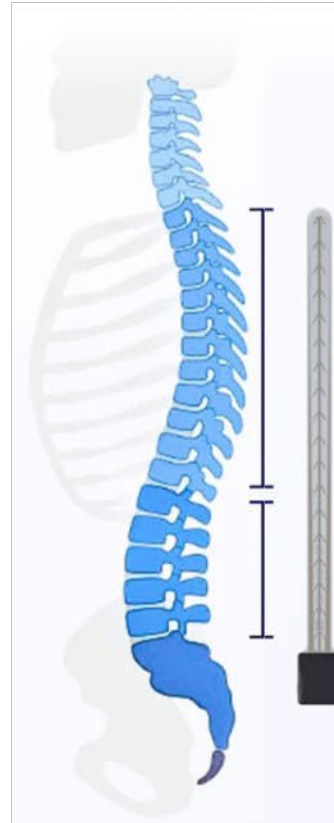
Datenerfassung – Kinematik



Marker-Tracking



MinkTec – rectify



IDAG – M360



DIERS – formetric 4D

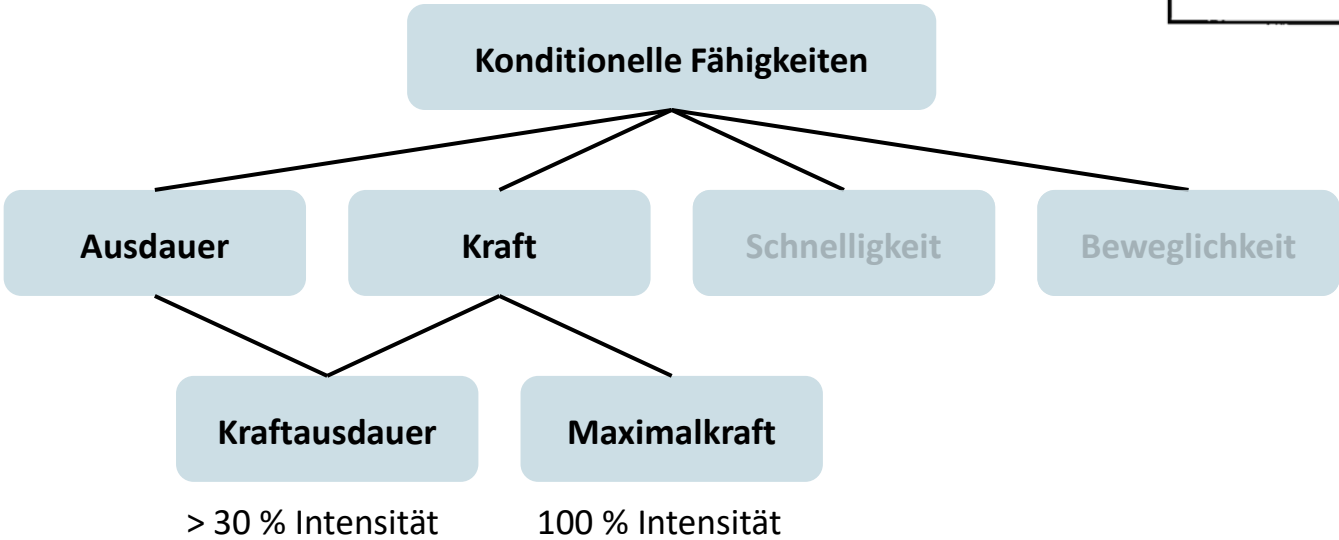


- Koch, D., Nüesch, C., Ignasiak, D., Schären, S., Ferguson, S. J., Mündermann, A., & Netzer, C. (2025). Age and activity but not lumbar spinal stenosis and muscle fatigue affect sagittal spinal alignment: A pilot study.
- Degenhardt, B. F., Starks, Z. & Bhatia, S. (2020). Reliability of the DIERS Formetric 4D Spine Shape Parameters in Adults without Postural Deformities
- Haghi, M., Ershadi, A. & Deserno, T. M. (2023). Recognizing Human Activity of Daily Living Using a Flexible Wearable for 3D Spine Pose Tracking



3. Literatur-Exkurs

Konditionelle Fähigkeiten



Weight Lifted

PREDICTED 1-RM = 1.0278 - .0278X

where X = the number of reps performed

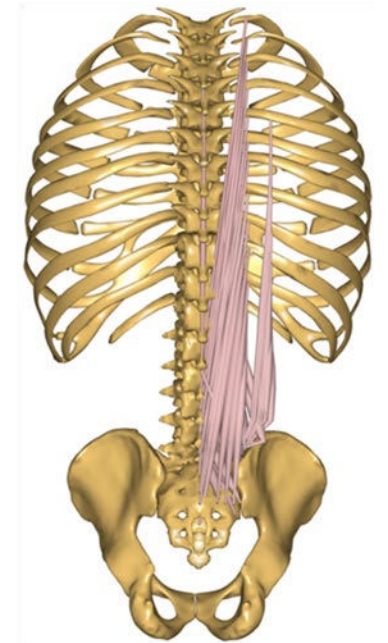
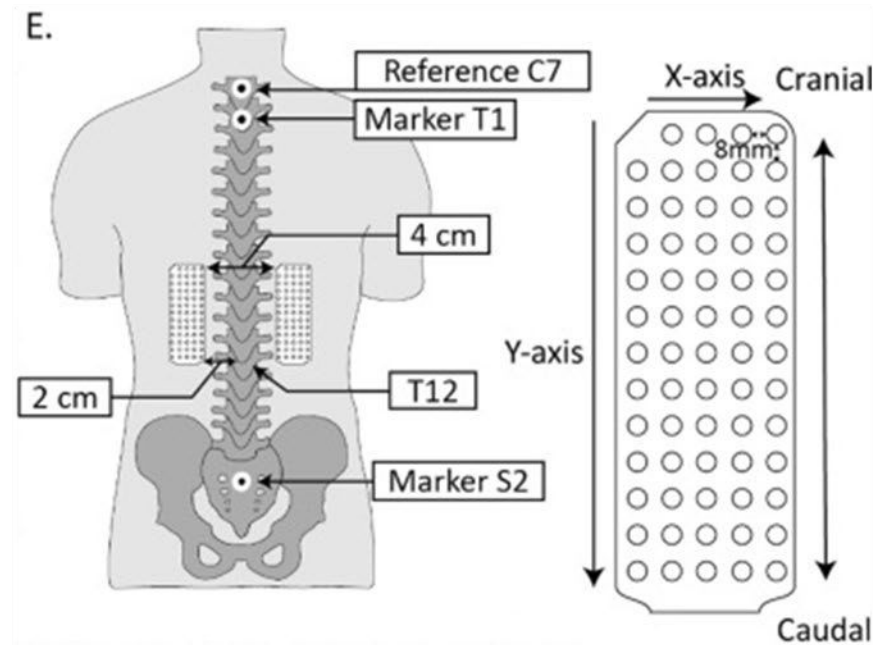
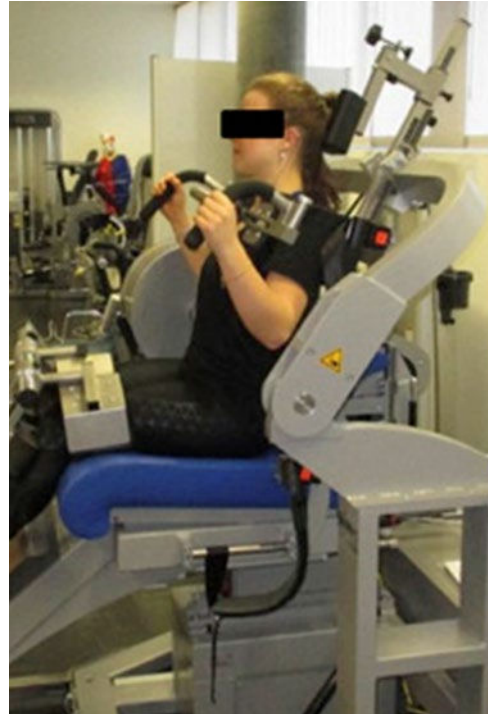
Figure 1. Equation for Predicting 1-RM Based on Reps-to-Fatigue

Anzahl Wiederholungen	% 1 RM (Intensität)
1	100
5	88
10	75
15	61
20	47

Brzycki, M. (1993). Strength Testing—Predicting a One-Rep Max from Reps-to-Fatigue.
Hohmann, A., Lames, M., Letzelter, M. (2014). Einführung in die Trainingswissenschaft.

3. Methodik

Datenerfassung – konditionelle Fähigkeiten



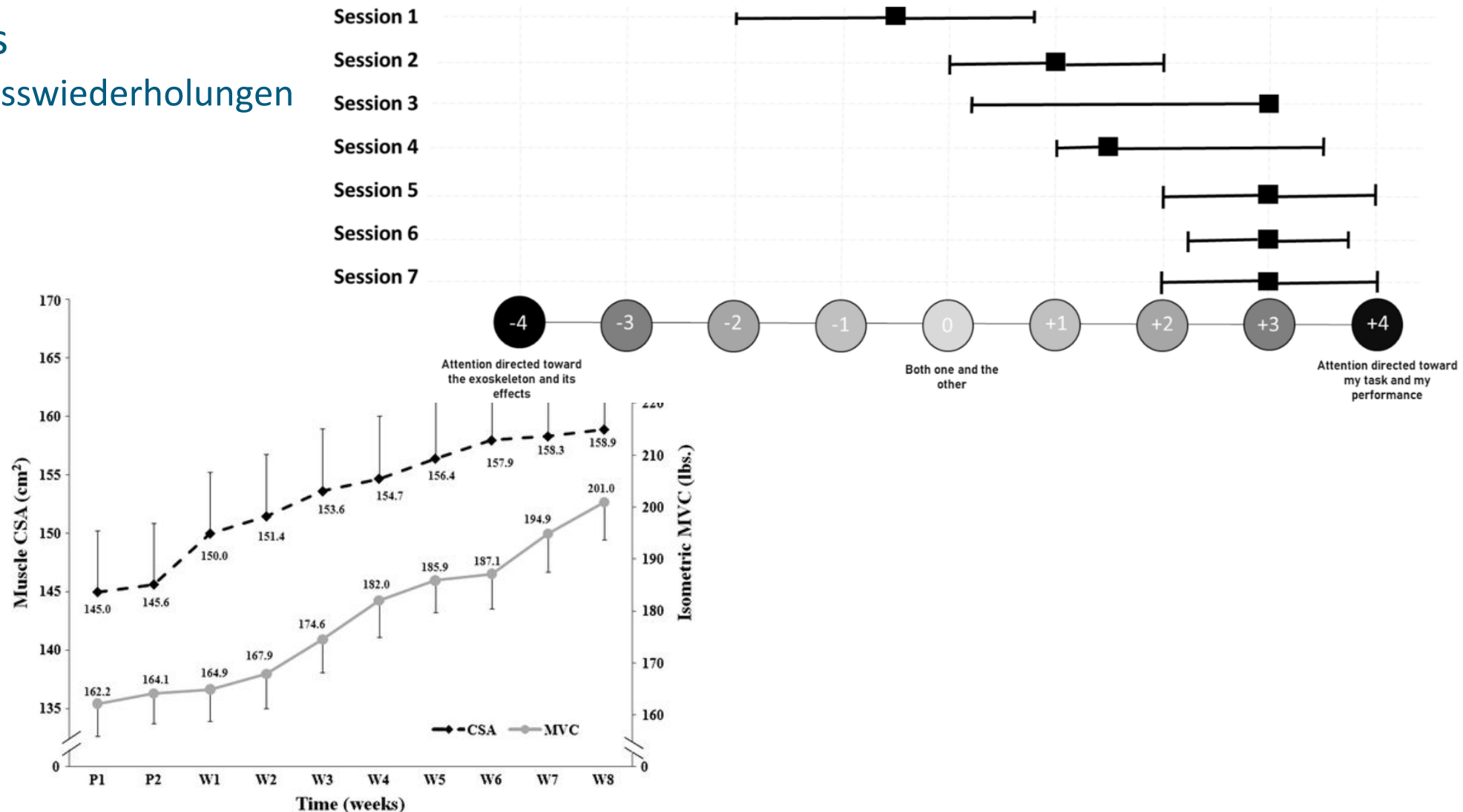
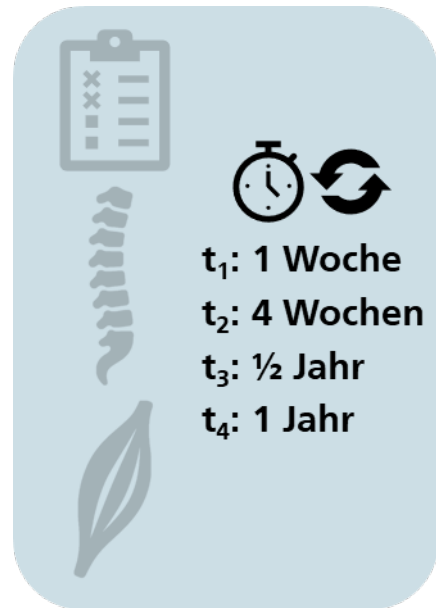
Roth, R., Donath, L., Kurz, E., Zahner, L., & Faude, O. (2017). Absolute and relative reliability of isokinetic and isometric trunk strength testing using the IsoMed-2000 dynamometer.

van Helden, J. F. L., Martinez-Valdes, E., Strutton, P. H., Falla, D., & Chiou, S. Y. (2022). Reliability of high-density surface electromyography for assessing characteristics of the thoracic erector spinae during static and dynamic tasks.

Drost, G., Stegeman, D. F., van Engelen, B. G. M., & Zwarts, M. J. (2006). Clinical applications of high-density surface EMG: A systematic review.

3. Literatur-Exkurs

Datenerfassung – Messwiederholungen

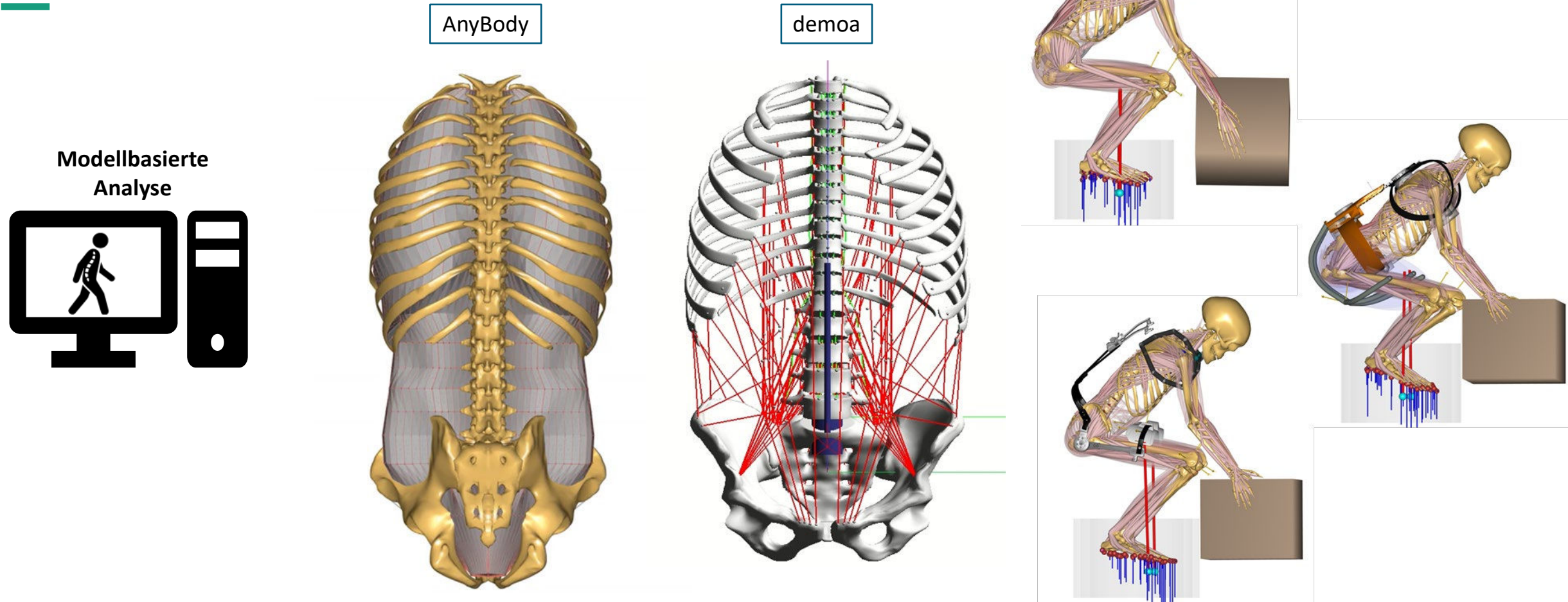


DeFreitas, J. M., Beck, T. W., Stock, M. S., Dillon, M. A. & Kasishke, P. R. (2011). An examination of the time course of training-induced skeletal muscle hypertrophy

Dufraisse, M., Atain Kouadio, J.-J., Hayot, C., Desbrosses, K., Clerc-Urmès, I., Morel, O., Rémy, O., Wioland, L. & Cegarra, J. (2025). Embodiment of Occupational Exoskeletons as Developing a Sense of Ownership and Readiness-To-Hand: Laboratory and Field Explorations.

3. Methodik

Datenverarbeitung – In-silico-Menschmodellierung



Hammer, M., Riede, J. M., Meszaros-Beller, L. & Schmitt, S. (2022). *gspine: A Human Spine Model Built Using Literature Data*.

Shayestehpour, H., Tørholm, S., Damsgaard, M., Lund, M. E., Wong, C. & Rasmussen, J. (2024). A generic detailed multibody model for simulating thoracic spine and ribcage kinematics.

4. Diskussion und Ausblick



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA



University of Stuttgart
Institute of Industrial Manufacturing
and Management IFF

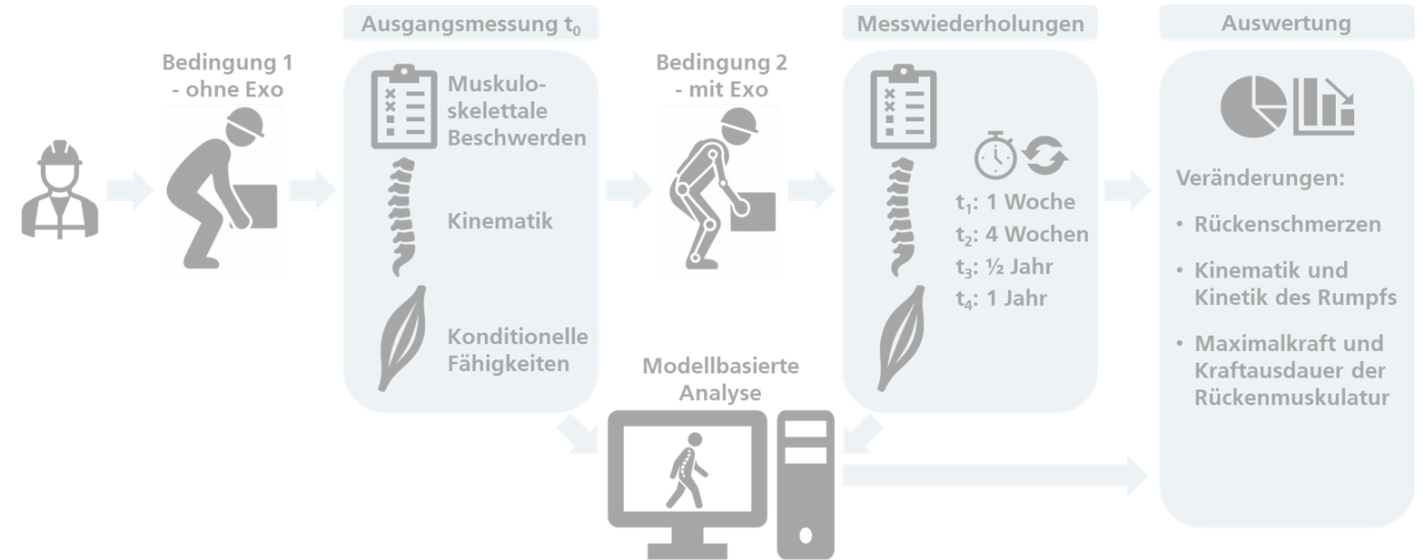


University of Stuttgart
Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering - GSaME

4. Diskussion und Ausblick

Kooperation und weitere Überlegungen

- Kooperation mit Unternehmen
- Kontakt zu Ärzten/Kliniken
- Methodentests
- Start der Messungen 2026



Kontakt

M. Sc. Paula Kennel
Doktorandin und wissenschaftliche Mitarbeiterin IPA & IFF
810 04 - In-silico Human Modeling
Tel. +49 176 55748792
paula.kennel@ipa.fraunhofer.de

Fraunhofer IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA



University of Stuttgart
Institute of Industrial Manufacturing
and Management IFF



University of Stuttgart
Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering - GSaME