

Abschlussbericht zum Vorhaben
„Entwicklung zusätzlicher
Trainingselemente zur Prävention von
Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen,
unterstützt durch den Einsatz von
virtueller Realität am Beispiel von
Unternehmen der Stahlerzeugung und
der Post- und Paketzustellung
(ENTRAPon)“ - **FP-0470**

Laufzeit
01.12.2021-30.11.2024

Bericht vom 30.11.2024

*Prof. Dr. Rolf Ellegast, Prof. Dr. Ulrich Hartmann, Prof. Dr. Kiros Karamanidis,
Prof. Dr. Dipl.-Psych. Annette Kluge, Mirko Kaufmann, Lea Krugmann, Moritz
Schneider, Jan Zimmermann, Andy Lungfiel, Albert Bohlscheid, Dr. Peter Nickel,
Dr. Christoph Schiefer, Ingo Hermanns-Truxius, Dr. Julian Werth & Dr. Anika
Weber*

Kurzfassung deutsch

Kurzfassung englisch

1. Problemstellung

2. Forschungszweck/-ziel

3. Methodik und Studiendesign des Gesamtvorhabens

Experimentelles Studiendesign

Stichprobe

Projektplan und Abweichungen während des Projekts

4. Beschreibung Praxispartner und Mitarbeitende

Methodik der fragebogenbasierte Datenerhebung

Deskriptive Ergebnisse

Praxisunternehmen HKM

Praxisunternehmen Deutsche Post/DHL:

Inferenzstatistische Ergebnisse

Zusammenfassung und Diskussion

5. VR-SRF Schulungssimulation

Methodik der Fragebögen

Deskriptive Ergebnisse

Deskriptive Ergebnisse zum ersten Messtag

Deskriptive Ergebnisse zum zweiten Messtag

Inferenzstatistische Ergebnisse

Diskussion der fragebogenbasierten Evaluation der VR-SRF Schulungssimulation

6. Perturbationstraining

Methodik

Messdurchführung des reaktiven Perturbationstrainingsprogrammes

Unvorhersehbare Gangperturbationen auf dem SRF-Parcours

Datenverarbeitung & -analyse für das Perturbationstrainingsprogramm

Berechnung der dynamischen Gangparameter aus den kinematischen Daten

Statistische Auswertung der dynamischen Gangparameter

Ergebnisse

Mechanische und VR-basiertes Perturbationstraining auf dem Laufband

Unvorhersehbare Gangperturbation auf dem SRF-Parcours - Transferanalyse

Diskussion

Fragebogenbasierte Evaluation der Perturbationstrainings

Methodik der Fragebögen

Deskriptive Ergebnisse

Inferenzstatistische Ergebnisse

Diskussion der fragebogenbasierten Evaluation der Perturbationstrainings

7. Weiterführende Auswertung des IFA

Zielsetzung der Auswertungen des IFA

8. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

9. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

10. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

11. Literaturverzeichnis

12. Anhang/Anhänge

Unterschriftenseite verpflichtend für Kooperationsprojekte

Kurzfassung deutsch

Ausgangspunkt: Stürze von Beschäftigten durch Stolpern, (Aus-)rutschen und Fehltritte (SRF) sind ein Unfallschwerpunkt sowohl im beruflichen als auch im privaten Umfeld. Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erweiterung eines bestehenden proaktiven VR-basierten Trainingselementes (BGHW Lagerhallensimulator) um eine virtuelle Stadtumgebung. Zudem wurde ein biomechanisches (reaktives) Perturbationstraining als mechanische und VR-basierte Variante entwickelt. Die Entwicklung und Evaluation der Trainingselemente zu drei Messzeitpunkten erfolgte mit Unterstützung von Unternehmen der Stahlerzeugung (HKM) und der Post- und Paketzustellung (Deutsche Post/DHL).

Methode: 110 Beschäftigte wurden randomisiert in eine von zwei Interventionsgruppen (mechanisches versus VR-basiertes Training, $n = 40$ pro Gruppe) oder eine Kontrollgruppe ($n = 30$) eingeteilt. Alle Gruppen nahmen an der VR-basierten Schulungssimulation (Lager oder Stadt) teil. Alle drei Gruppen wurden vor (Pre) und nach dem Training (Post) sowie sechs Monate später (Ret) beim Gehen auf einem Laufsteg in zwei Ganggeschwindigkeiten (ihrer bevorzugten und einer schnelleren) einem unvorhersehbaren, ebenerdigen Stolpern, Rutschen und Fehltreten in randomisierter Reihenfolge ausgesetzt. Durch die kinematischen Daten eines am Körper getragenen inertialsensorbasierten Messanzuges (Xsens Link Motion Tracker (Movella™)) wurden die Toleranz der Stabilität sowie die dynamischen Stabilitätskomponenten mittels eines Ganzkörpersegmentmodells (23 Segmente) erfasst. Zudem wurden diverse personen- und umfeldbezogene Daten erhoben.

Ergebnisse: Sowohl die VR als auch die MECH-Gruppe zeigten für beide Ganggeschwindigkeiten eine signifikante Zunahme in der Toleranz der Stabilität in den Schritten nach der Perturbation (Post Pert) nur in der Transferbewegung Stolpern auf. Beide Interventionsgruppen zeigten innerhalb des ersten Schrittes nach dem Stolpern „Post-Intervention“ im Vergleich zu „Pre-Intervention“ eine Vergrößerung in der Unterstützungsfläche (BoS) für die schnelle Ganggeschwindigkeit sowie in beiden Ganggeschwindigkeiten jeweils eine Verringerung der Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (CoM, MECH-Gruppe) oder Reduktion des Oberkörperflexionswinkels (VR-Gruppe). Die subjektiven Sturzmonitorings zeigen ergänzend nach dem Training eine Verringerung der SRF-Ereignisse. Das Arbeitsumfeld wies positive Faktoren für den Transfer des Gelernten in die Praxis auf. Die Kontrollgruppe wies keine signifikante Zunahme in der Toleranz der Stabilität zwischen Pre und Post für alle drei Gangperturbationen unabhängig von der Ganggeschwindigkeit auf. Bezüglich der Analyse der Beibehaltung der Adaptationen in der Transferbewegung Stolpern sechs 6 Monate später (Ret) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in den Komponenten der dynamischen Stabilität im Vergleich zu vor dem Training. Die Ergebnisse der Studie zeigen auf, dass ein VR- oder mechanisch basiertes Perturbationstraining die Gangstabilität verbessert und die erlernten Stabilitätskontrollmechanismen auf simulierte ebenerdige Stolperereignisse transferiert werden können. Die Trainings werden insgesamt von den Mitarbeitenden als wertvoll und nützlich angesehen. Die beiden Perturbationstrainings wurden von den Teilnehmenden nach dem Training und auch sechs Monate später positiv bewertet. Es gab nur in wenigen Fällen Symptome von Cyber-Sickness beim VR-basierten Perturbationstraining.

Ausblick: Um eine signifikante Reduktion von Stolperunfällen in der Arbeitswelt durch physische Interventionen effektiv zu erreichen, wird empfohlen, die Trainingsdosis individualisiert anzupassen und mittels datengetriebener Technologien das Sturzrisiko im Beruf und Alltag zu bewerten. Gemeinsam mit der VR-SRF-Schulungssimulation zeigt das Trainingspaket großes Potenzial, durch die kombinierte Anwendung von proaktiven und reaktiven Elementen die Wahrscheinlichkeit zu verringern, eine SRF-Situation bzw. einen Sturz durch Stolpern zu erleben.

Kurzfassung englisch

Übersetzung der „Kurzfassung deutsch“

Starting Point: Slips, trips, and missteps (SRF) are a major cause of accidents in both professional and private environments. The objective of this research project was to expand an existing proactive VR-based training module (BGHW warehouse simulator) by integrating a virtual city environment. Additionally, a biomechanical (reactive) perturbation training system was developed as both a mechanical and a VR-based version. The development and evaluation of the training components at three measurement points were carried out with the support of companies in the steel production sector (HKM) and postal and parcel delivery (Deutsche Post/DHL).

Method: A total of 110 employees were randomly assigned to one of two intervention groups (mechanical vs. VR-based training, $n = 40$ per group) or a control group ($n = 30$). All groups participated in the VR-based training simulation (warehouse or city). The three groups were exposed to unpredictable, ground-level slips, trips, and missteps in random order while walking on a treadmill at two walking speeds (their preferred speed and a faster speed) before (Pre) and after (Post) the training, as well as six months later (Ret). Kinematic data from a body-worn inertial sensor-based motion tracking suit (Xsens Link Motion Tracker (Movella™)) were used to measure stability tolerance and dynamic stability components through a full-body segment model (23 segments). Additionally, various person- and environment-related data were collected.

Results: Both the VR and MECH groups showed a significant increase in stability tolerance in the steps following the perturbation (Post Pert) for the transfer movement of tripping at both walking speeds. Both intervention groups demonstrated an increase in the base of support (BoS) for fast walking speeds and a reduction in the speed of the center of mass (CoM, MECH group) or a reduction in the upper body flexion angle (VR group) within the first step after tripping “post-intervention” compared to “pre-intervention” at both walking speeds. Subjective fall monitoring also showed a reduction in SRF events after training. The work environment revealed positive factors for the transfer of learning into practice. The control group did not show any significant increase in stability tolerance between Pre and Post for any of the three gait perturbations, regardless of walking speed. Regarding the retention of adaptations in the transfer movement of tripping six months later (Ret), there were no significant differences in the components of dynamic stability compared to before the training. The study results demonstrate that both VR- and mechanically-based perturbation training improve walking stability and that the learned stability control mechanisms can be transferred to simulated ground-level tripping events. Overall, the training was perceived by employees as valuable and useful. The two perturbation training methods were rated positively by participants both immediately after training and six months later. Only a few cases of cybersickness symptoms were reported during the VR-based perturbation training.

Outlook: To effectively achieve a significant reduction in trip-related accidents in the workplace through physical interventions, it is recommended to tailor the training dosage to individual needs and to assess fall risk in both professional and everyday contexts using data-driven technologies. Together with the VR-SRF training simulation, the training package demonstrates significant potential to reduce the likelihood of experiencing an SRF situation or a fall caused by tripping through the combined application of proactive and reactive elements.

1. Problemstellung

Stürze durch Stolpern, (Aus-)rutschen und Fehltritte (SRF) stellen einen bedeutenden Unfallschwerpunkt sowohl im beruflichen als auch im privaten Umfeld dar (Di Pilla, 2017; Hsiao, 2017). Nationale und internationale Statistiken zeigen, dass etwa ein Fünftel aller Unfälle auf SRF zurückzuführen sind. SRF-Unfälle stellen für Unternehmen aus vielen Branchen ein großes Problem dar und verursachen massive Arbeitsausfälle (Hsiao, 2014, BAuA, 2021). SRF-Unfälle führen nach Informationen der BGHM seit Jahren konstant die Liste der meldepflichtigen Arbeitsunfälle an (BGHM, 2021). Auch laut Informationen der BG-Verkehr sind Stolpern, Rutschen, Stürzen die häufigsten Unfallursachen im Bereich Verkehr, Transport und Logistik (BG Verkehr, 2021). Wenn es zu einem plötzlichen Stoppen der Fußbewegung an einer Stolperstelle kommt, wird von Stolpern gesprochen (Wetzel, 2022). Verliert der Fuß die Haftung auf dem Boden in Bewegungsrichtung und rutscht in diese Richtung schneller weiter als der Körper (in der Regel), wird von Rutschen gesprochen (Wetzel, 2022). Das Fehltreten wird als falsches Aufsetzen des Fußes beim „Tritt ins Leere“ (z. B. durch Übersehen einer Stufe), beim „Danebentreten“ (z. B. an einer Absturzstelle) oder beim ungenauen Aufsetzen des Fußes auf Stufen oder Kanten (was zum Umknicken führen kann) deklariert (Wetzel, 2022).

Insgesamt gab es im Zeitraum des DGUV-Berichts aus 2020 (DGUV, 2020) 169.538 SRF-Unfälle, davon sieben tödliche, verbunden mit 2.955 Unfallrenten. Der höchste Anteil an SRF-Unfällen findet sich mit 33 Prozent im gewerblichen Bereich (z. B. Produktion, Werkstätten, Be- und Entladestellen). Mit 17 Prozent ereignen sich SRF-Unfälle im öffentlichen Umfeld von allgemein zugänglichen öffentlichen Orten und Außenbereichen (z. B. Weg, Parkplatz, Wartesaal, siehe DGUV, 2020).

SRF-Unfälle haben dadurch eine hohe Priorität in der Unfallprävention und erfordern die Entwicklung von Arbeitsschutzmaßnahmen auf allen Ebenen (DGUV, 2022; Eurostat_web, 2023; Schäfer et al., 2022).

Rutschgefährdungen ergeben sich u. a. auf rutschigen Trittplächen (z. B. Flächen mit öligen, fettigen, schmierigen Verschmutzungen), nassen oder glatten Trittplächen (stauende Nässe durch fehlende Abflussmöglichkeiten, geschliffene, mit Pflegemitteln polierte Flächen), unter anderem auf Treppenstufen und Stufenkanten, auf Flächen mit witterungsbedingter Glätte (Eis, Schnee), losen Ablagerungen (Laub, körniges Material, Staub) und losen Belägen auf Trittplächen, durch wechselnden Belag auf Trittplächen mit unterschiedlichem Gleitreibungswiderstand oder auf Trittplächen mit Neigung/Steigung (Auffahrampen, Laufstege, BAuA, 2021). Gefährdungen durch Stolpern, Umknicken oder Fehltreten entstehen z. B. durch Unebenheiten der Fläche (Stufungen, Schrägen/Welligkeit, Öffnungen/Vertiefungen) oder gelöste, hochstehende Belagränder oder Stufenkantenprofile (BAuA, 2021). Neben baulichen Mängeln wie rutschigen Böden oder Stolperfallen liegen Ursachen auch häufig in Verschmutzungen und herumliegenden Gegenständen, die leicht vermieden werden könnten (DGUV-I. 208-181; Mewes, 2023; Wetzel, 2022). Das Problem selbst ist nicht neu, ganz im Gegenteil. Ordnung und Sauberkeit sind bekannte Arbeitsschutzmaßnahmen (Alli, 2008; Wetzel, 2022), die aber nicht pauschal und in jedem Fall ihre Wirkung entfalten können. Im Bereich des Arbeitsschutzes können Beschäftigte schließlich auch für Gefährdungen und deren Folgen sensibilisiert und zu sicherem Verhalten motiviert werden. Damit wird deutlich, dass zur Prävention von SRF-Unfällen die gesamte Maßnahmenhierarchie des Arbeitsschutzes eingesetzt werden kann. Wie die DGUV-Auswertung aus 2020 zeigt, sind gerade Berufsgruppen im gewerblichen Bereich wie z. B. Personen in der Stahlindustrie und die angeschlossenen Werksfeuerwehren sowie Feuerwehrleute generell (Mohr, 2017) sowie Personen, die im öffentlichen Umfeld tätig sind, wie z. B. Post- und Paketzusteller*innen (Bentley, 1998), Gefährdungen durch SRF ausgesetzt.

Das Forschungsvorhaben hat deshalb die Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Prävention von SRF-Unfällen am Beispiel von Unternehmen der Stahlherzeugung und der Post- und Paketzustellung zum Ziel. Dieses Training soll später auch in anderen Betrieben anwendbar sein. Unfälle, die durch das Fallen aus einer gewissen Höhe verursacht werden, stehen im Rahmen dieses Projekts zunächst nicht im Fokus. Für das DGUV-Forschungsförderungsprojekt ENTRAPon (FP470) werden Gefährdungen durch SRF wie

auch Maßnahmen der Prävention mit neuen Technologien – Virtual Reality (VR) – vermittelt, um das Interesse an einer breit angelegten Prävention in diesem Unfallschwerpunkt neu zu beleben.

SRF- Prävention

Zur Vermeidung von SRF-Unfällen stehen nach dem Stand der Technik eine Vielzahl von Schutzmaßnahmen gemäß der sicherheitstechnischen Gestaltungsrangfolge: 1. Substitution (S) vor 2. technische Schutzmaßnahmen (T) vor 3. organisatorische Schutzmaßnahmen (O) und 4. persönliche Schutzmaßnahmen (P) zur Verfügung (Wetzel, 2013). Es sind dabei die Schutzmaßnahmen mit der weitreichendsten Wirkung zu bevorzugen (Wetzel, 2013). Die Prävention orientiert sich hauptsächlich an dieser auch international etablierten Maßnahmenhierarchie „STOP-Prinzip“ (DGUV-I. 208-041, 2019; EU OSH, 2008; ISSA_web, 2023; Lehto, 2012). Maßnahmen der obersten Ebene zielen darauf ab, Gefahrenstellen zu ersetzen. Im Zusammenhang mit der SRF-Prävention können hier Maßnahmen wie etwa die stufenlose Gestaltung von Arbeitsbereichen, der Einbau von rutschfesten Böden und das Überdachen von Verkehrswegen getroffen werden. Auf der zweiten Ebene umfassen sie technische Maßnahmen wie etwa das Verlegen einer Heizspirale zur Vermeidung von Glatteis auf Gehwegen (DGUV-I. 208-181; Mewes, 2023; Wetzel, 2015). Grundsätzlich gilt, dass Maßnahmen auf den beiden oberen Ebenen, sobald sie umgesetzt sind, SRF-Gefährdungen für viele und auch zukünftige Beschäftigte und Passanten wirksam beseitigen oder reduzieren. Maßnahmen der unteren Ebene tragen ebenfalls zum Schutz der betroffenen Personen bei und ihre Wirkung als zusätzliche oder ergänzende Vorkehrung ist für die Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der Arbeit von großem Wert. Organisatorische Maßnahmen der dritten Ebene organisieren Arbeitstätigkeiten wie etwa Regelungen zum Betreten offizieller Wege, zur Bereitschaft von Reinigungs- und Winterdiensten sowie zum Aufräumen der Arbeitsbereiche; manchmal auch als gute Haushaltsführung bezeichnet (Alli, 2008; Wetzel, 2022). Auf der untersten Ebene kommen Maßnahmen zum Einsatz, die auf das Personal einwirken, wie etwa das Tragen von Arbeitsschuhen mit rutschhemmenden Sohlen als persönliche Schutzausrüstung und die Teilnahme an Verhaltenstrainingsprogrammen zur Verbesserung des sicheren Verhaltens und zur Verringerung der Unfallfolgen (DGUV-I. 208-181; Mewes, 2023; Wetzel, 2015).

Adressat für die STOP-Gestaltungsrangfolge ist der Unternehmer/Arbeitgeber und sie gibt dessen Methodik im Umgang mit SRF-Gefährdungen vor. Um die Anzahl der SRF-Unfälle zu reduzieren, werden den Unternehmen und Organisationen u. a. DGUV-Regeln zur Verfügung gestellt, die Hilfestellung bei der Umsetzung der Pflichten aus staatlichen Arbeitsschutzvorschriften und/oder Unfallverhütungsvorschriften geben. Für die in diesem Forschungsvorhaben adressierte Vermeidung von SRF-Unfällen sind z. B. folgende Regelwerke und Informationen relevant:

- DGUV Regel 108-003 April 1994 – aktualisierte Fassung Oktober 2003. Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr
- Die technischen Regeln für Arbeitsstätten, Fußböden, ASR A 1.5/ 1,2
- DGUV-Information 208-041, Bewertung der Rutschgefahr unter Betriebsbedingungen, September 2019
- DGUV-Information 208-046 Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Zeitungszustellung, August 2015
- DGUV-Information 208-035 Okt. 2020 Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Zustellen von Sendungen Handlungshilfe für Führungskräfte in Betrieben mit Kurier-, Express- und Postdienstleistungen
- Das BG Verkehr Video Stolpern, Rutschen, Stürzen mit den Botschaften: „Deine Augen sind das Assistenzsystem deiner Füße“ (BG-Verkehr, 2021).

Die DGUV-Information 208-046 informiert z. B. über die Verantwortung der Unternehmen zur Bereitstellung und zum Tragen geeigneter persönlicher Schutzausrüstung wie z. B. Schuhwerk, Wetterschutzkleidung und Sicherheitsausrüstung. Gefährdungen für Personen, die Zeitungen, Post oder

Pakete zustellen, sind bedingt durch die Teilnahme am Straßenverkehr, durch ungünstige Witterungsbedingungen wie Regen oder Schnee und vom Unternehmen nicht zu kontrollierende Faktoren (örtliche Gegebenheiten der Zustellungsrouten, Straßen, Bürgersteige, Zufahrtswege, Treppenaufgänge und der Treppenhäuser in Gebäuden).

Als gute Beispiele für die Prävention von SRF-Unfällen werden in DGUV-Information 208-035 (2020) erfolgreiche Maßnahmen beschrieben:

- Trainings zur bewussten Wahrnehmung von Gefahrenstellen, z. B. Stolperparcours,
- Aufklärung über geeignetes Schuhwerk für die Zustellung, z. B. Schuhsohlenmaterial,
- Beratung zu sicherem Gehen, z. B. keine Sortierarbeiten während des Gehens

Auch in den Materialien der BG-Verkehr wird auf die Wichtigkeit der Achtsamkeit beim Gehen hingewiesen mit der Aussage „Die Augen sind das Assistenzsystem Deiner Füße“. Als schon erprobte Maßnahme bietet das BGHW mobil („Sicher zu Fuß und auf dem Rad“) Unterstützung beim betrieblichen Arbeitsschutz durch Mitmachangebote, z. B. das Testen von Schuhwerk auf einem rutschigen Laufband. Dieses mobile Angebot der BGHW sensibilisiert die Arbeitnehmer*innen für das Erkennen von Gefährdungen in einer virtuellen Umgebung und übt die entsprechenden STOP-Maßnahmen ein.

Ein Trainingselement des BGHW Mobil ist der sog. Lagerhallensimulator (Heyer, 2018). Der Lagersimulator ist eine VR-basierte Anwendung von ca. 10 min Durchführungszeit zur Sensibilisierung für Stolper-, Rutsch- und Sturzunfälle im Arbeitsleben (Heyer, 2018). Die Teilnehmer*innen navigieren durch eine virtuelle Lagerhalle, in der verschiedene Gefährdungen entdeckt werden müssen. Während der Bewegung durch die Lagerhalle begegnen den Teilnehmer*innen verschiedene SRF-Gefahren (z. B. ein umgekippter Farbeimer, eine Fuge ohne Silikon, nicht ordnungsgemäß entsorgter Müll; Heyer, 2018). Die Teilnehmer*innen sollen zunächst die Gefährdungen erkennen und anschließend Vorschläge auswählen, die die Gefährdung beseitigen (z. B. der Müll wird aufgenommen und aus dem Weg geräumt), darauf hinweisen (Aufstellen eines Warnschilds, wenn die Gefährdung nicht sofort beseitigt werden kann) und Verbesserungen vorschlagen (z. B. Anschaffung zusätzlicher Müllcontainer). Es ist prinzipiell die Option vorhanden, dass für richtige Antworten Punkte gesammelt werden können, um so den Lernfortschritt zu dokumentieren (Heyer, 2018).

Bei der Entstehung von SRF-Unfällen sind viele Faktoren im Bereich der Technik, Organisation und Person zu beachten (Paridon, 2005). Mit der Umsetzung des STOP-Modells werden Arbeitsplätze im Hinblick auf SRF-Unfälle sicherer gemacht. Bei einer Auswertung in der Stahlindustrie zeigte sich, dass SRF-Unfälle bei Arbeiten, die alleine oder in der Gruppe durchgeführt werden, gleichermaßen auftreten (Verma et al., 2014), dass jedoch im Fall von Arbeiten in einer Gruppe oft eine fehlende Aufmerksamkeit und Achtsamkeit als wichtiger Faktor auszumachen war (Radomsky et al., 2001, Verma et al., 2014). Eine Auswertung von SRF-Unfällen bei Postzustellern (Haslam & Bentley, 1999) zeigte, dass diese in den meisten Fällen auf Schnee und Eis zurückzuführen sind (70%). Bei 50 % der Unfälle wurde eine Kombination aus rutschigen Bedingungen, Verwendung von Schuhen mit schlechtem Profil und zeitsparendem Verhalten festgestellt, z. B. die unsichere Praxis, die Post für die nächste Zustellung im Gehen vorzubereiten (Bentley & Haslam, 2001; Haslam & Bentley, 1999). Die Hälfte aller Stürze ereignete sich in den Monaten November bis Februar und drei Viertel der Stürze traten zwischen 7 und 9 Uhr morgens auf. Die Häufigkeit der Stürze war bei weiblichen Mitarbeitern um 50% höher als bei ihren männlichen Kollegen (Bentley, 1998). Die Untersuchung lässt vermuten, dass unsichere Arbeitspraktiken, z. B. das Lesen von Adressen im Gehen und das Abkürzen von Wegen, das Sturzrisiko erhöhen (Bentley, 1998). Vor allem an den Gefahrenstellen, bei denen aufgrund der Lage der Unfallorte (in privaten und öffentlich zugänglichen Immobilien wie Wohnhäusern oder bei weitläufigen Außenanlagen unter freiem Himmel) technische und organisatorische Maßnahmen zum Schutz vor SRF-Unfällen ausgeschöpft wurden, soll mit dem Forschungsvorhaben angesetzt werden.

Benutzung von VR-Techniken im Arbeitsschutz, insbesondere in der SRF-Prävention

VR-Techniken haben eine lange Tradition und einen festen Platz in der Unterstützung von Instruktionsdesign, Qualifizierung und Training (Cohn et al., 2009; Nicholson et al., 2009; Schmorow et al., 2009). Das Gestalten von VR-Simulationsumgebungen nach Erkenntnissen der Bildungswissenschaften unterstützt Mensch-System-Interaktionen und bildet eine Brücke zu Instruktionsdesign und Konstruktivismus (Niegemann, 2009). Lernende konstruieren Wissen aktiv durch Interaktionen, anstatt Informationen passiv aufzunehmen. Wissen entsteht nicht durch die Verwaltung von Informationen, sondern ist ein adaptiver Prozess, der die Erfahrungsumgebung des Lernenden organisiert. Es ist nach wie vor beliebt, VR-Techniken in Schulungen auch zur SRF-Prävention, d. h. durch verhaltensbasierte Präventionsmaßnahmen anzuwenden (Simeonov, 2017). Der Einsatz von VR-Technologien im Kontext von Präventionstrainings führt zu einem erhöhten Immersionserleben und zu einer damit verbundenen erhöhten und zielbezogenen Lernmotivation (samt effektiverem Transfer) sowie zu einer verringerten Fehlerzahl in realen Transferaufgaben (Blum et al., 2020; Fung, 2006; Kern, 2019; Lackey, 2016; Makransky, 2019; Randeniya, 2019; Rockstroh et al., 2020; Simeonov, 2017; Sowndararajan, 2008; Straub & Kluge, 2020). Sie bieten potenzielle Lösungen, indem sie das Engagement und das Verständnis der Bildungsteilnehmenden durch erfahrungsbasiertes Lernen in sicherheitsrelevanten Szenarien fördern (Lawson et al., 2019). Darüber hinaus können Teilnehmende mit besonderer Vorsicht gefährlichen virtuellen Umgebungen ausgesetzt werden, während das Risiko eines tatsächlichen körperlichen Schadens eher gering bleibt (Nickel et al., 2017; Nickel & Lungfiel, 2024). Einige der Studien zur Entwicklung und Implementierung von VR-Techniken in Trainingsumgebungen zeigen jedoch, dass diese Arbeiten kein Selbstläufer sind und nicht immer einfach umgesetzt werden können (Champney et al., 2015; Simpson et al., 2015). Aufgrund wissenschaftlicher Erkenntnisse und Erfahrungen mit dem Einsatz von VR-Simulationen wurde in den letzten Jahren ein Human-Factors-Konzept zur strukturierten Entwicklung virtueller Umgebungen (SDVE; Eastgate et al., 2015) entwickelt und in verschiedenen Anwendungsbereichen erfolgreich eingesetzt (z. B. Gomoll et al., 2018; Wetzels et al., 2023).

Verbesserung der Gangstabilität durch Perturbationstraining

Zur Verbesserung der Stabilität des menschlichen Gangs können mechanische Perturbationen (Störungen) eingesetzt werden. Während des Gehens auf einem Laufband werden die Teilnehmenden dabei durch Seilzugsysteme oder Laufbandbeschleunigung gestört. Dadurch wird ein Stolper- oder Rutschvorgang provoziert und ein motorischer Lernprozess zur Verbesserung der Kontrolle des Gleichgewichts ausgelöst. Die Widerstandsfähigkeit des für die Gangstabilität zuständigen motorischen Systems gegenüber ähnlichen zukünftigen Gleichgewichtsstörungen wird auf diese Weise erhöht. Die Arbeitshypothese des aktuellen Forschungsvorhabens ist, dass ein tatsächlicher Stolper- oder Rutschunfall am Arbeitsplatz oder im Alltag aufgrund eines solchen Trainings unwahrscheinlicher wird. Wissenschaftliche Erkenntnisse auf dem Gebiet der Gerontologie unterstützen die obige Hypothese. Ältere Menschen können trotz reduzierter Muskelkraft von einem kurzen Laufbandtraining mit kontrolliertem Stolpern und Ausrutschen profitieren, indem ihre sturzhemmenden Fähigkeiten gestärkt werden (Karamanidis et al., 2020). Im Vergleich zu jungen Erwachsenen ist bei älteren Erwachsenen ein längerer Trainingszeitraum erforderlich, um Verbesserungen der sturzhemmenden Fähigkeiten zu stimulieren. Bisherige Erkenntnisse deuten darauf hin, dass vor allem die jungen und mittelalten Beschäftigten sehr intensiv und nachhaltig auf ein Training mit mechanischen Gangstörungen reagieren. Bei den älteren Beschäftigten könnte ein intensiveres Training nötig sein, um ähnliche Ergebnisse zu erzielen. Für ein solches Training mit mechanischer Störung des Gangs werden jedoch spezifische Trainingsgeräte benötigt. Daher setzen inzwischen immer mehr Arbeitsgruppen die virtuelle Realität als Hilfsmittel für spezifisches Gangtraining ein. Mit Hilfe von VR kann die Anzahl physischer Trainingsgeräte reduziert werden, während sichere und fordernde Trainingsbedingungen geschaffen werden.

In den letzten Jahren wurden einige Forschungsarbeiten durchgeführt, die spezifische Einsatzmöglichkeiten von VR in Präventions- und Rehabilitationsmaßnahmen zu Sturz- und Rutschunfällen sowie Gangart-Schulungen und Gleichgewichtsverbesserungen untersucht haben (Soltani & Andrade, 2021). Beim Einsatz von VR in der Präventionsforschung für Rutschunfälle werden Head-Mounted-Displays auf Laufbändern mit virtueller Perturbation (z. B. durch eine Rotation der virtuellen Umgebung) als Trainingsmedien genutzt. Physische Effekte wurden primär in einer variableren und adaptiveren Schrittlänge und Schrittfrequenz festgestellt. Weiterhin wurde gezeigt, dass sich VR-basiertes Training auf dem Laufband positiv auf neuromuskuläre Adaptationen auswirkt, die sich in proaktiven und reaktiven motorischen Anpassungen zeigen (Parijat et al., 2015a, Parijat et al., 2015b). Ein VR-Rutschtraining ist in der Lage, bei älteren Erwachsenen Reaktionen hervorzurufen und zu trainieren, sodass die Teilnehmenden diese motorischen Fähigkeiten auf reale Rutschsituationen übertragen können (Parijat et al., 2015a). Eigene Vorarbeiten bezüglich der aufgabenspezifischen Trainings mit Hilfe von VR oder mechanischen Gangstörungen bestärken die Einschätzung ihrer Wirksamkeit. In bisherigen Studien wurde untersucht, ob das Alter die Adaptation der Wiederherstellung des Gleichgewichts nach einem Training mit mechanischen Gangstörungen sowie seine Beibehaltung über Monate beeinflusst (Epro et al., 2018a, Epro et al., 2018b; Karamanidis et al., 2020; König et al., 2019a, König et al., 2019b). Nicht beeinträchtigte junge, mittelalte und ältere Erwachsene gehen auf einem Laufband und erfahren eine unerwartete mechanische Störung des Gangs. Die mechanische Störung erfolgt mittels einer speziell dafür angefertigten pneumatischen Brems- und Lösevorrichtung, mit der ein plötzlicher Widerstand während der Schwungphase beim Gang erzeugt werden kann. Über mehrere Gangstörungen hinweg wird die Stabilität für den ersten Ausgleichsschritt erhöht und die Verbesserungen über bis zu 1,5 Jahre beibehalten (Epro et al., 2018b).

Zusammenfassende Darstellung der Forschungslücke:

Die empirische Forschung zeigt deutlich die Wirkung und den Nutzen von VR-basierter Sensibilisierung für SRF-Unfälle und von gezieltem Training des Gangs (mechanisch und mit Hilfe von VR) auf. Infolge erhöhter Motivation und Akzeptanz erweist sich die VR zum einen als ein effizientes Trainingswerkzeug zur Sensibilisierung von Arbeitnehmer*innen in Hinblick auf Gefahrensituationen, die zu SRF-Unfällen führen können. Zum anderen ist die VR-Technologie aber auch für ein spezifisches motorisches Training zur Sturzreduzierung flexibel einsetzbar. Im Bereich des Trainings motorischer Fähigkeiten mit Hilfe von mechanischen Störungen des Gangs zeigen sich Verbesserungen der sturzhemmenden Fähigkeiten der Teilnehmenden über verschiedene Altersspannen sowie bei pathologischen Veränderungen im Alter. Diese Fähigkeiten werden auch ohne weiteres Training über mehrere Monate beibehalten. Ähnliche Effekte können bei einem Training mit Hilfe der VR beobachtet werden. Sowohl bei gesunden als auch bei pathologischen jungen und älteren Teilnehmenden konnten Verbesserungen der Gangstabilität durch ein gezieltes VR-Training beobachtet werden, wodurch zukünftig Stürze reduziert werden. Bisher wurden die Trainingselemente jedoch nur unter Laborbedingungen und nicht im betrieblichen Umfeld erprobt und deren langfristige Wirkungen auf die SRF-Unfallzahlen sind nicht untersucht worden. Zudem wurde bisher die Effektivität des mechanischen Trainings nicht mit der des VR-Trainings verglichen. Das VR-Training bietet eine zeitlich und örtlich flexible Trainingsalternative, die eine Reduzierung der benötigten Trainingsgeräte zur Folge hat.

2. Forschungszweck/-ziel

Das vorrangige Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erweiterung eines bestehenden proaktiven VR-basierten Trainingselementes der Unfallversicherungsträger (BGHW Lagerhallensimulator, proaktives Trainingsprogramm) zur Prävention arbeitsbezogener Stolper-, Rutsch- und Fehltretenfälle (SRF) um ein biomechanisches Perturbationstraining (reaktives Perturbationstrainingsprogramm). Die Wirksamkeit des BGHW-Lagerhallensimulators soll überprüft werden. Neben der Evaluation des Lagerhallensimulators soll eine weitere Anwendung zur Sensibilisierung von SRF-Gefahrensituationen im Kontext der Post- und Paketzusteller*innen entwickelt werden. Zusätzlich wird die Effektivität eines mechanischen mit der eines VR-basierten Perturbationstrainings verglichen. Das gesamte Trainingspaket besteht aus einer STOP-Sensibilisierungseinheit (Theorie und VR-basierte SRF-Schulungssimulation; weiterentwickelt aus dem VR-Lagerhallensimulator der BGHW) und einem körperlichen Perturbationstraining, welches auf einem Laufband durchgeführt wird. Die Wirkung des Trainingspakets wird mittels einer wissenschaftlichen Studie mit einem Interventionszeitraum von sechs Monaten über drei Messzeitpunkte (Prä-Post-Beibehaltung Messdesign) mit zwei Interventionsgruppen (mechanisches und VR-basiertes Perturbationstraining) und einer Kontrollgruppe in Feldmessungen mit Beschäftigten der kooperierenden Unternehmen untersucht. Zu diesem Zweck wird im Rahmen des Projekts ein standardisierter SRF-Parcours konstruiert, in welchem Gangperturbationen mittels modularer Elemente (z. B. ein weicher Untergrund, eine Rutschplatte) als Transfertask eingeleitet werden, um reale SRF-Situationen, die denen aus den Unfallberichten der Unternehmen nachgestellt sind, zu simulieren. Zudem werden den Beschäftigten unternehmensspezifische und SRF-relevante Arbeitsumgebungen in Form von 360°-Fotos gezeigt, in welchen alle möglichen Gefährdungsstellen (z. B. Gleise, ein Bordstein, Geröll) benannt werden sollen. Die nachhaltige Wirkung des Trainingspakets wird durch eine weitere Messung mehrere Wochen nach dem Training überprüft. Durch den Einsatz des Trainingspakets und dessen Evaluation soll die Wirkung hinsichtlich der Präventionsarbeit in zwei unterschiedlichen Gefährdungsbereichen aufgezeigt werden: Postzustellung (DHL) und industrielle Fertigung (Stahlbetrieb HKM).

Die Relevanz für die gesetzliche Unfallversicherung ist u. a. darin zu sehen, dass die im Rahmen des Projekts erarbeiteten und evaluierten SRF-Trainingskonzepte eine sinnvolle und noch fehlende Ergänzung zu bisherigen Präventionsangeboten der Unfallversicherungsträger darstellen und somit das gesamte Spektrum der Verhältnis- und Verhaltensprävention von Beschäftigten abdecken. Am Ende des Projekts steht ein evaluiertes Trainingsprogramm inklusive aller Trainingsmaterialien zur Verfügung, das anschließend vor Ort in den Betrieben prinzipiell eingesetzt werden kann. Ein Konzept zur Durchführung der Trainingsmodule durch die Unfallversicherer und eine Beschreibung der technischen Voraussetzungen für die Durchführung im Betrieb werden nach Projektende zur Verfügung gestellt. Es ist geplant, dass die notwendige Hardware beim IFA am Ende des Projekts zur Verfügung stehen wird und von interessierten Unfallversicherungsträgern entliehen werden kann. Die Unfallversicherungsträger könnten so die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt in Mitgliedsbetrieben testen und prüfen, ob diese oder Teile hiervon in bestehende Programme zur SRF-Prävention integriert werden können.

Insgesamt ist hierdurch eine qualitative Verbesserung der Arbeitssituation, die mit einer Verringerung der Anzahl von SRF-Unfällen einhergeht, zu erwarten. Ferner werden die Arbeits- und Beschäftigungsfähigkeit der Zielgruppe bis zum Renteneintritt gefördert sowie ein Beitrag zur Erhöhung der Motivation und Förderung der Gesundheit geleistet. Darüber hinaus könnten die im Rahmen dieses Forschungsprojekts eingesetzten Inertialsensorsysteme (IMUs: eine Kombination aus Beschleunigungs-, Gyroskopsensoren) perspektivisch so weiterentwickelt werden, dass sie zur Gefährdungsbeurteilung von SRF-Unfallgefahren in der betrieblichen Praxis einsetzbar sind.

3. Methodik und Studiendesign des Gesamtvorhabens

Experimentelles Studiendesign

Die Studie gliederte sich in insgesamt vier Messzeitpunkte und zwei Messtage (Abbildung 1). Vor dem ersten Messtag füllten die Teilnehmenden einen Eingangsfragebogen aus (Zeitpunkt T0). Am ersten Messtag absolvierten sie ein proaktives und reaktives Trainingsprogramm, welches jeweils aus einer Trainingsintervention, in der Mechanismen trainiert bzw. verbessert werden sollten, sowie Tests, um die Wirksamkeit des Transfers der trainierten Fähigkeiten auf reale Alltagssituationen zu evaluieren. Aus dem bereits bestehenden proaktiven VR-Training des BGHW-Lagerhallensimulators wurde eine virtuelle Stadtumgebung für die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL entwickelt und die Lagerhalle durch HKM-spezifische Gefährdungen ergänzt. Vor Durchlaufen der SRF-Schulungssimulation erhielten alle Teilnehmenden eine kurze theoretische Einführung zum Thema SRF-Gefährdungen sowie dem STOP-Prinzip. Die Teilnehmenden erhielten eine Einführung in die Nutzung des Virtualizers, mit dem sie die VR-SRF-Schulungssimulation durchliefen. Anschließend führten die HKM-Mitarbeitenden die Aufgabe in der virtuellen Lagerhalle und Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL in der virtuellen Stadt durch. Um ihre Erfahrung mit dem Virtualizer und der Schulungssimulation zu bewerten, füllten die Teilnehmenden danach einen Fragebogen aus. Zur Überprüfung der Sensibilisierung hatten sie anschließend die Aufgabe, mögliche SRF-Gefährdungen in unternehmensspezifischen 360°-Umgebungsphotos zu erkennen. Das reaktive Perturbationstrainingsprogramm beinhaltete als Trainingsintervention (Int) ein Perturbationstraining auf dem Laufband, das durch gezielte Störungen (Perturbationen) während des Gehens zu einer adaptiven Verbesserung der Mechanismen der dynamischen Stabilitätskontrolle führt (Epro et al., 2018a, Epro et al., 2018b, König et al., 2019a, König et al., 2019b). Dafür wurde ein Anteil der Teilnehmenden auf zwei Interventionsgruppen aufgeteilt, welche jeweils verschiedene Perturbationstrainingsarten (Intervention I und Intervention II) absolvierten. Interventionsgruppe I absolvierte dabei ein Perturbationstraining, in welchem die Perturbationen während des Gehens mittels eines Seilzugsystems ausgelöst wurden (mechanisches Perturbationstraining, MECH). Für die Interventionsgruppe II hingegen wurden die Perturbationen mittels einer VR-Brille durch Rotation (Kippen/Verdrehen) des virtuellen Bildes induziert (VR-basiertes Perturbationstraining, VR). Zur Evaluation der Wirksamkeit beider Perturbationstrainingsarten wurde ein standardisierter SRF-Parcours entwickelt, auf welchem die Teilnehmenden vor (Pre Intervention; Pre Int, Zeitpunkt T1) und nach (Post Intervention; Post Int, Zeitpunkt T2) dem Training auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Retention Intervention; Ret Int, Zeitpunkt T3) auf reale, ebenerdige, unvorhersehbare SRF-Situationen (Stolpern, Rutschen & Fehltreten) für zwei Ganggeschwindigkeiten (ihre bevorzugte und eine schnellere Ganggeschwindigkeit) reagieren sollten. Um dabei den Einfluss möglicher Adaptationseffekte nach mehrmaliger Absolvierung des SRF-Parcours einschätzen zu können, wurde im Vorfeld der Studie zudem eine Kontrollgruppe (CON) definiert, welche ebenfalls den Parcours wie die Interventionsgruppen dreimal absolvierte (Pre vs. Post vs. Ret), allerdings keines der beiden Perturbationstrainings durchführte.

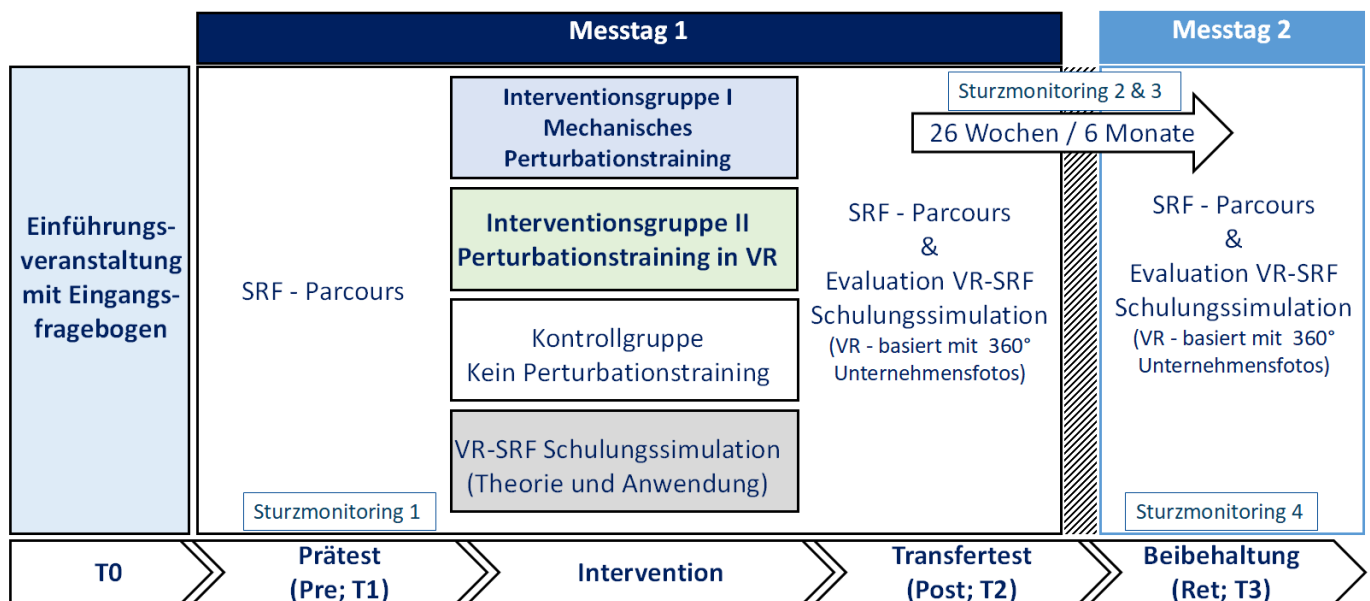


Abbildung 1: Studiendesign mit den vier verschiedenen Messzeitpunkten (T0, T1, T2 und T3) und den Trainingsinterventionen aufgeteilt auf die beiden Messtage.

Stichprobe

Für die Durchführung der Studie wurde vor Beginn der Messungen ein positives Votum seitens der Ethikkommission der Hochschule Koblenz eingeholt. Das Projekt wurde in Kooperation mit den Unternehmen Hüttenwerke Krupp Mannesmann (HKM) und der Deutschen Post DHL durchgeführt (deren Mitarbeitende an der Studie teilgenommen haben).

Vorstellung der Praxispartner:

Hüttenwerke Krupp Mannesmann (HKM) produziert mit 3000 Mitarbeitenden jährlich ca. vier Millionen Tonnen Stahl. Die Stahlherstellung ist aufgrund ihres komplexen soziotechnischen Systems eine der gefährlichsten Industrien. Einerseits verwendet sie Hochtechnologie, andererseits ist sie arbeitsintensiv (Verma et al., 2014). Zu den Produkten von HKM gehören Brammen mit Breiten von bis zu 2,1m für die Verarbeitung von Großrohren und Karosseriebauteilen und Rundstahl mit Durchmessern von 180 bis 406mm und Längen von bis zu 14,5m für Schmiedezwecke und die Herstellung nahtloser Rohre. HKM hat eine eigene Werkfeuerwehr, die in die Studie ebenfalls mit einbezogen werden soll.

SRF-Unfälle in 2019 waren z. B. Umknicken beim Gehen vom Pausenraum über eine Schiene zu einem Verteilerwagen, Stolpern im Gleisbereich, Gehen über eine Bahnschwelle, auf der ein Stein lag, Ausrutschen auf dem Weg zur Kranfahrer-Kabine, Ablenkung (z. B. durch Ansprechen) beim Absteigen von einer Löschmaschine und anschließendes Umknicken beim nächsten Schritt (Aufsetzen des Fußes auf den Boden). In allen Fällen wurden gültige Regelungen (Betriebsanweisungen, Arbeitsanweisungen, Unterweisungen, HKM-Richtlinien und Gefährdungsbeurteilung) angewendet.

Deutsche Post DHL Deutschland stellt als größtes Postunternehmen Europas in Deutschland mit rund 118.600 Zustellenden an jedem Werktag etwa 49 Millionen Briefe und rund 5,9 Millionen Pakete zu. Gefährdungen entstehen für Deutsche Post DHL vor allem auf den Wegen zu den 6.650 Packstationen, 109.500 Briefkästen, 10.500 Paketshops oder 13.000 Filialen (Deutsche Post DHL, 2021). Zu den häufigsten Unfallursachen bei der Deutschen Post DHL zählen Stolpern über Bord- und Rinnen, Rutschen durch Witterungseinflüsse (Schnee, Regen, Laub), Mängel an Verkehrswegen sowie Ablenkung beim Gehen (z. B. durch Lesen der Empfänger von Briefen und Paketen).

Probandenkollektiv

Insgesamt haben 113 gesunde Mitarbeitende freiwillig an der Studie teilgenommen, davon 58 Mitarbeitende der Firma HKM und 55 Mitarbeitende der Deutschen Post DHL. Zu Beginn der Studie wurden die Teilnehmenden schriftlich über den Inhalt und Ablauf der Studie sowie über das entsprechende

Datenschutzkonzept informiert und gaben ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme. Die Teilnehmenden der Studie teilten sich, wie in Tabelle 1 dargestellt, auf die beiden Praxispartner und Messtage auf.

Tabelle 1: Verteilung der Teilnehmenden auf Praxispartner, Messzeitpunkte und Trainings- bzw. Evaluationselemente.

Messzeitpunkt	HKM	DHL
<i>Einführungsveranstaltung T0</i>	75	63
<i>Erster Messtag</i>	58	55
<i>SRF-Schulungssimulation</i>	57	48
<i>Perturbationstraining und Parcours</i>	55	55
<i>Vollständiges Training</i>	54	48
<i>Zweiter Messtag</i>	34	27
<i>360° Unternehmensfotos</i>	33	24
<i>Parcours</i>	33	27

Drei Mitarbeitende von HKM absolvierten nur die VR-SRF-Schulungssimulation, da sie die Auswahlkriterien für das körperliche Sturztraining nicht erfüllen konnten (keine Bewegungseinschränkungen durch neurologische Erkrankungen oder Verletzungen des Bewegungsapparates). Ein*e Mitarbeiter*in der Firma HKM absolvierte nur das körperliche Sturztraining, da die VR-SRF-Schulungssimulation aufgrund von Übelkeit abgebrochen werden musste. Somit nahmen 54 Mitarbeitende am vollständigen Training teil. Seitens der Post/DHL haben insgesamt 55 Mitarbeitende am ersten Messtag teilgenommen. Sieben Mitarbeitende durchliefen nur das Training und den Parcours, da sie die VR-SRF-Schulungssimulation aufgrund von Übelkeit abbrechen mussten. Insgesamt nahmen 48 Mitarbeitende der Post/DHL am gesamten Training teil. An dem reaktiven Perturbationstrainingsprogramm haben am ersten Messtag insgesamt 110 Mitarbeitende teilgenommen (55 pro Unternehmen), aufgeteilt in jeweils 40 Teilnehmende pro Interventionsgruppe (MECH und VR) und 30 Teilnehmende in der Kontrollgruppe (CON, Tabelle 2). Das Perturbationstrainingsprogramm wurde nur von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern absolviert, bei denen keine körperlichen Einschränkungen des Bewegungsapparates z. B. aufgrund von muskuloskelettalen oder neurologischen Erkrankungen vorlagen, die zu einem erhöhten Verletzungsrisiko bei der Durchführung des Trainingsprogramms geführt hätten.

Tabelle 2: Demographische Daten (Mittelwert \pm Standardabweichung) mit Geschlechterverteilung der Teilnehmenden in der Kontrollgruppe CON sowie den beiden Interventionsgruppen MECH und VR). N ist die Anzahl der Teilnehmenden in der jeweiligen Gruppe

	Anzahl je Unternehmen	Geschlecht	Alter (Jahre)	Größe (m)	Gewicht (kg)	BMI (kg/m ²)
CON N = 30	15	m = 20	42.4 \pm 12.1	1.8 \pm 0.1	85.6 \pm 10.0	25.9 \pm 2.9
		w = 10	44.3 \pm 12.5	1.7 \pm 0.1	75.0 \pm 14.7	27.2 \pm 4.4
MECH N = 40	20	m = 30	42.0 \pm 9.8	1.8 \pm 0.1	88.1 \pm 14.5	26.8 \pm 4.2
		w = 10	37.5 \pm 11.8	1.7 \pm 0.1	68.9 \pm 14.3	23.6 \pm 3.7
VR N = 40	20	m = 29	42.7 \pm 12.5	1.8 \pm 0.1	80.9 \pm 13.3	25.4 \pm 3.7
		w = 11	39.3 \pm 10.6	1.7 \pm 0.1	76.6 \pm 13.5	26.8 \pm 3.7

Summe 110	m = 79	42.3 ± 11.3	1.8 ± 0.1	84.8 ± 13.3	26.0 ± 3.8
	w = 31	40.3 ± 11.6	1.7 ± 0.1	73.6 ± 14.1	25.9 ± 4.1

Am zweiten Messtag absolvierten 62 Teilnehmende (33 HKM, 29 Deutsche Post DHL, gesamte Abbruchquote zum ersten Messtag ca. 44%) erneut den SRF-Parcours (18 CON, 24 MECH, 20 VR), um so mögliche Beibehaltungseffekte der Trainingsinterventionen zu untersuchen.

Projektplan und Abweichungen während des Projekts

Der Zeitplan des Projekts wich in einigen Arbeitspaketen (AP) in geringem Ausmaß vom ursprünglichen Zeitplan des Projekts ab. Die vorbereitenden Aufgaben in den beteiligten Unternehmen (AP1), die Erstellung und Evaluierung des SRF-Parcours (AP3), die Einführung und das Monitoring (AP7) sowie die Datenauswertung/-interpretation (AP10) haben ein Quartal länger gedauert als im Projektplan vorgesehen (grün markiert). Die Öffentlichkeitsarbeit (AP11) konnte hingegen drei Quartale früher begonnen werden. Die Arbeitspakete AP8 (Trainingsdurchführung und Prä-Post-Trainingsmessung) und AP9 (Monitoring 2 und Retentionsmessung) endeten jeweils zwei Quartale früher (grau markiert). Das geplante Arbeitspaket 5 (Auswahl und Validierung IMU) wurde gestrichen. Die Gründe dieser Anpassungen werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 3. Ursprünglicher und ausgeführter Zeitplan des Projektes mit Arbeitspaketen (AP). Erweiterte Arbeitspakete sind in grün markiert, gekürzte in grau.

Arbeitspaket	Projektquartale											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	I	II
AP 0												
AP 1												
AP 2												
AP 3												
AP 4												
AP 5												
AP 6												
AP 7												
AP 8												
AP 9												
AP 10												
AP 11												

Aufgrund der Komplexität der Mechanismen im SRF-Parcours wurden während der Entwicklung mehrere Lösungsansätze für die Umsetzung der Gangperturbationen getestet, um die gewünschte Funktionsweise zu erhalten. Zudem sind vereinzelt Lieferengpässe bei den entsprechenden Bauteilen aufgetreten. Zusammenfassend wurde deswegen das Arbeitspaket 3 (Erstellung und Evaluierung des SRF-Parcours) um ein Quartal verlängert. Arbeitspaket 5 wurde durch den Entschluss, ein kommerzielles Sensorsystem einzusetzen, neu konzipiert. Es wurde eine Validierungsstudie durchgeführt, in der das XSENS-System mit einem optischen Messsystem verglichen wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass Xsens sehr gut als kinematisches Messsystem für die Erreichung der Projektziele geeignet ist. Ein Software-Tool zur Erfassung der Gangstabilität und eine Schnittstelle zur CUELA-Software des IFA zur biomechanischen Analyse der IMU-Daten wurden entwickelt. Durch zeitliche Restriktionen in der Verfügbarkeit der Mitarbeitenden der Deutschen Post DHL aufgrund des Saisongeschäftes im Dezember wurden die Einführungsveranstaltung sowie die Online-Befragung (Zeitpunkt T0) in den Januar 2023 verlegt und das Arbeitspaket 7 entsprechend um ein Quartal verlängert. Ursprünglich sollten die Messungen innerhalb der

Studie getrennt einmal auf dem Gelände der Firma HKM in Duisburg (für die dortigen Mitarbeitenden) sowie am RheinAhrCampus in Remagen (für die Mitarbeitenden der Deutschen Post DHL, Standort Bonn) durchgeführt werden, wobei ein Transport der Trainingselemente zwischen den beiden Standorten eingeplant war. Zu Beginn des Projektes wurde allerdings seitens der Firma HKM das Angebot unterbreitet, die gesamten Messungen, d. h. für die Mitarbeitenden beider Partnerfirmen, in den Räumlichkeiten von HKM durchzuführen. Aufgrund der vorher geplanten logistischen Herausforderung in Bezug auf den Transport der Trainingselemente zwischen Remagen und Duisburg wurde das Angebot der Firma HKM seitens der Forschungspartner angenommen. Zeitgleich wurde innerhalb der Deutschen Post DHL der Kontakt zum Standort in Duisburg aufgenommen, um die dortigen Mitarbeitenden als Teilnehmende zu akquirieren. Da allerdings dafür die Zustimmung bestimmter Personenkreise am Standort Duisburg (u. A. Standortleitung, Arbeitssicherheit, betriebsärztlicher Dienst) eingeholt werden musste, wurden diese im Rahmen von mehreren Informationsveranstaltungen über das Projekt informiert. Zudem wurden die notwendigen Ansprechpartner am Standort Duisburg identifiziert und ebenfalls informiert. Dies führte dazu, dass das Arbeitspaket AP1 (Vorbereitende Aufgaben in den beteiligten Unternehmen) um ein Quartal verlängert werden musste. Durch die Zusammenlegung aller Messungen an den Standort der Firma HKM konnten außerdem die Messungen der Mitarbeitenden beider Firmen simultan erfolgen und der Transport der Trainingselemente zwischen den Standorten war nicht notwendig. Dadurch verkürzte sich der Zeitraum für die Messungen sowie die entsprechenden Arbeitspakete AP8 (Trainingsdurchführung und Prä-Post-Trainingsmessung) und AP9 (Monitoring 2 und Retentionsmessung) um jeweils zwei Quartale. Darüber hinaus ergaben sich zu Beginn der ersten Messphase sowie in der zweiten Messphase Schwierigkeiten bei der (Re-)Akquise von Teilnehmenden in beiden Unternehmen aus verschiedenen Gründen, u. a. durch gewerkschaftlich organisierte Streiks, Krankheit, Urlaub und optimierbare Kommunikation in den Unternehmen über das Projekt. Dadurch konnte die vor Projektbeginn festgelegte Stichprobengröße von 140 Teilnehmenden (70 pro Betrieb) nicht erreicht werden. Allerdings zeigten sich sowohl für das proaktive als auch das reaktive Trainingsprogramm, dass trotz der verringerten Stichprobengröße die vorliegenden Daten ausreichend waren, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse für den ersten Messtag zu erzielen. Für den zweiten Messtag war die resultierende Stichprobengröße allerdings nicht immer ausreichend genug, worauf in den entsprechenden Kapiteln tiefer eingegangen wird. Die Stichprobengröße wurde bei Antragstellung mit einem Studiendesign berechnet, das drei unterschiedliche Schwierigkeitsstufen beim Durchlaufen des SRF-Parcours beinhaltet. Die Teilnehmenden sollten jeweils mit der niedrigsten (einfachsten) Stufe starten und nach erfolgreichem Durchlaufen dieser in die nächsthöhere Stufe übergehen. Sollten die Teilnehmenden schon bei der niedrigsten Stufe deutlich aus dem Gleichgewicht gebracht werden, wären sie für die restlichen Durchgänge auf dieser Stufe verblieben. Dadurch wurde im Vorfeld bereits eingeplant, dass die Anzahl der Wiederholungen in den verschiedenen Schwierigkeitsstufen zwischen den Teilnehmenden stark variieren wird. Dies wurde auch bei der Berechnung der Stichprobengröße berücksichtigt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um Stürze der Teilnehmenden zu vermeiden, da vor Beginn der Studie nicht ersichtlich war, ob über dem SRF-Parcours ein entsprechendes Sicherungssystem zur Sturzprävention vorhanden sein würde. Durch die Zusammenlegung der Messungen von der Deutschen Post DHL und HKM in die Räumlichkeiten der Firma HKM konnte nun ein Sicherungssystem über dem SRF-Parcours montiert werden, wodurch die Implementierung unterschiedlicher Störungsstärken entfiel. Um dennoch die Schwierigkeit des Parcours variabel zu halten, durchliefen die Teilnehmenden den Parcours, wie bereits erwähnt, in zwei unterschiedlichen Ganggeschwindigkeiten. Da alle Teilnehmenden den SRF-Parcours in beiden Ganggeschwindigkeiten absolviert haben, ist die Anzahl der Wiederholungen innerhalb der Probanden identisch.

Durch einen nicht vorsehbaren Mehraufwand in der abschließenden Analyse der Messdaten der beiden Trainingsinterventionen auf dem Laufband und des SRF-Parcours aufgrund teils verschiedener Strategien zur Bewältigung der Perturbationen durch die Teilnehmenden wurde das Arbeitspaket AP10 (Datenauswertung/-interpretation) um ein Quartal verlängert. Vereinzelt vorliegende Ergebnisse aus den

Messungen standen allerdings bereits früher als erwartet zur Verfügung, wodurch die Präsentation dieser Ergebnisse und die damit verbundene Öffentlichkeitsarbeit (AP11) drei Quartale früher erfolgen konnten.

In der ersten Messphase wurden einige Fragebögen nicht direkt ausgefüllt, jedoch meist am selben Tag nachgeholt. Bei Teilnehmenden mit Cyber-Sickness nach der VR-SRF-Schulung fehlen jedoch teils Daten zur Schulung, was bei der Auswertung zu berücksichtigen ist. Die Symptome wurden dennoch dokumentiert. Die Teilnahme am Sturzmonitoring (zwei Wochen und drei Monate nach dem ersten Trainingstag) war geringer.

Auf weitere Abweichungen vom Projektplan bzw. festgestellte Limitationen und deren Einfluss auf die Studie wird im Folgenden an den entsprechenden Stellen detaillierter eingegangen.

4. Beschreibung der Arbeitsbedingungen und des SRF Risikos

Methodik der fragebogenbasierte Datenerhebung

In den Einführungsveranstaltungen beider Unternehmen wurden Beschreibungen der Arbeitsbedingungen, Eigenschaften der Mitarbeitenden und eine Einschätzung des SRF-Risikos abgefragt. Es wurden relevante demografische Daten (Geschlecht, Alter, Größe, Gewicht, Unternehmen, wie lange berufstätig, seit wann bei Praxisunternehmen) abgefragt. Um Risikofaktoren der Tätigkeit zu erfassen, die SRF-Ereignisse begünstigen können, wurden ausgewählte Konstrukte des Instruments zur stressbezogenen Arbeitsanalyse (ISTA; Semmer et al., 1995) und die Gewissenhaftigkeit der Mitarbeitenden (Schallberger & Venetz, 1999) nach Vorbild von Elfering et al. (2013) erfasst. Vom ISTA beantworteten die Teilnehmenden Items zur Komplexität ($\alpha = .74$), Zeitdruck ($\alpha = .88$) und Konzentrationsanforderungen ($\alpha = .72$) auf unterschiedlichen Skalen (Zustimmung, wie ähnlich der eigene Arbeitsplatz dem beschriebenen ist, oder als Häufigkeitsangaben von praktisch nie (1) bis sehr viel (5)). Gewissenhaftigkeit ($\alpha = .80$) wurde entlang der Einordnung auf einer Skala von gegensätzlichen Beschreibungen von Gewissenhaftigkeit erfasst, beispielsweise sehr unsorgfältig (1) bis sehr gründlich (6). Um weitere Faktoren zu erfassen, die das Risiko von SRF-Ereignissen beeinflussen können, wurden weitere arbeitsbezogene Faktoren nach Swaen et al. (2014) abgefragt. Dies beinhaltete Angaben zu arbeitsbezogener Sicherheitsorientierung ($\alpha = .78$; bspw. „Meine Vorgesetzten legen großen Wert auf sicheres Arbeiten.“) entlang einer Skala von stimme nicht zu (1) bis stimme zu (5), der Beschreibung von Stressfaktoren (bspw. „Ich bin häufig gestresst oder in Eile.“) und Arbeitsbedingungen (bspw. „Ich bin meist länger als 20 Minuten auf den Beinen.“) entlang der Skala nie (1) bis immer (5). Des Weiteren wurden die Teilnehmenden nach ihren Erfahrungen mit Anwendungen der virtuellen Realität gefragt, ihre Sportlichkeit erfasst und gewisse körperliche Voraussetzungen für das Training abgefragt. Zur Einholung der Bewertung des Risikos der Teilnehmenden am eigenen Arbeitsplatz, ein SRF-Ereignis zu erleben, gaben sie Risikoeinschätzungen von verschiedenen Orten, Aktivitäten und Bedingungen für SRF-Unfälle entlang kein Risiko (0) bis ein sehr hohes Risiko (3), angelehnt an Khaday et al. (2021) und Bentley (1998) an. Zum Schluss füllten sie Items zur Erfassung ihrer sturzbezogenen physischen Selbstwirksamkeit ($\alpha = .84$; orientiert an Nakamura et al., 2016) entlang stimme nicht zu (1) bis stimme zu (4; bspw. „Mein Körper reagiert bei unerwarteten Situationen reflexartig richtig.“) aus.

Deskriptive Ergebnisse

Praxisunternehmen HKM

Beschreibung der Arbeitsbedingungen von HKM

Die Arbeitstätigkeit der Mitarbeitenden wurde im Durchschnitt mit einer eher höheren Komplexität beschrieben ($M = 3.8$, $SD = 0.61$). Erheblichen Zeitdruck erlebten die Mitarbeitenden eher selten bis gelegentlich ($M = 2.6$, $SD = 0.93$), während hohe Konzentrationsanforderungen im Durchschnitt einmal

täglich vorkamen ($M = 2.99$, $SD = 0.72$). Die Sicherheitsorientierung im Arbeitsumfeld wurde von den Mitarbeitenden als hoch beschrieben ($M = 4.44$, $SD = 0.52$). Positive stressbezogene Faktoren des Arbeitsumfelds (gute Beziehung mit Vorgesetzten, Möglichkeit zur Selbstorganisation, mentale Herausforderungen) traten öfter auf (Abbildung 2). Stress negativ beeinflussende Faktoren (Eile, Ablenkung, emotionale Anstrengung, hohe Arbeitsbelastung, Schwierigkeit Unterstützung anzufordern, und Zeitdruck) traten selten bis manchmal auf. Die Mitarbeitenden gaben an, eher weniger risikofreudig zu sein ($M = 2.60$, $SD = 0.90$, Abbildung 2).

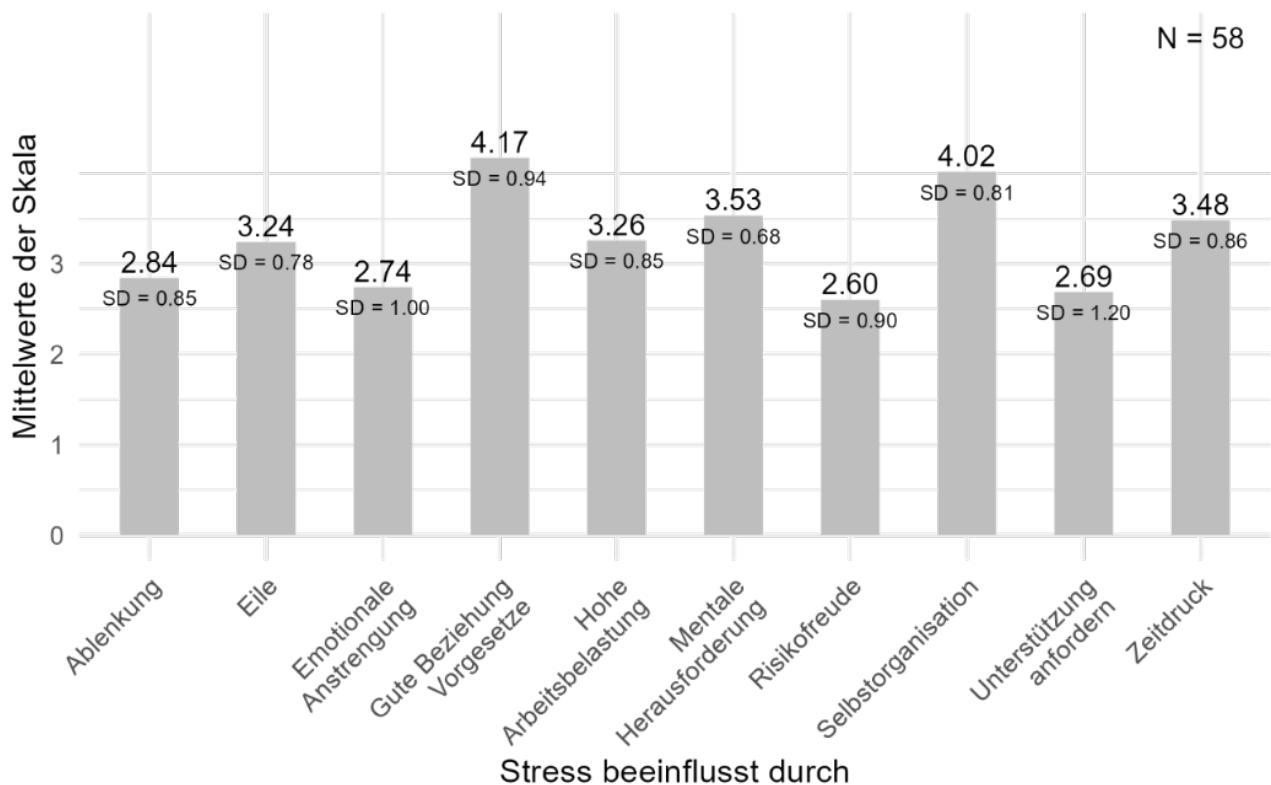


Abbildung 2: Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der stressbezogenen Faktoren im Arbeitsumfeld von HKM. Die Bewertungsskala verlief entlang nie (1), selten (2), manchmal (3), oft (4) und immer (5).

Mitarbeitende von HKM arbeiteten gelegentlich mehr als acht Stunden am Tag ($M = 3.17$, $SD = 1.37$), waren dafür aber öfter mehr als 20 Minuten auf den Beinen ($M = 3.62$, $SD = 1.23$). Sie gaben an, selten oder oft Materialien zu tragen ($M = 2.76$, $SD = 1.25$) und stiegen gelegentlich viele Treppen ($M = 3.29$,

$SD = 1.11$). Die meisten der Teilnehmenden gaben an, fast nie mit Maschinen zu arbeiten ($M = 2.41$, $SD = 1.55$), einige wenige taten dies aber öfter (Verteilung siehe Abbildung 3).

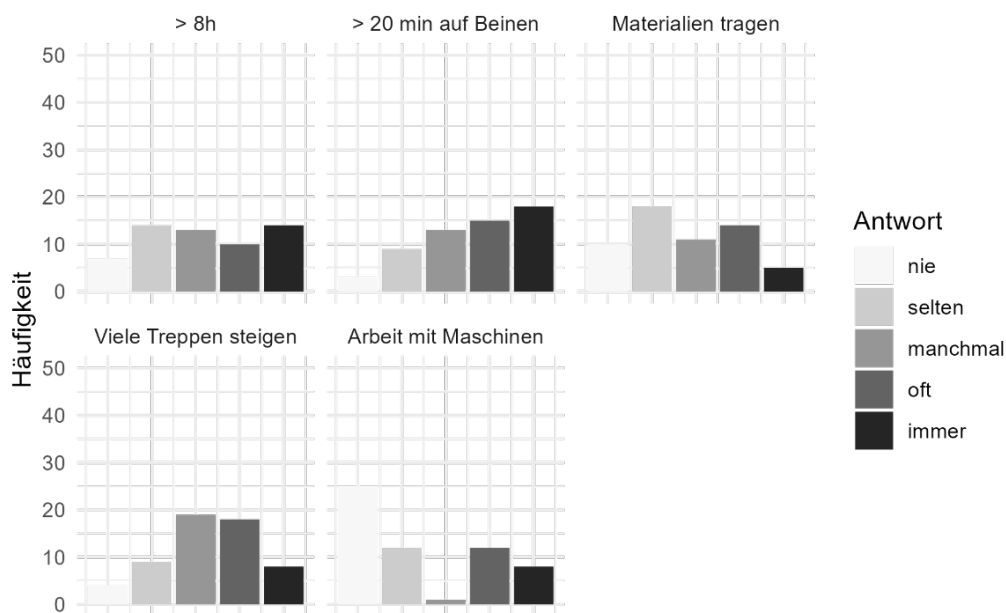


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung zur Beschreibung der Arbeitsbedingungen bei HKM. Die Bewertungsskala verlief entlang nie (1), selten (2), manchmal (3), oft (4) und immer (5).

Die Mitarbeitenden von HKM bewerteten die generellen Risiken für Stolper-, Rutsch- und Fehltretereignisse (SRF-Ereignisse) am Arbeitsplatz als moderat ($M = 2.02$, $SD = 0.87$). Für die Bewertung der spezifischen Arbeitsumgebungen siehe Tabelle 3. Das höchste Risiko wurde beim Steigen von Treppen und bei der Überquerung des Gleises angegeben. Weitere genannte Risikoorte waren bestimmte Bereiche in der Produktion wie in der Gießhalle, in der Nähe der Förderbandstrecken oder Kranbahnen, bestimmte Wege auf Lichtgitterrost oder in Lagerbereichen verschiedener Stoffe/Materialien sowie Sozialräume.

Tabelle 3: Risikobewertung verschiedener Orte am Arbeitsplatz von HKM. Bewertungsskala verlief entlang niedrig/nicht vorhanden (1), moderat (2), hoch (3) bis sehr hoch (4).

Orte	Betrieb	Rampe	Weg	Gleis	Treppe	Straße	Werkstatt	Gang	Lager	Büro
<i>M</i>	2.60	1.88	1.83	2.36	2.53	1.91	2.03	1.66	1.95	1.41
<i>SD</i>	0.94	0.77	0.73	0.95	0.92	0.78	0.75	0.66	0.74	0.62

Das allgemeine Risiko für SRF-Ereignisse zu verschiedenen Bedingungen am Arbeitsplatz wurde als moderat bis hoch bewertet ($M = 2.62$, $SD = 0.89$; Tabelle 4). Das größte Risiko wurde bei Eis, Schnee und Bodenunebenheiten gesehen. Weitere risikobehaftete Bedingungen wurden mit Lärm, schlechten Sichtverhältnissen, sandigen oder schlammigen Untergründen und generell unübersichtlichen Situationen genannt. Schwerfälligkeit und Ungelenkigkeit wurden als individuelle Risikofaktoren zusätzlich angegeben.

Tabelle 4: Risikobewertung verschiedener Bedingungen am Arbeitsplatz von HKM. Bewertungsskala verlief entlang niedrig/nicht vorhanden (1), moderat (2), hoch (3) bis sehr hoch (4).

Bedingungen	Wetter	Eis	Schnee	Nässe	Laubblätter	Schotter	Bodenunebenheiten
<i>M</i>	2.55	3.03	2.83	2.53	2.36	2.29	2.71
<i>SD</i>	0.78	0.92	0.90	0.73	0.93	0.88	0.86

Das allgemeine Risiko bei verschiedenen Aktivitäten auf der Arbeit wurde ebenfalls mit moderat bis hoch bewertet ($M = 2.40$, $SD = 0.91$). Das größte Risiko bestand beim Arbeiten auf einer Baustelle (Tabelle 5). Als weitere risikobehaftete Aktivitäten wurden Routineaufgaben sowie Ausnahmesituationen wie Löscheinsätze oder Menschenrettung genannt.

Tabelle 5: Risikobewertung verschiedener Aktivitäten am Arbeitsplatz von HKM. Bewertungsskala verlief entlang niedrig/nicht vorhanden (1), moderat (2), hoch (3) bis sehr hoch (4).

Aktivität	Fahrzeug- ausstieg	Fahrrad- abstieg	Ohne Sicherheits- schuhe	In Eile	Materialien tragen	Hindernisse	Ablenk- ung	Bau- stelle
<i>M</i>	2.03	1.91	2.43	2.55	2.45	2.45	2.57	2.79
<i>SD</i>	0.88	0.86	0.94	0.88	0.86	0.84	0.80	0.93

Eigenschaften der Mitarbeitenden von HKM

Von HKM konnten 58 Mitarbeitende für die Stichprobenbeschreibung berücksichtigt werden. Insgesamt nahmen sieben Frauen und 51 Männer an der Studie teil. Das durchschnittliche Alter der HKM-Mitarbeitenden betrug 41 Jahre ($SD = 11.98$, $min = 19$, $max = 61$). Die meisten Mitarbeitenden von HKM waren bereits seit über 15 Jahren berufstätig (67%), mit der größten Gruppe sogar seit 20 bis 30 Jahren (36%). Dabei gaben 21% an, seit 5–15 Jahren und ca. 12% seit weniger als 5 Jahren berufstätig zu sein. Die Hälfte der Teilnehmenden arbeitete seit mehr als 15 Jahren bei HKM und je ein Viertel fünf bis 15 Jahre bzw. unter fünf Jahren. Die meisten arbeiteten in Vollzeit (81%) und im Schichtdienst (10%). Die Mitarbeitenden zeichneten sich durch einen hohen Grad an Gewissenhaftigkeit ($M = 4.8$, $SD = 0.59$) aus. Sie gaben eine moderate sturzbezogene Selbstwirksamkeit zu Beginn des Projekts an ($M = 3.15$, $SD = 0.46$). Ungefähr 40% der Mitarbeitenden gaben an, bereits Erfahrung mit VR-Anwendungen gesammelt zu haben, wobei die Nutzung bei den meisten in den letzten sechs Monaten oder im letzten Jahr erfolgte. Zwei Personen gaben an, regelmäßig eine VR-Anwendung zu nutzen. 75% der teilnehmenden Mitarbeitenden von HKM gaben an, regelmäßig Sport zu treiben. Im Durchschnitt waren sie drei Tage ($SD = 1.18$) und ungefähr 4,5 Stunden ($SD = 2.41$) in der Woche aktiv. Die häufigsten Aktivitäten waren allgemeines Fitnesstraining (Fitnessstudio, Kraftsport), Fußball, Joggen, Badminton, Mountainbiking und Tennis. Yoga, Kampfsport und Tanzen waren, wenn auch selten, ebenfalls vertreten.

Praxisunternehmen Deutsche Post/DHL:

Beschreibung der Arbeitsbedingungen der Post/DHL

Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL empfanden ihre Arbeitstätigkeit im Durchschnitt als moderat komplex ($M = 2.91$, $SD = 0.79$). Erheblichen Zeitdruck erlebten sie durchschnittlich mindestens einmal am Tag, wenn nicht sogar häufiger ($M = 3.37$, $SD = 0.98$), während hohe Konzentrationsanforderungen gelegentlich vorkamen ($M = 3.00$, $SD = 0.81$). Die Sicherheitsorientierung im Arbeitsumfeld der Mitarbeitenden wurde als eher hoch beschrieben ($M = 3.91$, $SD = 0.72$). Faktoren der Arbeitsumgebung, die helfen, Stress zu reduzieren, traten öfter auf (gute Beziehung zu Vorgesetzten, Selbstorganisation), aber ebenso oft kam es zu Stress durch Eile, hohe Arbeitsbelastung und Zeitdruck (Abbildung 4). Gelegentlich kam es zu emotionaler Anstrengung, mentalen Herausforderungen und der Schwierigkeit Unterstützung anzufordern. Die Mitarbeitenden der Post/DHL gaben selten bis manchmal an, dass sie leicht abzulenken oder risikofreudig waren (Abbildung 4).

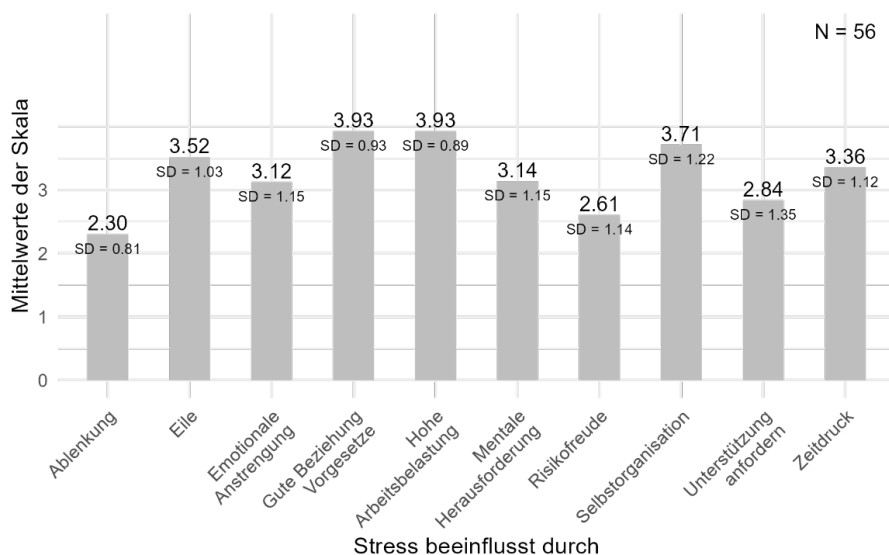


Abbildung 4: Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der stressbezogenen Faktoren im Arbeitsumfeld der Deutschen Post/ DHL. Die Bewertungsskala verlief entlang nie (1), selten (2), manchmal (3), oft (4) und immer (5).

Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL arbeiteten öfter mehr als acht Stunden am Tag ($M = 3.64$, $SD = 1.29$) und waren fast immer mehr als 20 Minuten auf den Beinen ($M = 4.70$, $SD = 0.85$). Sie trugen eigentlich immer Materialien ($M = 4.48$, $SD = 1.08$) und stiegen oft viele Treppen ($M = 4.12$, $SD = 0.99$). Die meisten der teilnehmenden Mitarbeitenden arbeiteten durchschnittlich nie bis selten mit Maschinen ($M = 1.89$, $SD = 1.38$; Verteilung siehe Abbildung 5).

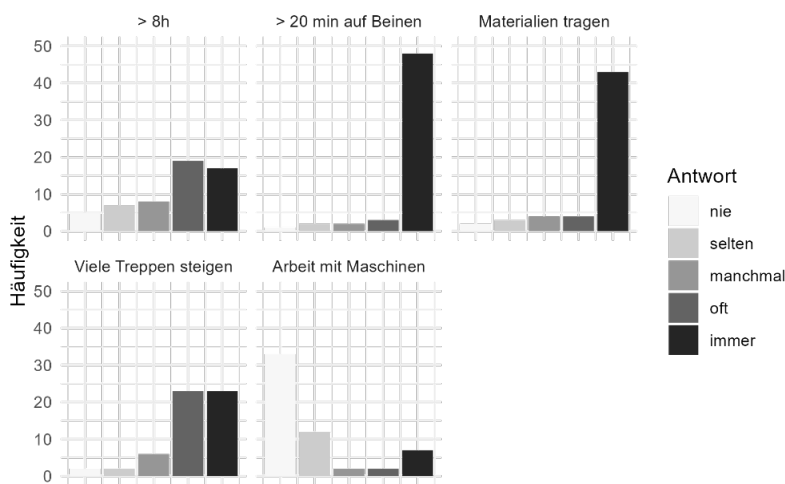


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung zur Beschreibung der Arbeitsbedingungen der Deutschen Post/ DHL. Die Bewertungsskala verlief entlang nie (1), selten (2), manchmal (3), oft (4) und immer (5).

Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL bewerteten die generellen Risiken für SRF-Ereignisse am Arbeitsplatz als moderat ($M = 1.97$, $SD = 0.97$). Für die Bewertung der spezifischen Arbeitsumgebungen siehe Tabelle 6. Das höchste Risiko (moderat) wurde beim Steigen von Treppen sowie beim Gang auf Straßen und Wegen erkannt. Weitere genannte Risikoorte waren die Pakethalle, Vorgärten, Bordsteinkanten an Straßen und Toiletten.

Tabelle 6: Risikobewertung verschiedener Orte am Arbeitsplatz der Deutschen Post/ DHL. Bewertungsskala verlief entlang niedrig/nicht vorhanden (1), moderat (2), hoch (3) bis sehr hoch (4).

Orte	Betrieb	Rampe	Weg	Gleis	Treppe	Straße	Werkstatt	Gang	Lager	Büro
M	2.20	1.77	2.43	1.66	2.73	2.66	1.32	1.95	1.64	1.32
SD	0.88	0.95	0.83	1.03	0.90	0.86	0.72	0.82	0.75	0.58

Das allgemeine Risiko für SRF-Ereignisse zu verschiedenen Bedingungen am Arbeitsplatz wurde als hoch bewertet ($M = 3.08$, $SD = 0.96$; Tabelle 7). Das größte und damit ein sehr hohes Risiko wurde bei Eis und Schnee gesehen. Zusätzlich genannte Bedingungen waren nasse/gefrorene Holzdielen, glatte Bodenbeläge (bspw. Marmor oder Fliesen) sowie umherliegende Schlingen von Zeitungen und im Weg stehende Gegenstände.

Tabelle 7: Risikobewertung verschiedener Bedingungen am Arbeitsplatz der Deutschen Post/ DHL. Bewertungsskala verlief entlang niedrig/nicht vorhanden (1), moderat (2), hoch (3) bis sehr hoch (4).

Bedingungen	Wetter	Eis	Schnee	Nässe	Laubblätter	Schotter	Bodenunebenheiten
<i>M</i>	3.07	3.61	3.46	3.05	2.93	2.39	3.05
<i>SD</i>	0.99	0.73	0.85	0.92	0.97	0.93	0.82

Das allgemeine Risiko bei verschiedenen Aktivitäten auf der Arbeit wurde von den Deutsche Post/DHL-Mitarbeitenden durchschnittlich eher hoch bewertet ($M = 2.56$, $SD = 1.05$). Das größte Risiko sahen sie beim Arbeiten auf einer Baustelle, wenn in Eile oder abgelenkt (Tabelle 8). Als weitere risikoreiche Aktivitäten wurden das Schieben von Postkarren und Hundebegegnungen genannt.

Tabelle 8: Risikobewertung verschiedener Aktivitäten am Arbeitsplatz von HKM. Bewertungsskala verlief entlang niedrig/nicht vorhanden (1), moderat (2), hoch (3) bis sehr hoch (4).

Aktivität	Fahrzeugausstieg	Fahrradabstieg	Ohne Sicherheitschuhe	In Eile	Materialien tragen	Hindernisse	Ablenkung	Baustelle
<i>M</i>	2.05	2.32	2.64	2.88	2.39	2.45	2.77	2.95
<i>SD</i>	0.94	1.01	1.15	1.01	1.04	0.97	0.97	1.02

Einstellung der Mitarbeitenden der Post/DHL

Insgesamt nahmen 56 Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL am ersten Messtag teil, welche sich auf 26 Frauen und 30 Männer aufteilten. Der Altersdurchschnitt betrug $M = 42.02$ ($SD = 10.87$, $min = 23$, $max = 63$). Die meisten Mitarbeitenden (46 %) waren bereits mehr als 20 Jahre berufstätig. Ungefähr 27% gaben weniger als 10 Jahre Berufserfahrung und 23% 10 bis 20 Jahre an. Davon waren 36 % bereits seit mehr als 20 Jahren bei der Deutschen Post/DHL angestellt. Viele (30%) waren seit weniger als fünf Jahren dort. Mit 20% arbeiteten einige Mitarbeitende auch seit fünf bis 10 Jahren bei der Deutschen Post/DHL. Die Mehrzahl der Mitarbeitenden (88%) arbeitete in Vollzeit, einige in (Alters-)Teilzeit (10%). Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL zeigten einen hohen Grad an Gewissenhaftigkeit ($M = 5.10$, $SD = 0.68$). Sie gaben eine moderate sturzbezogene Selbstwirksamkeit zu Beginn des Projekts an ($M = 3.11$, $SD = 0.51$). Etwas mehr als ein Drittel (36%) der Beschäftigten der Deutschen Post/DHL gaben an, bereits Erfahrung mit VR-Anwendungen zu haben, wobei die letzte Nutzung größtenteils in den letzten sechs Monaten stattfand oder über ein Jahr her war. Zwei Personen gaben an, regelmäßig eine VR-Anwendung zu nutzen. Von den Mitarbeitenden gaben 68% an, sportlich aktiv zu sein, mit durchschnittlich drei Tagen ($SD = 1.66$) und durchschnittlich 5.44 ($SD = 5.33$) Stunden Sport die Woche. Die häufigsten Aktivitäten bestanden aus Fitness- und Ausdauersport (Kraftsport, Joggen, Fahrradfahren und Schwimmen), verschiedenen Ballsportarten (Fußball, Badminton, Volleyball und Billard) sowie Kampfsport.

Inferenzstatistische Ergebnisse

Korrelationen der Eigenschaften von Mitarbeitenden von HKM und dortigen Arbeitsbedingungen

Nachfolgend werden die signifikanten Korrelationen der Eigenschaften der Mitarbeitenden, erfassten Arbeitsbedingungen, Risikowahrnehmung und SRF-Ereignisse für HKM dargestellt.

Tabelle 9. Signifikante Korrelationen nach Pearson zwischen den Eigenschaften der Mitarbeitenden und der Arbeitsumgebung, der beschriebenen Risikowahrnehmung und angegebenen SRF-Ereignissen bei HKM. N = 57, Geschlecht weiblich = 0, männlich = 1, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

	Geschlecht	Alter	Körper-gewicht	Berufs-erfahrung	Betriebs- zugehörigkeit
Risikowahrnehmung					
Betrieb	0.36 **		0.28 *		
Weg			0.48 ***		
Treppe	0.27 *		0.31 *		
Straße	0.30 *		0.43 ***		
Gang			0.46 ***		
Lager		-0.34 **		-0.30 *	-0.28 *
Büro			0.27 *		
Wetter	0.27 *				
Nässe	0.35 **				
Ablenkung		0.36 **		0.34 **	
SRF-Ereignis			-0.27 *		
SM1					
SM2	-0.62 ***		-0.42 **		
ISTA					
Komplexität				-0.27 *	
Zeitdruck				0.27 *	
Konzentrations- anforderungen				0.32 *	
Gewissenhaftigkeit				0.30 *	

Es zeigte sich, dass bei HKM-Mitarbeitenden das Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Berufserfahrung und Betriebszugehörigkeit jeweils in Zusammenhang mit der Risikowahrnehmung am Arbeitsplatz stehen. Darüber hinaus besteht eine Assoziation zwischen Geschlecht und Körpergewicht sowie der Wahrscheinlichkeit von SRF-Ereignissen. Berufserfahrung steht außerdem im Zusammenhang mit der stressbezogenen Bewertung des Arbeitsplatzes (Tabelle 9).

Tabelle 10. Signifikante Korrelationen nach Pearson zwischen den Eigenschaften der Arbeitsumgebung und der Mitarbeitenden und der von ihnen beschriebenen Risikowahrnehmung bei HKM. N = 57. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

	Komplexität	Zeitdruck	Konzentrations- anforderungen	Selbstwirksam-keit T0
Zeitdruck	0.27 *		0.63 ***	
Konzentrations- anforderungen		0.63 ***		
Risikowahrnehmung				
Betrieb	-0.26 *			
Werkstatt		0.32 *	0.31 *	
Eis			0.27 *	
Schnee			0.29 *	
Nässe			0.39 **	
Laubblätter				
Schotter			0.31 *	
Bodenunebenheiten			0.34 **	
Fahrzeugausstieg			0.36 **	
Ablenkung			0.39 **	0.33 *
Gewissenhaftigkeit			0.39 **	
Selbstwirksamkeit T0	-0.32 *			

Es wurde deutlich, dass bei HKM die stressbezogenen Aspekte (Zeitdruck, Komplexität und Konzentrationsanforderungen) teils stark miteinander korrelieren, aber auch verschieden mit der Risikowahrnehmung am Arbeitsplatz zusammenhängen (Tabelle 10).

*Tabelle 11. Signifikante Korrelationen nach Pearson zwischen den angegebenen SRF-Ereignissen und der von den Mitarbeitenden beschriebenen Risikowahrnehmung bei HKM. N = 57. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.*

SRF-Ereignis	2 Wochen vor T2	2 Wochen nach T2	2 Wochen vor T3
Risikowahrnehmung			
Betrieb	-0.26 *	-0.29 *	
Rampe			-0.35 *
Werkstatt	0.34 *		

Hier zeigte sich, dass bei HKM das Erleben oder Nicht-Erleben von SRF-Ereignissen im Zusammenhang mit der Risikowahrnehmung einiger Orte am Arbeitsplatz steht (Tabelle 11).

Korrelationen der Eigenschaften von Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL und dortigen Arbeitsbedingungen

Nachfolgend werden die signifikanten Korrelationen der Eigenschaften der Mitarbeitenden, erfassten Arbeitsbedingungen, Risikowahrnehmung und SRF-Ereignisse für die Deutsche Post/DHL dargestellt. Hier zeigten sich Zusammenhänge des Alters, der Betriebszugehörigkeit, der Komplexität der eigenen Tätigkeit, des Erlebens von Zeitdruck und Konzentrationsanforderungen mit der Risikowahrnehmung am Arbeitsplatz. Zudem hingen Betriebszugehörigkeit, Komplexität des Arbeitsplatzes und Zeitdruck negativ mit erlebten SRF-Ereignissen zusammen. Geschlecht und Betriebszugehörigkeit zeigten jeweils einen Zusammenhang mit Gewissenhaftigkeit (Tabelle 12).

Es zeigte sich ebenfalls, dass bei der Post/DHL das Erleben oder Nicht-Erleben von SRF-Ereignissen im Zusammenhang mit der Risikowahrnehmung im Lager und beim Abgelenktsein steht. Zudem sind die Risikowahrnehmung beim In-Eile-Sein und die sturzbezogene Selbstwirksamkeit zur Einführungsveranstaltung assoziiert (Tabelle 13).

*Tabelle 12. Signifikante Korrelationen nach Pearson zwischen den Eigenschaften der Mitarbeitenden und der Arbeitsumgebung, der beschriebenen Risikowahrnehmung und angegebenen SRF-Ereignissen bei der Deutschen Post/DHL. N = 48, Geschlecht weiblich = 0, männlich = 1, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.*

	Geschlecht	Alter	Betriebs-zugehörigkeit	Komplexität	Zeit-druck	Konzentrations-anforderung
Risiko-wahrnehmung						
Betrieb					0.36 **	
Weg					0.31 *	
Gleis				0.28 *		
Treppe		-0.36 **	-0.29 *	0.35 *	0.30 *	0.27 *
Werkstatt				0.37 **		0.29 *
Straße					0.32 *	
Rampe						0.27 *
Wetter					0.30 *	
Schotter				0.28 *		0.26 *
Boden-unebenheiten					0.28 *	
Fahrzeugausstieg						0.33 *
In Eile					0.31 *	
Hindernis					0.28 *	
Baustelle						0.28 *
SRF-Ereignis				-0.31 *		

SM1		-0.31 *	
SM2			-0.30 *
ISTA			
Komplexität	0.27 *		
Konzentrations- anforderungen		0.33 *	0.53 ***
Gewissenhaftigkeit	-0.27 *	0.30 *	

*Tabelle 13. Signifikante Korrelationen nach Pearson zwischen der beschriebenen Risikowahrnehmung und angegebenen SRF-Ereignissen bzw. der Selbstwirksamkeit bei der Deutschen Post/DHL. N = 23. * $p < .05$.*

SRF-Ereignis	2 Wochen nach T2	2 Wochen vor T3	Selbstwirksamkeit T0
Risikowahrnehmung			
Lager		0.46 *	
In Eile			-0.26 *
Ablenkung	-0.33 *		

Sturzbezogene Selbstwirksamkeit über die Zeit in den Trainingsinterventionsgruppen und Praxispartnern

Teilnehmende Mitarbeitende von HKM gaben zur Einführungsveranstaltung (T0) eine durchschnittliche sturzbezogene Selbstwirksamkeit von $M = 3.15$ ($SD = 0.46$) an. Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL zeigten durchschnittlich eine Selbstwirksamkeit von $M = 3.11$ ($SD = 0.51$) an. Zum zweiten Messtag nach sechs Monaten gaben die Mitarbeitenden von HKM (über alle Interventionsgruppen) durchschnittlich eine mittlere sturzbezogene Selbstwirksamkeit an ($M = 3.28$, $SD = 0.44$). Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL zeigen ebenfalls eine mittlere sturzbezogene Selbstwirksamkeit ($M = 3.28$, $SD = 0.55$) über alle Interventionsgruppen.

Aufgeteilt auf die Interventionsgruppen zeigte sich der Wert der Kontrollgruppe (T3, $N = 18$) zu Beginn der Studie mit $M = 3.15$ ($SD = 0.57$) und zum letzten Messtag mit $M = 3.31$ ($SD = 0.59$). Die mechanische Interventionsgruppe ($N = 24$) gab zu Beginn der Studie eine durchschnittliche Selbstwirksamkeit von $M = 3.17$ ($SD = 0.58$), und zum Ende der Studie einen Wert von $M = 3.22$ ($SD = 0.48$) an. Die VR-basierte Interventionsgruppe ($N = 20$) gab anfangs einen durchschnittlichen Wert von $M = 3.11$ ($SD = 0.44$) und zum Ende einen Wert von $M = 3.36$ ($SD = 0.41$) an.

Über die gesamte Stichprobe hinweg zeigte sich eine signifikante Steigerung der sturzbezogenen Selbstwirksamkeit zwischen der Einführungsveranstaltung vor dem Training und sechs Monate nach dem Training, $t(60) = -2.26$, $p = .028$. Der Mittelwert der Differenzen betrug -0.145 , mit einem 95% Konfidenzintervall von $[-0.273, -0.016]$. Aufgeschlüsselt auf die Trainings ist der Effekt nicht festzustellen, da die Mittelwerte nicht signifikant verschieden waren (Kontrollgruppe $p = .135$, VR $p = .051$, mechanisch $p = .612$). Zudem korrelierte die Selbstwirksamkeit zur Einführungsveranstaltung signifikant positiv mit der nach dem Training ($r = 0.48$, $p < .001$).

Zusammenfassung und Diskussion

Risikowahrnehmung und Arbeitsbedingungen

Die Beschreibung der Arbeitsbedingungen bei den Praxisunternehmen und der Eigenschaften der Mitarbeitenden liefern Hinweise auf mögliche Risiken als auch Schutzfaktoren für SRF-Ereignisse. Elfering et al. (2013) beschrieben, wie sich Zeitdruck, hohe Konzentrationsanforderungen und Komplexität der Tätigkeit auf die kognitiven Kapazitäten auswirken und dadurch das Risiko für SRF-Ereignisse nach der Arbeit erhöhen. Sowohl bei HKM als auch bei der Deutschen Post/DHL wurde die Arbeit als eher komplex beschrieben und ging gelegentlich mit hohen Konzentrationsanforderungen einher. Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL hatten zudem mit hohem Zeitdruck zu tun. Mit zunehmender Komplexität und steigenden Konzentrationsanforderungen nahm auch bei HKM der Zeitdruck zu. Bei der Post nahmen

Konzentrationsanforderungen mit steigender Komplexität zu. Dadurch zeigen sich bei beiden Unternehmen aufgrund der kognitiven Arbeitsanforderungen bereits gewisse Risiken, welche bei der Post aufgrund des angegebenen Zeitdrucks etwas höher zu sein scheinen.

Zeitdruck, Eile und eine hohe Arbeitsbelastung können Stress hervorrufen (Kavosi et al., 2018; Oliveras et al., 2002), welcher die Wahrscheinlichkeit von Unfällen erhöht (Bridger et al., 2012). Zeitdruck und Herausforderungen können aber auch zu mehr proaktivem Verhalten führen (Ohly & Fritz, 2010). Diese stressbezogenen Belastungen waren bei beiden Praxisunternehmen vorhanden. Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL gaben häufiger eine hohe Arbeitsbelastung an. In beiden Unternehmen fand sich zudem sehr oft eine gute Beziehung zu den Vorgesetzten und ein gewisses Maß an Selbstorganisation, Faktoren, die Stress senken können (Zirwatul Aida et al., 2012; Karasek, 1979).

Faktoren, die Risiken für (Sturz-)Unfälle senken, sind beispielsweise eine hohe Sicherheitskultur (Swedler et al., 2015) und niedrige Risikobereitschaft (Butler et al., 2015). Es herrschte bei beiden Praxisunternehmen eine hohe Sicherheitsorientierung und niedrige Risikobereitschaft. Weitere Risikofaktoren für SRF-Ereignisse sind Schichtarbeit, längeres Stehen, Materialtransport und das Arbeiten mit Maschinen (Swaen, 2014). HKM-Mitarbeitende gaben an, oft viel in Bewegung zu sein und je nach Tätigkeit mit Maschinen zu arbeiten. Deutsche Post/DHL Mitarbeitende waren während ihrer Arbeitszeit größtenteils auf den Beinen unterwegs und trugen dabei regelmäßig Materialien herum. Damit zeigten sich weitere Risikofaktoren bei beiden Praxisunternehmen.

Um zu erfassen, wie die Mitarbeitenden beider Unternehmen SRF-Risiken in ihren Tätigkeiten bewerten, wurden sie zu verschiedenen Orten, Bedingungen und Aktivitäten befragt. Wie sich bereits bei Bentley und Haslam (2001) zeigte, gaben die Mitarbeitenden bei beiden Unternehmen das höchste Risiko für ein SRF-Ereignis bei Eis und Schnee an. HKM-Mitarbeitende sahen zudem ein hohes Risiko auf unebenen Böden, ein etwas höheres Risiko beim Treppensteigen, beim Überqueren von Gleisen und in speziellen Arbeitsbereichen wie der Gießhalle, entlang von Förderbändern und auf Baustellen. Das generelle Risiko für ein SRF-Ereignis wurde bei HKM als moderat bis leicht erhöht eingeschätzt. Die Deutsche Post/DHL-Mitarbeitenden gaben ein höheres Risiko während ihrer Tätigkeit an. Ablenkung und Eile wurden als eher risikobehaftet eingeschätzt, auf Baustellen, Treppen, Straßen und Wegen wurde ein moderates Risiko gesehen.

Personenbezogene Faktoren, die das Risiko eines SRF-Ereignisses beeinflussen, waren Gewissenhaftigkeit und Sportlichkeit (Canada, 2020; Caban-Martinez, 2014; Skelton, 2001). Sowohl die Mitarbeitenden von HKM als auch der Deutschen Post/DHL gaben einen hohen Grad an Gewissenhaftigkeit an und waren zum Großteil sportlich.

Die Arbeitsbedingungen der Praxispartner und Bewertung der Risiken durch die Mitarbeitenden zeigten verschiedene, erhöhte Risikofaktoren für SRF-Ereignisse bei beiden Unternehmen. Bei der Deutschen Post/DHL zeigte sich ein leicht höheres Risiko. Gleichzeitig existieren in beiden Unternehmen Schutzfaktoren wie eine hohe Sicherheitskultur, gute Vorgesetztenbeziehungen und Gewissenhaftigkeit der Mitarbeitenden. Diese Ergebnisse zeigen den Bedarf beider Unternehmen für gezielte Maßnahmen zur Minimierung von SRF-Risiken.

Individuelle Unterschiede in der Risikowahrnehmung, Einschätzung der Arbeitsumgebung und SRF-Ereignissen

Die Risikowahrnehmung war bei beiden Unternehmen durch individuelle Unterschiede geprägt: Über die gesamte Stichprobe hinweg nahmen Männer im Betrieb, auf Treppen, Straßen und bei ungünstigen Wetterbedingungen höhere Risiken wahr und berichteten weniger SRF-Ereignisse im Sturzmonitoring während des Projektes. Männliche Mitarbeitende bei HKM nahmen einerseits häufiger Risiken in Betrieb, auf Treppen und Straßen sowie bei widrigen Wetterbedingungen wahr, berichteten aber andererseits

weniger SRF-Ereignisse zwei Wochen nach dem ersten Messtag. Dabei ist zu beachten, dass nur sieben Frauen von HKM an der Studie teilnahmen. Männliche Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL schätzten ihre Arbeit als komplexer ein und zeigten eine geringere Gewissenhaftigkeit. Größere Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL berichteten häufiger von SRF-Ereignissen während der Studie, während Mitarbeitende mit höherem Körpergewicht eine niedrigere Gewissenhaftigkeit zeigten. Bei HKM gaben Mitarbeitende mit höherem Körpergewicht eine höhere Risikoeinschätzung ihres Arbeitsumfelds an, berichteten jedoch seltener von SRF-Ereignissen, was bei beiden Unternehmen möglicherweise mit dem höheren Männeranteil in der Gruppe zusammenhängt, die ein höheres Körpergewicht aufwies. Personen bei HKM, die regelmäßig Sport treiben, gaben zu Beginn der Studie häufiger ein SRF-Ereignis an.

Das Alter beeinflusste ebenfalls die Risikowahrnehmung: Jüngere Mitarbeitende von HKM sahen größere Risiken im Lager, während Ältere die Ablenkung bei der Arbeit als risikoreicher einschätzten. Dies könnte auf unterschiedliche Arbeitsbereiche zurückzuführen sein, da ältere Mitarbeitende meist weniger körperlich anstrengende Tätigkeiten (wie im Lager) ausführen. Bei der Deutschen Post/DHL nahmen jüngere Mitarbeitende ein höheres Risiko auf Treppen wahr.

Auch die Berufserfahrung zeigte einen Einfluss: Erfahrene Mitarbeitende von HKM bewerteten die Komplexität ihrer Arbeit als geringer, berichteten jedoch häufiger von Zeitdruck und erhöhten Konzentrationsanforderungen. Diese Gruppe zeichnete sich durch eine höhere Gewissenhaftigkeit aus und nahm unterschiedliche Risiken wahr, beispielsweise ein geringeres Risiko im Lager, aber erhöhtes Risiko durch Ablenkung. Die Länge der Betriebszugehörigkeit bei HKM beeinflusste ebenfalls die Risikoeinschätzung in bestimmten Bereichen wie dem Lager. Länger beschäftigte Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL zeigten ebenfalls eine höhere Gewissenhaftigkeit, bewerteten das Treppensturzrisiko geringer und berichteten zu Studienbeginn von weniger SRF-Ereignissen.

Mitarbeitende von HKM, die ihre Tätigkeit als besonders konzentrationsintensiv bewerteten, schätzten das Risiko für SRF-Ereignisse höher ein und wiesen einen höheren Grad an Gewissenhaftigkeit auf. HKM-Mitarbeitende in komplexen Tätigkeiten hingegen bewerteten das SRF-Risiko im Betrieb als geringer. Je höher Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL die Komplexität ihrer Tätigkeit, den Zeitdruck und die Konzentrationsanforderungen einschätzten, desto eher gaben sie ein höheres Risiko eines SRF-Ereignisses im Arbeitsumfeld an. Zugleich berichteten Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL mit komplexeren Tätigkeiten häufiger von SRF-Ereignissen vor und während der Studie.

Mitarbeitende von HKM mit hoher sturzbezogener Selbstwirksamkeit betrachteten die Arbeit unter Ablenkung als risikoreicher. Mitarbeitende der Deutschen Post/DHL mit hoher sturzbezogener Selbstwirksamkeit zu Beginn der Studie bewerteten das Risiko in hektischen Situationen als geringer.

Mitarbeitende von HKM, die Teile ihres Arbeitsumfelds als risikoreicher einschätzten, berichteten seltener von SRF-Ereignissen im Studienverlauf, während jene, die das Risiko in der Werkstatt hoch bewerteten, zu Studienbeginn häufiger von einem SRF-Ereignis berichteten. Personen von DHL, die das Risiko im Lager und bei Ablenkung als hoch einschätzten, berichteten während der Studie eher von einem SRF-Ereignis.

Leider wurde nicht erfasst, in welchen Bereichen der Unternehmen die einzelnen Teilnehmenden arbeiteten, sodass dies nicht als möglicher Einfluss zur Risikobewertung mit einfließen konnte. Zudem sollte die Betrachtung der SRF-Ereignisse durch die Sturzmonitorings mit Vorsicht erfolgen, da diese keine objektive Erfassung von SRF-Ereignissen ermöglichten.

Sturzbezogene Selbstwirksamkeit

Die geringe Differenz der sturzbezogenen Selbstwirksamkeit zu Beginn der Erhebungen deutet darauf hin, dass die Mitarbeitenden beider Praxisunternehmen anfänglich ähnliche Einschätzungen ihrer

Selbstwirksamkeit hatten. Der ähnliche Anstieg bei beiden Gruppen spricht für einen allgemeinen Trainingseffekt oder eine andere nicht interventionsspezifische Einflussgröße. Die Betrachtung der einzelnen Trainingsgruppen zeigte, dass keine der Gruppen eine signifikant stärkere Verbesserung erzielte, obwohl die VR-basierte Gruppe die höchste relative Steigerung aufwies. Dies könnte auf einen tendenziellen Effekt der VR-Intervention auf die sturzbezogene Selbstwirksamkeit hinweisen, die aber in dieser kleinen Stichprobe noch nicht ausreichend nachweisbar ist. Mitarbeitende, die anfangs eine höhere Selbstwirksamkeit angaben, berichteten auch später tendenziell höhere Werte und umgekehrt. Diese Korrelation könnte darauf hindeuten, dass die sturzbezogene Selbstwirksamkeit eine gewisse Beständigkeit aufweist und möglicherweise von Persönlichkeitseigenschaften beeinflusst wird. Über die gesamte Stichprobe hinweg zeigte sich eine statistisch bedeutsame Erhöhung der Selbstwirksamkeit, die aber nicht auf bestimmte Faktoren zurückgeführt werden kann. Darüber hinaus gab es kein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis, sodass die darauf bezogenen Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden sollten.

5. VR-SRF Schulungssimulation

Die Entwicklung des VR-Simulationsschulungstools zur SRF-Unfallprävention wird anhand eines strukturellen Gestaltungskonzepts aus „Human Factors“ vorgestellt. Das Design der VR-Anwendung und die Auswahl passender VR-Techniken beruhen auf einer für die Berufsgenossenschaft Handel und Logistik (BGHW) entwickelten „Lagersimulation“ (Wetzel et al., 2023). Diese Simulation wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes in den Anwendungsbereich einer virtuellen „Stadtumgebung“ übertragen und erweitert. In dieser Simulation einer virtuellen, städtischen Umgebung werden Beispielszenarien zur Prävention von SRF-Unfällen aus Unternehmen der Stahlerzeugung sowie der Post- und Paketzustellung mithilfe von VR dargestellt. Die bisherige Simulationsumgebung und die nun neu entwickelte lenken die Aufmerksamkeit der Beschäftigten auf ausgewählte, geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von SRF-Unfällen im Kontext der jeweiligen Beschäftigungsgebiete.

Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) hat die neue VR-SRF-Schulungssimulation in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Arbeits-, Organisations- und Wirtschaftspsychologie der Ruhr-Universität Bochum und dem Arbeitsbereich Ergonomie und Virtuelle Realität am Rhein-Ahr-Campus der Hochschule Koblenz erarbeitet. Die Darstellung in diesem Bericht erfolgt anhand der neu entstandenen Stadtumgebung für ENTRAPon, deren Konzept im Wesentlichen auf dem des BGHW-Lagersimulators beruht (Wetzel et al., 2023). In der ENTRAPon-Studie kamen beide Anwendungen zum Einsatz.

Human Factors Konzept zur strukturierten Entwicklung virtueller Umgebungen

Es wird davon ausgegangen, dass eine anwendungsbezogene Qualifizierung von Beschäftigten für die Prävention von SRF-Unfällen förderlich ist. Dabei unterstützt ein Instruktionsdesign, kombiniert mit einer maßgeschneiderten VR-Simulationsumgebung. Das Human-Factors-Konzept zur strukturierten Entwicklung virtueller Umgebungen (SDVE, Eastgate et al., 2015) wird verwendet, um in einem iterativen Prozess eine zielgerichtete virtuelle Anwendungsumgebung zu entwickeln, die zur SRF-Unfallprävention beiträgt. Dazu folgt SDVE den im Folgenden dargestellten Phasen.

Definition: In der ersten Phase des SDVE-Konzeptes wird das Vorhaben festgelegt. Ziele der Anwendung sind es, Beschäftigte für die Prävention von SRF-Unfällen am Arbeitsplatz zu sensibilisieren, sie zur Teilnahme zu motivieren und ihnen konstruktive Wege für ihr eigenes Handeln aufzuzeigen. Gleichzeitig sollte die technische Struktur der Anwendung generisch gestaltet sein, um dieselbe Anwendung sowohl für Beschäftigte aus der Stahlerzeugung als auch der Post- und Paketzustellung einsetzen zu können. Gleichzeitig sollte sie bezogen auf potenzielle Präventionsmaßnahmen und Instruktionsdesigns die Beschäftigten aus allen Arbeitsbereichen ansprechen, also generisch und spezifisch für die jeweilige Domäne sein.

Anforderungsanalyse: In dieser Phase konzentrieren sich die Analysen auf die Aufgaben und die beteiligten Personengruppen (Stakeholder). Dabei werden sowohl das Arbeitsumfeld der Beschäftigten als auch typische Gefährdungen aus dem Berufsalltag betrachtet. Stakeholder-Analysen sollten nicht nur die Benutzer der Anwendung, sondern auch die Personen, die die technische Ausrüstung einrichten und warten, einbeziehen. Zudem sollten die Benutzer vor, während und nach der Nutzung der Lernanwendung angesprochen, angeleitet und in den Interaktionsprozess einbezogen werden.

Spezifikation und Integration der Mensch-System-Interaktion: Die Mensch-System-Interaktion ist ein wesentlicher Bestandteil des Bildungskontextes, um die Ziele der Anwendung zu unterstützen. Die Interaktionsprozesse werden durch spezifische Szenarien und Storyboards für den didaktischen Kontext definiert. Diese können auch potenzielle Grenzen für didaktische Anforderungen sowie Möglichkeiten oder Freiräume für zusätzliche didaktische Inhalte aufzeigen.

Entwicklung der VR-Simulationsumgebung: In dieser Phase sind die Hardware-Spezifikationen und die Software-Entwicklung zentrale Elemente des SDVE-Konzeptes. Während die technischen Entwicklungen eng an den Szenarienspezifikationen und dem Storyboard orientiert sind, kann der Entwicklungsprozess auch alternative Lösungen und Verbesserungen in der Mensch-System-Interaktion bieten, die für das Instruktionsdesign nützlich sind.

Implementierung als didaktische Anwendung: In der Umsetzungsphase wird das Instruktionsdesign mit der entwickelten VR-Simulationsumgebung kombiniert, um eine gezielte Interaktion zwischen Menschen und technischem System zu ermöglichen.

Bewertung der Ziele: Eine abschließende Evaluation ist notwendig, um die Auswirkungen der didaktischen Anwendung in der Praxis zu überprüfen. Diese sollte aufzeigen, ob die Ziele der Anwendung, wie zu Beginn des SDVE-Konzeptes festgelegt, erreicht wurden.

Technische Umsetzung und Design der VR-Anwendung

Der vorliegende Abschnitt informiert über die Entwicklung der Anwendung der ENTRAPon-Stadtumgebung. Die Ergebnisse werden in Anlehnung an die SDVE-(Eastgate et al., 2015) Phasen dargestellt, wobei der Schwerpunkt auf der technischen Weiterentwicklung der VR-Simulationsumgebung liegt. Das Konzept gleicht im Wesentlichen dem Vorgehen bei der Entwicklung des BGHW-Lagersimulators (Wetzel et al., 2023). Spezielle Anpassungen für die Rahmenbedingungen der ENTRAPon-Studien sind ergänzend dargestellt.

Definition

Ziel der VR-SRF-Schulungssimulation ist, das Interesse für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit mit dem Schwerpunkt auf SRF-Prävention am Arbeitsplatz zu wecken und die Teilnehmenden der ENTRAPon-Studie sowie anderen Interessierten und potenziellen Benutzern aus dem Bereich der Post- und Paketzustellung für eine aktive Beteiligung an Präventionsmaßnahmen zu sensibilisieren. Um die betroffenen Personen zu erreichen, musste die Schulungssimulation bereichsspezifisch sein, um geeignete Maßnahmen zur Verhütung von SRF-Unfällen und Unterweisungsdesigns anzusprechen. Da die Struktur der Anwendung generisch gestaltet ist, ist ein Übertragen auf andere Bereiche ebenfalls möglich, wodurch ein breites Spektrum an Unternehmen und Arbeitsbereichen erreicht werden kann.

Anforderungsanalyse

Die Analyse der Interessengruppen ergab, dass drei Parteien an der Nutzung der Anwendung beteiligt sein sollten: die Studienteilnehmenden im Projekt, die Studiendurchführenden sowie die Instandhaltungsingenieure für die technischen Studienaufbauten.

Im konkreten Kontext der Stadtumgebung mussten die Studienteilnehmenden verschiedene Aufgaben in der Post- und Paketzustellungen wahrnehmen. Die Studiendurchführenden beaufsichtigten die Benutzung der Anwendungen, vorbereiteten, starteten und stoppten den technischen Betrieb der Anwendung und leiteten die Studienteilnehmenden während der Benutzung der Simulation an. Darüber hinaus führten die Studiendurchführenden die vorgesehenen Befragungen zur Evaluation durch. Wartungsingenieure für die technische Anwendung sorgten für den Auf- und Abbau der Hardware und notwendige Software-Updates sowie den reibungslosen Ablauf der Anwendungen.

Spezifikation und Integration der Mensch-System-Interaktion

Im konkreten Kontext der ENTRAPon-Stadtumgebung mussten die Studienteilnehmenden typische Aufgaben der Post- und Paketzustellung in einer städtischen Umwelt erledigen. Dazu wurden Anregungen aus Gesprächen mit Vertretern einer großen Logistikfirma aus dem Bereich der Paketzustellung aufgenommen sowie vorliegende Berichte von Unfallanalysen verwendet. So konnten typische Szenarien zu SRF-Unfällen und -Beinaheunfällen identifiziert und skizziert sowie Unfallursachen gesammelt und geordnet werden. Diese dienten als Vorgaben für die Szenario-Entwicklung in der Simulationsumgebung.

Szenarien aus anderen Anwendungsgebieten (Wetzel et al., 2023) wurden durch spezifische Gefahrenquellen der Arbeit unter freiem Himmel erweitert. Diese sind häufig Folge von wechselnden Witterungsverhältnissen über die Jahreszeiten und durch externe bauliche und situative Gegebenheiten wie Baustellen oder Verkehr beeinflusst.

Die Studienteilnehmenden wurden während ihres Auftrags der Post- und Paketzustellung aufgefordert, sich in der städtischen Umgebung frei zu bewegen. Beim Durchschreiten der verschiedenen Wege und Straßen stießen die Anwender*innen auf Hindernisse auf dem Boden, Störungen auf Wegen und andere Gegenstände oder Situationen, die potenzielle Risiken für SRF-Unfälle darstellen. Wenn sie Szenarien mit potenziellem Risiko identifizierten, konnten sie diese ignorieren und ihrem Ziel in der Stadt weiter folgen oder die Situationen durch ihre Auswahl von verschiedenen, angezeigten Maßnahmen bewältigen. Im letzteren Fall wurden sie gebeten, zwischen meist vier Handlungsalternativen zu wählen, die von der Beseitigung der Gefahr über die Information von Kollegen zu den potenziell gefährlichen Situationen bis hin zum Ignorieren des Szenarios und dem Weitermachen, als ob nichts geschehen wäre, reichten. Im öffentlichen Raum ist es den Beschäftigten der Post- und Paketzustellung meist nicht möglich, die Gefahren sofort und eigenständig zu beseitigen. Laub, Pfützen, lose Stufen oder anderes können sie nicht entfernen oder austauschen. Auch wenn die Gefahr nicht beseitigt werden kann, können die Personen aber ihre eigene Bewegung den Gegebenheiten anpassen. Ist eine Zustellung wegen bestimmter Gegebenheiten zu riskant, können die Beschäftigten die Zustellung auch abbrechen, die Kunden und Kundinnen auf die Gefährdungen aufmerksam machen und ihre Dienststelle darüber informieren. Jede Begegnung mit Gefährdungen in den virtuellen Szenarien forderte die Beschäftigten zu aktiven Entscheidungen über Präventionsmaßnahmen auf, informierte aber auch über mögliche Alternativen, von denen geeignete ausgewählt wurden.

Da die Trainingsumgebung potenzielle Beschäftigte auch motivieren sollte, wurden VR-Techniken gewählt, um die dynamische VR-Simulation zu modellieren. Technische VR-Ausrüstungen zur Unterstützung der Mensch-System-Interaktion wurden nach grundlegenden Anforderungen aus Human-Faktors und Ergonomie ausgewählt und gestaltet und zielten stark darauf ab, Beeinträchtigungen des Arbeitshandelns sowie Gesundheits- und Sicherheitsrisiken zu vermeiden (z. B. ISO 9241-394:2020; Wickens et al., 2023). Da die reale Arbeitsumwelt in der Stadt weitläufig ist, war für die Fortbewegung in der VR-Simulation ein Laufband notwendig. Das erlaubte den Beschäftigten auch, dass sie sich in allen Teilen der virtuellen Umgebung frei bewegen können.

Entwicklung der VR-Simulationsumgebung

Hardware-Spezifikationen und Software-Entwicklung sind die Kernelemente dieser jeweiligen Phase in SDVE. Während sich die technische Entwicklung einerseits eng an die Szenariospezifikationen und das Storyboard anlehnt, kann der Entwicklungsprozess andererseits alternative Lösungen und Verfeinerungen der Mensch-System-Interaktion bieten, die für das didaktische Design (Instruktionsdesign) geeignet sind.

Entwicklung der VR-Software. Die Entwicklung der VR-SRF-Schulungssimulation wurde mit der Software Unity (Unity Technologies, USA) umgesetzt. Alle relevanten Informationen wie Gefährdungsbeschreibungen und Maßnahmen sind in einer zentralen Datei im Microsoft-Excel-Format (Microsoft Cooperation, USA) gespeichert. Es können beliebig viele Microsoft-Excel-Dateien in verschiedenen Sprachen erstellt werden. Dadurch ist es möglich, die Benutzermenüs in den Simulationsumgebungen je nach ausgewählter Microsoft-Excel-Datei mit bestimmten Sprachen zu versehen. Beim Programmstart werden alle Dateien automatisch erkannt und stehen in einem Startmenü zur Auswahl (Abbildung 6).

Wenn eine gefährliche Situation in der Simulationsumgebung vom Benutzer identifiziert wird, kann dieser über ein Auswahlfenster (Abbildung 7) ein oder mehrere Maßnahmen zur Risikominderung auswählen. Mit Blick auf die Zielsetzung der gesamten VR-SRF-Schulungssimulation wurde der Fokus auf eher typische

Tätigkeiten gelegt. Das Beispielenü in Abbildung 7 zeigt die typische Struktur: den Namen der Gefahr, eine Beschreibung und ein Bild der Gefahrenquelle und fragt den Studienteilnehmenden, was er oder sie in dieser Situation tun würde. Jedes Menü enthält bis zu vier Antwortoptionen, um auf die Gefahr zu reagieren. Eine Antwort ist das „Ignorieren“ und die weiteren sind typische Maßnahmen zur Risikominderung. Ignorieren ist aus Sicht des Arbeitsschutzes die schlechteste Option, da die Gefahr nicht beseitigt wird, sondern in gleichem Maße bestehen bleibt. Diese Option wird nach der Auswahl in Rot hervorgehoben. Die Studienteilnehmenden sollen am Beispiel erfahren und lernen, dass es immer Möglichkeiten bzw. Maßnahmen zur Risikominderung gibt. Aus diesem Grund werden diese anderen Auswahlmöglichkeiten bei Aktivierung grün hervorgehoben. Am Ende des Menüs befinden sich außerdem zwei Schaltflächen zum Bestätigen oder Abbrechen des Vorgangs.



Abbildung 6: Anfangsmenü mit Optionen zur Auswahl der zentralen Datei im Microsoft Excel-Format.

Die im Menü angegebenen Informationen werden automatisch aus der Microsoft-Excel-Datei abgerufen. Bei der Gestaltung der Benutzungsoberflächen wurde darauf geachtet, den Interaktionsprozess einfach zu halten, d. h. ohne Animationen oder Punktesysteme für ausgewählte Optionen. Die Entscheidungsfindung für den Studienteilnehmenden nach der Identifikation von potenziellen Gefahrenszenarien sollte eine Konzentration auf die Entscheidungsfindung ermöglichen und dabei Ablenkungen und Überforderungen vermeiden.



Abbildung 7: Menü für die Reaktion auf eine erkannte Gefahrensituation (z.B. ein umgefallener Cityroller)

Gestaltung der VR-Hardware. Für die Navigation und Interaktion in der virtuellen Umgebung wurden verschiedene Interaktionsschnittstellen integriert. Die VR-Anwendung ermöglicht die Verwendung von Maus und Tastatur, aber auch eines Head-Mounted-Displays (HMD) wie dem VIVE Pro (HTC Corporation, Taiwan) einschließlich VIVE-Controllern und optional einem VIVE-Tracker. Die Controller dienen zur Gefahrenauswahl und zur Bedienung eines Menüs, um Maßnahmen im Umgang mit Gefahren auszuwählen. Darüber hinaus wurden die Controller zur Navigation in der virtuellen Stadt-Umgebung eingesetzt. Der Anwendende kann sich dabei von Ort zu Ort teleportieren. Um ein realitätsnahes Gehen in der VR-Umgebungen zu ermöglichen, wurde ein omnidirektionales Laufband integriert (siehe auch Wetzel et al., 2023), das ein Fortbewegen auf den eigenen Beinen und vollständige Bewegungen in 360 Grad ermöglicht (VIRTUALIZER, Cyberith GmbH, Österreich). Die Fortbewegung mithilfe des Laufbandes wurde priorisiert verwendet. Sollte dieses aus technischen Gründen nicht nutzbar sein, konnte auf das Teleportieren mithilfe der Controller zurückgegriffen werden.

Implementierung der Unterrichtsumgebung

Die neue Lernumgebung ENTRAPon-Stadtumgebung wurde zusammen mit einer leicht modifizierten Version des BGHW-Lagersimulators in den Räumlichkeiten eines der an der Projektstudie teilnehmenden Unternehmens realisiert. Alle Studienstationen, die in den ENTRAPon-Studien verwendet wurden, waren auf einer Etage untergebracht. So konnten alle Trainingselemente lokal an einem Ort und nahe

beieinander genutzt werden. Das erleichterte die Organisation des Studienablaufs. Abbildung 8 zeigt verschiedene Stationen. Studienteilnehmende beider Praxisunternehmen konnten diese Lokalität mitnutzen.



Abbildung 8: ENTRAPon-Stationen zur Sensibilisierung auf der Arbeitsschutzzetage eines beteiligten Unternehmens: VR-SRF-Schulungssimulation (links) und 360°-Unternehmensfotos (rechts)

Zum sicheren Betreten des Virtualizers wird eine Einstieghilfe verwendet, die den Höhenunterschied zwischen Plattform und Fußboden ausgleicht und über ein Geländer zum Ein- und Ausstieg verfügt. Transport und Auf- und Abbau der Hardware sind mit zwei Personen und einem Transporter möglich, sodass die Anwendung auch an anderen Orten und durch weitere Benutzerkreise verwendet werden kann. Abbildung 9 zeigt die Nutzung der VR-SRF-Schulungssimulation.



Abbildung 9: Nutzung der VR-SRF-Schulungssimulation auf dem VIRTUALIZER mit HMD

Die ENTRAPon-Stadtumgebung stellt eine Auswahl typischer Arbeitsumgebungen der Branche Post- und Paketzustellung dar. In der Simulationsumgebung können die Studienteilnehmenden auf verschiedene SRF-Gefahrenstellen treffen, die über verschiedene Straßenzüge der Stadtumgebung verteilt sind. Abbildung 10 veranschaulicht eine der Gefahrensituationen und zeigt beispielhaft einen durch Schmierstoffe verschmutzten Weg (links) oder eine temporäre Baustelle (rechts). Die Gefahrenstellen waren durch die Studienteilnehmenden zu identifizieren und aus einer präsentierten Auswahl von Maßnahmen geeignete zu wählen (ähnlich Abbildung 7).



Abbildung 10: Szenario mit verschiedenen potenziellen SRF-Gefahrenstellen (z.B. durch eine Baustelle)

Bewertung der VR- SRF Schulungssimulation

Um die Prävention von Beinahe-Unfällen und Unfällen durch SRF zu verbessern, wurde eine VR-Schulungssimulation speziell für die Post- und Paketzustellbranche aufgebaut. Eine erste Evaluation wurde im Rahmen der ENTRAPon-Studie durchgeführt. Diese kann helfen, die Auswirkungen der Lernumgebung in der Praxis zu ermitteln und zeigen, ob das Lernziel, wie es anfangs der SDVE definiert wurde, erreicht wurde. Insgesamt nahmen 105 Personen an der SRF-Schulungssimulation teil.

Methodik der Fragebögen

Zur Evaluation der VR-SRF-Schulungssimulation füllten die Teilnehmenden nach dem Durchlaufen der Anwendung zum Zeitpunkt T2 Items des Training-Evaluation-Inventars als VR-bezogene Variante ($\alpha = .81$; TEI, Ritzmann et al., 2014), zur Erfassung von Cyber Sickness ($\alpha = .88$; Kennedy et al., 1993) und Präsenzerleben ($\alpha = .76$; IPQ; Schubert et al., 2001) aus. Beim TEI zu T2 als auch T3 wurden Konstrukte wie Spaß ($\alpha = .81$), Nützlichkeit ($\alpha = .79$), Schwierigkeit ($\alpha = .78$), Wissensgewinn ($\alpha = .86$), Einstellung ($\alpha = .85$), problembasiertes Lernen ($\alpha = .84$), Aktivierung von Vorwissen ($\alpha = .77$), Anwendung ($\alpha = .24$) und Integration des Gelernten ($\alpha = .63$) auf einer Skala von stimme nicht zu (1) bis stimme sehr zu (5) abgefragt. Das Präsenzerleben wurde auf einer Skala von trifft gar nicht zu (1) bis trifft voll zu (5) erfasst und Cybersickness von nicht vorhanden (0) bis stark (3). Um die Einstellung zum Training sowie arbeitsbedingte Faktoren, die den Transfer des Gelernten beeinflussen, zu erfassen, beantworteten die Teilnehmenden zum Zeitpunkt T3 rückblickend gestellte Items des TEI und Items des Transfer Climate Questionnaires (Thayer & Teachout, 1995). Dies beinhaltete die Transferklimakonstrukte Zielhinweise, Aufgabenhinweise ($\alpha = .83$), Positive Verstärkung ($\alpha = .57$), Negative Verstärkung ($\alpha = .18$) und Extinktion

($\alpha = .47$). Rückblickend wurden Nützlichkeit, Wissenserwerb ($\alpha = .85$) sowie die Einstellung zur Anwendung ($\alpha = .23$) abgefragt.

Der Transfer der VR-basierten SRF-Schulungssimulation wurde zusätzlich an zwei Zeitpunkten evaluiert: direkt nach Abschluss des Trainingsprogramms (T2) und sechs Monate später (T3). Die Teilnehmenden bekamen dabei 360°-Fotos aus ihrem jeweiligen Arbeitsumfeld gezeigt, die typische sturzrelevante Gefährdungen (z. B. Gleise, Bordsteine, Geröll) darstellten. Diese Gefährdungsstellen wurden zuvor von den Expert*innen der beteiligten Unternehmen identifiziert. Bei jedem Messzeitpunkt wurden den Teilnehmenden drei unterschiedliche Fotoszenen in VR gezeigt, auf denen sie die Gefährdungen benennen sollten. Die Fotos waren spezifisch für die Unternehmen: Bei HKM stammten sie vom Betriebsgelände, während sie bei der Deutschen Post DHL während einer Post- und Paketzustellung aufgenommen wurden. Ziel dieser Simulation war es, die Sensibilisierung der Teilnehmenden und den Transfer des Gelernten in den beruflichen Alltag zu bewerten.

Für die Auswertung wurden zwei Kennzahlen berechnet:

1. **Relative Häufigkeit der identifizierten Gefährdungen (%)**: Anteil der von den Expert*innen zuvor definierten Gefährdungen, die von den Teilnehmenden erkannt wurden.
2. **Zusätzlich entdeckte Gefährdungen**: Anzahl der Gefährdungen, die über die von den Expert*innen identifizierten hinausgingen.

Um die zusätzlich entdeckten Gefährdungen zu kategorisieren, wurde ein Medianwert (Median = 1.67) berechnet, der die durchschnittliche Anzahl an zusätzlichen Gefährdungen pro Person und Messzeitpunkt über beide Zeitpunkte hinweg beschreibt. Die Teilnehmenden wurden wie folgt eingeteilt:

- **0**: Keine zusätzlichen Gefährdungen gefunden.
- **1**: Wenige zusätzliche Gefährdungen gefunden (unter dem Median).
- **2**: Viele zusätzliche Gefährdungen gefunden (über dem Median).

Diese Einteilung wurde sowohl für den ersten als auch den zweiten Messzeitpunkt vorgenommen, basierend auf der durchschnittlichen Anzahl der zusätzlich gefundenen Gefährdungen in den drei Szenen. Die Evaluation der SRF-Schulungssimulation mithilfe der 360°-Unternehmensfotos wurde anders als geplant durchgeführt. Ursprünglich waren hier eine Navigation sowie direkte Interaktion mit den Gefährdungen geplant. Dies war jedoch technisch nicht umsetzbar.

Deskriptive Ergebnisse

Deskriptive Ergebnisse zum ersten Messtag

Grundsätzlich wurde die Sensibilisierung von den Mitarbeitenden positiv bewertet (Abbildungen 11 und 12). Sie gaben an, Spaß bei der Simulation in der Lagerhalle zu haben und die Anwendung eher als nützlich zu empfinden. Zudem zeigten sie eher eine positive Einstellung und gaben an, eher einen subjektiven Wissensgewinn zu erleben. Die Anwendung wurde als nicht schwierig eingeordnet. Die Mitarbeitenden von HKM gaben an, dass sie eher eine Aktivierung von Vorwissen erlebten und das Gelernte in der Sensibilisierung auch anwenden konnten. Die Simulation in der Lagerhalle ist laut den Mitarbeitenden eher problembasiert aufgebaut. Sie stimmen eher zu, dass das Gelernte leicht zu integrieren sei.

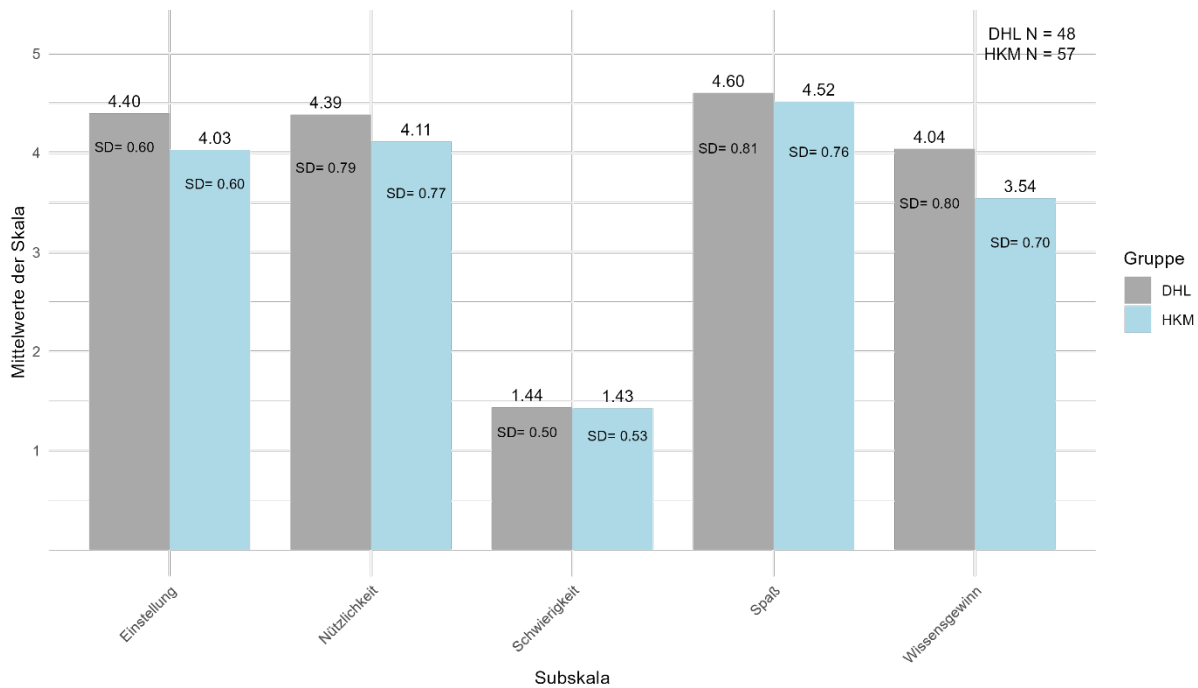


Abbildung 11: Bewertung beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation im Vergleich mithilfe des TEIs zum Trainingsoutcome. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

Die Sensibilisierung in der Stadtumgebung wurde von Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL ebenfalls positiv bewertet (Abbildungen 11 und 12). Sie gaben an, Spaß bei der Simulation in der Lagerhalle zu haben und die Anwendung eher als nützlich zu empfinden. Zudem zeigten sie eher eine positive Einstellung und gaben an, eher einen subjektiven Wissensgewinn zu erleben. Die Anwendung wurde als nicht schwierig eingeordnet. Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL gaben an, dass sie eher eine Aktivierung von Vorwissen erlebten und das Gelernte in der Sensibilisierung auch anwenden konnten. Die Sensibilisierung in der Stadtumgebung ist laut den Mitarbeitenden problembasiert aufgebaut. Sie stimmen eher zu, dass das Gelernte leicht zu integrieren sei.

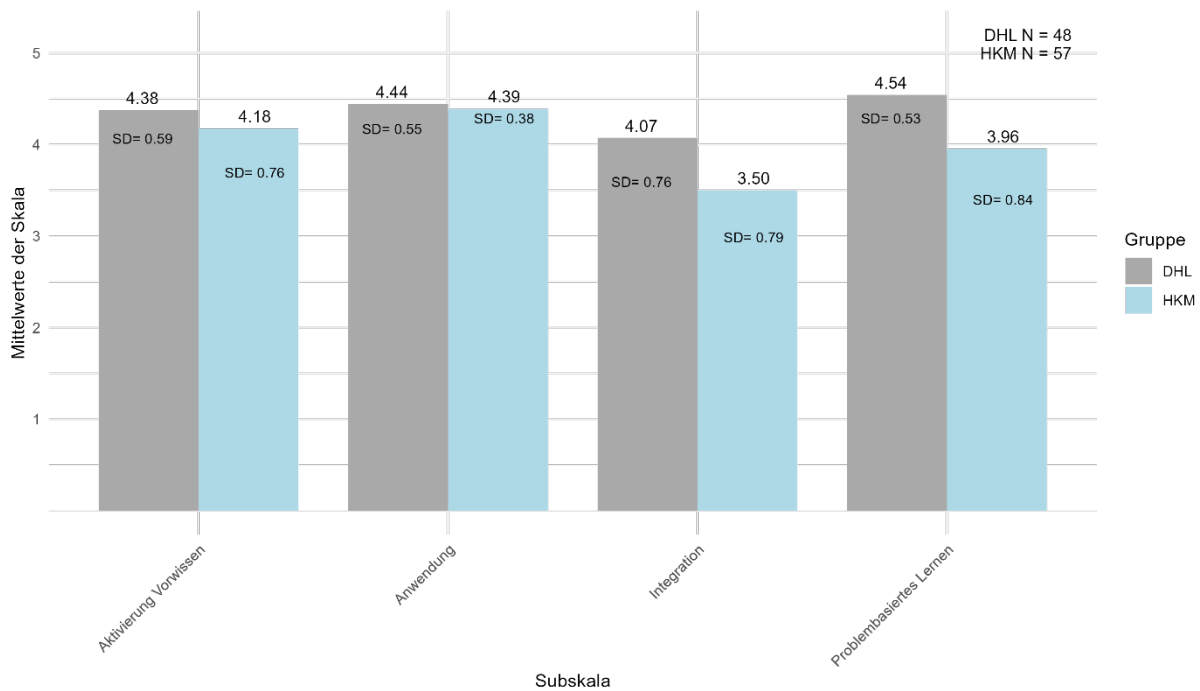


Abbildung 12: Bewertung beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation im Vergleich mithilfe des TEIs zum Trainingsdesign. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

Mitarbeitende von HKM gaben eher an, Präsenzerleben in der Sensibilisierung in der Lagerhalle zu erfahren ($M = 3.74$, $SD = 0.55$). Die Sensibilisierung der Deutschen Post/DHL-Mitarbeitenden in der Stadtumgebung erzeugte ebenfalls eher ein Präsenzerleben ($M = 3.46$, $SD = 0.84$; Abbildung 13).

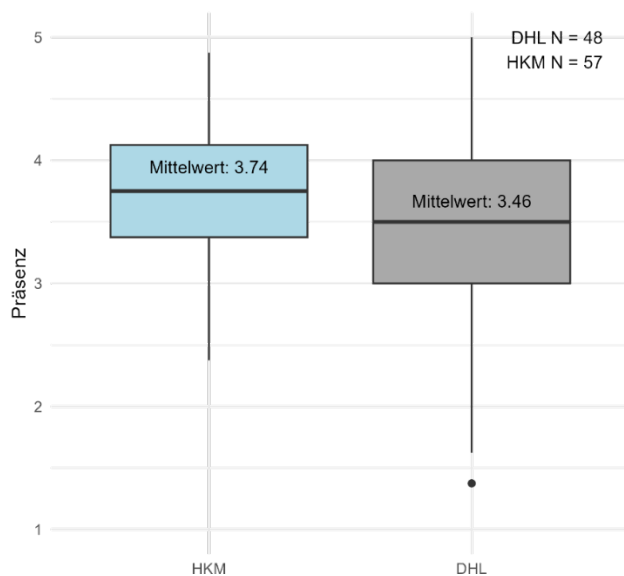


Abbildung 13: Bewertung des Präsenzerlebens beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation im Vergleich. Die Bewertungsskala verlief entlang trifft gar nicht zu (1), trifft eher nicht zu (2), weder noch (3), trifft eher zu (4) und trifft voll zu (5).

Bei HKM brach eine Person die Sensibilisierung aufgrund von Unwohlsein ab. Die restlichen Mitarbeitenden gaben ansonsten keine bis leichte Symptome an ($M = 0.42$, $SD = 0.48$; Abbildung 14).

Stadtsimulation als Sensibilisierung musste von sieben Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL aufgrund von Unwohlsein abgebrochen werden.¹ Ansonsten kam es zu keinen bis leichten Symptomen von Cybersickness ($M = 0.4$, $SD = 0.62$; Abbildung 14).

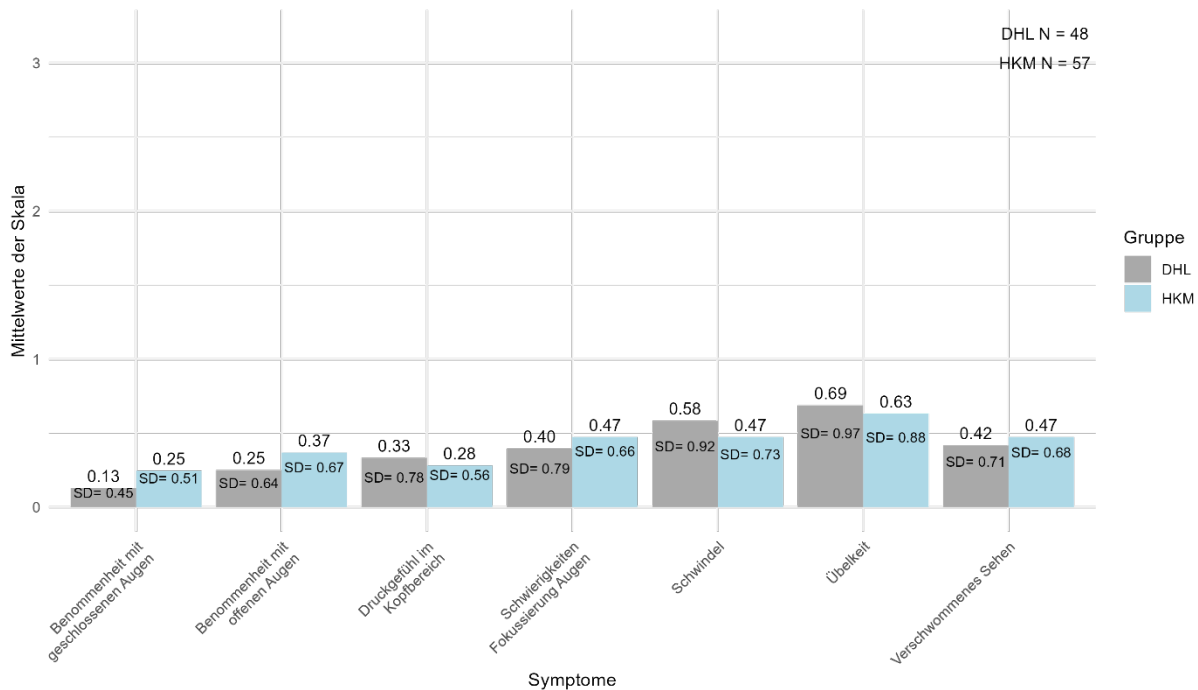


Abbildung 14: Bewertung der Cyber Sickness Symptome beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation im Vergleich. Die Bewertungsskala verlief entlang nicht vorhanden (0), leicht (1), mäßig (2) und stark (3).

Deskriptive Ergebnisse zum zweiten Messtag

Auch nach sechs Monaten bewerteten die Mitarbeitenden von HKM die Sensibilisierung in der Lagerhalle noch als eher nützlich und positiv. Zudem berichteten sie von einem anhaltenden Wissenszuwachs. Die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL zeigen bzgl. der Sensibilisierung in der Stadtumgebung rückblickend ebenfalls eine positive Einstellung, sahen sie als nützlich und berichteten weiterhin einen subjektiven Wissenszuwachs bestehend nach sechs Monaten (Abbildung 15).

¹ Anmerkung: In einem Update wurden einige störende Effekte in der VR-Umgebung entfernt, so dass erwartbar ist das zukünftig weniger Abbrüche durch Unwohlsein auftreten.

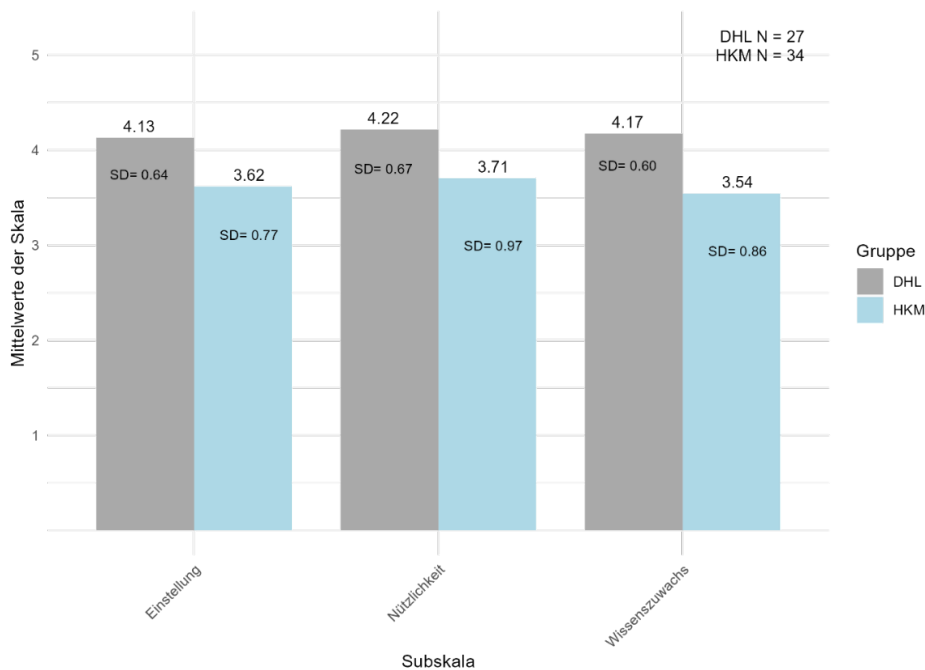


Abbildung 15: Rückblickende Bewertung beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation im Vergleich mithilfe ausgewählter Subskalen des TEIs. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

Das Transferklima im Arbeitsumfeld der HKM-Mitarbeitenden in Bezug auf die durchlaufene Sensibilisierung wurde überwiegend positiv bewertet (Abbildung 16). Die Mitarbeitenden berichteten, dass ihnen häufig Hinweisreize begegnen, die die trainierte Sensibilisierung ins Gedächtnis rufen. Extinktionsfaktoren wurden als eher förderlich für den Transfer erfasst. Negative Verstärkung im Arbeitsumfeld kam gelegentlich vor, positive Verstärkung trat jedoch etwas häufiger auf. Die Vorgesetzten der HKM-Mitarbeitenden schafften Zielhinweise, die dazu beitrugen, das Gelernte in den Alltag zu übertragen.

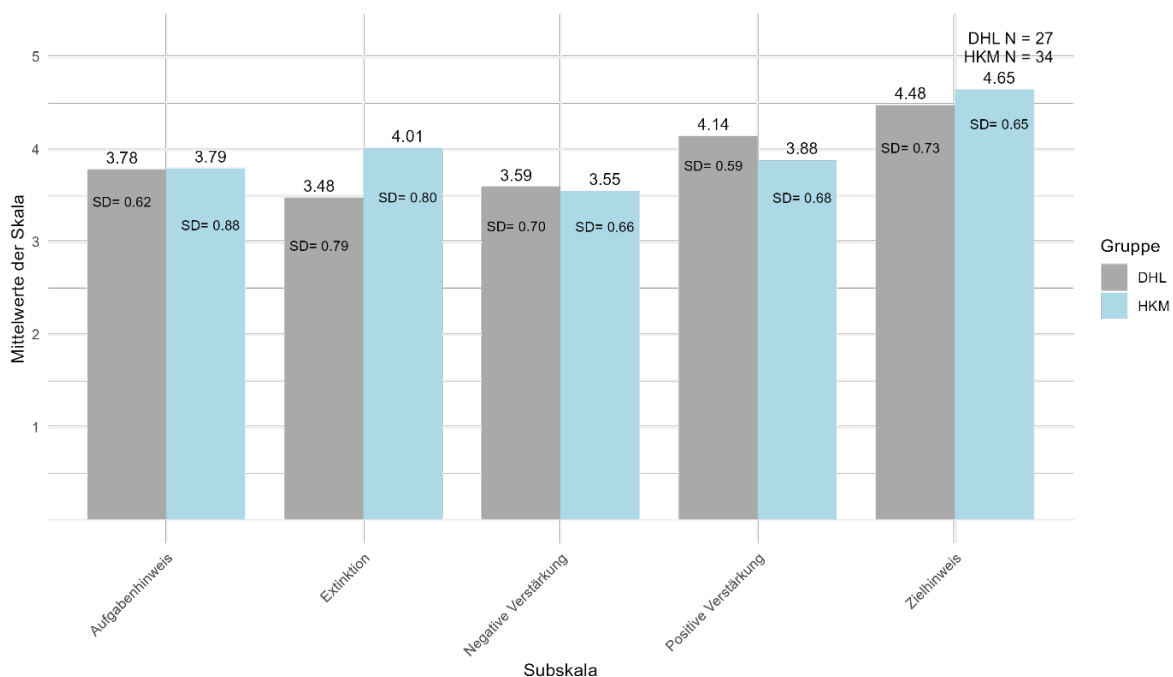


Abbildung 16: Bewertung des Transferklimas beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation in den Alltag im Vergleich mithilfe des Transfer Climate Questionnaires. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

Auch die Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL bewerteten das Transferklima in ihrer Arbeitsumgebung bezüglich der SRF-Sensibilisierung überwiegend positiv (Abbildung 16). Ihre Arbeitsumgebung beinhaltet gelegentlich Hinweise, die zur Anwendung des Gelernten führen. Extinktionsfaktoren zeigten sich eher förderlich für den Transfer. Die Mitarbeitenden berichteten von etwas negativer Verstärkung, gaben jedoch häufiger positive Verstärkung und Zielhinweise durch Vorgesetzte an.

Ergebnisse zum Transfertask anhand von 360°-Unternehmensfotos

Zum ersten Messtag fanden Mitarbeitende von HKM ($N = 55$) im Durchschnitt 77.39% ($SD = 11.97$) der SRF-Gefährdungen in den 360°-Unternehmensfotos. Darüber hinaus entdeckten sie im Durchschnitt $M = 1.67$ weitere Gefährdungen ($SD = 1.40$), die nicht auf der Liste der Studienleitung standen. Diese waren mehr als durchschnittlich an den beiden Messtagen zusätzlich bei beiden Praxispartnern zu finden ($M = 1.19$, $SD = 0.69$; 0= keine weiteren, 1= etwas gefunden (bis Median), 2= weit darüber hinaus (höher als Median)). Zum zweiten Messtag fanden die Mitarbeitenden durchschnittlich 76.49% ($SD = 14.88$) der Gefährdungen und etwa $M = 1.93$ ($SD = 1.28$) Gefährdungen, die ihnen noch zusätzlich auffielen.

Deutsche Post/DHL-Mitarbeitende fanden zum ersten Messtag im Durchschnitt 52.67% ($SD = 17.89$) Gefährdungen in den 360°-Bildern der Arbeitsumgebung. Sie fanden im Schnitt $M = 1.39$ ($SD = 0.98$) weitere Gefährdungen und somit nur etwas mehr Gefährdungen ($M = 1.19$, $SD = 0.53$). Am zweiten Messtag fanden die Mitarbeitenden ungefähr 55.76% ($SD = 18.39$) der Gefährdungen und ungefähr $M = 1.89$ ($SD = 0.85$) weitere Gefährdungen. Somit fanden sie auch zum zweiten Messtag eher wenige weitere Gefährdungen ($M = 0.65$, $SD = 0.79$; 0=keine weiteren, 1= etwas gefunden (bis Median), 2= weit darüber hinaus (höher als Median)).

Inferenzstatistische Ergebnisse

Korrelationen über die gesamte Stichprobe bezogen auf Geschlecht und Sportlichkeit als Prädiktoren für die Bewertung der Trainings und der SRF-Ereignisse

In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 14) sind schwache bis moderate Korrelationen zwischen Geschlecht und Sportlichkeit mit der Bewertung der SRF-Schulungssimulation zu finden. Hier ist erkennbar, dass das Geschlecht negativ mit dem Erleben von Cybersickness zusammenhängt. Sportlichkeit steht im Zusammenhang mit einer niedrigeren Bewertung und weniger Präsenzerleben in der SRF-Schulungssimulation.

*Tabelle 14. Signifikante Korrelationen nach Spearman zur VR-SRF Schulungssimulation über die gesamte Stichprobe bezogen auf Geschlecht und Sportlichkeit. Geschlecht weiblich = 0, männlich = 1, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.*

	Geschlecht	Sportstunden / Woche
Schulungssimulation		
Aktivierung		-0.19 *
Cyber Sickness	-0.32 ***	
Präsenzerleben		-0.20 *

Cyber Sickness und Präsenzerleben

Bei beiden Anwendungen (Stadt und Lagerhalle) korrelierte das Präsenzerleben in der Simulation signifikant positiv mit einer besseren Bewertung der SRF-Schulungssimulation (Tabelle 15).

*Tabelle 15: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen dem Präsenzerleben und der Bewertung der VR-SRF Schulungssimulation HKM ($N = 57$) und der Deutschen Post/DHL ($N = 48$). * $p < .05$.*

TEI Skalen	Spaß	Nützlichkeit	Problem- basiertes Lernen	Aktivierung Vorwissen	Anwendung	Schwierigkeit
Präsenzerleben						
HKM	0.27*					
Post/DHL	0.32*	0.29*	0.31*	0.34*	0.29*	-0.34*

In der Stadtumgebung korrelierte eine höhere Cybersickness negativ mit dem Erleben von Spaß ($r = -0.43$, $p < .01$), einer positiven Einstellung ($r = -0.32$, $p < .05$) sowie der Aktivierung von Vorwissen ($r = -0.42$, $p < .01$).

Diskussion der fragebogenbasierten Evaluation der VR-SRF Schulungssimulation

Die hohen Unfallzahlen in allen Industrie- und Dienstleistungssektoren erfordern eine Mobilisierung aller Ebenen der Maßnahmenhierarchie für die SRF-Prävention. Zusätzlich zu den verfügbaren substituierenden, technischen und organisatorischen Maßnahmen sind Ansätze auf personaler Ebene sehr aufwändig, um eine breite Wirksamkeit zu entfalten (Schäfer et al., 2022; Wetzel et al., 2015; Wetzel, 2022). Generell haben Maßnahmen auf dieser Ebene jedoch das Potenzial, Maßnahmen der hierarchisch höher angesiedelten Ebenen zu verstärken (ISSA_web, 2023; Lehto & Cook, 2012). Zur Unterstützung präventiver Aktivitäten in der Logistik wurde die ENTRAPon-Stadtumgebung als Ergänzung zur BGHW-Lagersimulation entwickelt (Bohlscheid et al., 2024; Lungfiel et al., 2023; Zimmermann et al., 2023; vgl. Anhang). Da es in verschiedenen Branchen unterschiedliche Arbeitsplätze und Arbeitsaufgaben mit spezifischen Gefährdungen gibt, wurde bereits vor der technischen Entwicklung der ersten VR-basierten Lernumgebung entschieden, diese skalierbar zu gestalten. Sie war von Beginn an auf zukünftige Anwendungen und weitere Branchen und Arbeitsbereiche ausgelegt und damit auch für das ENTRAPon-Projekt prinzipiell geeignet. Die Anpassungen an die ENTRAPon-spezifischen Anforderungen folgten ebenfalls dem SDVE-Prozess (Eastgate et al., 2015), waren mit relativ wenig Aufwand möglich und zielten erfolgreich darauf ab, eine Sensibilität für SRF-Unfälle auch an diesen Arbeitsplätzen zu verbessern und diese den Mitarbeitenden in ihrem Arbeitsalltag zu vermitteln. Dies wurde durch das Angebot eines breiten Spektrums an praktischen Möglichkeiten zur aktiven Beteiligung an der Prävention am Arbeitsplatz erreicht und die Möglichkeit, die Umsetzung in der virtuellen Umgebung individuell zu gestalten.

Beide Anwendungen der VR-SRF-Schulungssimulation wurden von den Mitarbeitenden der Praxisunternehmen sehr positiv bewertet. Dabei schnitt die neu entwickelte Stadtanwendung etwas besser ab als die Lagerhallensimulation. Beide Anwendungen riefen eher Präsenzerleben in den Teilnehmenden hervor, hier zeigte sich die Lagerhallensimulation etwas besser. Cybersickness trat anfangs eher bei der Stadtanwendung auf. Nach Adjustierungen der Anwendung blieben die Symptome bei beiden Anwendungen gering. Ein hohes Präsenzerleben ging mit einer besseren Bewertung der Anwendungen einher. Die Bewertung der Stadtanwendung fiel bei höherem Erleben von Cyber-Sickness schlechter aus, wovon vor allem Frauen betroffen waren. Die Stadtanwendung wurde auch rückblickend noch recht positiv angesehen, während die rückblickende Bewertung der Lagerhallensimulation ebenfalls positiv, aber etwas geringer ausfiel.

In beiden Praxisunternehmen zeigten sich für den Transfer des in der SRF-Schulungssimulation Erlernten förderliche Bedingungen. Sportlichere Personen gaben bei beiden Anwendungen ein geringeres Präsenzerleben und eine geringere Aktivierung an. Sowohl die Sensibilisierung in der Lagerhalle als auch der Stadt kam bei den Mitarbeitenden der Praxisunternehmen gut an und zeigte Potenziale, das Wissen der Mitarbeitenden zu erhöhen, um SRF-Sturzereignisse zu verhindern. Hier zeigte sich der Vorteil, die Anwendung an die reale Arbeitsumgebung der zu Trainierenden anpassen zu können, um das Präsenzerleben zu erhöhen und den Transfer in den Alltag zu erleichtern. Die Anpassung der Anwendungen an die Arbeitsumgebung der Praxispartner konnte im Projekt erfolgreich umgesetzt werden. Die SRF-Schulungssimulation eignet sich als virtuelle Anwendung besonders dafür, branchenspezifisch genutzt zu werden. Durch die flexible Anpassung der virtuellen Umgebung an reale Arbeitskontexte und

Unfallursachen ist sie vielfältig in verschiedenen Kontexten zur Sensibilisierung für SRF-Ereignisse nutzbar. Damit kann die zielgerichtete Prävention von Arbeitsunfällen optimiert werden.

Für beide Praxispartner wurden 360°-Unternehmensfotos erstellt, um das Erkennen von SRF-Gefährdungen zu überprüfen. Die Mitarbeitenden von HKM fanden sowohl direkt nach der Sensibilisierung als auch sechs Monate später ungefähr 75% der in den Bildern versteckten Gefährdungen. Bei der Deutschen Post/DHL waren es ungefähr 55%. Dieser Unterschied zwischen den beiden Praxispartnern ist ihrer Arbeitsumgebung geschuldet. Die Betriebsstätte von HKM als Arbeitsumgebung ist nicht so großen Veränderungen unterzogen wie die Arbeitsumgebung der Post-Mitarbeitenden. Durch das Austragen von Post begeben sich die Mitarbeitenden in mehr Veränderungen ausgesetzten Umgebungen. Sei es nur die Veränderungen durch Wetter und Jahreszeiten, kommen auch Baustellen in Straßen und Häusern dazu, die zu unbekannten Veränderungen führen. Zudem fallen so Gefährdungen weniger auf als in einer Werkstatt bei HKM, in der beispielsweise keine Gegenstände in Wegbereiche gehören. Die ähnlichen Erkennungsraten von Gefährdungen zeigten, dass die Mitarbeitenden beider Unternehmen über die Zeit grundsätzlich auch nach sechs Monaten ähnlich sensibilisiert waren.

Nach den vorliegenden Ergebnissen zur Stadtumgebung kann davon ausgegangen werden, dass die Teilnehmenden durch die erfahrbare Mensch-System-Interaktion in der virtuellen Umgebung und durch die Diskussion mit den Auszubildenden und Kolleg*innen Erfahrungen gesammelt und ihr Wissen über Präventionsmaßnahmen erweitert haben. Mit dem Aufbau der Stadtumgebung hat sich gezeigt, dass sich die generisch angelegte Grundlage zum Konzept des „BGHW-Lagersimulators“ auch auf andere Branchen übertragen und sich spezifisch an die Arbeitsbereiche adaptieren lässt. Neben dem Lagersimulator wurde das Konzept auch bereits für die Branche des Einzelhandels (Projekt: IFA-5173_web, 2023) angewendet. In dieser Anwendung eines „VR-Supermarktes“ konnte auch der Wunsch nach mehr Dynamik und Lebendigkeit der Szenarien u. a. durch weitere bewegende virtuelle Personen umgesetzt werden. Dieser „VR-Supermarkt“ wird auch auf dem BGHW-Mobil präsentiert (BGHW, 2019). Neben verbesserten Interaktionen besteht auch die Möglichkeit, die Anwendungen als Desktop-Version zur Verfügung zu stellen, um zukünftig andere Anwender oder neue Seminar-Kontexte abzudecken. Es könnten bei Bedarf ebenfalls nur die 360°-Unternehmensfotos zur Sensibilisierung betrachtet werden (Straub & Kluge, 2020). Wartungsingenieure kamen nur selten zum Einsatz, abgesehen von Aktualisierungen der VR-Umgebung und kleineren Anpassungen der verwendeten VR-Techniken sowie für Schönheitsreparaturen am Softwaresystem. Da sich die Teilnehmenden gelegentlich etwas lebendigere Szenarien wünschten, wird derzeit ein Upgrade entwickelt. Komplexere Umgebungen und verbesserte HMDs erfordern jedoch mehr Rechenleistung. Hardware-Updates sind relativ einfach, da Standardkomponenten aus dem Gamingbereich verwendet wurden und somit je nach Bedarf geändert werden können.

Limitationen:

Herausforderungen bezogen auf die VR-SRF-Schulungssimulation bestanden vereinzelt bei der Nutzung des Virtualizers mit der Folge von Cyber-Sickness aufseiten der Teilnehmenden. Vor allem nach der Entwicklung des Stadtszenarios war die Testphase zu gering, als dass jegliche Unwohlsein auslösende Faktoren aus der Simulation gefunden und entfernt werden konnten. Einigen Teilnehmenden fiel die Nutzung des Virtualizers schwer und führte zu erhöhter Anstrengung. Um einen Trainingsabbruch aufgrund von Cyber-Sickness zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Trainingselemente geändert, sodass die VR-Simulation erst nach Training und Parcours absolviert wird. Mögliche Ursachen waren die neuere Unity-Version und die hohe Objektdichte im Stadtszenario. Als Gegenmaßnahmen wurden virtueller Nebel, reduzierte Ganggeschwindigkeit und eine vereinfachte Umgebung eingeführt, was die Stabilität verbesserte. Zudem könnte die höhere Schwierigkeit, Gefährdungen in der Stadt zu erkennen, ein weiterer Faktor sein. Für die zukünftige Anwendung ist es wichtig, auch nach Konzipierung bzw. Anpassung der VR-Simulation eine ausreichende Testphase zu durchlaufen, als auch die Verträglichkeit der VR-Anwendungen bei zu trainierenden Personen zu überprüfen und so das Risiko für Symptome zu verringern.

Herausforderungen bei der Bewertung der 360°-Bilder bezogen sich hauptsächlich auf die Post/DHL-Umgebung. Dort schien es erneut schwieriger, Gefährdungen zu finden als bei den HKM-Aufnahmen. Des

Weiteren konnte die Erkennung und Dokumentation entdeckter Gefährdungen der Post/DHL nicht objektiv eingetragen werden, da teilweise Gefährdungen nicht eindeutig oder ausreichend spezifisch durch die Teilnehmenden benannt wurden. Hierbei könnte die Problematik entstanden sein, dass einige Gefährdungen aufgrund der Häufigkeit ihres Auftretens im Arbeitsalltag der Mitarbeitenden (bspw. Bordsteine oder Laub) zwar generell als Gefahr wahrgenommen, in ihrem Unfallmechanismus (Stolpern, Rutschen, Fehltreten) aber nicht weiter differenziert wurden (bspw. verdeckte Stolperkante durch Laub im Gegensatz zu Laub auf der Straße als Rutschgefahr). Es wurden zudem mehr zusätzliche Gefährdungen gesehen. Es zeigte sich, dass die Bewertung der 360°-Bilder in der Post/DHL-Umgebung besonders herausfordernd war, da Gefährdungen schwerer zu erkennen und von den Teilnehmenden oft unspezifisch benannt wurden. Häufige Alltagsgefahren, wie Bordsteine oder Laub, wurden zwar wahrgenommen, aber nicht klar differenziert (z. B. Stolperkante durch Laub vs. Rutschgefahr durch Laub). Zudem wurden mehr zusätzliche Gefährdungen identifiziert.

Danksagung:

Wir möchten uns besonders bei Herrn Dr. Christoph Wetzel (BGHW) für die konzeptionellen Vorarbeiten und sehr umfangreiche Unterstützung bei der Entwicklung der VR-SRF-Schulungssimulation bedanken.

6. Perturbationstraining

Methodik

Messdurchführung des reaktiven Perturbationstrainingsprogrammes

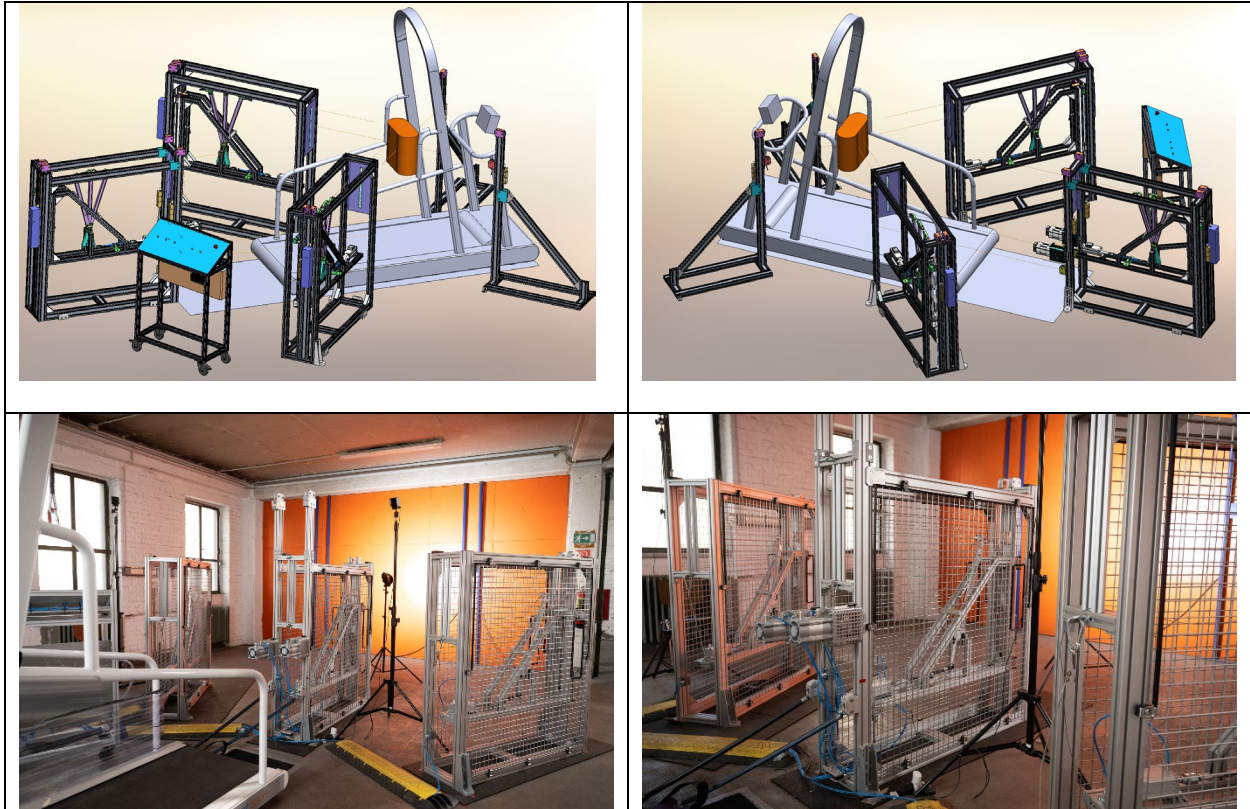


Abbildung 17: Aufbau des mechanischen Perturbationstrainings

Das mechanische Perturbationstraining wurde wiederum in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurden die Teilnehmenden während des Gehens auf dem Laufband insgesamt 16-mal an einem Fuß (jeweils acht links und acht rechts) perturbiert, wobei die Bewegungen des Fußes während der Schwungphase des entsprechenden Beines für weniger als eine Sekunde blockiert wurden. Dies konnte an beiden Füßen durch die Studienleitung mittels einer Bremsvorrichtung über ein Drahtseil eingeleitet werden, das vor dem Training über eine Manschette am Knöchel der Teilnehmenden befestigt wurde und sich während des Gehens auf dem Laufband mit den Bewegungen des Teilnehmenden mitbewegte (Abbildung 18, linkes Bild). In der zweiten Phase wurden Hüftperturbationen induziert, indem das Becken 16-mal über am Sicherheitsgurt befestigte Drahtseile gezogen wurde (Abbildung 18, rechtes Bild). Insgesamt wurden acht Perturbationen in posteriorer Richtung während der Schwungphase des rechten oder linken Beines und acht Perturbationen in lateraler Richtung (jeweils vier nach links und vier nach rechts in einem Winkel von 45° zur Körpermitte während der Schwungphase des entsprechenden Beines) durchgeführt. In beiden Phasen wurden die jeweiligen Perturbationen im Abstand von ca. 30s durchgeführt, wobei die Reihenfolge bezüglich des perturbierten Fußes bzw. der Perturbationsrichtung bei der Hüftperturbation für jeden Teilnehmenden vorher zufällig festgelegt wurde.

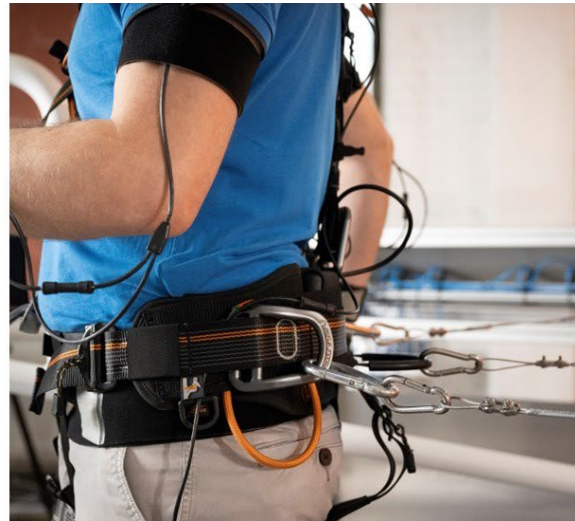


Abbildung 18: Fußmanschetten für die mechanische Perturbation an den Füßen (linke Abbildung) sowie Anschlagpunkte für die mechanische Perturbation an der Hüfte (rechte Abbildung)

Für das VR-basierte Perturbationstraining wurde von den Forschungsgruppen des RheinAhrCampus Remagen und der London South Bank University eine 3D-Umgebung in Form eines endlosen virtuellen Korridors in Unity (Version 2019.2.7f2, Unity Technologies, San Francisco, Kalifornien) konstruiert, den die Teilnehmenden während des Gehens auf dem Laufband durchliefen. Zu vorher definierten Zeitpunkten wurden Perturbationen durch eine Rotation (Kippen/Verdrehen) des virtuellen Bildes ausgelöst. Insgesamt wurden 30 Perturbationen nach einem festgelegten Schema durchgeführt, wobei die Dauer der Rotation sowie die Rotationsachse und der Rotationswinkel zwischen den einzelnen Perturbationen variierten. Der Beginn einer Perturbation wurde zum Zeitpunkt des Fersenkontaktes des rechten Fußes eingeleitet. Für die Durchführung des VR-basierten Perturbationstrainings wurde das HTC Vive System (High Tech Computer Corporation; HTC, Taoyuan, Taiwan) mit der HTC Vive Pro 1 Brille mit vier Lighthouses (jeweils zwei vor und zwei hinter dem Laufband) verwendet. Die Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb der VR-Umgebung wurde durch die Geschwindigkeit des Laufbandes festgelegt, um das Auftreten von „Motion Sickness“ während des Trainings zu reduzieren. Zur besseren Orientierung in der virtuellen Umgebung wurde ein 3D-Körpermodell des jeweiligen Teilnehmenden mittels eines HTC Vive Trackers an der Hüfte und des am Körper getragenen Xsens Link Motion Tracker (Movella™) (, Fullbody, Messfrequenz 120 Hz) in die VR-Umgebung gestreamt. Zusätzlich wurde ein 3D-Modell des Lode Laufbandes in die Umgebung integriert und in Unity manuell relativ zum Teilnehmenden positioniert (Abbildung 19). Die anfänglich geplante Positionierung mittels eines weiteren Vive Trackers war hier aufgrund eines sich wiederholenden Fehlers in Unity nicht möglich.



Abbildung 19: Beispielproband auf dem Laufband ausgerüstet mit der VR-Brille und einem Vive Tracker (rot markiert, linke Abbildung) sowie eine Darstellung seines Körpermodells in der Movella-Software (rechte Abbildung, linker Bildschirm) und in der Unity-Umgebung mit einem Modell des Laufbandes (rechte Abbildung, rechter Bildschirm)

Unvorhersehbare Gangperturbationen auf dem SRF-Parcours

Um zu evaluieren, ob die Durchführung eines der Perturbationstrainings auf dem Laufband zu einer adaptiven Verbesserung der dynamischen Stabilität geführt hat und ob diese Verbesserungen von den Teilnehmenden auf reale SRF-Situationen transferiert werden können, wurde für das Projekt in der Werkstatt des RheinAhrCampus in Remagen in Zusammenarbeit mit der London South Bank University eine pneumatisch betriebene Gangstrecke (Länge 14,7 m, bestehend aus sieben Modulen à 2,1 m Länge, Breite 1 m) konstruiert (Abbildung 20). Die Teilnehmenden durchliefen den Parcours auf gleichmäßig über die Gangstrecke verteilten Bodenplatten (Abstand 70cm), unter bzw. neben denen SRF-Elemente eingebaut waren, die jeweils beim Betreten unvorhersehbar eine von drei Perturbationsarten auslösen konnten: 1) Stolpern, 2) Rutschen oder 3) Fehltreten. Insgesamt wurden 18 SRF-Elemente (6 pro Perturbationsart) über die gesamte Länge des Parcours sowohl links als auch rechts in zufälliger Verteilung eingebaut. Der SRF-Parcours sollte nach dem Projektplan auch ein Treppenelement enthalten, was aufgrund der niedrigen Deckenhöhe bei HKM aus Sicherheitsgründen entfällt. Um Verletzungen durch einen Sturz nach dem Auslösen einer Perturbation zu verhindern, waren die Teilnehmenden jederzeit über einen Auffanggurt mit einem an der Decke montierten Sicherungssystem der Firma Skylotec (SKYLOTEC GmbH, Neuwied, Deutschland), bestehend aus einer Laufschiene mit Endanschlügen, verbunden (Abbildung 20).



Abbildung 20: Stolper-, Rutsch- und Fehltreten Parcours (SRF-Parcours) mit dem an der Decke montierten Schienensystem der Firma Skylotech mit einem Beispielproband

Die unvorhersehbare Gangperturbation „Stolpern“ wurde durch das Hochklappen eines Holzbrettes (Höhe 19 cm) während der Schwungphase des zu perturbierenden Beines eingeleitet. Das Element wurde dabei durch das Aufsetzen des kontralateralen Beines auf die daneben liegende schwarze Bodenplatte mit Hilfe eines verdeckten Kontaktsensors ausgelöst (Abbildung 21).



Abbildung 21: Element „Stolpern“ des Stolper-, Rutsch- und Fehltreten Parcours mit einem Beispielproband

Die unvorhersehbare Gangperturbation „Rutschen“ wurde durch das Verrutschen einer beweglichen Bodenplatte verursacht, die beim Aufsetzen des zu perturbierenden Beines auf zwei verdeckten Schienen mit Linearlagern nach vorne gleiten konnte (Endanschlag bei 14 cm, Abbildung 22).



Abbildung 22: Element „Rutschen“ des Stolper-, Rutsch- und Fehltreten Parcours mit einem Beispielproband

Die unvorhersehbare Gangperturbation „Fehltreten“ wurde durch das Absenken einer Bodenplatte mittels eines darunter liegenden Schaumblocks (Höhe 11 cm) verursacht, der beim Aufsetzen des zu perturbierenden Beines zusammengedrückt wurde (Absenktiefe 5 cm, Abbildung 23).

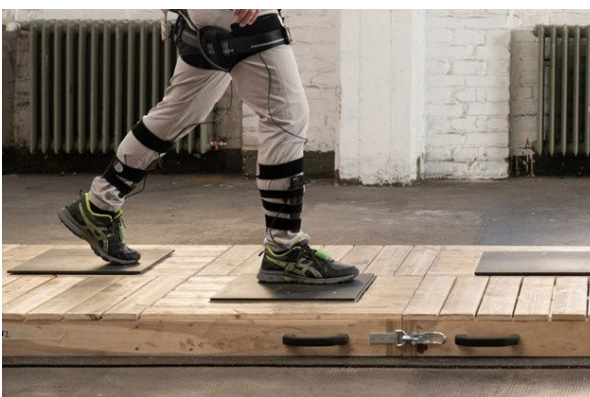


Abbildung 23: Element „Fehltreten“ des Stolper-, Rutsch- und Fehltreten Parcours mit einem Beispielproband

Die beschriebenen SRF-Elemente wurden so in den Parcours integriert, dass bei Aktivierung eines Elementes durch die Studienleitung für den Teilnehmenden im Voraus nicht vorhersehbar war, welches Element auslösen würde. Aufgrund der Konstruktion des Parcours konnten die Elemente nur in eine Gangrichtung ausgelöst werden, weshalb im Vorfeld eine feste Gangrichtung mit entsprechendem Start- und Endpunkt definiert wurde.

Am ersten Messtag wurde zu Beginn des reaktiven Perturbationstrainingsprogramms die Anthropometrie der Teilnehmenden nach den Vorgaben der Software XSens MVN Record (Version 2022.0.2, Movella Holdings Inc., Henderson, Nevada) vermessen. Anschließend wurden sie mit dem XSens-Link-Messanzug (Movella™) bestehend aus 17 inertialen Messsensoren (IMUs) nach den Platzierungs-Vorgaben von XSens ausgestattet (Abbildung 24), um ihre Gangkinematik während der Durchführung des Perturbationstrainings auf dem Laufband sowie auf dem SRF-Parcours zu erfassen. Zusätzlich wurde ihnen der Sicherungsgurt mit Auffanggeschirr der Firma Skylotec angelegt.

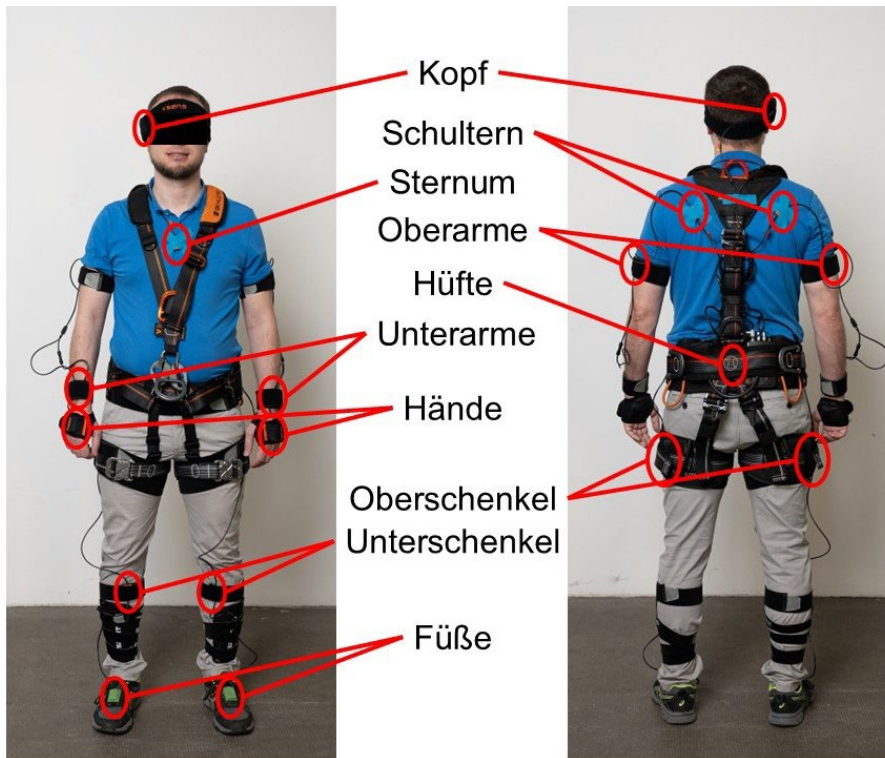


Abbildung 24: Darstellung der Platzierung der einzelnen Sensoren des XSens-Messanzuges (Link System) anhand eines Beispielprobanden, welcher zusätzlich mit dem Sicherungsgurt mit Auffanggeschirr der Firma Skylotec ausgerüstet ist

Nach dem Anlegen des Messequipments und des Sicherungsgurts wurde der XSens-Messanzug kalibriert (Modus Neutralpose „N-Pose“ + Gehen „Walk“) und die Teilnehmenden absolvierten die erste Session (Pre für CON bzw. Pre Int für MECH und VR) auf dem SRF-Parcours in zwei Phasen mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten: 1) mit ihrer normalen bzw. bevorzugten Ganggeschwindigkeit (bevorzugt) dann 2) mit einer vom Teilnehmenden subjektiv empfundenen schnelleren Ganggeschwindigkeit (schnell).

Die Teilnehmenden wurden im Vorfeld darüber instruiert, beim Überschreiten des Parcours nur die schwarzen Bodenplatten zu betreten. Für beide Ganggeschwindigkeiten starteten die Teilnehmenden mit einer Akklimatisierungsphase ohne Perturbationen, in welcher sie den Parcours mehrmals selbständig und ohne weitere Instruktionen durch die Studienleitung hin- und zurückgehen sollten, um sich an die jeweilige Ganggeschwindigkeit und die Abstände der Bodenplatte zu gewöhnen. Anschließend wurden für die jeweilige Ganggeschwindigkeit mehrere Durchgänge absolviert, bei denen jeweils eines der drei zuvor beschriebenen Elemente „Stolpern“, „Rutschen“ und „Fehltreten“ während des Hinabgehens des Parcours auslösen konnte. Zwischendurch wurden von Teilnehmenden auch Durchgänge ohne Perturbation absolviert. Die Teilnehmenden wurden im Vorfeld darüber informiert, dass ab diesem Zeitpunkt eine Perturbation beim Hinabgehen des Parcours erfolgen könnte. Sie erhielten jedoch keine weiteren Informationen über die Art, den Ort oder den Zeitpunkt einer Perturbation. Außerdem wurden sie instruiert, nach einer erfolgten Perturbation den Parcours (wenn möglich) bis zum Ende weiter entlangzugehen und nicht stehen zu bleiben, wobei sie nicht mehr auf die Bodenplatte treten mussten. Der Beginn eines

Durchgangs wurde dabei seitens der Studienleitung vorgegeben. Nach einem Durchgang mit erfolgter Perturbation wurden ohne vorherige Information an die Teilnehmenden weitere Durchgänge ohne Perturbation absolviert. Dieses Vorgehen wurde gewählt, damit die Teilnehmenden nicht bei jedem Durchgang mit einer Perturbation rechnen. Insgesamt durchliefen alle Teilnehmenden in beiden Geschwindigkeiten einmal alle drei Perturbationen. Zwei Kameras wurden jeweils in Blickrichtung des Teilnehmenden (Webcam Logitech C920, Logitech international S. A., Apples, Schweiz, synchronisiert mit der XSens-Software) und hinter dem Teilnehmenden (GoPro Hero8, GoPro, San Mateo, Kalifornien) positioniert, um von den Messungen Videoaufnahmen zu generieren, welche für die spätere Auswertung der Messdaten (bspw. für die Detektion von Stürzen) genutzt wurden.

Anschließend starteten die Teilnehmenden der beiden Interventionsgruppen ihr jeweiliges Perturbationstraining auf dem Laufband (Int), wobei zuvor die Platzierung der einzelnen Sensoren des XSens-Messanzuges visuell überprüft und der Anzug erneut kalibriert wurde. Die Teilnehmenden in der Kontrollgruppe gingen für 15 Minuten ohne Perturbation auf dem Laufband. Zu Beginn des Perturbationstrainings absolvierten die Teilnehmenden für beide Trainingsinterventionen eine zweiminütige Akklimatisierungsphase, in der sie sich an das Gehen auf dem Laufband unter der vorgegebenen Ganggeschwindigkeit gewöhnen konnten. Anschließend wurden die Teilnehmenden mit dem Equipment für das jeweilige Perturbationstraining ausgestattet. Für das mechanische Perturbationstraining absolvierten die Teilnehmenden vor der entsprechenden Phase (Fuß- bzw. Hüftperturbation) jeweils eine weitere zweiminütige Akklimatisierungsphase, um sich an das Gehen mit den Fußmanschetten bzw. den Drahtseilen zu gewöhnen. Für die Teilnehmenden im VR-basierten Perturbationstraining wurde ebenfalls eine weitere zweiminütige Akklimatisierungsphase durchgeführt, um sich an das Gehen in der virtuellen Umgebung zu gewöhnen. Innerhalb dieser Akklimatisierungsphase sollten sich die Teilnehmenden in der ersten Minute noch mit den Händen an den vorderen Griffen des Laufbandes festhalten. Danach gingen die Teilnehmenden für eine weitere Minute frei auf dem Laufband, ohne sich an den Griffen festzuhalten. Nach den Akklimatisierungsphasen wurde das jeweilige Perturbationstraining nach den entsprechenden oben beschriebenen Schemata durchgeführt. Vor Beginn des Perturbationstrainings wurden die Teilnehmenden instruiert, sich nach einer erfolgten Perturbation möglichst selbständig abzufangen, ohne sich am Laufband festzuhalten oder abzustützen, sowie weiter auf dem Laufband zu gehen, ohne stehen zu bleiben. Zwei Kameras wurden jeweils parallel (Webcam Logitech C920, Logitech international S. A., Apples, Schweiz, synchronisiert mit der XSens-Software) und hinter dem Laufband (GoPro Hero9, GoPro, San Mateo, Kalifornien) positioniert, um von den Messungen Videoaufnahmen zu generieren, welche für die spätere Auswertung der Messdaten (bspw. für die Detektion von Stürzen) genutzt wurden.

Im Anschluss an das Perturbationstraining füllten die Teilnehmenden von Interventionsgruppe I (mech. Perturbationstraining) eine Kurzversion des validierten Training-Evaluations-Inventar-Fragebogens (TEI; Ritzmann, Hagemann und Kluge, 2014) aus, in dem sie das von ihnen absolvierte Perturbationstraining bewerten sollten. Die Interventionsgruppe II (VR-Perturbationstraining) füllte eine VR-bezogene Variante des TEI, den VR „Simulator Sickness“-Fragebogen (Kennedy et al., 1993) und einen Fragebogen zum empfundenen Immersionserlebnis (IPQ; Schubert et al., 2001) aus, um den Einfluss der VR im Training zu erfassen. Abschließend absolvierten alle Teilnehmenden die zweite Session auf dem SRF-Parcours (Post für CON, Post Int für MECH und VR), wobei die Reihenfolge der Perturbationen innerhalb der beiden Geschwindigkeiten im Vergleich zur ersten Session (Pre CON/Pre Int MECH & VR) verändert wurde. In vereinzelt Fällen verweigerten die Teilnehmenden jedoch im Vorfeld die Wiederholung einzelner Gangperturbationen oder direkt des gesamten Durchgangs in der schnellen Ganggeschwindigkeit, sodass diese Messungen nicht durchgeführt wurden. Vor der zweiten Session wurden erneut die Platzierung der einzelnen Sensoren des XSens-Messanzuges visuell überprüft und der Messanzug neu kalibriert.

Am zweiten Messtag wurden die Teilnehmenden erneut mit dem Equipment (XSens-Messanzug + Sicherheitsgurt) ausgestattet und absolvierten eine dritte Session auf dem SRF-Parcours (Ret CON/ Ret Int MECH & VR), wobei die Reihenfolge der Perturbationen innerhalb der beiden Geschwindigkeiten im Vergleich zu den beiden Durchgängen am ersten Messtag (Pre Int und Post Int) erneut verändert wurde.

Datenverarbeitung & -analyse für das Perturbationstrainingsprogramm

Zu Beginn wurden die Videoaufnahmen aller Messungen analysiert, um eventuelle Stürze und mögliche Unterschiede in den Abfangstrategien der Teilnehmenden für die jeweilige Perturbation zu detektieren. Für die Gangperturbation „Stolpern“ sowie für die Perturbation der Füße für das mechanische Perturbationstraining wurden zwei unterschiedliche Abfangstrategien seitens der Teilnehmenden identifiziert: 1) die „Lowering Strategy“, bei der die Teilnehmenden den perturbierten Fuß direkt in Richtung Boden absenkten, sowie 2) die „Elevating Strategy“, bei der der perturbierte Fuß zunächst in der Luft angehoben und dann mit einem Ausfallschritt nach vorne abgesetzt wurde. Für die Gangperturbation „Rutschen“ wurden drei verschiedene Abfangstrategien identifiziert: 1) die Teilnehmenden setzten den Fuß des nicht-perturbierten Beines neben oder hinter den Fuß des perturbierten Beines ab (zweiter Schritt mit dem perturbierten Bein) 2) die Teilnehmenden setzten den Fuß des nicht-perturbierten Beines vor den Fuß des perturbierten Beines ab (zweiter Schritt mit dem perturbierten Bein) sowie 3) die Teilnehmenden setzten den Fuß des nicht-perturbierten Beines erst hinter/neben und dann vor den Fuß des perturbierten Beines ab (zweiter Schritt mit dem nicht-perturbierten Bein). Für die Gangperturbation „Fehltreten“, die Perturbation an der Hüfte für das mechanische Perturbationstraining und das VR-basierte Perturbationstraining konnten keine für die Auswertung relevanten Unterschiede in den Abfangstrategien zwischen den Teilnehmenden detektiert werden.

Neben der Analyse der Abfangstrategien wurden alle Messungen (Perturbationstraining und SRF-Parcours) anhand der Videoaufnahmen auf Stürze der Teilnehmenden untersucht. Dabei wurden für die weitere Auswertung der Messdaten des SRF-Parcours alle Teilnehmenden ausgeschlossen, die in mindestens einem der drei Durchgänge (Pre Int, Post Int oder Ret Int) nach einer erfolgten Gangperturbation das Gleichgewicht nicht selbstständig wiederherstellen konnten und durch das Sicherungssystem aufgefangen werden mussten. Zudem wurden alle Teilnehmenden ausgeschlossen, welche eine oder mehrere der Gangperturbationen im zweiten (Post) oder dritten Durchgang (Ret) nicht mehr absolvieren wollten oder bei denen technische Probleme (z. B. Lösen eines Sensors) während einer Messung aufgetreten sind. Dieses Verfahren wurde für beide Ganggeschwindigkeiten und alle drei Gangperturbationen getrennt durchgeführt. Für die Gangperturbation „Stolpern“ wurden zusätzlich für beide Geschwindigkeiten alle Teilnehmenden ausgeschlossen, die zu mindestens einem der drei Messzeitpunkte die „Lowering Strategy“ zur Wiedererlangung des Gleichgewichts einsetzten (Tabelle 16).

Tabelle 16: Resultierende Stichprobengrößen für die weitere Auswertung der Messdaten des ersten Messtages nach Sichtung aller Videos und Überprüfung der Datensätze für die beiden Interventionsgruppe MECH und VR und die Kontrollgruppe CON für die einzelnen Kombinationen der Gangperturbationen (Stolpern, Rutschen und Fehltreten) und Geschwindigkeiten (bevorzugt und schnell). N ist die Anzahl der ursprünglichen Stichprobengröße für die jeweilige Gruppe

	Stolpern, bevorzugt	Stolpern, schnell	Rutschen, bevorzugt	Rutschen, schnell	Fehltreten, bevorzugt	Fehltreten, schnell
CON (N = 30)	26	21	28	27	28	28
MECH (N = 40)	36	30	39	39	38	37

VR (N = 40)	37	31	40	40	40	40
------------------------	----	----	----	----	----	----

Für die Messungen des Perturbationstrainings wurden alle Perturbationen notiert, bei denen ein Sturz detektiert wurde oder Teilnehmende sich am Laufband festgehalten hatten. Für beide Perturbationstrainings wurde abschließend für die weitere Auswertung für jeden Teilnehmenden eine Perturbation ausgewählt, bei welcher dieser eine entsprechend starke Reaktion zeigte und keine der oben genannten Ausschlusskriterien aufwies (Tabelle 17). Dies erfolgte getrennt für die Perturbationen an den Füßen (jeweils links und rechts) und an der Hüfte (für alle drei Zugrichtungen) für das mechanische Perturbationstraining sowie für das VR-basierte Perturbationstraining.

Tabelle 17: Resultierende Stichprobengrößen für die weitere Auswertung nach Sichtung aller Videos und Überprüfung der Datensätze für die beiden Perturbationstrainings. Bei dem mechanischen Perturbationstraining wurden die Datensätze für die Perturbation an den Füßen und an der Hüfte getrennt voneinander analysiert. N ist die Anzahl der ursprünglichen Stichprobengröße.

	Mechanisches Perturbationstraining		VR – basiertes Perturbationstraining
	Füße	Hüfte	
N = 40	35	37	30

Berechnung der dynamischen Gangparameter aus den kinematischen Daten

Im ersten Schritt wurden die Messdaten des Perturbationstrainings und des SRF-Parcours in der Software XSens MVN Record (Version 2022.0.2, Konfiguration „HD – Multi Level“ für die Gangperturbation „Fehltreten“, Konfiguration „HD – Single Level“ für die restlichen Datensätze) verarbeitet. Die resultierenden prozessierten Messdaten wurden anschließend in der Software „WIDAAN“ (Version 2023.4) mit den entsprechenden Videoaufnahmen der Webcams synchronisiert. Basierend auf der aus den Sensordaten erhaltenen Rumpfquaternion wurde der Flexionswinkel des Oberkörpers (Abbildung 25) nach dem Modell „CUELA-Dortmunder“ (Jäger, 2018) in WIDAAN berechnet. Die weitere Datenverarbeitung sowie die Berechnung der dynamischen Gangparameter erfolgten anschließend in Python (Version 3.12.0, Python Software Foundation, Beaverton, Oregon). Dazu wurden die kinematischen Daten (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) des Körperschwerpunktes (CoM) und der Füße (jeweils für links und rechts, unterteilt in Rückfuß „FOOT“ und Vorfuß „TOE“) aus den von XSens prozessierten Daten sowie der Flexionswinkel des Oberkörpers aus WIDAAN extrahiert. Zusätzlich wurden die Schritte der Teilnehmenden auf Basis der Bodenkontaktzeitpunkte des Vor- und Rückfußes berechnet, die mit Hilfe eines Algorithmus in der Software XSens ermittelt wurden. Die Positionsdaten des CoM wurden anschließend gefiltert (Savitzky-Golay Filter, Fensterbreite 250, Grad 3) und die globalen Positionen und Orientierungen des CoM und der Füße (FOOT und TOE) in der XY-Ebene in Relation zu der Position und Orientierung des CoM drei Schritte vor der Perturbation transformiert. Diese Vorgehensweise wurde angewendet, damit die Parameter in ihre anterior-posterior (AP) und medio-lateralen Komponenten (ML) aufgeteilt werden konnten und somit eine bessere Analyse der Mechanismen möglich war.

Als Maß für die dynamische Gangstabilität wurde die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, Gleichung 1) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase (Zeitpunkt „Touchdown“; TD) nach Hof et al., 2005 berechnet (Abbildung 25):

$$MoS = BoS^{AP} - X_{CoM} \quad (1)$$

wobei BoS^{AP} als vordere (anteriore) Grenze der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS) und X_{CoM} als extrapolierter Körperschwerpunkt definiert ist (Gleichung 1). Die BoS^{AP} wurde hierbei über die Position des vorderen Fußes (LTOE oder RTOE) in Gangrichtung (X-Koordinate) zum Zeitpunkt TD bestimmt und der X_{CoM} nach folgender Formel (Gleichung 2) berechnet (Abbildung 26, Hof et al., 2005):

$$X_{CoM} = P_{CoM} + \frac{V_{CoM}}{\sqrt{\frac{g}{l}}} \quad (2)$$

wobei P_{CoM} und V_{CoM} globale Position bzw. Geschwindigkeit des CoM, l die Beinlänge und g die Erdbeschleunigung sind.

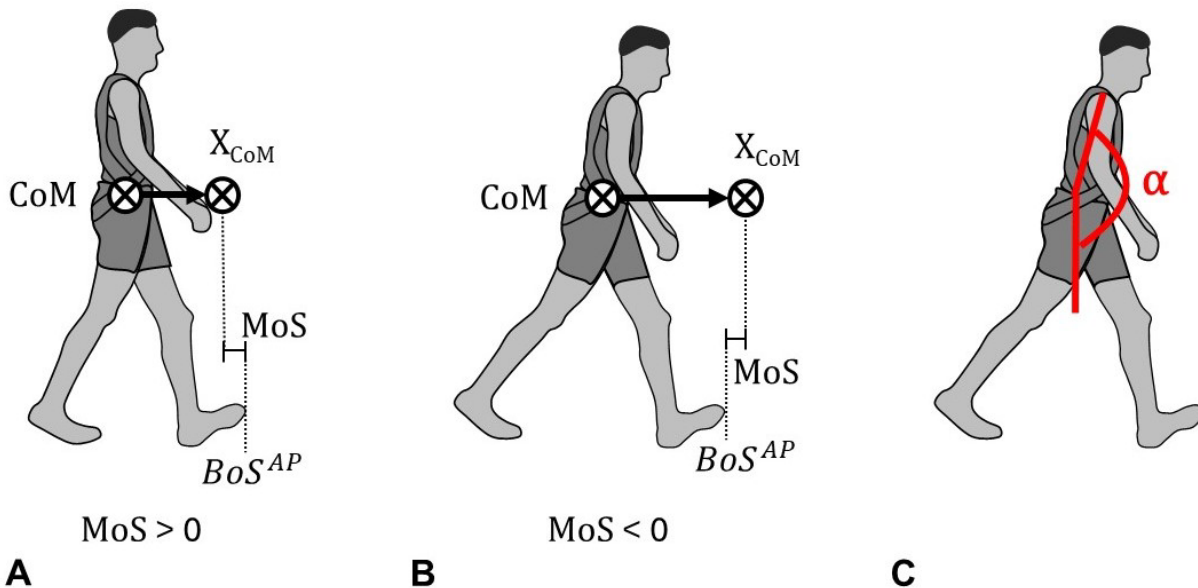


Abbildung 25: Darstellung der Gangparameter Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS), vordere (anterior) Grenze der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS^{AP}), Position des Körperschwerpunktes (CoM), extrapolierter Körperschwerpunkt (X_{CoM}) und dem Flexionswinkel des Oberkörpers (α , C). Bei $MoS > 0$ befindet sich der X_{CoM} hinter der BoS^{AP} (A); bei $MoS < 0$ befindet sich der X_{CoM} vor der BoS^{AP} (B)

Als weitere Parameter wurden die Vergrößerung der BoS in anterior Richtung (BoS, Gleichung 3) über die Position des vorderen Fußes (P_{Toe}) zum Zeitpunkt TD (TD_0) berechnet, wobei in allen drei Fällen die Positionen des hinteren Fuß (P_{Foot}) des vorherigen Schrittes (TD_{-1}) als globale Referenz definiert wurde:

$$BoS = P_{Toe}^{TD_0} - P_{Foot}^{TD_{-1}} \quad (3)$$

Für die Messdaten des SRF-Parcours und des Perturbationstrainings wurden für jede erfolgte Perturbation drei Events mit den jeweiligen erfolgten Schritten innerhalb der Datensätze definiert:

- Baseline:

Das Event „Baseline“ beschreibt den Zeitraum vor Auftreten einer Perturbation und umfasst bei allen Perturbationen den Zeitpunkt TD der beiden Schritte vor Auslösen der Perturbation (Pre Pert).

- Perturbation

Das Event „Perturbation“ beschreibt den Zeitpunkt, zu dem der Beginn einer entsprechenden Reaktion des Teilnehmenden nach einer Perturbation detektiert wurde.

- Postperturbation

Das Event „Postperturbation“ beschreibt den Zeitraum nach einer erfolgten Perturbation, in welchem der Teilnehmende versucht, seine dynamische Gangstabilität wiederzuerlangen, und beinhaltet den Zeitpunkt TD aller dafür notwendigen Schritte. Basierend auf der höheren motorischen Anforderung wurde bei der Perturbation der Gangperturbation „Stolpern“ der Fokus der Auswertung auf den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) gelegt (Epro et al., 2018a, Epro et al., 2018b). Für die Gangperturbation „Rutschen“ wurde aufgrund der unterschiedlichen Abfangstrategien für die ersten beiden Schritte nach der Perturbation der dritte Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) analysiert. Bei der Gangperturbation „Fehltreten“ wurde der erste Schritt nach der Perturbation ausgewertet (Post Pert1), da diese Perturbation die geringste motorische Anforderung aufzeigte und fast alle Teilnehmenden beim zweiten Schritt ihr Gleichgewicht bereits wiedererlangt hatten. Für die ausgewählte Perturbation innerhalb der Trainingsdaten wurden die ersten vier Schritte nach der Perturbation betrachtet (Post Pert 1-4).

Zur Detektion des Zeitpunktes der Perturbation wurden vorher innerhalb der Messdaten festgelegte Bereiche markiert, in welchen die entsprechende Perturbation erfolgt ist. Für die Messdaten des SRF-Parcours wurden die Bereiche automatisch mittels in den Parcours integrierter Sensoren detektiert, welche den Zeitpunkt der Auslösung der Perturbation erfassten. Die markierten Bereiche wurden anschließend kontrolliert und wenn notwendig korrigiert. Für die Messdaten der Perturbationstrainings wurden die Bereiche händisch in den Datensätzen markiert. Die Detektion des genauen Zeitpunktes der Perturbation wurde dann je nach Art der Perturbation mit unterschiedlichen Verfahren bestimmt:

- Detektion über den Beschleunigungspeak des perturbierten Fußes. Dieses Verfahren wurde für die Perturbationen bei den Gangperturbationen „Stolpern“ und „Rutschen“ auf dem SRF-Parcours sowie bei der Perturbation der Füße für das mechanische Perturbationstraining durchgeführt.
- Detektion über die Fußposition des WIDAAN-Modells (visuell) in Kombination mit den Videoaufnahmen.

Dieses Verfahren wurde für die Perturbation an der Hüfte für das mechanische Perturbationstraining durchgeführt, da eine Detektion über einen Peak in den Beschleunigungsdaten nicht möglich war.

- Detektion über eine Reduktion in der MoS zum Zeitpunkt TD nach erfolgter Perturbation im Vergleich zu vor der Perturbation.

Dieses Verfahren wurde für das VR-basierte Perturbationstraining verwendet, da die Reaktion des Teilnehmenden auf die Perturbation nicht zeitgleich mit der Rotation des Bildschirms erfolgte und auch zwischen den Teilnehmenden variierte.

- Detektion über das Minimum in der vertikalen Komponente (Z-Koordinate) des perturbierten Fußes.

Dieses Verfahren wurde für die Gangperturbation „Fehltreten“ angewendet, da die Reaktion auf die Perturbation bei der maximalen Einsinktiefe des perturbierten Beines erfolgte.

Die Zeitpunkte der einzelnen Schritte für die Events „Baseline“ und „Postperturbation“ sowie der Zeitpunkt der Perturbation wurden dann in den Datensätzen gespeichert und visuell in WIDAAN nachkontrolliert. Anschließend wurden für die statistische Auswertung die berechneten Messwerte für die Gangparameter zu diesen Zeitpunkten extrahiert, wobei für das Intervall „Baseline“ der Mittelwert über beide Schritte gebildet wurde. Für die Messdaten des mechanischen Perturbationstrainings wurde für die Perturbation an den Füßen der Mittelwert über beide Seiten (links und rechts) für alle Gangparameter gebildet. Für die Hüftperturbation wurde der Mittelwert entsprechend über alle drei Zugrichtungen (posterior sowie lateral links und rechts) berechnet.

Statistische Auswertung der dynamischen Gangparameter

Die statistische Auswertung erfolgte in SPSS (Version 29.0.2.0 (20), IBM Deutschland GmbH, Böblingen, Deutschland), wobei folgende Gangparameter als abhängige Variablen definiert wurden: MoS, BoS, der Flexionswinkel des Oberkörpers und für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von 5 % festgelegt. Für die Auswertung der Messdaten vom SRF-Parcours wurde für einen „Pre vs. Post“-Vergleich der abhängigen Variablen ein gepaarter, zweiseitiger t-Test zwischen den beiden Sessions auf dem SRF-Parcours getrennt für die beiden Interventionsgruppen MECH und VR sowie für die Kontrollgruppe CON angewandt. Diese Vorgehensweise wurde separat für die drei Gangperturbationen (Stolpern, Rutschen und Fehltreten) in den beiden Ganggeschwindigkeiten (bevorzugt und schnell) für den Schritt vor der Perturbation (Pre Pert) sowie für die vorher definierten Schritte nach der Perturbation (Post Pert) der jeweiligen Gangperturbation durchgeführt: dem ersten und zweiten Schritt für die Gangperturbation „Stolpern“ (Post Pert1-2), dem dritten Schritt für die Gangperturbation „Rutschen“ (Post Pert3) und dem ersten Schritt für die Gangperturbation „Fehltreten“ (Post Pert1). Für die beiden Interventionsgruppen wurden bei einer signifikanten Zunahme (Post Int vs. Pre Int) in der MoS für einen Schritt nach einer der Gangperturbationen (Post Pert) alle Teilnehmenden identifiziert, welche in der zweiten Session einen höheren Wert für die MoS im Vergleich zur ersten Session aufzeigten („Responder“). Für dieses Kollektiv wurden für die entsprechende Gangperturbation in beiden Geschwindigkeiten weitere separate gepaarte, zweiseitige t-Tests zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die abhängigen Variablen angewandt. Zudem wurde bei einer ausreichenden Anzahl an „Respondern“ innerhalb der entsprechenden Interventionsgruppe bzw. Teilnehmenden in der Kontrollgruppe am zweiten Messtag sechs Monate nach dem Training (Ret bzw. Ret Int) eine einseitige ANOVA mit Messwiederholungen über alle drei Zeitpunkte (Pre vs. Post vs. Ret) für die abhängigen Variablen durchgeführt, um mögliche Beibehaltungseffekte in den erlernten Mechanismen nach sechs Monaten zu analysieren. Anschließend wurden weitere gepaarte, zweiseitige t-Tests mit Bonferroni-Korrektur angewandt, um weiterführend Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitpunkten festzustellen, wenn ein signifikanter Unterschied durch die ANOVA detektiert wurde. Damit ein Beibehaltungseffekt angenommen werden konnte, wurden folgende Kriterien definiert:

- Eine signifikante Zunahme in der MoS für „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“.
- Kein signifikanter Unterschied in der MoS „Post-Intervention“ zu „Retention-Intervention“.
- Eine signifikante Zunahme in der MoS für „Retention Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“.

Für die Trainingsdaten wurden für alle abhängigen Variablen vier separate gepaarte, zweiseitige t-Tests mit Bonferroni-Korrektur zwischen dem Schritt vor der Perturbation (Pre Pert) jeweils zu den vier Schritten nach der Perturbation (Post Pert 1-4) durchgeführt.

Ergebnisse

Mechanische und VR-basiertes Perturbationstraining auf dem Laufband

Im mechanischen Perturbationstraining zeigte sich für die MoS eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) über alle vier Schritte nach der Perturbation (Post Pert1–4) im Vergleich zur Baseline (Pre Pert; Abbildung 10 A). Die BoS wies für die Fußperturbation eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den ersten und vierten Schritt (Post Pert1 und Post Pert4) sowie eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert2) im Vergleich zur Baseline auf (Pre Pert; Abbildung 26 B). Zudem ergab sich für die BoS im Vergleich zur Baseline (Pre Pert) für die Hüftperturbation eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) im ersten und zweiten Schritt (Post Pert1-2) sowie eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den dritten und vierten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3-4; Abbildung 26 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) über alle vier Schritte nach der Perturbation (Post Pert1-4) im Vergleich zur Baseline (Pre Pert) festgestellt werden (Abbildung 26 C).

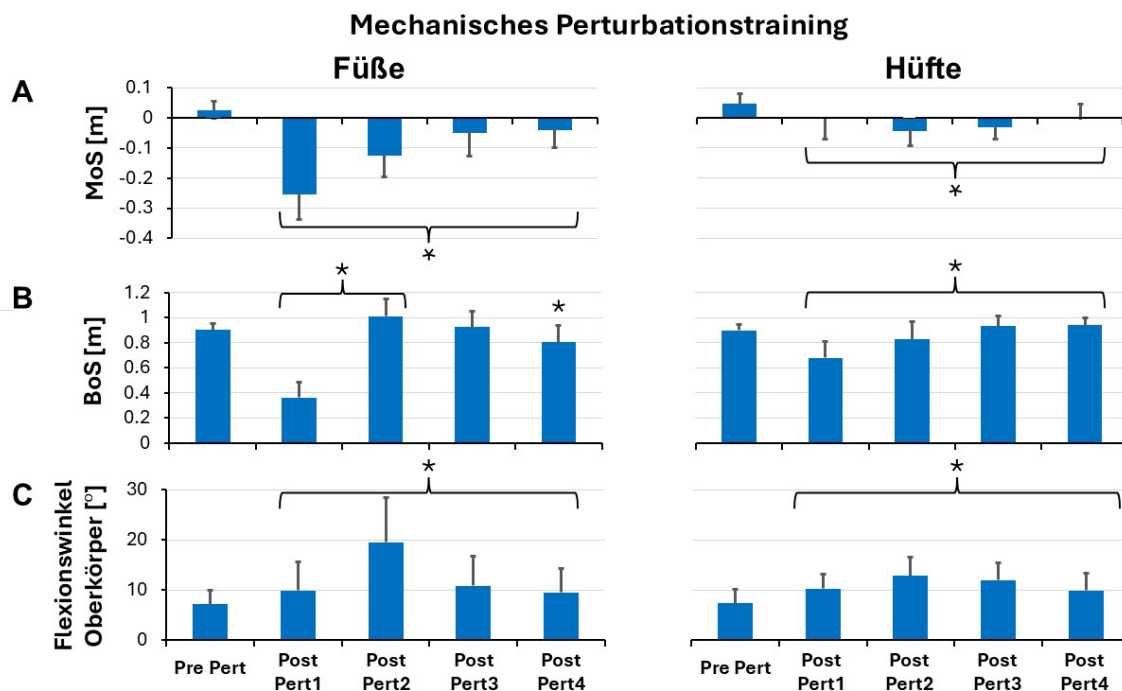


Abbildung 26: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS), die Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der mechanischen Perturbation (Post Pert1-4) am Fuß (links) bzw. der Hüfte (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zu Pre Pert (Baseline; $p < 0.05$).

V_{CoM} wies für die Fußperturbation eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den ersten und vierten Schritt (Post Pert1 und Post Pert4) sowie eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den zweiten und dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert2) im Vergleich zur Baseline auf (Pre Pert; Tabelle 18). Zudem ergab sich für V_{CoM} im Vergleich zur Baseline (Pre Pert) für die Hüftperturbation eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) im ersten Schritt (Post Pert1) sowie eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den dritten und vierten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3-4; Tabelle 18).

Tabelle 18. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der mechanischen Perturbation (Post Pert1-4) am Fuß bzw. der Hüfte.

*: statistisch signifikanter Unterschied zu Pre Pert (Baseline; $p < 0.05$).

Mechanisches Perturbationstraining

V_{CoM} [m/s]	Pre Pert	Post Pert1	Post Pert2	Post Pert3	Post Pert4
Füße	1.44 (0.04)	1.14* (0.08)	1.60* (0.10)	1.50* (0.13)	1.38* (0.10)
Hüfte	1.38 (0.04)	1.00* (0.14)	1.38 (0.14)	1.50* (0.09)	1.47* (0.06)

Im VR-basierten Perturbationstraining zeigte sich für die MoS eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) über alle vier Schritte nach der Perturbation (Post Pert1–4) im Vergleich zur Baseline (Pre Pert; Abbildung 27 A). Die BoS wies eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den ersten Schritt (Post Pert1) im Vergleich zur Baseline auf (Pre Pert; Abbildung 27 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) über alle vier Schritte nach der Perturbation (Post Pert1-4) im Vergleich zu Baseline (Pre Pert) festgestellt werden (Abbildung 27 C).

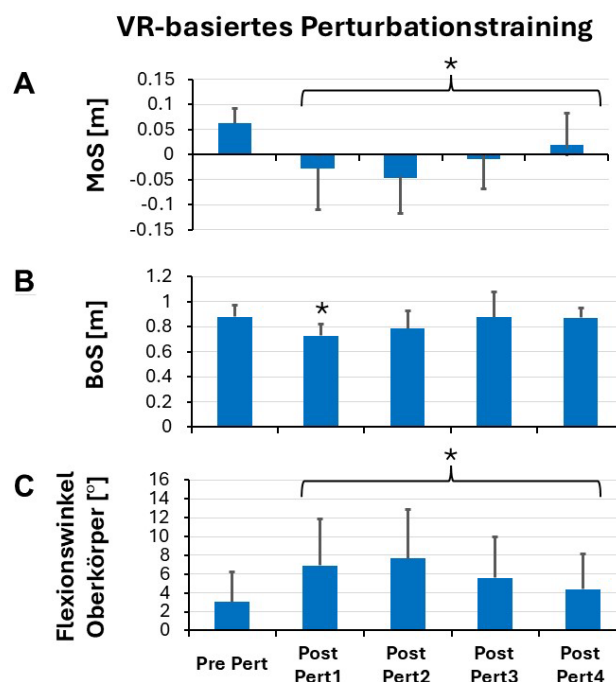


Abbildung 27: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der VR-basierten Perturbation (Post Pert1-4).

*: statistisch signifikanter Unterschied zu Pre Pert (Baseline; $p < 0.05$).

V_{CoM} wies für das VR-basierte Perturbationstraining eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den dritten Schritt (Post Pert3) im Vergleich zur Baseline auf (Pre Pert; Tabelle 19).

Tabelle 19. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der VR-basierten Perturbation (Post Pert1-4).

*: statistisch signifikanter Unterschied zu Pre Pert (Baseline; $p < 0.05$).

VR-basiertes Perturbationstraining

	Pre Pert	Post Pert1	Post Pert2	Post Pert3	Post Pert4
V_{CoM} [m/s]	1.38 (0.10)	1.32 (0.18)	1.42 (0.21)	1.49* (0.13)	1.42 (0.12)

Unvorhersehbare Gangperturbation auf dem SRF-Parcours - Transferanalyse

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse für die unvorhersehbaren Gangperturbationen „Fehltreten“, „Rutschen“ und „Stolpern“ auf dem SRF-Parcours innerhalb der bevorzugten und schnellen Ganggeschwindigkeit sowohl für die beiden Interventionsgruppen (MECH und VR) für vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband als auch für die Kontrollgruppe (CON) für vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband präsentiert.

Unvorhersehbare Gangperturbation „Fehltreten“

Für die Gangperturbation „Fehltreten“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH zeigten sich für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der MoS und der BoS (28 A und B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Reduktion für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ unabhängig von der Ganggeschwindigkeit festgestellt werden ($p < 0.05$, Abbildung 28 C). Für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) konnte für die bevorzugte Geschwindigkeit zudem eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) in der MoS sowie kein signifikanter Unterschied in der BoS und im Oberkörperflexionswinkel „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Abbildung 28 A, B und C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in der MoS und der BoS zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Abbildung 28 A und B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ für die schnelle Ganggeschwindigkeit festgestellt werden (Abbildung 28 C).

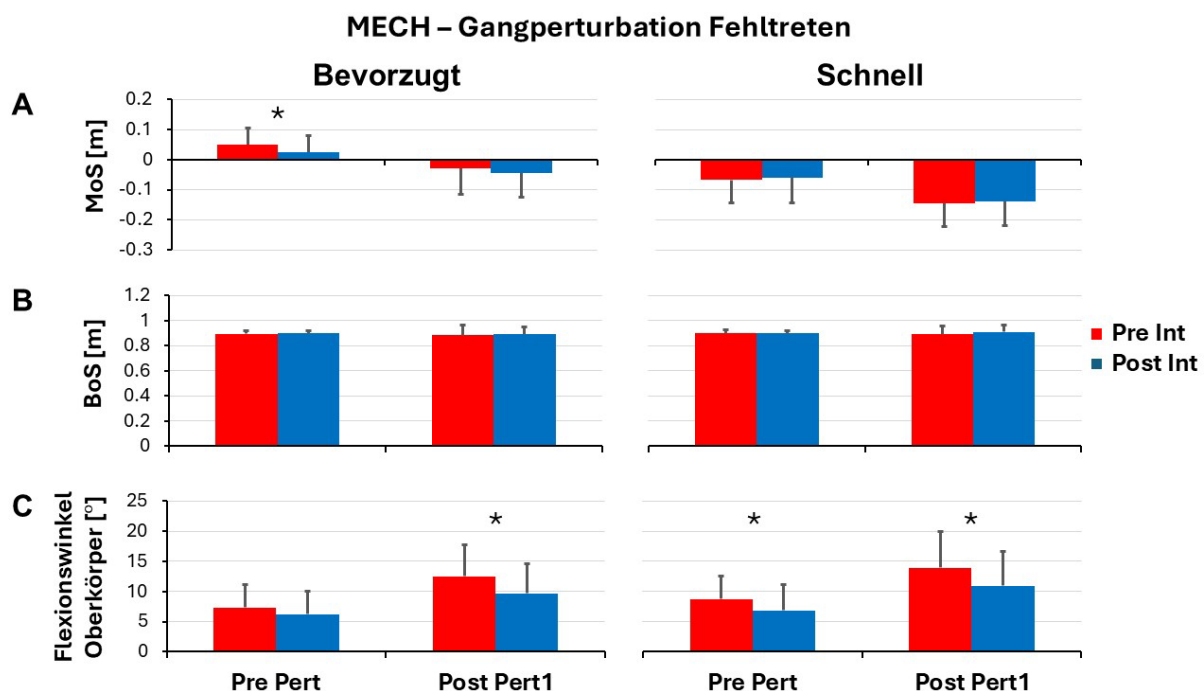


Abbildung 28: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

Für die Gangperturbation „Fehltreten“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante

Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 20). Für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) konnte für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit zudem kein signifikanter Unterschied in V_{CoM} „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Tabelle 20). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 20).

Tabelle 20. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

MECH – Gangperturbation Fehltreten

	Pre Pert				Post Pert1			
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM} [m/s]	1.41 (.12)	1.47* (.14)	1.72 (.16)	1.70 (.20)	1.40 (.13)	1.43 (.13)	1.69 (.20)	1.69 (.17)

Für die Gangperturbation „Fehltreten“ innerhalb der Interventionsgruppe VR zeigten sich für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der MoS, der BoS und im Flexionswinkel des Oberkörpers (Abbildung 29 A, B und C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in den drei Parametern (MoS, BoS und Oberkörperflexionswinkel) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert), unabhängig von der Ganggeschwindigkeit (Abbildung 29 A, B und C).

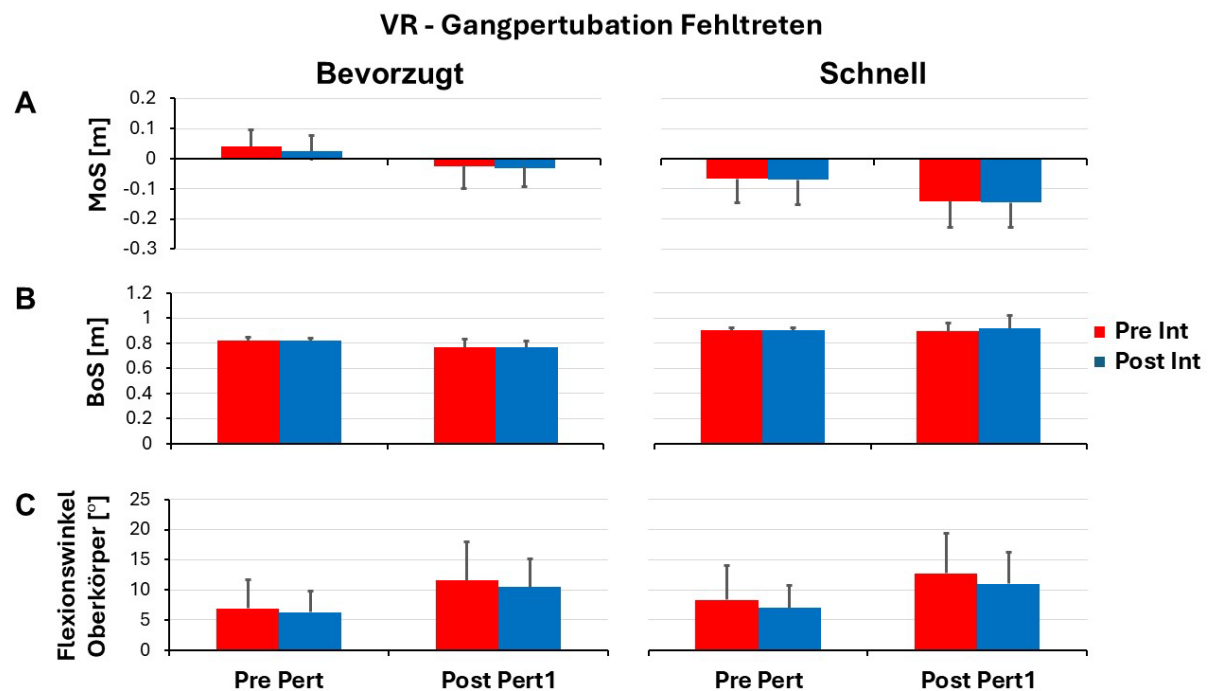


Abbildung 29: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

Für die Gangperturbation „Fehltreten“ innerhalb der Interventionsgruppe VR zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband keine signifikanten Unterschiede in V_{CoM} für beide Ganggeschwindigkeiten (Tabelle 21).

Tabelle 21. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

**: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).*

VR – Gangperturbation Fehltreten

	Pre Pert				Post Pert1			
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM} [m/s]	1.44 (.15)	1.47 (.14)	1.73 (.20)	1.73 (.20)	1.40 (.15)	1.43 (.13)	1.69 (.22)	1.69 (.21)

Für die Gangperturbation „Fehltreten“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigte sich in der MoS eine signifikante Reduktion zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit ($p < 0.05$, Abbildung 30 A). Die BoS wies für die bevorzugte Geschwindigkeit eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) sowie keinen signifikanten Unterschied zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) „Post“ im Vergleich zu „Pre“ auf (Abbildung 30 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnten keine signifikanten Unterschiede (Post vs. Pre) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit festgestellt werden (Abbildung 30 C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede (Pre vs. Post) in den drei Parametern (MoS, BoS und Oberkörperflexionswinkel) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) für die schnelle Ganggeschwindigkeit (Abbildung 30 A, B und C).

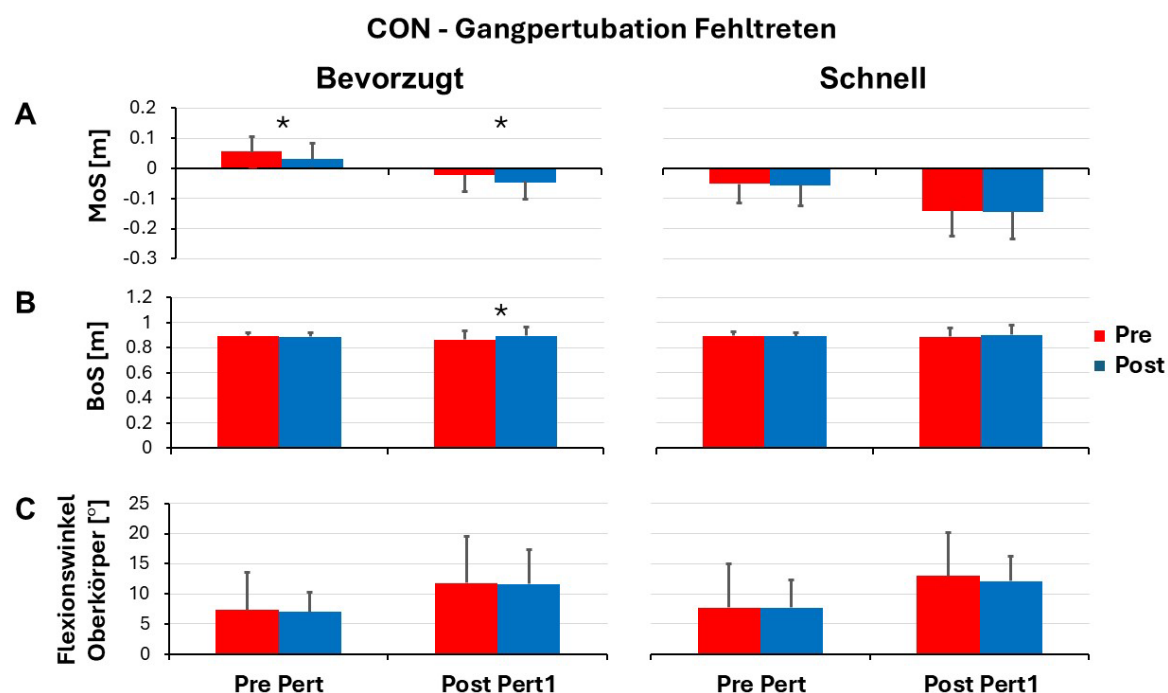


Abbildung 30: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre und Post ($p < 0.05$).

Für die Gangperturbation „Fehlreten“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 22). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede (Pre vs. Post) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 22).

Tabelle 22. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre und Post ($p < 0.05$).

CON – Gangperturbation Fehlreten

	Pre Pert				Post Pert1			
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
V_{CoM} [m/s]	1.40 (.13)	1.46* (.14)	1.70 (.17)	1.70 (.19)	1.36 (.16)	1.43* (.17)	1.69 (.24)	1.66 (.25)

Da keine signifikante Zunahme in der MoS vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Interventionsgruppen innerhalb der beiden Ganggeschwindigkeiten für die Gangperturbation „Fehlreten“ vorlag, wurde in diesem Fall keine statistische Analyse der „Responder“ durchgeführt.

Unvorhersehbare Gangperturbation „Rutschen“

Für die Gangperturbation „Rutschen“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH zeigten sich für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der MoS oder der BoS (Abbildung 31 A und B). Der Oberkörperflexionswinkel wies eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ für beide Ganggeschwindigkeiten auf (Abbildung 31 C). Für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) konnte für die bevorzugte Geschwindigkeit zudem eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) (Post Int vs Pre Int) in der MoS sowie kein signifikanter Unterschied in der BoS und im Oberkörperflexionswinkel festgestellt werden (Abbildung 31 A, B und C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in der MoS und der BoS zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Abbildung 31 A und B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ für die schnelle Ganggeschwindigkeit festgestellt werden (Abbildung 31 C).

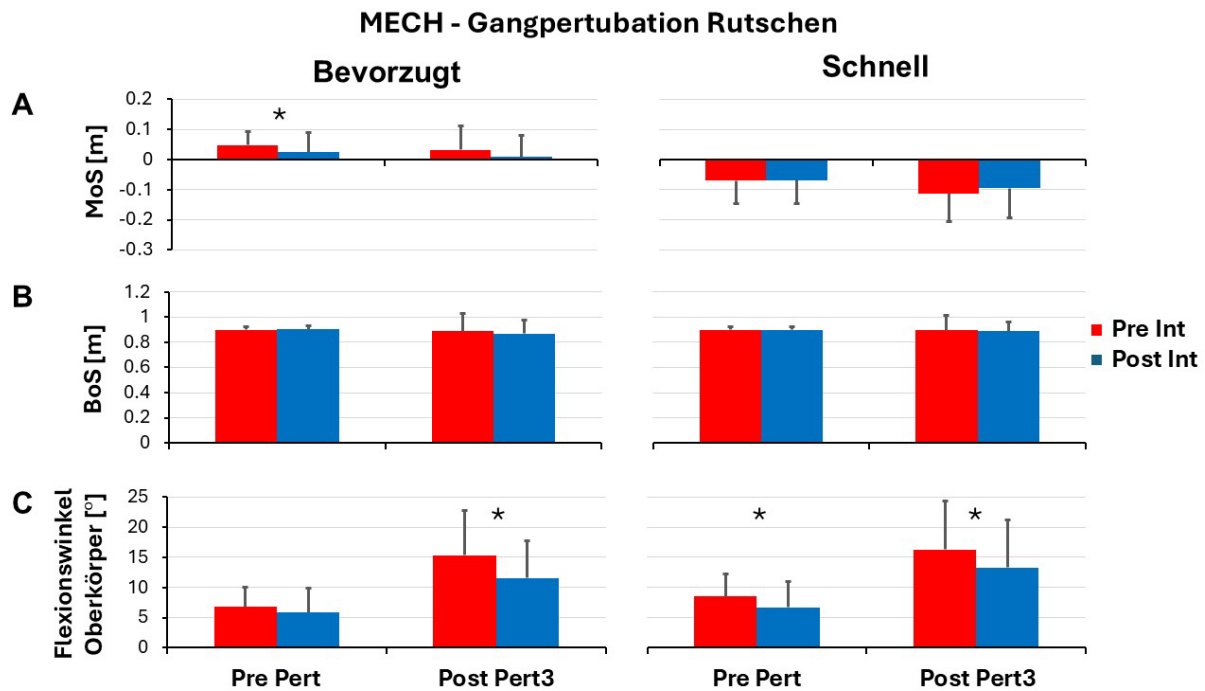


Abbildung 31: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

Für die Gangperturbation „Rutschen“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 23). Für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) konnte für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit zudem kein signifikanter Unterschied in V_{CoM} „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Tabelle 23). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 23).

Tabelle 23. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

MECH – Gangperturbation Rutschen

	Pre Pert				Post Pert3			
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM}	1.41	1.49*	1.72	1.73	1.34	1.40	1.70	1.70
[m/s]	(.09)	(.14)	(.16)	(.18)	(.22)	(.18)	(.24)	(.20)

Für die Gangperturbation „Rutschen“ innerhalb der Interventionsgruppe VR zeigte sich in der MoS eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit (Abbildung 32 A). Die BoS wies für die bevorzugte

Geschwindigkeit keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) auf (Abbildung 32 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnten für die bevorzugte Geschwindigkeit eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) sowie kein signifikanter Unterschied zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ festgestellt werden (Abbildung 32 C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in den drei Parametern (MoS, BoS und Oberkörperflexionswinkel) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) für die schnelle Ganggeschwindigkeit (Abbildung 32 A, B und C).

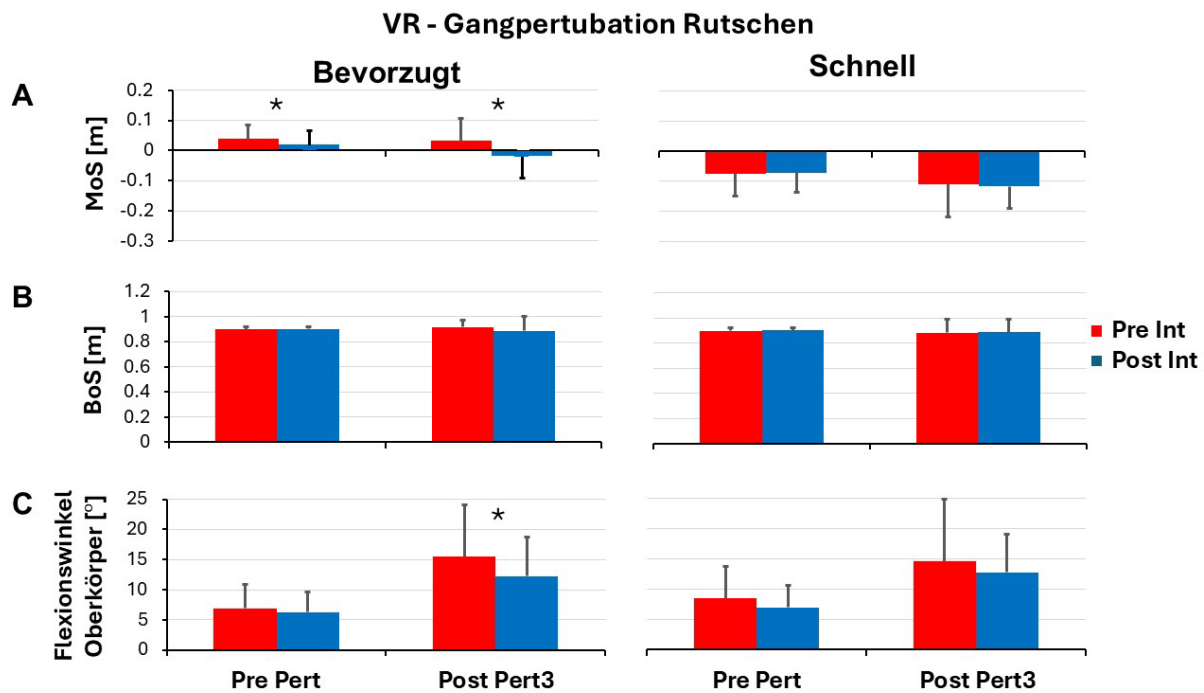


Abbildung 32: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$)

Für die Gangperturbation „Rutschen“ innerhalb der Interventionsgruppe VR zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 24). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 24).

Tabelle 24. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

VR – Gangperturbation Rutschen

Pre Pert		Post Pert3	
bevorzugt	schnell	bevorzugt	schnell

	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM}	1.44	1.51*	1.74	1.75	1.39	1.49*	1.66	1.71
[m/s]	(.13)	(.13)	(.17)	(.16)	(.16)	(.19)	(.25)	(.21)

Für die Gangperturbation „Rutschen“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigten sich für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Reduktion in der MoS ($p < 0.05$, Abbildung 33 A). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre vs. Post) in der MoS für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) für die schnelle Ganggeschwindigkeit (Abbildung 33 A). In der BoS und im Flexionswinkel des Oberkörpers konnten keine signifikanten Unterschiede für den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) „Post“ im Vergleich „Pre“ für beide Ganggeschwindigkeiten festgestellt werden ($p < 0.05$, Abbildung 33 C).

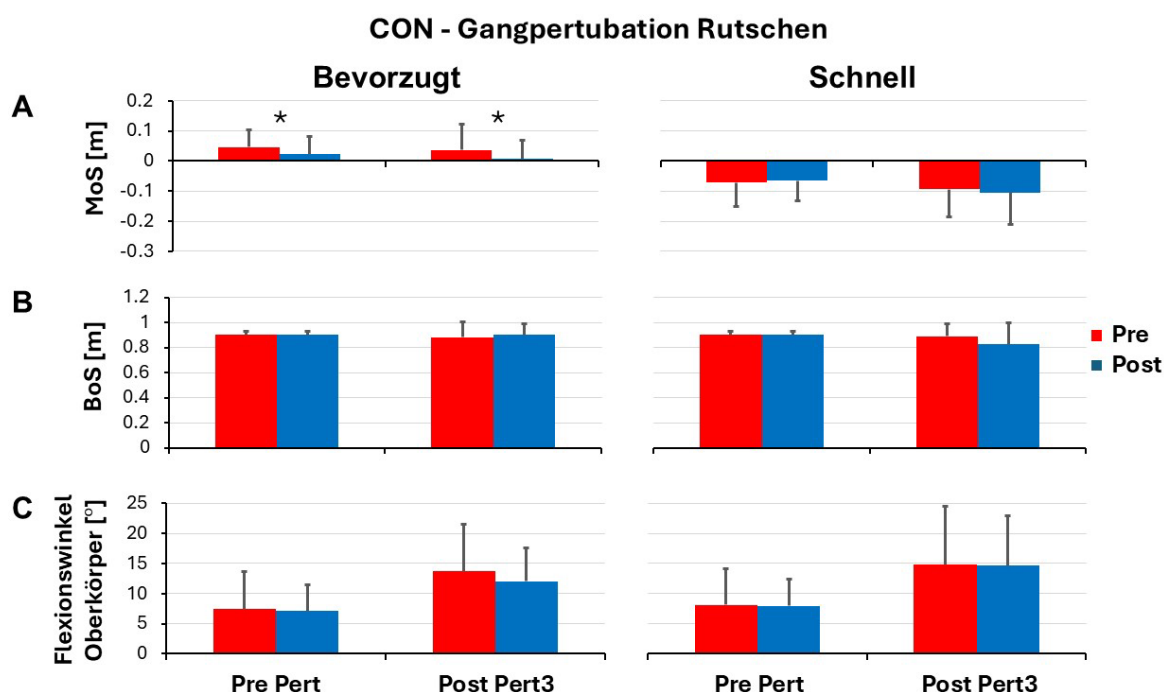


Abbildung 33: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre und Post ($p < 0.05$)

Für die Gangperturbation „Rutschen“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und den dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 25). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede (Pre vs. Post) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im dritten Schritt nach der Perturbation (Post Pert3) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 25).

Tabelle 25. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre und Post ($p < 0.05$).

CON – Gangperturbation Rutschen

	Pre Pert				Post Pert3			
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
V_{CoM} [m/s]	1.43 (.15)	1.49* (.16)	1.75 (.21)	1.74 (.19)	1.31 (.33)	1.46* (.21)	1.68 (.29)	1.65 (.29)

Da keine signifikante Zunahme in der MoS vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Interventionsgruppen innerhalb der beiden Ganggeschwindigkeiten für die Gangperturbation „Rutschen“ vorlag, wurde in diesem Fall keine statistische Analyse der „Responder“ durchgeführt.

Unvorhersehbare Gangperturbation „Stolpern“

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH zeigten sich für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit keine signifikanten Unterschiede in der MoS, der BoS und im Flexionswinkel des Oberkörpers (Abbildung 34 A, B und C). Für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) konnte für die bevorzugte Geschwindigkeit zudem eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) in der MoS, eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) in der BoS sowie kein signifikanter Unterschied im Oberkörperflexionswinkel „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Abbildung 34 A, B und C). Die signifikante Zunahme in der BoS wird bei einer Differenz von 0.007 m (7 mm) als funktionell nicht relevant angesehen und deshalb nicht weiter betrachtet. Für die schnelle Ganggeschwindigkeit wies die MoS eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den ersten Schritt (Post Pert1) und keinen signifikanten Unterschied für den zweiten Schritt (Post Pert2) nach der Perturbation „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ auf (Abbildung 34 A). Die BoS zeigte keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in der schnellen Ganggeschwindigkeit für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2, Abbildung 34 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnten im Vergleich „Post Intervention“ zu „Pre Intervention“ eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den zweiten Schritt (Post Pert2) und kein signifikanter Unterschied für den ersten Schritt (Post Pert1) nach der Perturbation für die schnelle Ganggeschwindigkeit festgestellt werden (Abbildung 34 C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) für alle drei Parameter (MoS, BoS und Oberkörperflexionswinkel) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Abbildung 34 A, B und C).

MECH - Gangperturbation Stolpern

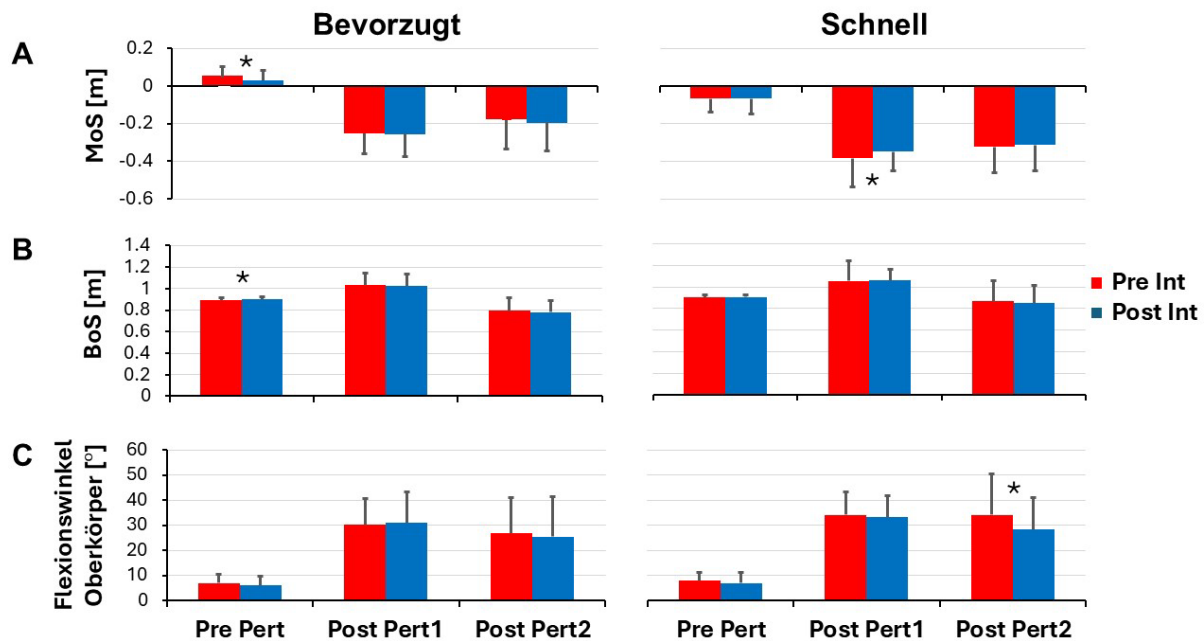


Abbildung 34: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 26). Für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) konnte für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit zudem kein signifikanter Unterschied in V_{CoM} „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Tabelle 26). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) sowie im ersten und im zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 26).

Tabelle 26. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

MECH – Gangperturbation Stolpern

	Pre Pert		Post Pert1				Post Pert2					
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM} [m/s]	1.4	1.48*	1.7	1.73	1.5	1.63	1.9	1.89	1.5	1.68*	2.0	2.0
	0	(.15)	3	(.20)	9	(.18)	2	(.17)	9	8*	3	1
	(.1		(.1		(.1		(.1		(.2	(.3	(.3	(.2
	2)		5)		4)		8)		5)	0)	2)	7)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Interventionsgruppe VR zeigten sich für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit keine signifikanten Unterschiede in der MoS und der BoS (Abbildung 35 A und B). Der Flexionswinkel des Oberkörpers wies für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den zweiten Schritt (Post Pert2) und keinen signifikanten Unterschied für den ersten Schritt (Post Pert1) „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ auf (Abbildung 35 C). Für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) konnte für die bevorzugte Geschwindigkeit zudem eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) in der MoS, eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) in der BoS sowie kein signifikanter Unterschied im Oberkörperflexionswinkel vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband festgestellt werden (Abbildung 35 A, B und C). Die signifikante Zunahme in der BoS wird bei einer Differenz von 0.007 m (7 mm) als funktionell nicht relevant angesehen und deshalb nicht weiter betrachtet. Für die schnelle Ganggeschwindigkeit zeigte sich in der MoS eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den ersten und den zweiten Schritt (Post Pert1-2) nach der Perturbation „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ (Abbildung 35 A). Die BoS zeigte keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in der schnellen Ganggeschwindigkeit für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2, Abbildung 35 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den ersten und zweiten Schritt (Post Pert1-2) nach der Perturbation „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ für die schnelle Ganggeschwindigkeit festgestellt werden (Abbildung 35 C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) für alle drei Parameter (MoS, BoS und Oberkörperflexionswinkel) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Abbildung 35 A, B und C).

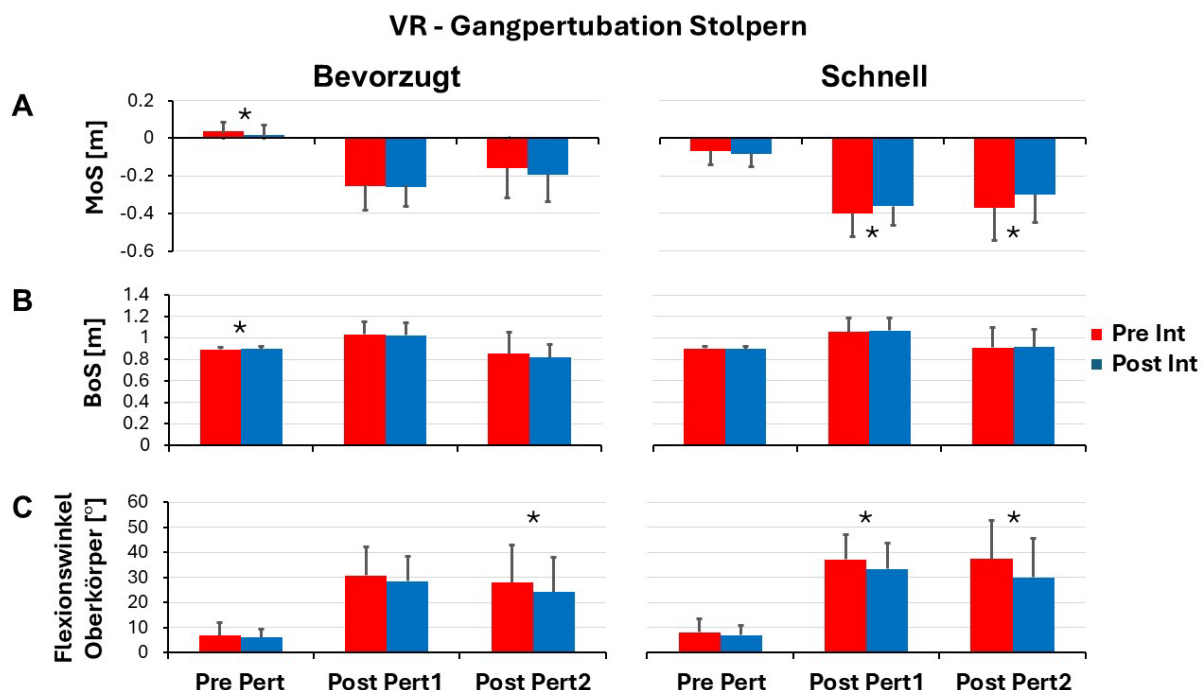


Abbildung 35: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Interventionsgruppe VR zeigte sich für den Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle

27). Für den ersten und den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) konnte für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit zudem kein signifikanter Unterschied in V_{CoM} „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Tabelle 27). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) sowie im ersten und im zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 27).

Tabelle 27. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

**: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).*

VR – Gangperturbation Stolpern

	Pre Pert		Post Pert1				Post Pert2					
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM} [m/s]	1.4	1.50*	1.7	1.76	1.6	1.64	1.9	1.91	1.6	1.6	2.1	2.0
	4	(.14)	4	(.17)	1	(.19)	3	(.18)	2	8	0	1
	(.1		(.1		(.1		(.2		(.3	(.2	(.3	(.2
	4)		7)		7)		0)		6)	7)	7)	7)

Aufgrund der signifikanten Zunahme (Post Int vs. Pre Int) in der MoS in den Schritten nach Perturbation (Post Pert) in den beiden Interventionsgruppen MECH und VR für die schnelle Ganggeschwindigkeit wurden alle Teilnehmenden identifiziert, welche nach der Trainingsintervention auf dem Laufband (Post Int) einen höheren Wert für die MoS im Vergleich zu vor der Trainingsintervention (Pre Int) aufzeigten („Responder“, Abbildung 36).

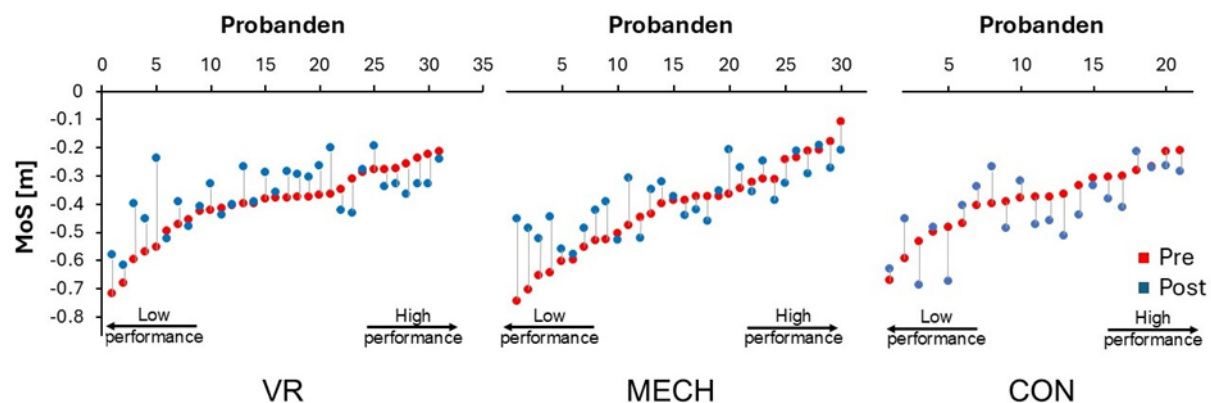


Abbildung 36: Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS) für alle Teilnehmenden innerhalb der beiden Interventionsgruppe (VR und MECH) sowie der Kontrollgruppe CON für die Gangperturbation „Stolpern“ in der schnellen Ganggeschwindigkeit für die erste (Pre) und zweite Session (Post).

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der „Responder“ der Interventionsgruppe MECH zeigte sich in der MoS eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den ersten (Pre Pert1) und kein signifikanter Unterschied für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Pre Pert2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten ($p > 0.05$, Abbildung 20 A). Die BoS wies keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in der bevorzugten Ganggeschwindigkeit für den ersten (Post Pert1) und zweiten Schritt (Post2) nach der Perturbation auf (Abbildung 37 B). Für die schnelle Ganggeschwindigkeit zeigte sich in der BoS vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$).

im ersten (Post Pert1) und eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) im zweiten Schritt (Post Pert2) nach der Perturbation (Abbildung 37 B). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in beiden Parametern (MoS und BoS) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) unabhängig von der Ganggeschwindigkeit (Abbildung 37 A). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnte eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den zweiten Schritt (Post Pert2) und kein signifikanter Unterschied für den ersten Schritt (Post Pert1) nach der Perturbation „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ für beide Ganggeschwindigkeiten festgestellt werden (Abbildung 37 C). Zudem ergab sich für den Flexionswinkel im Oberkörper zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für die bevorzugte Geschwindigkeit sowie kein signifikanter Unterschied für die schnelle Geschwindigkeit (Abbildung 37 C).

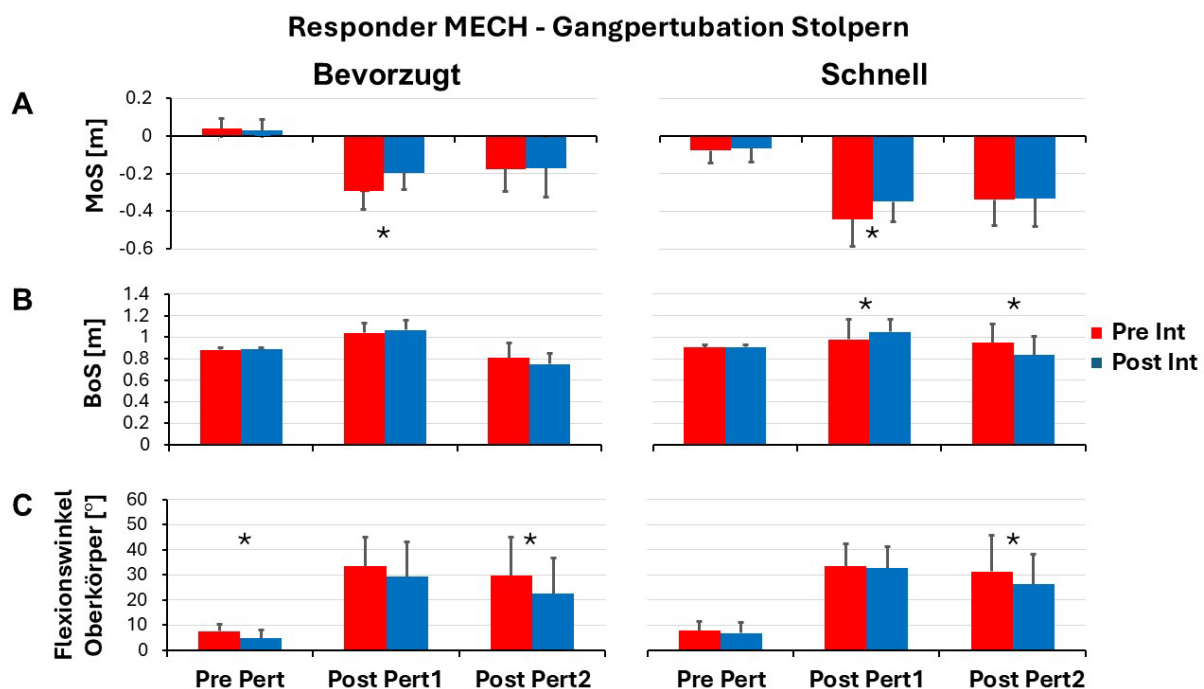


Abbildung 37: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der „Responder“ der Interventionsgruppe MECH zeigte sich für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit eine signifikante Reduktion in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 28). Zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert2) konnte für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit zudem kein signifikanter Unterschied in V_{CoM} „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ festgestellt werden (Tabelle 28). In der schnellen Ganggeschwindigkeit wies V_{CoM} eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den ersten und den zweiten Schritt (Post Pert1-2) nach der Perturbation zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband auf (Tabelle 28). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in der schnellen Ganggeschwindigkeit (Tabelle 28).

Tabelle 28. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).

Responder MECH – Gangperturbation Stolpern

	Pre Pert				Post Pert1				Post Pert2			
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM} [m/s]	1.42 (.13)	1.47 (.16)	1.73 (.15)	1.72 (.18)	1.66 (.15)	1.57* (.19)	1.94 (.18)	1.87* (.18)	1.65 (.25)	1.59 (.29)	2.13 (.28)	2.02 (.31)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der „Responder“ der Messgruppe VR zeigte sich in der MoS für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) für den ersten (Post Pert1) und kein signifikanter Unterschied für den zweiten Schritt (Post Pert2) nach der Perturbation (Abbildung 38 A). Für die schnelle Ganggeschwindigkeit wies die MoS eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) im ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ auf (Abbildung 38 A). In der BoS zeigten sich keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in der bevorzugten Ganggeschwindigkeit für den ersten und zweiten Schritt (Post Pert1-2) nach der Perturbation (Abbildung 38 B). Für die schnelle Ganggeschwindigkeit konnte in der BoS vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) im ersten (Post Pert1) und kein signifikanter Unterschied im zweiten Schritt (Post Pert2) nach der Perturbation festgestellt werden (Abbildung 38 B). Der Flexionswinkel im Oberkörper wies eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) „Post Intervention“ im Vergleich „Pre Intervention“ unabhängig von der Geschwindigkeit auf (Abbildung 38 C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in den drei Parametern (MoS, BoS und Oberkörperflexionswinkel) zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) für beide Ganggeschwindigkeiten (Abbildung 38 A, B und C).

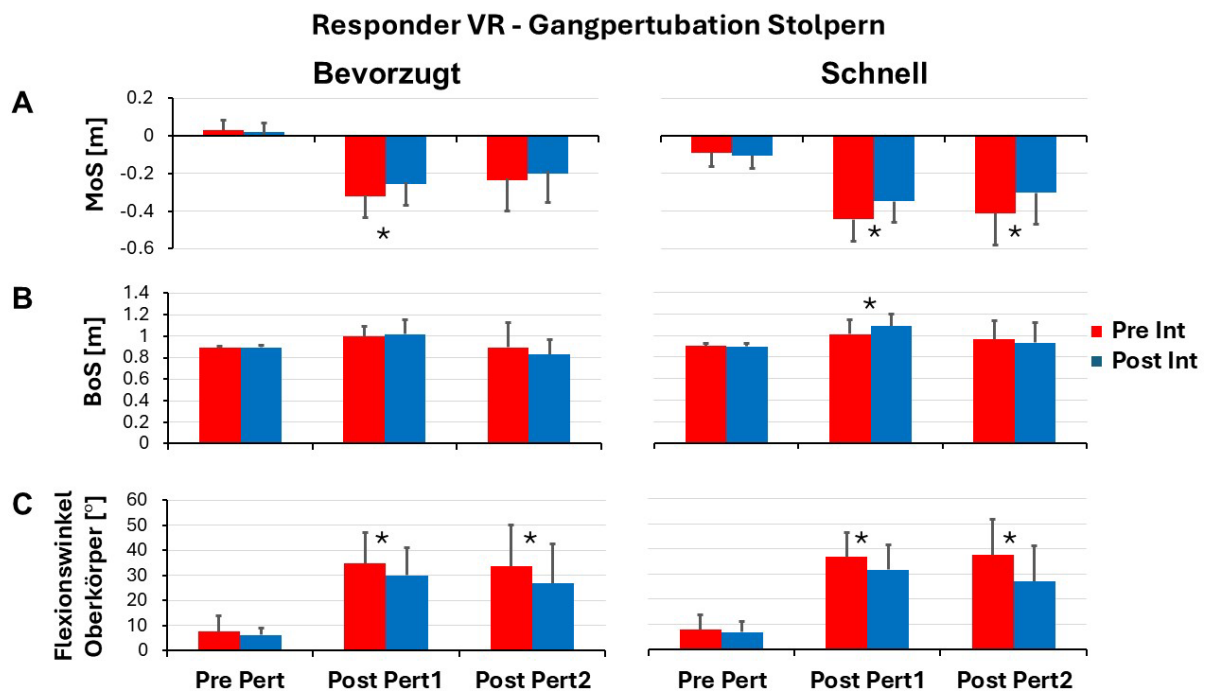


Abbildung 38: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der „Responder“ der Interventionsgruppe VR zeigte sich für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten eine signifikante Reduktion in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 29). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) und im ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) in beiden Ganggeschwindigkeiten (Tabelle 29).

Tabelle 29. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

**: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Post Int ($p < 0.05$).*

Responder VR – Gangperturbation Stolpern

	Pre Pert		Post Pert1				Post Pert2					
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int	Pre Int	Post Int
V_{CoM}	1.4	1.49	1.7	1.81	1.6	1.60	1.9	1.95	1.8	1.7	2.2	2.0
[m/s]	6	(.15)	9	(.18)	6	(.21)	8	(.17)	1	0*	4	5*
	(.1		(.1		(.1		(.2		(.3	(.2	(.3	(.3
	6)		7)		4)		1)		2)	6)	3)	1)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigten sich für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der MoS, der BoS oder im Flexionswinkel des Oberkörpers (Abbildung 39 A, B und C). Weiterhin ergab die statistische Auswertung eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) (Pre vs. Post) in der MoS sowie keine signifikanten Unterschiede in der BoS und im Flexionswinkel des Oberkörpers zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit (Abbildung 39 A, B und C). Für die schnelle Ganggeschwindigkeit konnten in der MoS, der BoS und im Flexionswinkel des Oberkörpers keine signifikanten Unterschiede zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) „Post“ im Vergleich „Pre“ festgestellt werden (Abbildung 39 A, B und C).

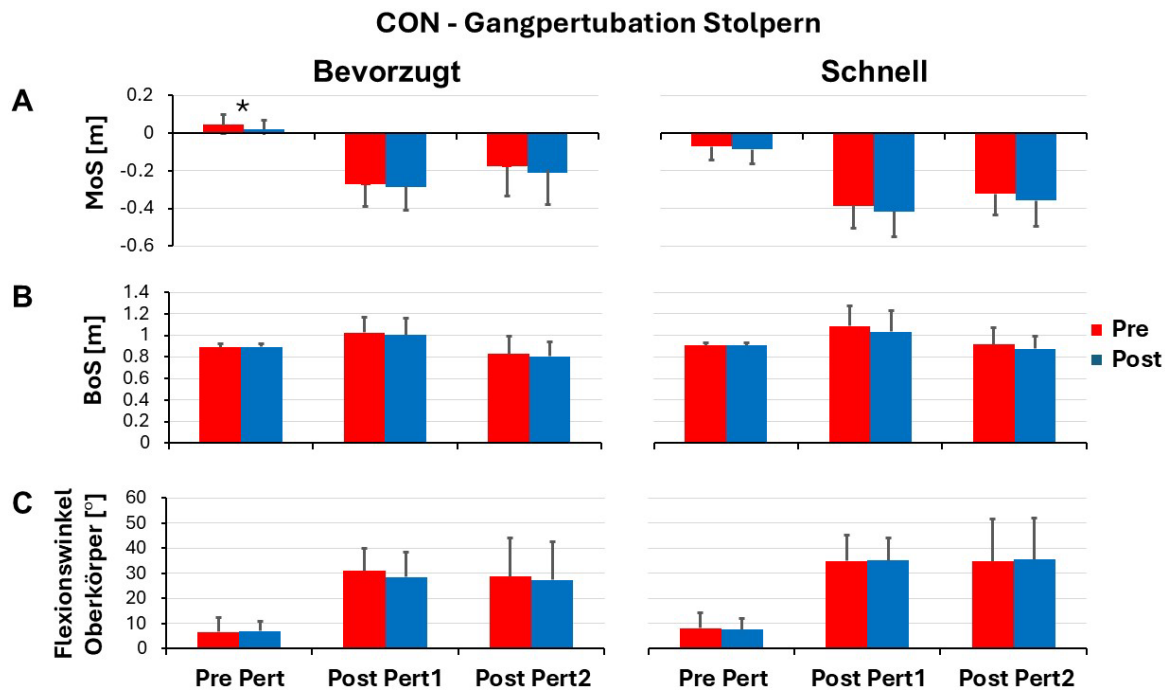


Abbildung 39: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre und Post ($p < 0.05$)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigte sich zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für beide Ganggeschwindigkeiten eine signifikante Zunahme in V_{CoM} ($p < 0.05$, Tabelle 30). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede (Pre vs. Post) in V_{CoM} im ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) in beiden Ganggeschwindigkeiten (Tabelle 30).

Tabelle 30. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert3) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre und Post ($p < 0.05$)

CON – Gangperturbation Stolpern

	Pre Pert		Post Pert1				Post Pert2					
	bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell		bevorzugt		schnell	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
V_{CoM} [m/s]	1.42	1.48*	1.74	1.79*	1.63	1.66	1.95	1.96	1.64	1.70	2.1	2.08
	(.15)	(.14)	(.19)	(.19)	(.19)	(.16)	(.15)	(.18)	(.36)	(.34)	(.23)	(.27)

Unvorhersehbare Gangperturbation auf dem SRF-Parcours - Beibehaltungsanalyse

Für die Gangperturbationen „Rutschen“ und „Fehlreten“ konnten bei der Transferanalyse für beide Geschwindigkeiten in keiner der beiden Interventionsgruppen MECH oder VR eine signifikante Zunahme in der MoS zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband festgestellt werden. Infolgedessen wurden keine Verbesserungen in der dynamischen Gangstabilität aufgrund der Trainingsintervention für diese beiden Gangperturbationen angenommen, weswegen in diesen Fällen keine statistischen Analysen bzgl. möglicher Beibehaltungseffekte sechs Monate nach dem

Training (Ret Int) durchgeführt wurden. Obwohl eine signifikante Zunahme (Pre Int vs. Post Int) in der MoS für die „Responder“ innerhalb der Interventionsgruppe VR für beide Ganggeschwindigkeiten für die unvorhersehbare Perturbation „Stolpern“ vorlag, konnte aufgrund einer zu geringen Anzahl an „Respondern“ innerhalb dieser Interventionsgruppe am zweiten Messtag kein Vergleich zwischen „Pre Intervention“ und „Post Intervention“ zu „Retention Intervention“ (sechs Monate nach dem Training) durchgeführt werden. Daraus folgt, dass keine validen Aussagen zu möglichen Beibehaltungseffekten bzgl. der trainierten Mechanismen für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Interventionsgruppe VR getroffen werden können.

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der „Responder“ der Interventionsgruppe MECH zeigte sich in der MoS ein signifikanter ($p < 0.05$) interventionsabhängiger Unterschied (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) für den ersten (Pre Pert1) und kein signifikanter Unterschied für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Pre Pert2) für beide Ganggeschwindigkeiten (Abbildung 40 A). Paarweise Vergleiche für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit wiesen eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) in der MoS jeweils zwischen vor (Pre Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Ret Int) im Vergleich zu nach (Post Int) der Trainingsintervention auf und keine signifikanten Unterschiede „Pre Intervention“ im Vergleich zu „Retention Intervention“ (Abbildung 40 A). Für die schnelle Ganggeschwindigkeit wurde in der MoS für den ersten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1) eine signifikante Zunahme ($p < 0.05$) „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ festgestellt sowie keine signifikanten Unterschiede für die beiden weiteren Vergleiche (Ret Int vs Pre Int und Post Int; Abbildung 40 A). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) in der MoS zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) für beide Ganggeschwindigkeiten (Abbildung 40 A). Die BoS wies signifikante ($p < 0.05$) interventionsabhängige Unterschiede (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) in der bevorzugten Ganggeschwindigkeit für den ersten (Post Pert1) und in der schnellen Ganggeschwindigkeit für den zweiten Schritt (Post Pert2) nach der Perturbation auf, wobei in beiden Fällen mittels paarweiser Vergleiche keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Zeitpunkten (Pre Int vs. Post Int vs. Ret Int) festgestellt werden konnten (Abbildung 40 B). Für den zweiten Schritt (Post Pert2) in der bevorzugten Ganggeschwindigkeit und den ersten Schritt (Post Pert1) nach der Perturbation in der schnellen Ganggeschwindigkeit zeigten sich in der BoS keine interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs Post Int vs Ret Int; Abbildung 40 B). Zudem konnten in der BoS signifikante ($p < 0.05$) interventionsabhängige Unterschiede (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) in beiden Ganggeschwindigkeiten zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) festgestellt werden, wobei in beiden Fällen mittels paarweiser Vergleiche eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) „Retention Intervention“ im Vergleich zu „Post Intervention“ sowie keine signifikanten Unterschiede für die beiden weiteren Vergleiche (Pre Int vs Post Int und Ret Int) festgestellt werden konnten (Abbildung 40 B). Im Flexionswinkel des Oberkörpers konnten signifikante ($p < 0.05$) interventionsabhängige Unterschiede (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) für den zweiten (Post Pert2) und kein signifikanter Unterschied für den ersten Schritt (Post Pert1) nach der Perturbation für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit festgestellt werden. Paarweise Vergleiche (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) für den zweiten Schritt (Post Pert2) nach der Perturbation für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit wiesen eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) im Oberkörperflexionswinkel „Post Intervention“ im Vergleich zu „Pre Intervention“ und keine signifikanten Unterschiede für die beiden weiteren Vergleiche (Ret Int vs Post Int und Pre Int) auf (Abbildung 40 C). Zudem zeigten sich im Flexionswinkel im Oberkörper signifikante ($p < 0.05$) interventionsabhängige Unterschiede (Pre Int vs Post Int vs Ret Int) in der bevorzugten Ganggeschwindigkeit zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert), wobei in beiden Fällen mittels paarweiser Vergleiche keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Zeitpunkten (Prä Int, Post Int und Ret Int) festgestellt werden konnten (Abbildung 40 C). Für die schnelle Ganggeschwindigkeit konnten im Flexionswinkel des Oberkörpers für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten festgestellt werden ($p > 0.05$, Abbildung 40 C).

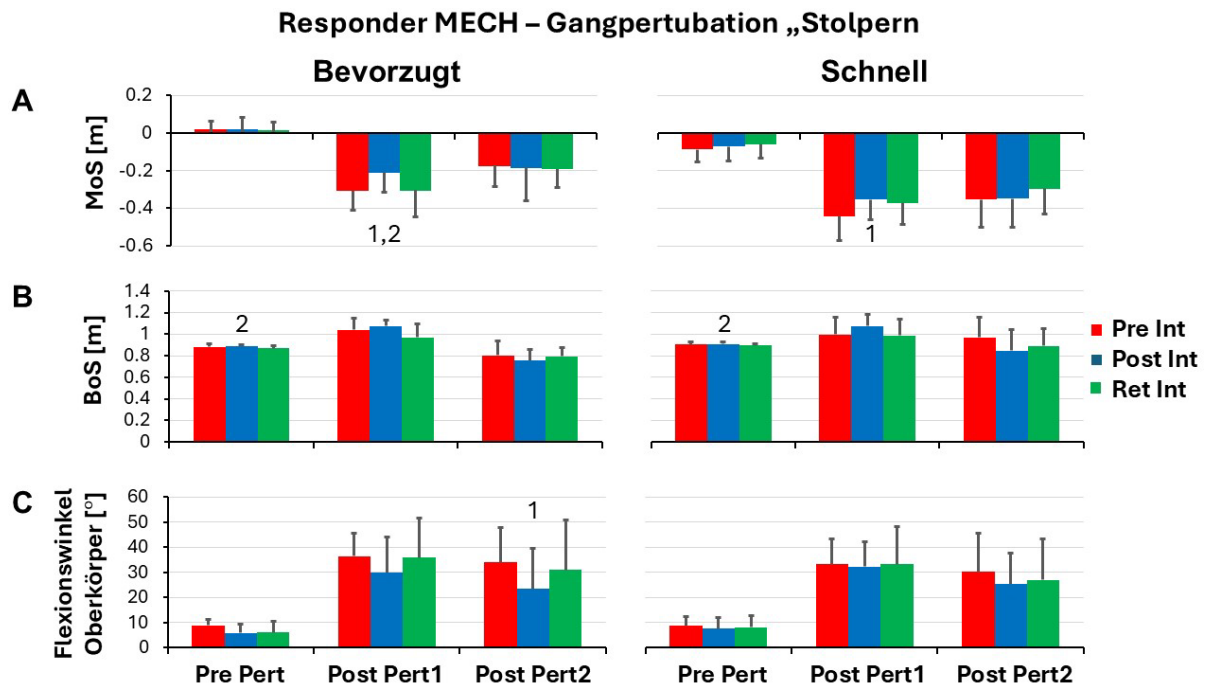


Abbildung 40: Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Ret Int) für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

1,2: statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0.05$) zwischen Pre Int/Post Int (1) oder Post Int/Ret Int (2).

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der „Responder“ der Interventionsgruppe MECH zeigten sich in V_{CoM} kein interventionsabhängiger Unterschied (Pre Int vs. Post Int vs. Ret Int) für den ersten und für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit (Tabelle 31). Weiterhin ergab die statistische Auswertung für die schnelle Ganggeschwindigkeit signifikante interventionsabhängige Unterschiede (Pre Int vs. Post Int vs. Ret Int) in V_{CoM} für den ersten und für den zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2). Paarweise Vergleiche für den ersten Schritt und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) für die schnelle Ganggeschwindigkeit wiesen eine signifikante Reduktion ($p < 0.05$) in V_{CoM} zwischen vor (Pre Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Ret Int) auf und jeweils keine signifikanten Unterschiede „Post Intervention“ im Vergleich zu jeweils „Pre Intervention“ und „Retention Intervention“ (Tabelle 31). Weiterhin ergab die statistische Auswertung keine signifikanten interventionsabhängigen Unterschiede (Pre Int vs. Post Int vs. Ret Int) in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) für die schnelle Ganggeschwindigkeit (Tabelle 31).

Tabelle 31. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Ret Int) für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

*: statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre Int und Ret Int ($p < 0.05$).

Responder MECH – Gangperturbation Stolpern

V_{CoM} [m/s]	bevorzugt			schnell		
	Pre Int	Post Int	Ret Int	Pre Int	Post Int	Ret Int
Pre Pert	1.45 (.12)	1.49 (.16)	1.47 (.10)	1.76 (.15)	1.73 (.19)	1.68 (.19)
Post Pert1	1.64 (.10)	1.61 (.19)	1.65 (.17)	1.97 (.18)	1.90 (.18)	1.82* (.24)
Post Pert2	1.62 (.27)	1.59 (.33)	1.66 (.23)	2.16 (.31)	2.07 (.32)	1.96* (.29)

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigten sich keine signifikanten Unterschiede (Pre vs. Post vs. Ret) für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in der MoS, der BoS oder im Flexionswinkel des Oberkörpers für beide Ganggeschwindigkeiten (Abbildung 41 A, B und C).

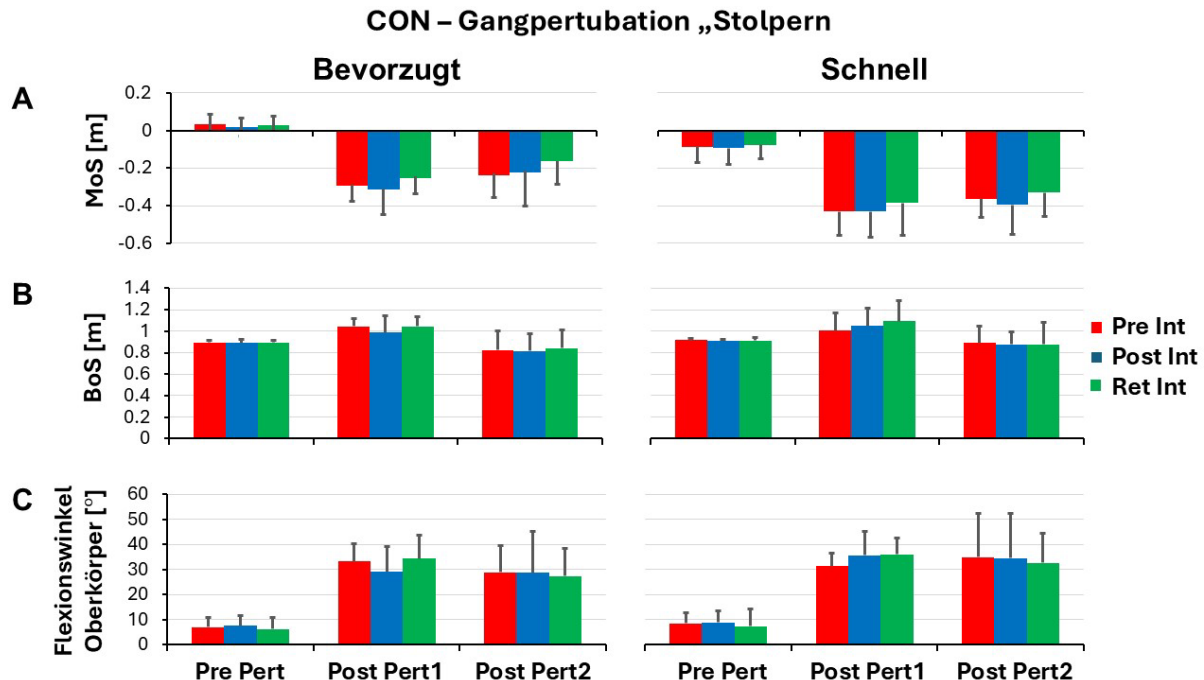


Abbildung 41 Mittelwert und Standardabweichung (+ bzw. -) für die Toleranz der Stabilität (engl. Margin of Stability; MoS, A), Vergrößerung der Unterstützungsfläche (engl. Base of Support, BoS, B) und Oberkörperflexionswinkel (C) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre Int) und nach (Post Int) der Trainingsintervention auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Ret Int) für die bevorzugte (links) und schnelle Ganggeschwindigkeit (rechts).

Für die Gangperturbation „Stolpern“ innerhalb der Kontrollgruppe CON zeigten sich keine signifikanten Unterschiede (Pre vs. Post vs. Ret) für den ersten und zweiten Schritt nach der Perturbation (Post Pert1-2) sowie zum Zeitpunkt vor der Perturbation (Pre Pert) in V_{CoM} für beide Ganggeschwindigkeiten (Tabelle 32).

Tabelle 32. Mittelwert \pm Standardabweichung für die Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (V_{CoM}) zum Zeitpunkt Beginn Stützphase vor (Pre Pert = Baseline) sowie nach der Perturbation (Post Pert1-2) zwischen vor (Pre) und nach (Post) dem Gehen auf dem Laufband sowie sechs Monate später (Ret) für die bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit.

CON – Gangperturbation Stolpern

V_{CoM} [m/s]	bevorzugt			schnell		
	Pre Int	Post Int	Ret Int	Pre Int	Post Int	Ret Int
Pre Pert	1.45 (.13)	1.50 (.11)	1.47 (.13)	1.80 (.22)	1.81 (.22)	1.76 (.18)
Post Pert1	1.67 (.15)	1.68 (.12)	1.62 (.20)	2.00 (.18)	2.02 (.20)	1.91 (.14)
Post Pert2	1.77 (.29)	1.75 (.32)	1.63 (.28)	2.10 (.25)	2.11 (.29)	1.97 (.41)

Diskussion

Ziel innerhalb des reaktiven Perturbationstrainingsprogrammes im Rahmen des Projektes war die Evaluation der Wirksamkeit des Transfers zweier unterschiedlicher Perturbationstrainings auf dem Laufband (mechanisches und VR-basiertes Perturbationstraining) auf reale, ebenerdige, unvorhersehbare

Gangperturbationen (Stolpern, Rutschen und Fehltreten) für zwei Ganggeschwindigkeiten (bevorzugte und schnelle Ganggeschwindigkeit) direkt nach dem Training (Post) sowie sechs Monate später (Beibehaltung).

Für die Gangperturbation „Stolpern“ konnte bei beiden Interventionsgruppen beim ersten Schritt nach der Perturbation auf dem Parcours eine Zunahme in der MoS (Verbesserung der reaktiven dynamischen Gangstabilität) nach der Trainingsintervention auf dem Laufband für die schnelle Ganggeschwindigkeit festgestellt werden. Die Zunahme der MoS ist bei beiden Interventionsgruppen auf die Kombination aus drei posturalen Korrekturen zurückzuführen:

- Vergrößerung der BoS,
- Reduktion der Oberkörperflexion und
- Verringerung der CoM-Geschwindigkeit.

Die BoS wurde in beiden Interventionsgruppen vergrößert, indem der perturbierter Fuß weiter nach anterior gesetzt wurde. Die Vergrößerung der BoS wurde als primär verbesserter Stabilitätsmechanismus nach dem Stolpern für die schnelle Ganggeschwindigkeit identifiziert. Zudem wurde eine geringere Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes (CoM) im ersten Schritt für die Gangperturbation „Stolpern“ in der schnellen Ganggeschwindigkeit für die mechanische Interventionsgruppe nach der Trainingsintervention festgestellt. Zeitgleich wurde allerdings keine Reduktion im Oberkörperflexionswinkel gefunden, welche auf eine Verringerung der Geschwindigkeit des CoM mittels Gegenrotation im Oberkörper hindeuten könnte. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Teilnehmenden die Geschwindigkeit des CoM bzw. den vorwärts gerichteten Drehimpuls des Oberkörpers über ein entsprechendes gegengerichtetes Drehmoment beim Aufsetzen des vorderen Fußes abbremsen (Grabiner et al., 1993, Karamanidis et al., 2020). Da hierbei die (vertikalen und horizontalen) Bodenreaktionskräfte primär mitwirken (Grabiner et al., 1993), diese allerdings während der Messungen nicht aufgenommen werden konnten, ist diese Aussage nur eingeschränkt möglich. In Kontrast dazu wies die Interventionsgruppe VR in der zweiten Session auf dem SRF-Parcours in der schnellen Ganggeschwindigkeit im ersten Schritt nach dem Stolpern eine geringere Flexion im Oberkörper auf. Diese Adaptation wurde bereits in früheren Studien nach einem erfolgten Perturbationstraining festgestellt und auf eine Verschiebung des CoM in posterior Richtung zurückgeführt (Brodie et al., 2018, Wang et al., 2012). In beiden Interventionsgruppen konnten somit neben einer Adaption bei der Vergrößerung der BoS (als zentralem Mechanismus zur Wiederherstellung des Gleichgewichts nach dem Stolpern) auch weitere, teils unterschiedliche posturale Korrekturen beobachtet werden, die sich zwischen den beiden Interventionsgruppen unterschieden. Liu et al., 2015 haben basierend auf den Ergebnissen ihrer Studie ebenfalls eine solche Diversität für das ebenerdige Rutschen auf einem Gangsteg zwischen zwei Interventionsgruppen gefunden, welche entweder ein mechanisches oder VR-basiertes Perturbationstraining (Rutschen auf einer beweglichen Plattform vs. Kippen des virtuellen Bildes) absolviert hatten. Dabei konnten sie Anpassungen nach dem Training für die mechanische Interventionsgruppe primär in den unteren Extremitäten und für die VR-basierte Interventionsgruppe in den oberen Extremitäten (z. B. dem Oberkörper) identifizieren, was sie wiederum auf die Unterschiede in den Perturbationsarten der jeweiligen Trainingsintervention zurückgeführt haben. Diese Erkenntnisse von Liu et al., 2015 lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Trainingsinterventionen auch in dieser Studie zu den unterschiedlichen Trainingseffekten in den Mechanismen geführt haben.

Weiterführend wies die Interventionsgruppe VR für die schnelle Ganggeschwindigkeit auch im zweiten Schritt nach dem Stolpern eine Verbesserung der reaktiven dynamischen Gangstabilität auf (in Form einer Zunahme in der MoS), welche auf eine Reduktion der Geschwindigkeit des CoM mittels einer Gegenrotation im Oberkörper mit gleichzeitigem geringerem Flexionswinkel hindeutet. Für die Interventionsgruppe MECH wurde in diesem Fall im zweiten Schritt keine Verbesserung der reaktiven dynamischen Gangstabilität festgestellt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Teilnehmenden in dieser Gruppe vor dem Training schon eine bessere dynamische Gangstabilität aufwiesen (mittlere MoS $-0.34 \text{ m} \pm 0.14$) als die Teilnehmenden in der Interventionsgruppe VR (mittlere MoS $-0.41 \text{ m} \pm 0.17$) und somit letztere mehr Kapazitäten für eine mögliche Verbesserung hatten.

In der zweiten Session auf dem SRF-Parcours bei bevorzugter Ganggeschwindigkeit wurde innerhalb der ‚Responder‘ nach dem Stolpern eine Verringerung der CoM-Geschwindigkeit in der Interventionsgruppe MECH sowie des Oberkörper-Flexionswinkels in der Interventionsgruppe VR festgestellt. In beiden Gruppen zeigten sich in diesem Fall allerdings keine Unterschiede in der Vergrößerung der BoS nach dem Training auf dem Laufband. Weiterführend wurde in der Gruppe der „Responder“ für beide Interventionsgruppen festgestellt, dass vor allem solche Teilnehmenden eine Verbesserung in der Stabilität beim Stolpern nach der Trainingsintervention aufzeigten, bei denen vor dem Training eine niedrigere dynamische Gangstabilität innerhalb ihrer jeweiligen Interventionsgruppe nachgewiesen wurde (Abbildung 36). Dies bedeutet, dass Teilnehmende eher von den jeweiligen Trainingsinterventionen profitiert bzw. sich in den jeweiligen posturalen Korrekturen verbessert haben, wenn sie vor dem Training eine geringere Stabilitätskontrolle (engl. „low performance“) in der Wiederherstellung ihres Gleichgewichtes nach dem Stolpern aufzeigten. Abschließend konnte sechs Monate nach dem Training für die „Responder“ innerhalb der Interventionsgruppe MECH für die Gangperturbation „Stolpern“ unabhängig von der Ganggeschwindigkeit keine Beibehaltung (engl. „Retention“) der verbesserten posturalen Korrekturen gefunden werden. Eine mögliche Erklärung könnte darin liegen, dass die einmalige Durchführung der mechanischen Trainingsintervention lediglich eine kurzfristige Anpassung bewirkt hat. Dies würde darauf hindeuten, dass die Trainingsdosis nicht ausreichte, um die erlernten Adaptionen über einen Zeitraum von bis zu sechs Monaten aufrechtzuerhalten. Eine Studie von König et al., 2019a hat bereits einen Zusammenhang zwischen der Trainingsdosis innerhalb eines mechanischen Perturbationstrainings und der entsprechenden Beibehaltung der gefundenen Trainingseffekte zu einem späteren Zeitpunkt (bspw. 14 Wochen) nachweisen können. Basierend auf diesen Erkenntnissen kann geschlussfolgert werden, dass die mechanische Trainingsintervention auf dem Laufband erneut absolviert werden sollte, um die erlernten Trainingseffekte über einen längeren Zeitraum beizubehalten, wobei keine Aussage bzgl. des genauen zeitlichen Abstandes zwischen zwei Trainingsdurchgängen getroffen werden kann.

Da die Verbesserung in der reaktiven dynamischen Gangstabilität nach dem Stolpern sowie die entsprechenden Adaptionen in der Kontrollgruppe CON für die schnelle Ganggeschwindigkeit nicht festgestellt werden konnten, kann geschlussfolgert werden, dass die genannten Effekte in den Interventionsgruppen auf die Trainingsintervention zurückgeführt werden können (unabhängig von der Art der Perturbation). Vorherige Studien konnten zeigen, dass eine unvorhersehbare mechanische posteriore Perturbation am Sprunggelenk während der Schwungphase zu einer Abnahme der dynamischen Stabilität während des Gehens auf dem Laufband führt (Epro et al., 2018a, Epro et al., 2018b, König et al., 2019a, König et al., 2019b, McCrum et al., 2016). Die Ergebnisse der aktuellen Studie für das mechanische Perturbationstraining bestätigen diese Erkenntnisse, da ebenfalls eine Abnahme der dynamischen Gangstabilität über eine Reduktion in der MoS festgestellt wurde. Zudem zeigte sich für das VR-basierte Perturbationstraining eine ähnliche Abnahme in der MoS. Dies bedeutet, dass in beiden Trainingsinterventionen die jeweils erfolgte Perturbation einen ausreichenden Stimulus auslöste, um die dynamische Gangstabilität zu stören. Zudem konnte sowohl für das mechanische als auch das VR-basierte Perturbationstraining eine Adjustierung der Vergrößerung der BoS nach einer erfolgten Perturbation in Richtung des Ausgangsniveaus festgestellt werden. Dies wurde auch bereits in vorherigen Studien als Reaktion nach einer erfolgten mechanischen Perturbation am Sprunggelenk nachgewiesen (Epro et al., 2018a). Weiterführend wurde dabei seitens der Autoren nach mehrmaliger Wiederholung der Perturbation eine Adaptation in Form einer Vergrößerung der BoS über eine erhöhte Positionierung des Fußes in anterior Richtung festgestellt (Epro et al., 2018a). Daraus kann geschlussfolgert werden, dass diese Adaptation in den beiden Interventionsgruppen für das Stolpern auf die jeweiligen Trainingsinterventionen zurückgeführt werden kann. In beiden Trainingsinterventionen konnte zudem bei den Teilnehmenden als Reaktion auf die jeweilige Perturbation eine erhöhte Flexion im Oberkörper mit anschließender Verringerung des Flexionswinkels festgestellt werden. Es kann deswegen angenommen werden, dass die Teilnehmenden zur Wiederherstellung ihres Gleichgewichtes nach der Perturbation die Position und Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes in anteriore Richtung mittels einer Gegenrotation im Oberkörper (Counterrotation) verringern (Brodie et al., 2018, Wang et al., 2012), was wiederum durch die Ergebnisse für V_{CoM} gestützt wird. Darüber hinaus zeigte sich in allen vier Parametern (MoS, BoS, im Oberkörperflexionswinkel und V_{CoM}) für das mechanische Perturbationstraining eine höhere maximale

Abweichung von der Baseline (Abbildung 26 Abbildung 27 A-C). Daraus folgt, dass die mechanische Perturbation im Mittel zu einer höheren Instabilität führte als die virtuelle Perturbation. Trotz der geringeren Beanspruchung und Trainingsintensität im VR-Training wurden beim Transfer auf den Parcours beim Stolpern ähnliche Effekte wie beim mechanischen Training beobachtet.

Für die unvorhersehbaren Gangperturbationen „Rutschen“ und „Fehltreten“ konnte in beiden Interventionsgruppen MECH und VR in den Schritten nach der jeweiligen Perturbation keine Zunahme in der MoS, d. h. der Toleranz der Stabilität, „Post-Intervention“ im Vergleich zu „Pre-Intervention“ unabhängig von der jeweiligen Ganggeschwindigkeit festgestellt werden. Dies impliziert, dass unabhängig von der Art der Perturbation auf dem Laufband (mechanische vs. virtuelle Perturbation) keine Verbesserung in der reaktiven dynamischen Gangstabilität nach Absolvierung der jeweiligen Trainingsintervention vorlag. Vorherige Studien konnten nachweisen, dass eine Verbesserung der dynamischen Gangstabilität bei unvorhersehbaren, ebenerdigen Rutschen und Fehltreten durch ein Perturbationstraining möglich ist (Bierbaum et al., 2010, Bierbaum et al., 2011, Okubo et al., 2018, Okubo et al., 2019, Yang et al., 2013, Yang et al., 2018). In den Studien von Yang et al. wurde ein wiederholtes Rutschen auf einem Laufband mittels einer unvorhersehbaren Vorwärtsbeschleunigung des Laufbandgurtes ausgelöst, wobei anschließend ein Transfer auf das ebenerdige Rutschen durch eine Verbesserung in der dynamischen Gangstabilität festgestellt werden konnte (Yang et al., 2013, Yang et al., 2018). Dies impliziert, dass das Trainingsparadigma aus den Studien von Yang et al. ein posteriores Rutschen realitätsnäher reproduziert und somit die entsprechende motorische Reaktion besser trainiert wird. Weiterführend kann daraus geschlossen werden, dass die mechanische Perturbation an der Hüfte sowie das angewandte VR-basierte Perturbationstraining aus der vorliegenden Studie die notwendige motorische Reaktion nicht adäquat trainiert haben. Deswegen sollte für ein Training der dynamischen Gangstabilität für das ebenerdige Rutschen das Perturbationstraining in Anlehnung an Yang et al. mit dem entsprechenden Trainingsparadigma angewandt werden. In den Studien von Bierbaum et al. wurde eine Adaptation des neuromotorischen Systems in Form einer Verbesserung in der dynamischen Gangstabilität für das ebenerdige Fehltreten (Einsinken des Untergrundes) während des Gehens auf einem Gangsteg (ähnlich dem SRF-Parcours) nachgewiesen (Bierbaum et al., 2010, Bierbaum et al., 2011). Diese Adaption wurde allerdings dadurch erzeugt, dass die Teilnehmenden mehrmals den Gangsteg entlanggingen, wobei sie wiederholt dieser Perturbation ausgesetzt wurden, d. h., sie haben die entsprechenden Bewegungen zur Wiederherstellung des Gleichgewichtes mehrfach nacheinander trainiert. Eine mögliche Umsetzung einer solchen vertikalen Perturbation auf dem Laufband ist allerdings nach dem aktuellen Stand nicht bekannt, wodurch nicht ersichtlich ist, ob ein Training auf dem Laufband geeignet ist, die dynamische Gangstabilität für das ebenerdige Fehltreten zu verbessern. Diese Verbesserung könnte allerdings analog zu den Studien von Bierbaum et al. durch ein wiederholtes Absolvieren dieser Perturbation auf dem SRF-Parcours erreicht werden. Im Gegensatz zu einem Trainingsprogramm auf dem Laufband ist die Umsetzung eines solchen Perturbationstrainings bei Firmen allerdings, u. a. aufgrund der Größe des Parcours und der Notwendigkeit eines Sicherungssystems an der Decke über dem Parcours, wesentlich schwieriger.

Abschließend konnte für die bevorzugte Geschwindigkeit für die beiden Gangperturbationen „Rutschen“ und „Fehltreten“ innerhalb der Kontrollgruppe sowie der Interventionsgruppe VR (hier nur beim Fehltreten) auch eine Verschlechterung in der reaktiven dynamischen Gangstabilität in den Schritten nach der Perturbation in der zweiten Session in Form einer Reduktion der MoS festgestellt werden. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit in der zweiten Session in allen drei Gruppen (MECH, VR und CON) für alle Gangperturbationen (Stolpern, Rutschen und Fehltreten) eine Zunahme in V_{CoM} zum Zeitpunkt vor der Perturbation festgestellt werden konnte (einzige nicht signifikante Ausnahme: Interventionsgruppe VR für Gangperturbation „Fehltreten“, mittlere Differenz $0.04 \text{ m/s} \pm 0.12 \text{ [SD]}$). Dies impliziert, dass die Teilnehmenden in der zweiten Session für die bevorzugte Ganggeschwindigkeit den SRF-Parcours schneller überquerten als in der ersten Session, was wiederum die Gangstabilität beeinflusst (Süptitz et al., 2012). Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass die Gangperturbationen den Teilnehmenden vor der ersten Session nicht bekannt waren und sie deswegen den Parcours aufgrund von Unsicherheit mit einer geringeren Ganggeschwindigkeit überschritten haben. In der zweiten Session haben die Teilnehmenden dann ihre bevorzugte Ganggeschwindigkeit erhöht, da

sie die Gangperturbationen bereits absolviert hatten und somit deren Bewältigung besser einschätzen konnten. Dies würde final auch erklären, warum die Ergebnisse für die Gangperturbation „Stolpern“ in der bevorzugten Ganggeschwindigkeit nicht so eindeutig sind wie für die schnelle Ganggeschwindigkeit.

Limitationen

Mehrere Limitationen für das reaktive Perturbationstraining sollten bei der Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext beachtet werden. Zunächst konnten aufgrund der geringen Anzahl an Teilnehmenden am zweiten Messtag innerhalb der Interventionsgruppe VR keine Analysen über mögliche Beibehaltungseffekte für die Gangperturbation „Stolpern“ durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass im Gegensatz zum mechanischen Perturbationstraining keine Aussagen darüber getroffen werden können, ob die entsprechenden Adaptionen in den trainierten posturalen Korrekturen sechs Monate nach dem VR-basierten Perturbationstraining noch beibehalten werden können. Außerdem gab es konstruktionsbedingte Einschränkungen bei dem SRF-Parcours in der Gestaltung der Elemente für die Gangperturbationen „Rutschen“ und „Fehltreten“, weswegen die Rutschdistanz der beweglichen Bodenplatte sowie die Einsinktiefen der deformierbaren Bodenplatte limitiert werden mussten. Dies erschwert die Übertragbarkeit der Ergebnisse für die beiden Gangperturbationen auf die entsprechenden realen Situationen im Alltag, da eine Person z. B. beim Ausrutschen auf einer Eisfläche mit dem Fuß über eine Distanz von mehr als 14 cm rutschen kann. Zudem wurden die Teilnehmenden im Vorfeld explizit darauf hingewiesen, dass sie direkt nach einer erfolgten Perturbation auf dem SRF-Parcours nicht auf die schwarzen Bodenplatten treten müssen. Hierbei konnte allerdings festgestellt werden, dass vereinzelte Teilnehmende trotzdem versucht haben, noch während der Wiederherstellung ihres Gleichgewichts wieder auf die schwarzen Bodenplatten zu treten, was sich wiederum in einem Kreuzgang nach der Perturbation zeigte. Abschließend wurde die Sturzdetektion bzw. ein Eingreifen des Sicherungssystems nach einer erfolgten Perturbation anstelle von eingebauter Sensorik visuell mittels Videoaufnahmen der Messungen evaluiert. Dies hatte zur Folge, dass vereinzelte Teilnehmende für die weitere Analyse nicht weiter berücksichtigt wurden, da ein Eingreifen des Sicherungssystems seitens der Studienleitung nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte. Für das mechanische Perturbationstraining ist zu berücksichtigen, dass die Perturbationen an den Füßen und der Hüfte händisch von der Studienleitung eingeleitet wurden, wodurch keine vollständige Standardisierung des Perturbationsprotokolls gewährleistet werden kann und somit keine Aussagen über mögliche Adaptionsprozesse innerhalb des Trainings getroffen werden können. Da im Vordergrund der Studie allerdings die Evaluation der Wirksamkeit des Transfers der verbesserten Stabilitätsmechanismen sowie die langfristigen Beibehaltungseffekte stehen, ist die vorliegende Variabilität im Protokoll sogar vorteilhaft, um eine höhere Generalisierbarkeit zu erreichen.

Fragebogenbasierte Evaluation der Perturbationstrainings

Methodik der Fragebögen

Bewertung des Perturbationstraining

Direkt nach den Trainingseinheiten (T2) wurde das Perturbationstraining (mechanisch und VR-basiert) für beide Trainings mit Items des Training-Evaluation-Inventars (TEI, Ritzmann et al., 2014) auf einer Skala von stimme nicht zu (1) bis stimme sehr zu (5) evaluiert. Das mechanische Perturbationstraining wurde mit dem TEI ($\alpha = .89$) bezüglich Spaß ($\alpha = .70$), Nützlichkeit ($\alpha = .88$), Schwierigkeit ($\alpha = .72$), subjektivem Fertigkeitserfolg ($\alpha = .52$), Einstellung ($\alpha = .77$), problembasiertem Lernen ($\alpha = .78$), Anwendung ($\alpha = .78$) und Integration des Gelernten ($\alpha = .65$) bewertet. Das VR-basierte Perturbationstraining wurde mit einer VR-bezogenen TEI-Variante ($\alpha = .94$) bezüglich Spaß ($\alpha = .75$), Nützlichkeit ($\alpha = .76$), Schwierigkeit ($\alpha = .46$), subjektivem Fertigkeitserfolg ($\alpha = .58$), Einstellung ($\alpha = .90$), problembasiertem Lernen ($\alpha = .86$), Anwendung ($\alpha = .54$) und Integration des Gelernten ($\alpha = .91$) bewertet. Die Interventionsgruppe des VR-basierten Trainings füllte zusätzlich Items zur Cyber Sickness (Kennedy et al., 1993) von nicht vorhanden (0) bis stark (3) und einen Fragebogen zum empfundenen Präsenzerleben (Schubert et al., 2001) auf einer Skala von trifft gar nicht zu (1) bis trifft voll zu (5) aus. Sechs Monate später, zum Zeitpunkt T3, wurde bei beiden Interventionsgruppen der Transfer der Sturztrainings in den Alltag abgefragt (Transfer Climate

Questionnaire; mechanisch $\alpha = .63$, VR-basiert $\alpha = .71$; modifiziert nach Thayer & Teachout, 1995). Dies beinhaltete die Transferklimakonstrukte Zielhinweise (mechanisch $\alpha = .84$, VR-basiert $\alpha = .95$), Positive Verstärkung (mechanisch $\alpha = .35$, VR-basiert $\alpha = .46$) und Negative Verstärkung. Zusätzlich beantworteten beide Gruppen rückblickend gestellte Items des TEI (mechanisch $\alpha = .72$, VR-basiert $\alpha = .90$). Rückblickend wurden Nützlichkeit, Fertigkeitserwerb (mechanisch $\alpha = .84$, VR-basiert $\alpha = .94$) sowie die Einstellung zum Training abgefragt.

Sturzmonitorings

Die ursprüngliche Idee, ein wöchentliches Monitoring zu erlebten SRF-Gefährdungen über sechs Monate durchzuführen, wurde verworfen. Unternehmenspartner äußerten Bedenken, dass Beschäftigte die Fragebögen nicht ausfüllen oder aus der Studie aussteigen könnten. Stattdessen erfolgt das Monitoring rückblickend zu vier Zeitpunkten. Zu Beginn des ersten Messtages (T1) füllten alle Teilnehmenden ein Sturzmonitoring aus, welches rückblickend auf die letzten zwei Wochen etwaige Stolper, Rutsch und Fehltritt-Vorfälle erfasst. Ungefähr zwei Wochen und drei Monate nach ihrem Trainingstag erhielten die Teilnehmenden die Möglichkeit, je ein weiteres Sturzmonitoring rückblickend auf die letzten zwei Wochen auszufüllen, um etwaige Stolper-, Rutsch- und Fehltrittereignisse anzugeben. Sechs Monate nach dem Durchlaufen des Trainingsprogrammes zum zweiten Messtag erfolgte ein letztes Sturzmonitoring rückblickend auf die letzten zwei Wochen. Das Sturzmonitoring beinhaltete Fragen dazu, ob es zu einem Ereignis kam, welche Form (Stolpern, Rutschen oder Fehltreten) es hatte, wie oft dies in der abgefragten Zeit vorkam, ob es zu einem Sturz kam und wenn ja, wo (Arbeit oder Privat), und ob es zu Verletzungen kam und wenn ja, welche. In der nachfolgenden Auswertung wurde nur betrachtet, ob es zu einem Ereignis kam oder nicht.

Deskriptive Ergebnisse

Bewertung und Evaluation der Perturbationstrainings zum ersten Messtag (T2)

Die Bewertung der Perturbationstrainings (mechanisch und VR basiert) durch das Training-Evaluations-Inventar (Ritzmann et al., 2015) ist in Abbildungen 42 und 43 dargestellt. Das mechanische Training wird zum ersten Messtag etwas besser bewertet als das VR-basierte Training. Beide Trainings werden aber als positiv angesehen, es wird ein subjektiver Fertigkeitserwerb und ein Gefühl von Spaß erlebt und die Anwendungen als nützlich und wenig schwierig angesehen.

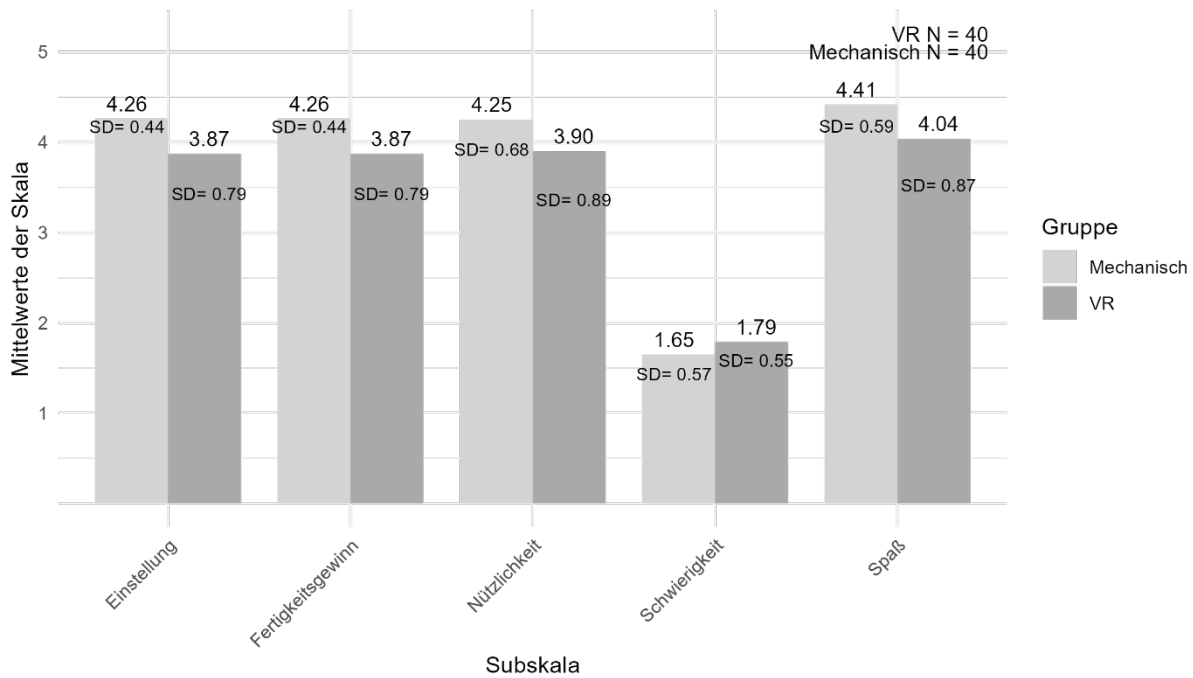


Abbildung 42: Bewertung beider Perturbationstrainings (Mechanisch und VR-basiert) im Vergleich mithilfe des TEIs zum Trainingsoutcome. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

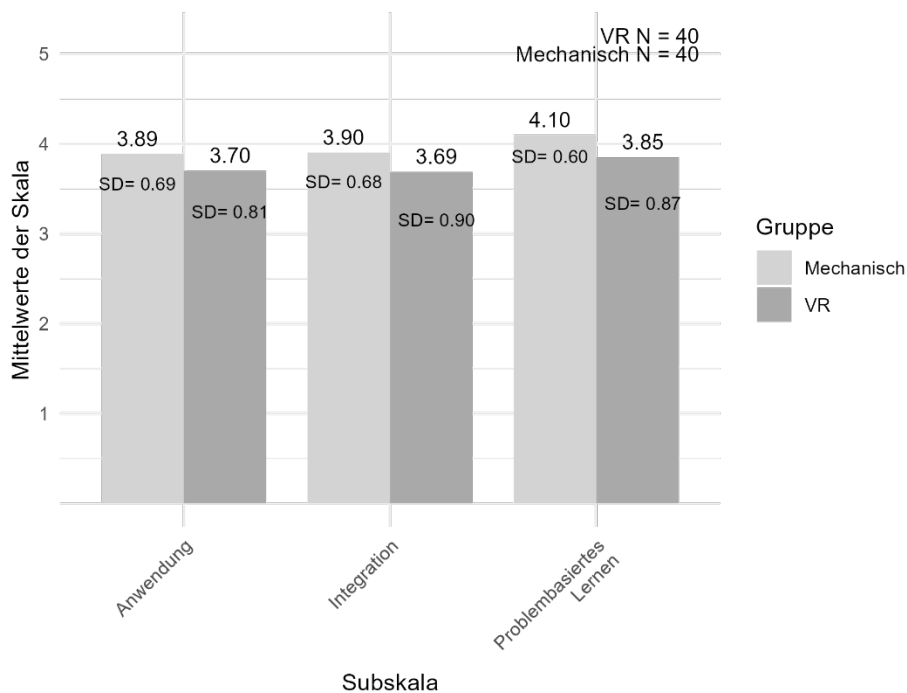


Abbildung 43: Bewertung beider Perturbationstrainings (Mechanisch und VR-basiert) im Vergleich mithilfe des TEIs zum Trainingsdesign. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

Personen, die am VR-basierten Perturbationstraining teilnahmen, gaben eher ein Präsenzerleben während der VR-Simulation an ($M = 3.42$, $SD = 0.77$). Zudem wurden keine bis leichte Cybersickness-Symptome berichtet ($M = 0.3$, $SD = 0.41$; Abbildung 44).

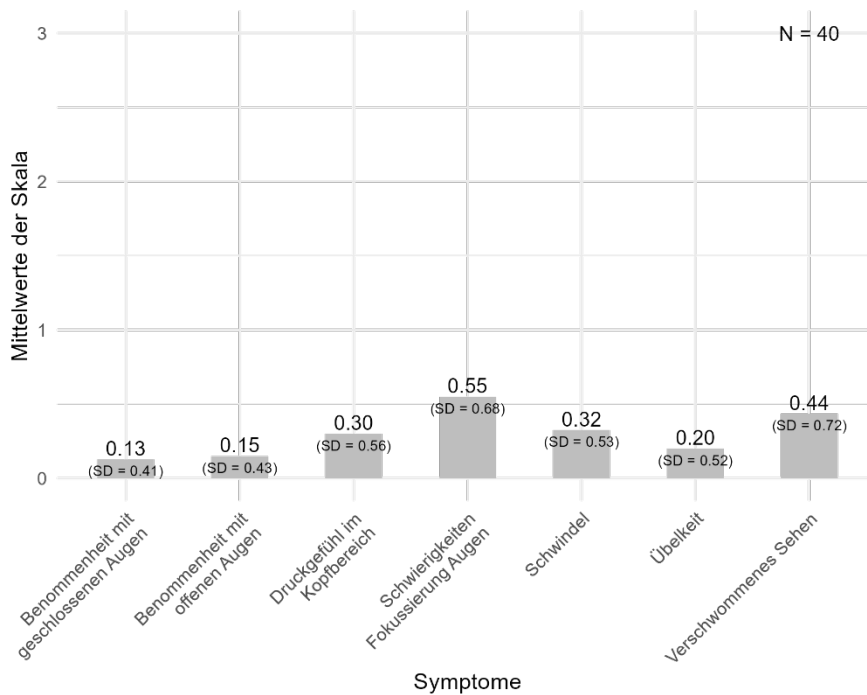


Abbildung 44: Bewertung der Cyber Sickness Symptome beider Anwendungen (Stadtszenario DHL und Lagerhalle HKM) der VR SRF-Schulungssimulation im Vergleich. Die Bewertungsskala verlief entlang nicht vorhanden (0), leicht (1), mäßig (2) und stark (3).

Bewertung und Evaluation der Perturbationstrainings zum zweiten Messtag (T3)

Zum zweiten Messtag gaben die Teilnehmenden der beiden Perturbationstrainings auch rückblickend noch eine sehr positive Einstellung, einen leichten subjektiven Fertigkeitserfolg und sahen weiterhin eine gewisse Nützlichkeit im Training (Abbildung 45).

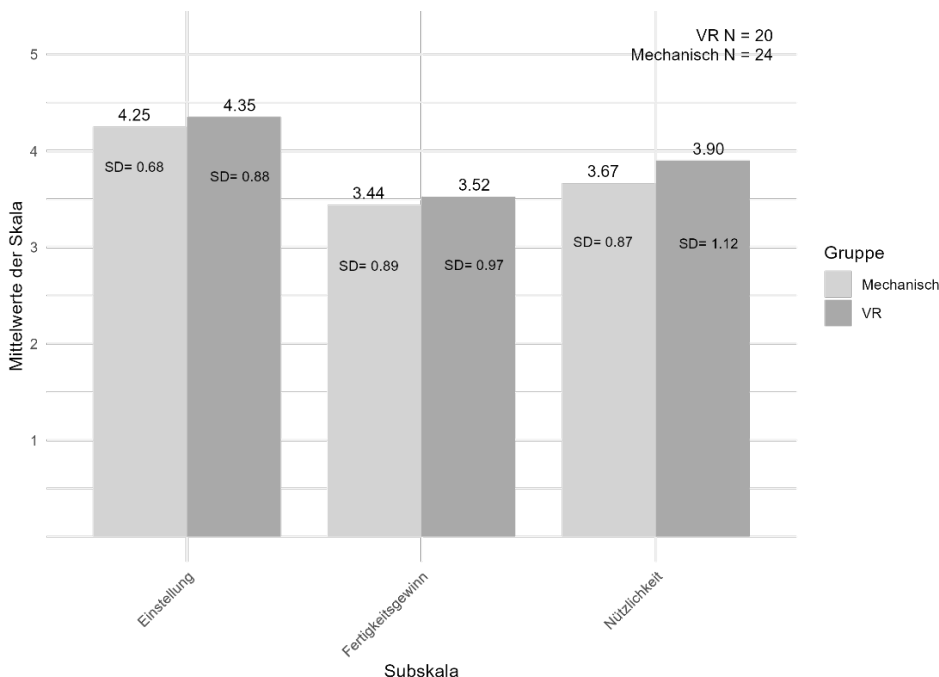


Abbildung 45: Rückblickende Bewertung beider Perturbationstrainings (Mechanisch und VR-basiert) im Vergleich mithilfe ausgewählter Subskalen des TEI. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

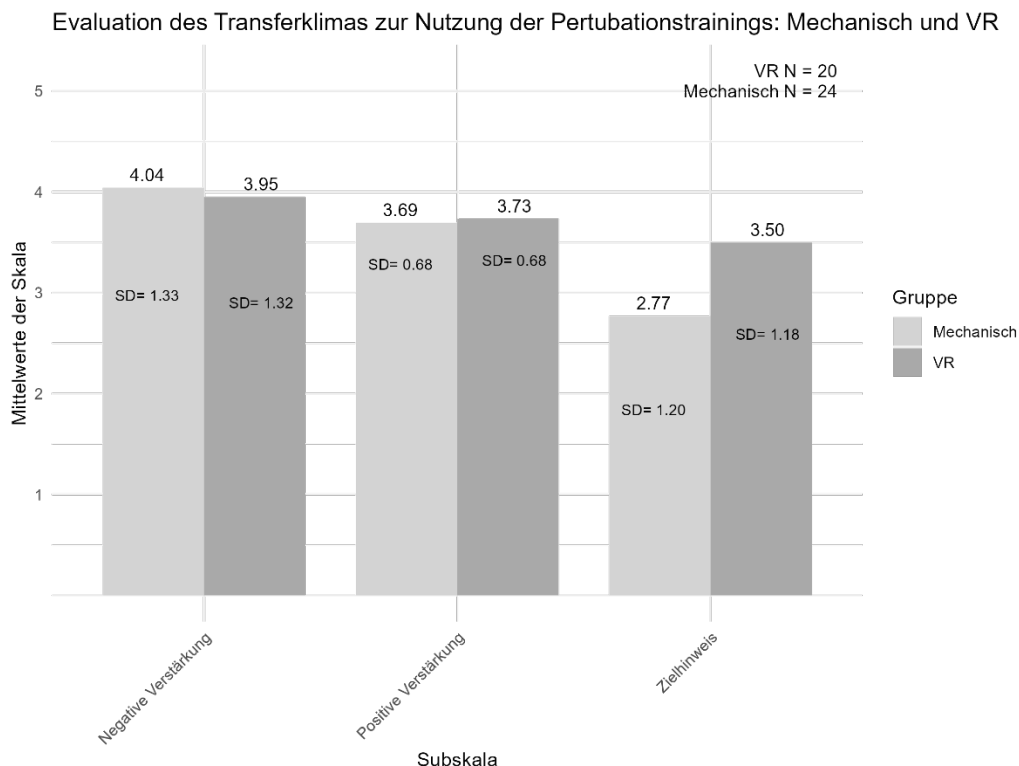


Abbildung 46: Bewertung des Transferklimas beider Trainingsgruppen (Mechanisch und VR-basiert) des Perturbationstrainings in den Alltag im Vergleich mithilfe des Transfer Climate Questionnaires. Die Bewertungsskala verlief entlang stimme nicht zu (1), stimme eher nicht zu (2), weder noch (3), stimme eher zu (4) und stimme sehr zu (5).

Förderliche Faktoren des Transfers des Perturbationstrainings in den Alltag wurden von beiden Interventionsgruppen als eher gut bewertet (negative und positive Verstärkung). Die mechanische Interventionsgruppe gab dabei eher das Vorhandensein von Zielhinweisen durch Vorgesetzte an als die VR-basierte Interventionsgruppe (Abbildung 46).

SRF-Ereignisse in der Projektlaufzeit

In der Auswertung der Sturzmonitorings waren nur Personen enthalten, die auch zum zweiten Messtag noch teilnahmen.

Tabelle 33: Relative Anzahl an Personen pro Erhebungszeitpunkt (%), die im Sturzmonitoring ein SRF-Ereignis angaben.

Sturzmonitorings	N	Ereignis
2 Wochen vor Training	61	46%
2 Wochen nach Training	54	37%
3 Monate nach Training	43	39%
2 Wochen vor zweitem Messtag	61	56%

Über alle Gruppen verteilt gaben 23% an, dass zu keinem Zeitpunkt in dem Erhebungszeitraum ein Ereignis vorgefallen ist. Ein SRF-Ereignis wurde von 28% der Teilnehmenden zu einem Zeitpunkt berichtet, an zwei Zeitpunkten gaben 21% ein Ereignis an, zu drei Zeitpunkten gaben 20% eins an und 8% gaben bei jeder Abfrage an, ein SRF-Ereignis erlebt zu haben. Die genaue Anzahl pro Erhebungszeitpunkt ist in Tabelle 33 zu erkennen.

Inferenzstatistische Ergebnisse

Korrelationen über die gesamte Stichprobe bezogen auf Geschlecht und Sportlichkeit als Prädiktoren für die Bewertung der Trainings und der SRF-Ereignisse

In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 34) sind schwache bis moderate Korrelationen zwischen Geschlecht und Sportlichkeit mit der Bewertung der Perturbationstrainings und des Monitorings der SRF-Ereignisse zu finden. Hier ist erkennbar, dass das Geschlecht negativ mit der Bewertung des mechanischen Trainings sowie dem Erleben von SRF-Ereignissen zusammenhängt. Sportlichkeit steht im Zusammenhang mit einer niedrigeren Bewertung des mechanischen Perturbationstrainings, einer besseren Bewertung des VR-basierten Perturbationstrainings und eher dem Erleben eines SRF-Ereignisses.

*Tabelle 34. Signifikante Korrelationen nach Spearman zu den Perturbationstrainings und Sturzmonitorings über die gesamte Stichprobe bezogen auf Geschlecht und Sportlichkeit. Geschlecht weiblich = 0, männlich = 1, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.*

	Geschlecht	Sportstunden / Woche
Mechanisches Perturbationstraining		
Fertigkeitsgewinn	-0.38 **	
Einstellung	-0.32 *	
Problembasiertes Lernen		-0.46 **
Schwierigkeit		0.33 *
Anwendung		-0.34 *
VR-basiertes Perturbationstraining		
Einstellung		0.32 *
Schwierigkeit		-0.32 *
SRF- Ereignis		
2 Wochen nach T2	-0.32 **	

Bewertung der Perturbationstrainings

Beim VR-basierten Training hing das Präsenzerleben positiv mit der Anwendung des Gelernten zusammen ($r = 0.33$, $p < .05$) und das Erleben von Cybersickness negativ mit dem Empfinden von Spaß ($r = -0.40$, $p < .05$).

Diskussion der fragebogenbasierten Evaluation der Perturbationstrainings

Die Evaluation der beiden Perturbationstrainings zeigt, dass beide Ansätze positiv und auch über die Zeit als nützlich empfunden wurden. Weniger sportliche Personen bewerteten das mechanische Training besser als sportliche Personen. Letztere bewerteten das VR-basierte Training besser. Frauen berichteten häufiger von einem Fertigkeitserfolg im mechanischen Training und zeigten eine positivere Einstellung dem Training gegenüber. Dabei sollte beachtet werden, dass kein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis vorhanden war. Ein stärkeres Präsenzgefühl im VR-Training führte zu einer besseren Bewertung, während Cyber-Sickness die Akzeptanz minderte. Vorab sollte die Neigung zu Motion und Cybersickness berücksichtigt werden, um geeignete Alternativen anzubieten. Beide Interventionsgruppen gaben eher ein förderliches Transferklima in ihrer Arbeitsumgebung an.

Die Sturzmonitorings zeigten über die gesamte Stichprobe eine Verringerung des Erlebens eines Ereignisses nach dem Training. Dies stieg in den zwei Wochen vor dem zweiten Messtag. Das könnte einen Hinweis auf einen kurzfristigen Effekt der Trainings darstellen. Die Ergebnisse sind aber mit Vorsicht zu interpretieren, da die fragebogenbasierte Abfrage nicht objektiv Ereignisse erfassen kann und die Rücklaufquoten außerhalb der Messzeitpunkte teilweise geringer ausfielen. Zudem konnten weitere die Ergebnisse beeinflussende Faktoren nicht erfasst und somit nicht berücksichtigt werden. Ein sensorbasierter Ansatz wurde im Rahmen dieses Projekts ebenfalls überprüft und wird im nächsten Kapitel umfassend dargestellt.

7. Weiterführende Auswertung des IFA

Zielsetzung der Auswertungen des IFA

Üblicherweise werden Untersuchungen zu Gangstabilität unter Laborbedingungen durchgeführt, um unter konstanten Perturbationsbedingungen, einem homogenen Probandenkollektiv und einer gesicherten Umgebung den Effekt von Perturbationen untersuchen zu können. Hierzu werden bestimmte Situationen der Gangphasen identifiziert und analysiert, wie im vorherigen Kapitel beschrieben.

Ziel der weiterführenden Auswertungen des IFA über das Projektziel hinaus ist eine Methodenentwicklung zur Erkennung von SRF-Ereignissen für den Einsatz in der Prävention. Kommt es aufgrund eines SRF-Ereignisses zu einem echten Sturz, sind der Ort, die Situationen sowie mögliche Ursachen in der Regel klar. Kommt es aber zu einem SRF-Ereignis, bei dem die Person nur beinahe gestürzt ist, können die Gegebenheiten schnell in Vergessenheit geraten und Häufigkeitskonzentrationen von Orten oder Situationen nicht erkannt werden. Es ist vorstellbar, dass solche Daten langfristig helfen können, diese Situationen zu erkennen und zu entschärfen. Aus diesem Grund soll die Erkennung von SRF-Ereignissen aus kontinuierlichen Messdaten an realen Arbeitsplätzen, unabhängig von manuell oder automatisch gesetzten Perturbationsereignissen, automatisch erfolgen können. Auch soll die Methodenentwicklung mit dem Aspekt stattfinden, die Unabhängigkeit und Austauschbarkeit der Messtechnik und der Auswertalgorithmen von proprietären und meistens nicht offengelegten (black-box)-Verfahren zu reduzieren. Aus diesem Grund verfolgt das IFA z. B. eine Methode, die unabhängig von der Bodenkontakterkennung der Füße ist, wie sie in der Auswertung der Hauptstudie genutzt wurde. Es wird dabei hingenommen, dass in der aktuellen Entwicklungsphase die Auswerteparameter zum Teil nicht die Effekte belegen können, die bei der Hauptstudie beschrieben werden.

Die Methodenentwicklung erfolgt in zwei Schritten. Erstens werden die erfassten Messdaten der SRF-Ereignisse mit dem sensorisch vollständigen und zeitlich kontinuierlichen Datensatz deskriptiv betrachtet. Hierzu wird das biomechanische CUELA-Modell mit individueller Massen- und Schwerpunktverteilung aller Körpersegmente und deren kinematischen Messdaten und weiteren Ausgabeparametern genutzt. Im zweiten Schritt, der nicht Teil dieses Berichtes ist, soll der Datensatz so weit reduziert werden, dass er mit einer minimalen Anzahl von Sensoren noch gute Ergebnisse erzielt. Dieser Schritt ist insofern wichtig, weil die Reduzierung der Sensoren die Praxistauglichkeit von so einem System erhöht. Das soll durch Anwendung von Verfahren aus dem maschinellen Lernen (künstlicher Intelligenz) erreicht werden.

Methodenentwicklung für Schritt 1

Die Analyse der Körperhaltung und -bewegung erfolgte unter Zuhilfenahme des Messsystems CUELA (computerunterstützte Erfassung und Langzeitanalyse). Das Messsystem wurde im IFA zur objektiven Ermittlung von Muskel-Skelett-Belastungen am Arbeitsplatz entwickelt [Ellegast 2000, Ellegast 2009]. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden Inertialsensoren der Firma Movella (vormals Xsens) verwendet. Diese Sensoren bestehen aus Beschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeits- und Magnetfeldsensoren, welche direkt am Körper getragen werden und somit die Körperhaltungen und -bewegungen aufzeichnen (Abb. 24). Im Rahmen der Studie wurden die kabelgebundenen Xsens Link-Motion-Tracker (Movella™) verwendet.

Nachbearbeitung der Daten

Nach Abschluss der Messungen lagen rund 620 GB Daten in Form von Messungen und Videos vor. Notwendig für die spätere Auswertung war im ersten Schritt die Aufbereitung der Messungen. Die Messungen wurden so umbenannt, dass eine automatisierte Identifizierung der Messeigenschaften wie: Probanden-ID, Zeitpunkt (T1/T2/T3), Interventionsgruppen (VR, mechanisch, Kontrolle), Gehgeschwindigkeit (langsam/schnell) und Perturbationsart (Stolpern, Rutschen, Fehltreten (SRF))

möglich war. Während der Messungen wurden dafür die Messeigenschaften in einer Eigenschaftstabelle eingetragen, um den Umbenennungsschritt bestmöglich automatisieren zu können.

Schon während der Messphase wurden stellenweise geplante Messungen verworfen. Probandinnen/Probanden haben z. B. Versuche nicht durchgeführt, sind echt gestürzt oder die Parcoursmechanik hatte nicht ausgelöst. Auch im Nachhinein wurden noch weitere fehlerhafte Messungen gefunden und herausgenommen. Nach der Bereinigung der Messungen blieben 1639 SRF-Messungen, 560 Baseline-Messungen, durchgeführt von 110 Probanden, übrig.

Eine Messung besteht aus 330 Kanälen, davon wurden 222 aus dem Bewegungserfassungssystem exportiert. Weiterhin wurden 22 Kanäle vom Pendelmodell (siehe Abschnitt „Berechnung der dynamischen Gangparameter aus den kinematischen Daten“) berechnet. Die restlichen Kanäle wurden von der im IFA entwickelten CUELA-Auswerte-Software „WIDAAN“ (Winkel-Daten-Analyse) berechnet, z. B.: Gelenkwinkel, Gelenkwinkelgeschwindigkeiten, die Ausgabeparameter des biomechanischen Modells.

Nach der Umbenennung wurden die Messdaten in das Datenformat von WIDAAN konvertiert. Auch die Videos der Messungen wurden in diesem Schritt umbenannt und, falls notwendig, noch in der Bildorientierung durch Rotation korrigiert. Die umbenannten Messdaten konnten danach synchron mit dem Video in der WIDAAN-Software dargestellt werden.

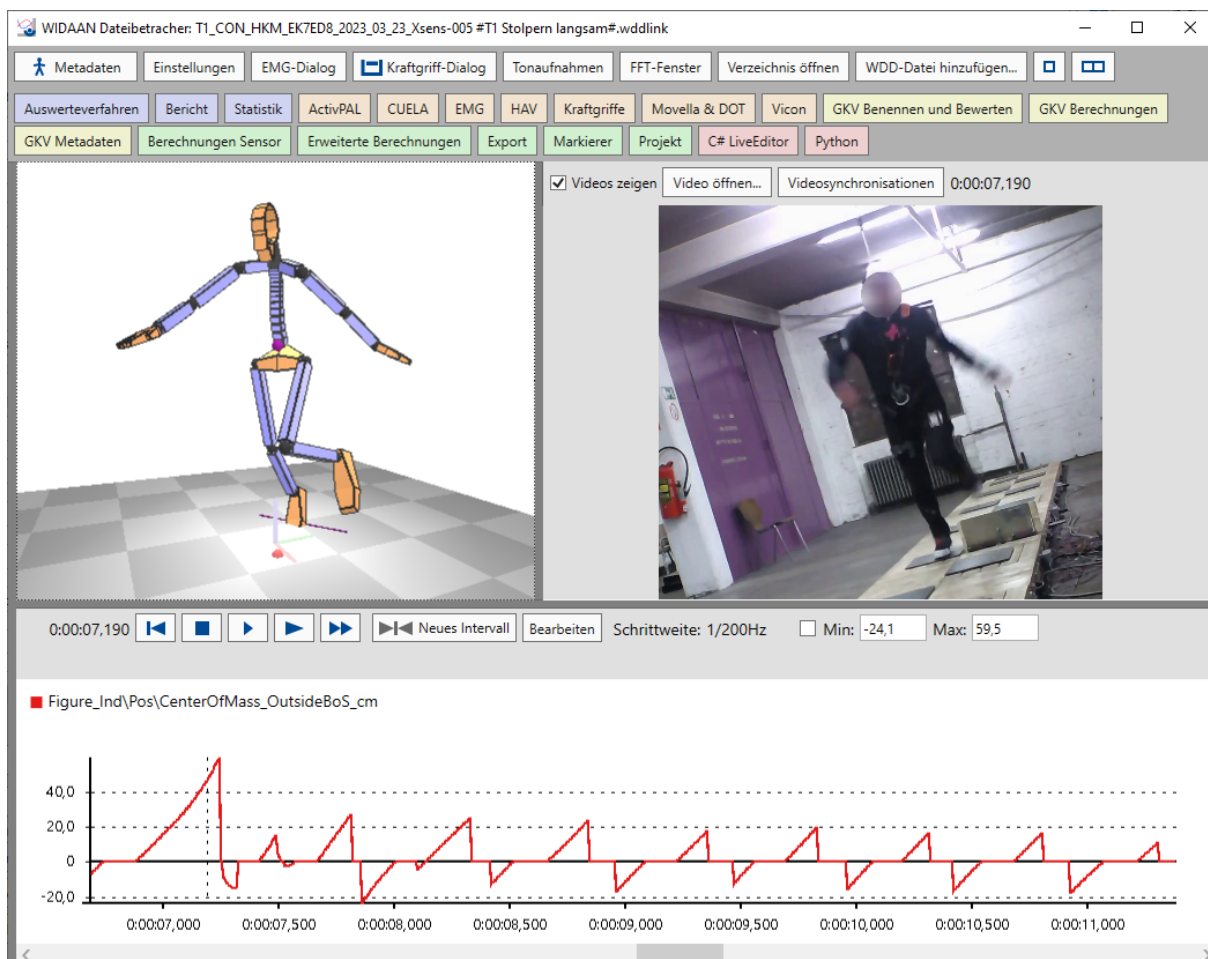


Abbildung 47: Der WIDAAN-Screenshot zeigt das biomechanische Modell, das synchronisierte Video und ein Auswerteparameter als Zeitreihe

Berechnung der Ausgabeparameter

Das biomechanische Modell der WIDAAN-Software wird von den kinematischen Daten des Bewegungserfassungssystems der Firma Movella bewegt. Die Anthropometrie des Modells wurde in der Körperlänge- und -masse individuell an die Maße der Probandinnen/Probanden angepasst, beruht aber grundsätzlich auf dem Skelettmodell des Dortmunders [Jäger 2018]. Jede Perturbation zeigt sich in einer unterschiedlichen Anzahl von Kanälen mit unterschiedlichen Intensitäten. Die folgende deskriptive Statistik fokussiert sich auf wenige aussagekräftige Kanäle und Ausgabeparameter. Die Herausforderung, einen Wert zu finden, der sich nicht nur vom normalen Gehen abhebt, sondern auch unsensibel gegenüber „normalen“ Alltagsbewegungen ist, erschwert die Parameterwahl im Rahmen der geplanten Nutzung für die Prävention.

Parameter: Masseschwerpunkt außerhalb der Unterstützungsfläche

Zu jedem Zeitpunkt der Messung wurde der Schwerpunkt des Modells berechnet und auf den Boden projiziert. Gleichzeitig wurden der vorderste Berührungspunkt eines Fußes (Ferse oder Ballen) und der hinterste Berührungspunkt des anderen Fußes ermittelt. Zwischen diesen Punkten liegt die Unterstützungsfläche (BoS, base of support). Liegt der Schwerpunkt innerhalb der Unterstützungsfläche, steht der Proband stabil. Liegt der Schwerpunkt länger außerhalb, kann der Proband umfallen, falls er nicht abgestützt ist. Auch im normalen Gang kommt es vor, dass der Mensch sich kurzfristig innerhalb der Schwungphase außerhalb der BoS befindet, was aber rechtzeitig durch das Aufsetzen des Fußes aufgefangen wird. Von Interesse sind also hier eher die Momente, in denen die Probanden sich zeitlich länger und weiter außerhalb der BoS befinden. Als Ausgabeparameter wird die Entfernung des Schwerpunktes außerhalb der BoS nach vorne positiv und nach hinten negativ in Zentimetern berechnet und im Folgenden OoS („Out of Support“) abgekürzt.

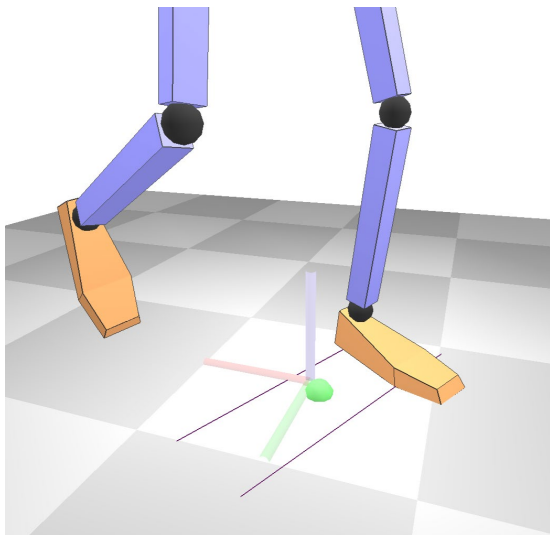


Abbildung 48: Projektion des Schwerpunktes auf den Boden (grün=stabil). Die Linien zeigen vorne/hinten der Unterstützungsfläche (BoS)

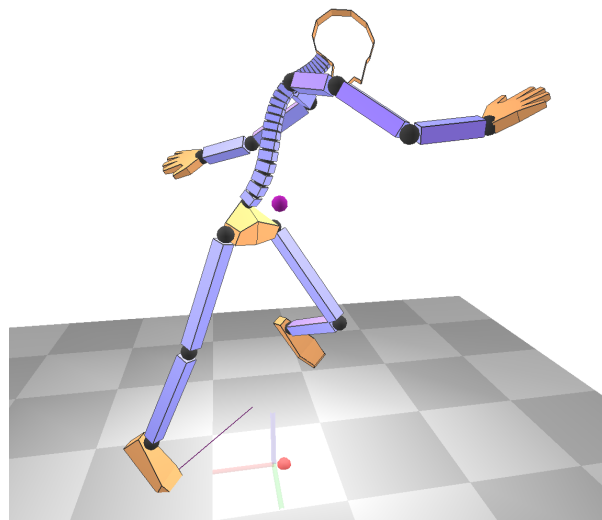


Abbildung 49: Schwerpunkt (lila), Projektion des Schwerpunktes auf den Boden (rot=instabil), die Linien zeigen vorne/hinten der Unterstützungsfläche (BoS)

Bei einem ungestörten Gang wechseln sich positive und negative Entfernungen außerhalb der BoS ab. Kommt es zu einer Störung des Gangbildes und zu einer möglichen Instabilität, ändert sich dieses Verhalten. Berechnet man eine fließende Dosis (Summe) mit einem Zeitfenster von einer Sekunde Dauer über die einzelnen Zeitpunkte, löschen sich beim ungestörten Gangbild die positiven und negativen Entfernungen nahezu aus. Bei einer Störung kommt es nicht mehr zu einer Auslöschung und die Instabilität wird sichtbar. Die folgenden Grafiken zeigen die Anteile des Schwerpunktes außerhalb der BoS, also den OoS und die darauf aufbauende OoS-Dosis.

■ Figure_Ind\Pos\CenterOfMass_OutsideBoS_cm ■ Figure_Ind\Pos\CenterOfMass_OutsideBoS_cm&Dose

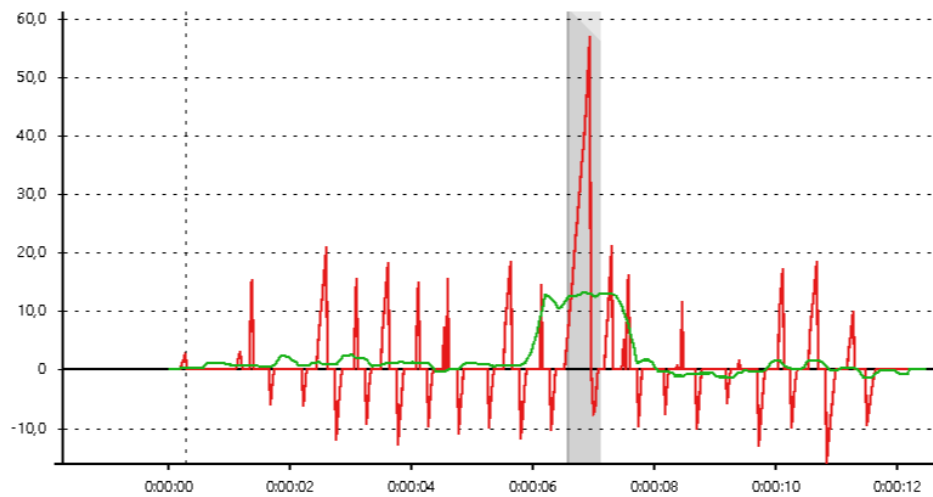


Abbildung 50: „Stolpern, schnell“: Schwerpunkt außerhalb der BoS (rot), fließende OoS-Dosis (grün). Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

■ Figure_Ind\Pos\CenterOfMass_OutsideBoS_cm ■ Figure_Ind\Pos\CenterOfMass_OutsideBoS_cm&Dose1_0

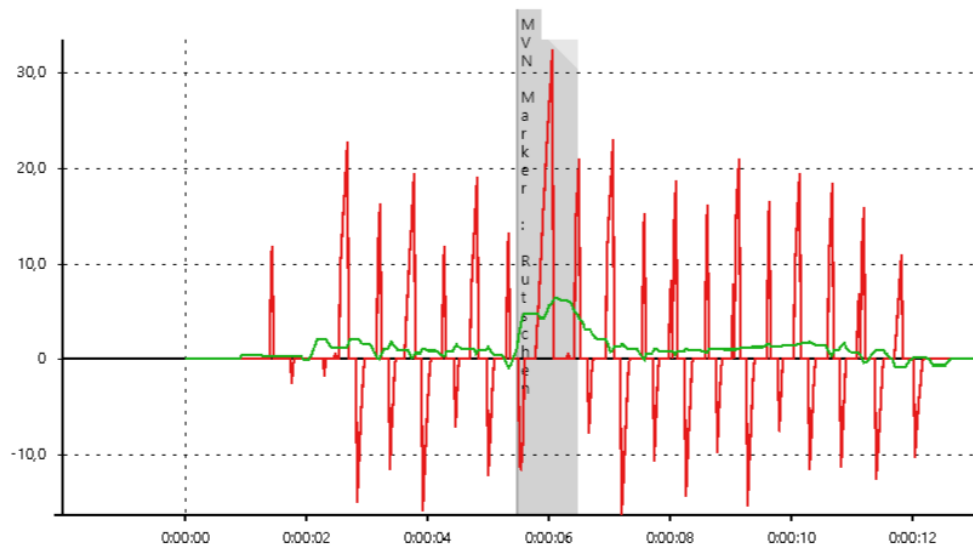


Abbildung 51: „Rutschen, schnell“: Schwerpunkt außerhalb der BoS (rot), fließende OoS-Dosis (grün). Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

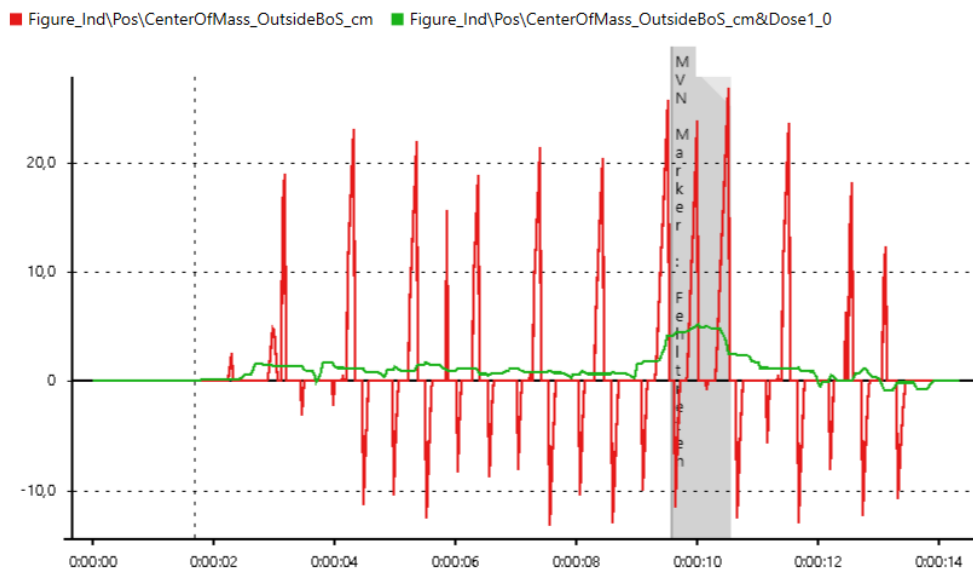


Abbildung 52: „Fehlertreten, schnell“: Schwerpunkt außerhalb der BoS (rot), fließende OoS-Dosis (grün). Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

Beim langsamen Gehen ist die Effektstärke der Perturbation geringer, der Unterschied der OoS-Dosis zum normalen Gehen ist aber trotzdem sichtbar, wie die folgenden Grafiken zeigen.

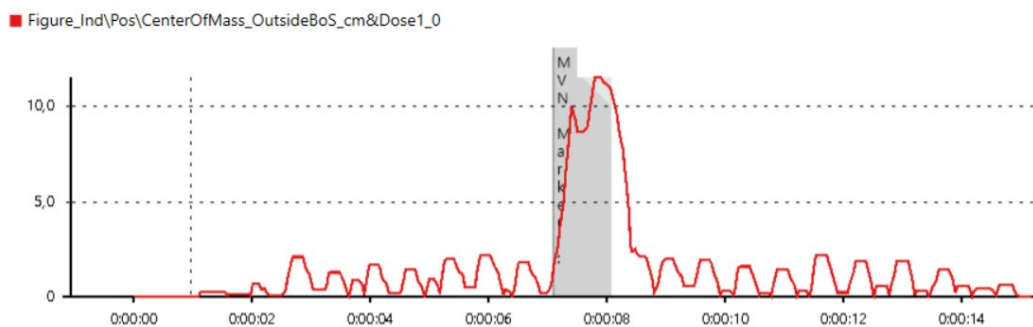


Abbildung 53: „Stolpern, langsam“: fließende OoS-Dosis (rot). Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

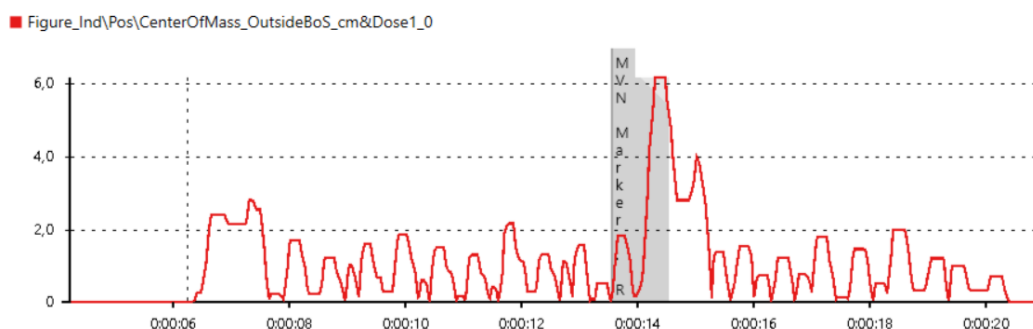


Abbildung 54: „Rutschen, langsam“: fließende OoS-Dosis (rot). Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

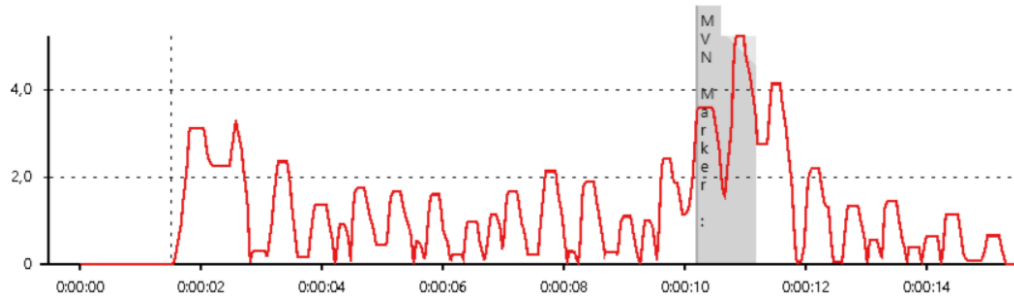


Abbildung 55: „Fehlertreten, langsam“: fließende OoS-Dosis (rot). Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

Im nächsten Schritt wurden von allen SRF-Messungen die 99ten Perzentile vom Zeitintervall Baseline (ungestörtes Gehen, n=1581), Stolpern schnell (n=252) / langsam (n=276), Rutschen schnell (n=277) / langsam (n=276) und Fehlertreten schnell (n=276) / langsam (n=280) betrachtet. Während der Unterschied von Stolpern zur Baseline deutlich zu sehen ist, ist der Unterschied zu Rutschen oder Fehlertreten geringer.

OoSDosis [cm] - Perz:P99

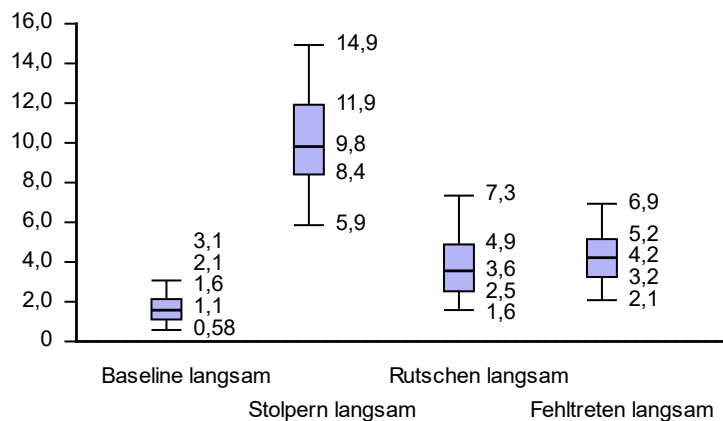


Abbildung 56: Vergleich der OoS-Dosis, P99 zwischen ungestörtem Gehen „Baseline“ und den drei Perturbationsarten SRF beim langsamen Gehen

OoSDosis [cm] - Perz:P99

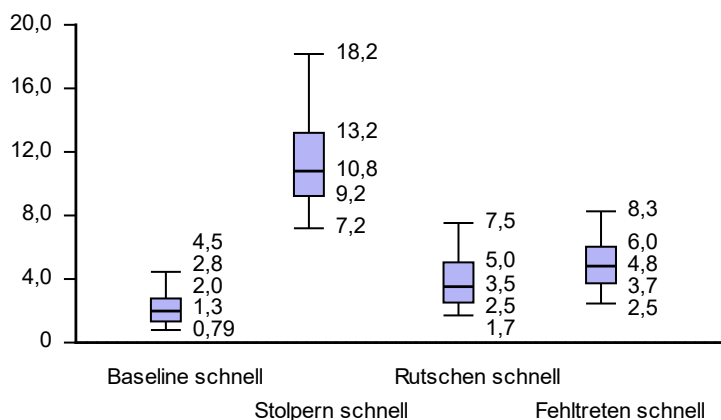


Abbildung 57: Vergleich der OoS-Dosis, P99 zwischen ungestörtem Gehen „Baseline“ und den drei Perturbationsarten SRF beim schnellen Gehen

Legt man nun einen Schwellwert von OoS-Dosis $\geq 4,5$ (P95, Baseline „schnell“) an, werden 99% aller Stolper-, 35% aller Rutsch- und 51% aller Fehlertreten-Situationen vom normalen Gehen unterschieden. Bei

OoS-Dosis $\geq 5,5$ (P99, Baseline „schnell“) entstehen Verhältnisse von 98%, 18% und 27%. Ist die Unterscheidung zwischen Gehen und Stolpern hier gut zu sehen, reicht die Unterscheidung für die beiden anderen Perturbationsarten nicht aus. Aus diesem Grund müssen weitere Parameter betrachtet werden.

Parameter: Beschleunigung des Thorax-Sensors

Ein weiterer Parameter ist die Vektorsumme der dreidimensionalen Beschleunigung des Sensors auf Höhe Th4 der Wirbelsäule.

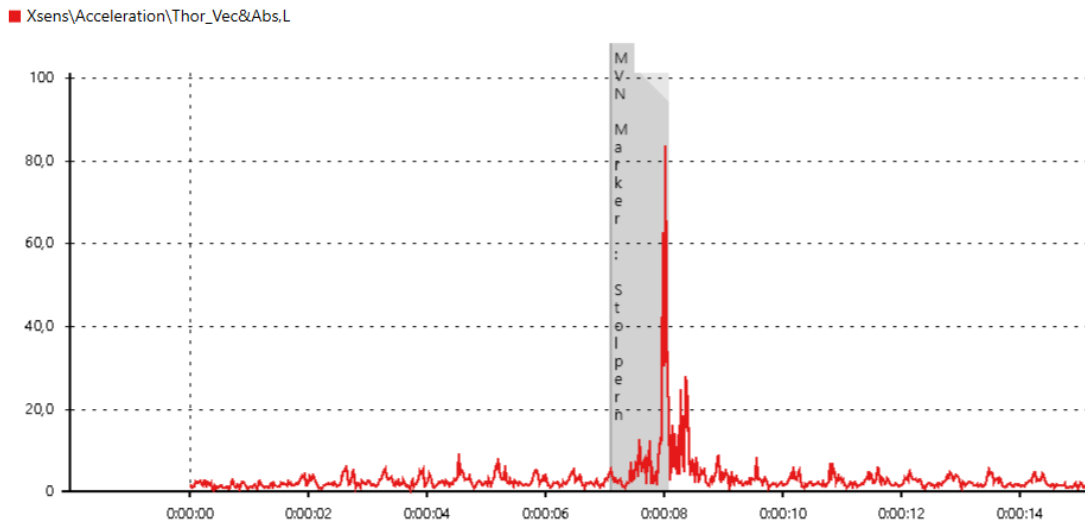


Abbildung 58: „Stolpern langsam“: Vektorsumme der Beschleunigung [m/s²] des Sensors auf Höhe Th4 der Wirbelsäule. Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

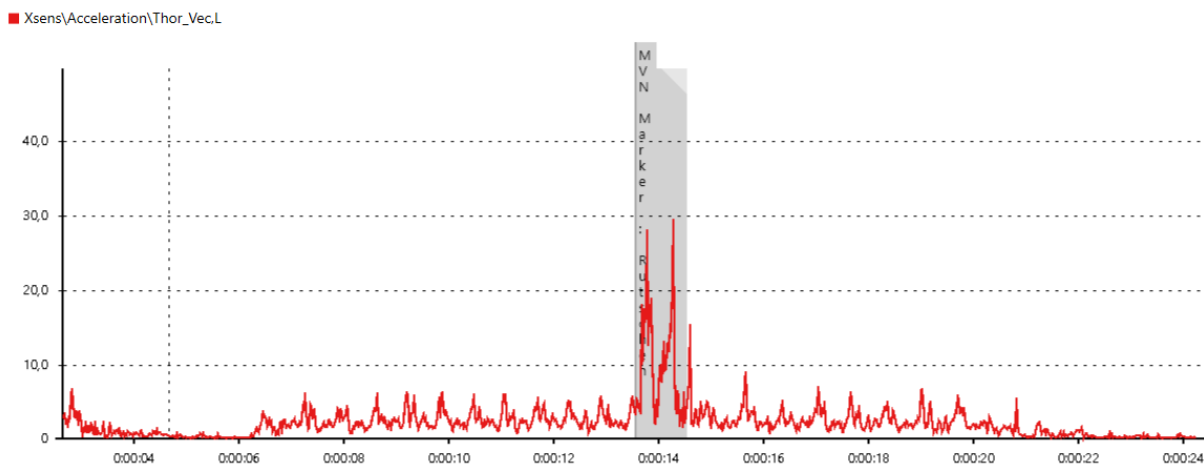


Abbildung 59: „Rutschen langsam“: Vektorsumme der Beschleunigung [m/s²] des Sensors auf Höhe Th4 der Wirbelsäule. Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation

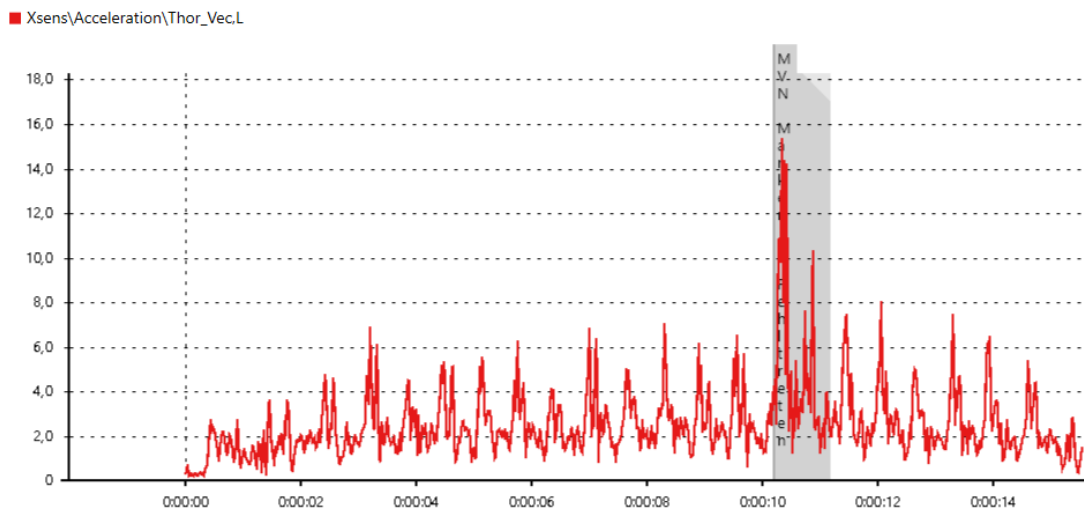


Abbildung 60: „Fehlreten langsam“: Vektorsumme der Beschleunigung [m/s²] des Sensors auf Höhe Th4 der Wirbelsäule. Grau hinterlegt ist der Schritt bei der Perturbation.

Die Beschleunigungsverläufe beim schnellen Gehen sind ähnlich wie beim langsamen Gehen. Durch die höhere Geschwindigkeit kommt es dann zu einer höheren Effektstärke, was an einem höheren Spitzenwert zu erkennen ist.

Betrachtet man wieder die Verteilung des 99ten Perzentils der einzelnen SRF-Ereignisse, zeigt sich auch hier deutlich der Unterschied zwischen dem ungestörten Gehen und den SRF-Ereignissen.

Acceleration\Thor_Vec&Abs,L - Perz:P99

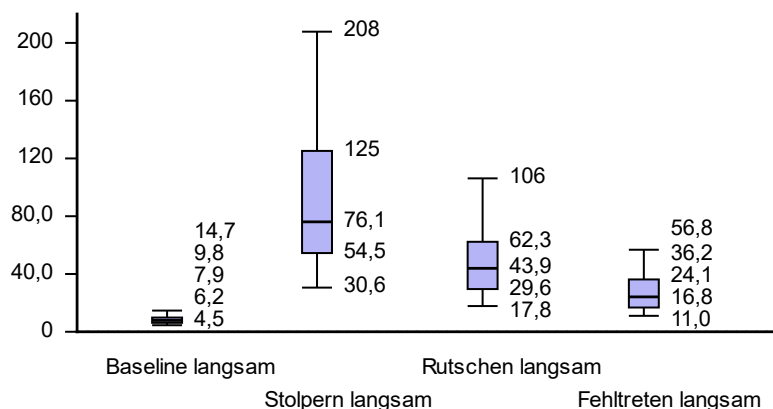


Abbildung 61: „langsam“: Vergleich der Thorax-Beschleunigung (Betrag) - P99 zwischen ungestörtem Gehen „Baseline“ und den drei Perturbationsarten SRF

Acceleration\Thor_Vec&Abs,L - Perz:P99

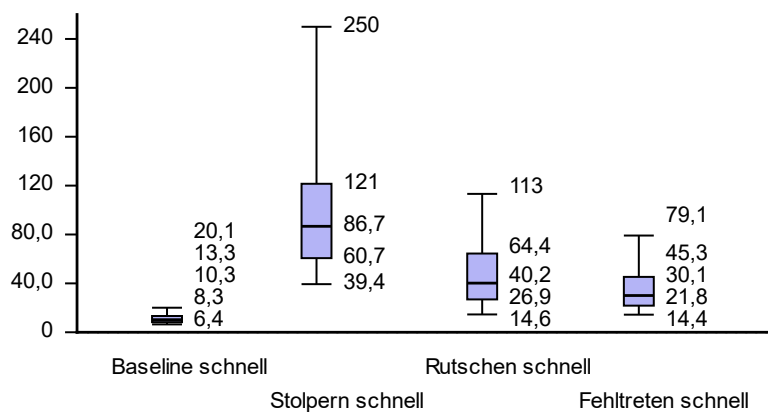


Abbildung 62: „schnell“: Vergleich der Thorax-Beschleunigung (Betrag) - P99 zwischen ungestörtem Gehen „Baseline“ und den drei Perturbationsarten SRF

Dieser erste Vergleich des Messparameters zeigt einen klar erkennbaren Unterschied zwischen Baseline und SRF-Event, der aber nicht mittels einfacher Schwellwertunterscheidung SRF-Events von der Baseline trennen kann. Daher erscheint es lohnend, zu überprüfen, ob mit einem Ansatz auf Basis künstlicher Intelligenz eine genauere und zuverlässigere Klassifikation von SRF-Events möglich ist.

Die Ergebnisse für den automatisierten Erkennungsansatz auf Basis kontinuierlicher Daten zeigen ähnliche Tendenzen wie die Analyse im vorherigen Teil. Für die tiefergehende Analyse des Interventionseffekts wird auf den vorherigen Abschnitt verwiesen.

Ergebnisse zum „Transfereffekt“

Zur deskriptiven Darstellung des Transfereffektes wurde die Differenz der Zeitpunkte T2 – T1 berechnet (vergleiche Auswertung RAC). Der Effekt des Perturbationstrainings zeigt sich bei dieser Rechnung, wenn die fließende Dosis der Entfernung zur Unterstützungsfläche zum Zeitpunkt T2 geringer ist als bei T1, d. h., das Ergebnis negativ wird. Ein positiver Transfereffekt im Sinne einer Verbesserung der Gangstabilität der Interventionsgruppe sollte sich daran zeigen, dass von der Kontrollgruppe (CON) ausgehend die Verteilung der Parameter sich in einen negativeren Bereich verschiebt.

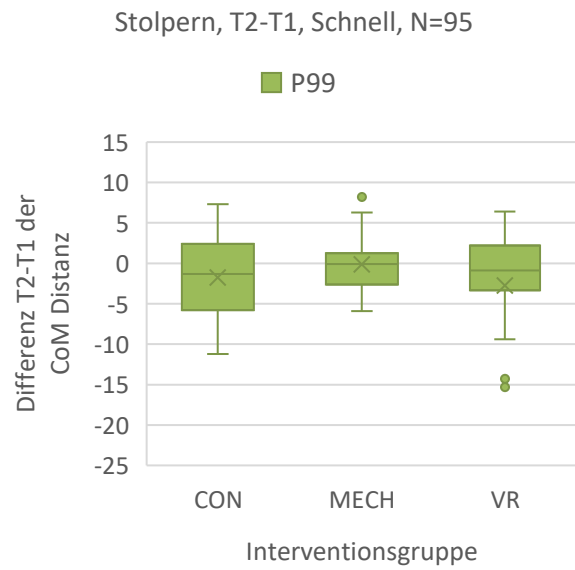


Abbildung 63 Vergleich der Interventionsgruppen durch die Verteilung des P99 der Differenzen T2-T1 am Perturbationsereignis Stolpern, schnell

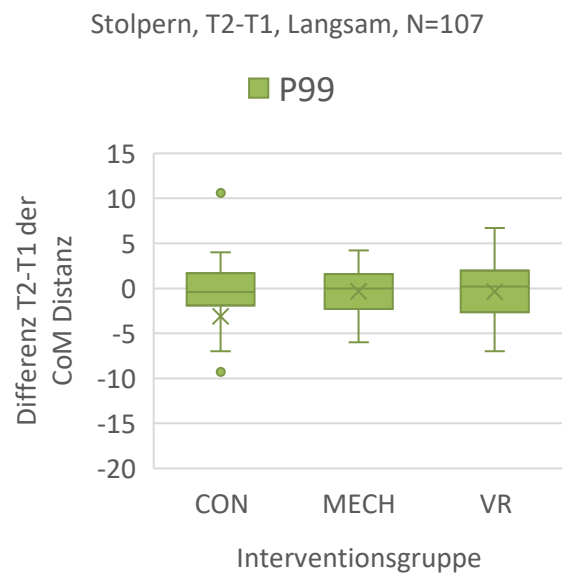


Abbildung 64 Vergleich der Interventionsgruppen durch die Verteilung des P99 der Differenzen T2-T1 am Perturbationsereignis Stolpern, langsam

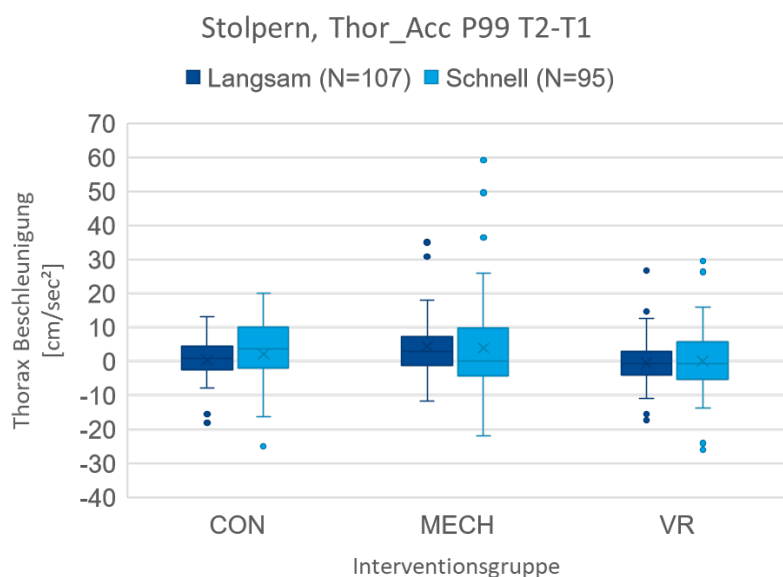


Abbildung 65 Interventionseffekt T2-T1 der Thorax-Beschleunigung P99 beim Stolpern bei langsamem und schnellem Gehen für die Kontroll- und Interventionsgruppen

In den Abbildungen 63-65 wird die Verteilung

Die Ergebnisse in Abbildung 63-65 deuten darauf hin, dass weder die mechanische Intervention noch die VR-basierte Intervention im Vergleich zur Kontrollgruppe eine substanzielle Änderung der Thorax-Beschleunigung in P99 beim Stolpern bewirkt haben. Die größere Variabilität und stärkeren Ausreißer bei schneller Ganggeschwindigkeit könnten auf eine erhöhte Instabilität oder größere biomechanische Anforderungen bei höherer Ganggeschwindigkeit hinweisen. Dies könnte sich darin begründen, dass Trainings- oder Interventionsansätze stärker auf spezifische motorische Anforderungen bei höheren Ganggeschwindigkeiten abgestimmt werden sollten.

Klassifikationsansatz mittels maschinellen Lernens

Der Klassifikationsansatz zur Erkennung von Beinahestürzen im Rahmen des ENTRAPon-Forschungsprojekts basiert auf einer detaillierten Analyse kinematischer Daten, die während gezielter Störungen des Gehens erfasst wurden. Ziel dieses Ansatzes auf Basis von Machine Learning ist es, eine zuverlässige(re) Unterscheidung zwischen normalen Gehbewegungen und Beinahestürzen zu ermöglichen. Dabei werden nicht nur das Auftreten von Störungen, sondern auch deren Art und Intensität berücksichtigt, um ein möglichst umfassendes Bild der Bewegungssicherheit der Probanden zu erhalten.

Im Kern der Klassifikation stehen mehrere kinematische Parameter, die als Indikatoren für Stabilität und Gleichgewicht dienen. Ein zentraler Parameter ist die Margin of Stability (MoS), die die dynamische Stabilität während des Gehens misst. Diese wird berechnet als die Differenz zwischen dem extrapolierten Schwerpunkt (Center of Mass, CoM) und der Grenze der Unterstützungsfläche (Base of Support, BoS). Ein niedriger Wert der MoS deutet auf ein höheres Sturzrisiko hin, da der CoM in solchen Fällen näher an den Rändern der Unterstützungsfläche liegt, was zu einem Verlust des Gleichgewichts führen kann. Neben der MoS spielen spatiotemporale Komponenten eine wesentliche Rolle. Diese umfassen Parameter wie Schrittlänge, Schrittbreite und Schrittdauer. Veränderungen in diesen Parametern können auf Anpassungen des Gangmusters hinweisen, die beispielsweise aufgrund einer drohenden Instabilität vorgenommen werden. Eine Verlängerung der Schrittdauer oder eine Verkürzung der Schrittlänge könnte beispielsweise darauf hindeuten, dass ein Proband versucht, sich auf eine instabile Situation einzustellen. Diese Parameter sind daher wichtige Indikatoren, um das Risiko eines Sturzes zu beurteilen und zu

unterscheiden zwischen stabilen und instabilen Gehbewegungen. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Geschwindigkeit des Schwerpunkts (CoM-Geschwindigkeit) beim Bodenkontakt. Eine erhöhte Geschwindigkeit des CoM kann auf eine instabilere Gangart hinweisen, da eine schnellere Bewegung des Schwerpunkts oft mit einem höheren Ungleichgewicht und einem erhöhten Sturzrisiko einhergeht. Insbesondere in Situationen, in denen der Schwerpunkt weit vor der Unterstützungsfläche liegt, kann eine hohe Geschwindigkeit des CoM das Risiko eines Sturzes erheblich erhöhen.

Zur Klassifikation der Bewegungsdaten wurden unterschiedliche Algorithmen eingesetzt. In einem ersten Schritt kamen einfache Schwellenwertmethoden zum Einsatz, bei denen die oben genannten Parameter jeweils gegen festgelegte Grenzwerte geprüft wurden. Diese Schwellenwerte wurden so gewählt, dass sie zwischen normalen Bewegungen und potenziell gefährlichen Störungen unterscheiden. Diese Schwellenwertmethoden wurden anschließend durch Entscheidungsbäume ergänzt, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Klassifikation zu verbessern. Diese Modelle sind besonders geeignet, da sie auf Basis der verfügbaren kinematischen Daten klare Entscheidungsregeln ableiten können. So wird beispielsweise basierend auf den maximalen Werten der MoS und der CoM-Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitintervall entschieden, ob es sich bei der aufgezeichneten Bewegung um einen stabilen Schritt oder einen Beinahesturz handelt.

Die Entscheidungskriterien in den Entscheidungsbäumen wurden dabei so gewählt, dass sie eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Klassifikation erreichen. Die Modelle wurden sowohl für die binäre Klassifikation (z. B. Unterscheidung zwischen Gehen und Stolpern) als auch für die Mehrklassenklassifikation (Gehen vs. Stolpern vs. Rutschen vs. Fehltritt) trainiert.

Tabelle 35. Accuracy, Precision, Recall und F1-Scores der verschiedenen Entscheidungsbäume

	Gehen Stolpern	vs	Gehen Rutschen	vs	Gehen Fehltreten	vs	Vier-Klassen Klassifizierung
Accuracy	0.99		0.76		0.77		0.63
Precision	1.0		0.77		0.77		0.61
Recall	0.98		0.74		0.76		0.61
F1-Score	0.99		0.75		0.76		0.61
ROC-AUC	0.99		0.79		0.82		0.84

Tabelle 36. Precision, Recall and F1-Scores des Vier-Klassen-Klassifikators, berechnet pro Klasse.

	Gehen	Stolpern	Rutschen	Fehltreten
Precision	0.61	0.94	0.45	0.46
Recall	0.80	0.93	0.33	0.38
F1-Score	0.69	0.93	0.38	0.42
ROC-AUC	0.88	0.97	0.74	0.77

Durch die Anwendung dieser Modelle zeigte sich, dass Stolpern im Vergleich zu anderen Vorfällen wie Rutschen und Fehlritten am genauesten klassifiziert werden konnte. Insbesondere die Unterscheidung zwischen Rutschen und Fehlritten stellte sich jedoch als komplex heraus, was auf die ähnliche kinematische Signatur dieser Ereignisse zurückzuführen ist.

Inferenzstatistik

Um statistisch fundierte Aussagen über die Wirkung der Interventionsmaßnahmen auf die Gangstabilität zu treffen, wurden gepaarte t-Tests sowie Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests durchgeführt.

Zur Quantifizierung der Gangstabilität der Teilnehmenden wurde unter anderem die Distanz berücksichtigt, um die sich das Lot des Massezentrums während eines Durchgangs durch den Stolperparcours aus der Unterstützungsfläche heraus bewegt. Zur Analyse dieser Bewegungskurve wurde ein gleitendes Integral mit einem Fenster von 1 Sekunde Länge berechnet. Das Fenster mit der maximalen Fläche eines Durchgangs wurde als Messwert für die statistischen Tests verwendet. Dieser Messwert reflektiert die dynamische Stabilität und Balance der Teilnehmenden; ein höherer Maximalwert weist auf eine gesteigerte Instabilität und ein erhöhtes Sturzrisiko hin. Die zugrunde liegende Hypothese lautete entsprechend, dass der Messwert zum Zeitpunkt T1 größer ist als zu den Zeitpunkten T2 oder T3.

Ein Teil der statistischen Auswertung ist in Tabelle 1 dargestellt. Diese Tabelle zeigt ein signifikantes Ergebnis für die Interventionsgruppe VR bei schnellem Stolpern, basierend auf dem t-Test bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Nach Anwendung der Benjamini-Hochberg-Korrektur auf die inferenzstatistischen Ergebnisse ergaben sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zeitpunkten T1 und T2 für alle untersuchten Messwerte und Gruppen.

Tabelle 1. Ergebnisse der inferenzstatistischen Auswertung zum Stolpern, basierend auf dem Messwert der maximalen Dosis, die das Massezentrum die Unterstützungsfläche verlässt. Der Vergleich wurde hier zwischen T1 und T2 angestellt.

SRS-Art	Geschwindigkeit	Intervention	Test	DoF	p-Wert
Stolpern	langsam	CON	t-test	28.0	0.138
Stolpern	langsam	CON	Wilcoxon	-	0.261
Stolpern	langsam	MECH	t-test	37.0	0.158
Stolpern	langsam	MECH	Wilcoxon	-	0.206
Stolpern	langsam	VR	t-test	38.0	0.167
Stolpern	langsam	VR	Wilcoxon	-	0.264
Stolpern	schnell	CON	t-test	22.0	0.061
Stolpern	schnell	CON	Wilcoxon	-	0.063
Stolpern	schnell	MECH	t-test	33.0	0.324
Stolpern	schnell	MECH	Wilcoxon	nan	0.271
Stolpern	schnell	VR	t-test	37.0	0.047

Stolpern	schnell	VR	Wilcoxon	nan	0.052
----------	---------	----	----------	-----	-------

Aufgrund des Fehlens signifikanter Ergebnisse zwischen T1 und T2 wurde der Unterschied zwischen T1 und T3 nicht weiter analysiert. Folglich kann auf der Grundlage dieser Tests kein positiver Einfluss der Intervention zur Prävention von Stürzen festgestellt werden.

Diskussion

Diese Studie adressiert die Entwicklung von Methoden zur Erkennung von SRF-Ereignissen zum Einsatz in der Prävention von Sturzunfällen. Anders als klassische, unter Laborbedingungen durchgeführte Studien zielt diese Forschung darauf ab, Beinahestürze in realen Arbeitsumgebungen zu identifizieren. Dies ist besonders relevant, da solche Ereignisse oft unbeachtet bleiben, obwohl sie wertvolle Hinweise auf Gefährdungssituationen liefern können.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Schwerpunktparameter (OoS-Dosis) und die Thorax-Beschleunigung vielversprechende Indikatoren für Instabilität sind. Insbesondere Stolpern konnte mit hoher Genauigkeit erkannt werden (F1-Score: 0,99). Herausforderungen bestehen jedoch bei der Unterscheidung von Rutschen und Fehltreten, deren kinematische Signaturen ähnliche Muster aufweisen. Während Schwellwertmethoden einfache Klassifikationen ermöglichen, erfordern komplexere Ereignisse wie Rutschen erweiterte Algorithmen. Die eingesetzten Entscheidungsbäume zeigten für die Mehrklassenklassifikation nur mäßige Ergebnisse (F1-Score: 0,61), was die Notwendigkeit nicht-linearer Modelle wie bspw. neuronaler Netze unterstreicht.

Eine wesentliche Stärke der Studie ist der umfassende Datensatz, der mit individuell angepassten biomechanischen Modellen (CUELA) und tragbaren Inertialsensoren (Xsens) erhoben wurde. Dennoch bleibt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Arbeitsumgebungen eingeschränkt, da die Messungen unter Laborbedingungen durchgeführt wurden. Hier sollten zukünftige Studien Pilotversuche in dynamischen Arbeitsumgebungen einbeziehen, um die Generalisierbarkeit zu verbessern. Auch die Heterogenität der Teilnehmenden (Alter, Fitness, berufliche Belastung) könnte in größeren Studien genauer abgebildet werden.

Die Ergebnisse zur Wirksamkeit der Interventionen blieben statistisch insignifikant, da signifikante Unterschiede zwischen T1 und T2 entsprechend der gewählten Methodik nicht nachgewiesen werden konnten. Dies legt nahe, dass die derzeitigen Parameter gut zur Erkennung von Gangstörungen geeignet sind, aber noch unzureichend, um präventive Maßnahmen zu bewerten. Eine Reduktion der Sensoranzahl im nächsten Projektschritt ist sinnvoll, um die Praxistauglichkeit zu erhöhen. Gleichzeitig besteht jedoch das Risiko, dass relevante Informationen verloren gehen. Hier könnten Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens dazu beitragen, die wichtigsten Parameter zu extrahieren.

Insgesamt leistet die Studie einen wichtigen Beitrag zur Sturzprävention, indem sie zeigt, dass kinematische Daten und maschinelle Lernmethoden zur zuverlässigen Erkennung von Instabilitäten genutzt werden können. Künftige Forschung sollte sich jedoch auf die Optimierung der KI-basierten Klassifikationsmethoden und die praktische Umsetzbarkeit konzentrieren, um langfristig präventive Maßnahmen effektiv in Arbeitsumgebungen zu integrieren.

8. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Beide Praxisunternehmen wiesen Risikofaktoren aufgrund vorhandener Arbeitsbedingungen und der mit den Tätigkeiten einhergehenden kognitiven Arbeitsanforderungen, Zeitdruck und Stress auf, die SRF-Ereignisse begünstigen könnten. Gleichzeitig zeigten sich aber auch Schutzfaktoren, die das Risiko verringern, wie stressverringende Bedingungen, eine hohe Sicherheitskultur und personenbezogene Faktoren wie Gewissenhaftigkeit und Sportlichkeit der Belegschaft. Das Risiko für ein SRF-Ereignis wurde von HKM-Mitarbeitenden generell als eher moderat eingeschätzt, von Mitarbeitenden der Deutschen Post/DHL als eher höher. Dabei gaben die Mitarbeitenden beider Unternehmen das größte Risiko bei Eis und Schnee an. Individuelle Unterschiede wie Geschlecht, Alter, Körpergewicht und Berufserfahrung beeinflussten die Risikowahrnehmung von SRF-Ereignissen. Über den Verlauf der Studie zeigte sich eine Erhöhung der sturzbezogenen Selbstwirksamkeit. Die Ergebnisse verdeutlichen den Bedarf beider Praxisunternehmen an gezielten Maßnahmen zur Reduktion von SRF-Ereignissen.

Die beiden Anwendungen (Stadtumgebung und Lagerhallensimulation) der VR-SRF-Schulungssimulation wurden von den Teilnehmenden auch über die Zeit positiv bewertet. Zudem zeigte sich eine anhaltende Sensibilisierung. Im Arbeitsumfeld zeigte sich ein positiver Einfluss auf den Transfer und die Umsetzung der Sensibilisierung. Wichtig ist es, die Vorgesetzten dafür mit ins Boot zu holen. Personen, die zu Cyber- oder Motion-Sickness neigen, sollten bei Nutzung der VR-Anwendung vorsichtig sein. Szenarien der VR-SRF-Schulungssimulation sollten an reale Arbeitsbedingungen angepasst sein, um die bestmögliche Sensibilisierung zu ermöglichen und Transfer zu gewährleisten.

Die Teilnehmenden wurden durch VR als neue Technologie und durch aktive Mensch-System-Interaktionen in Szenarien, die ihre eigene Arbeitsumwelt darstellen, motiviert, sich für die SRF-Prävention einzusetzen. Dazu ist der vom IFA entwickelte BGHW-Lagerhallensimulator mit den Anpassungen als virtuelle Stadtumgebung gemeinsam als VR-SRF-Schulungssimulation genutzt worden. Die Aktivitäten führten zumeist zu lebhaften Diskussionen über SRF-Gefährdungen am Arbeitsplatz. Im Allgemeinen wurde die Botschaft, sich persönlich zu engagieren und immer Möglichkeiten zur Vermeidung oder Abwendung von SRF-Gefahren zu haben, sehr gut aufgenommen. Außerdem war es mit dem gegebenen Schulungsumfeld möglich, mehr Beschäftigte in aktive Präventionsaktivitäten einzubeziehen. Dies deutet darauf hin, dass die an den Projektstudien beteiligten Beschäftigten möglichen Gefahren am Arbeitsplatz mehr Beachtung schenken und dass die Beschäftigten ihre Sensibilität für Präventionsmaßnahmen und Einflussmöglichkeiten verbessert haben.

Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse für das reaktive Perturbationstrainingsprogramm, dass ein VR- oder mechanisch basiertes Perturbationstraining auf dem Laufband für 20 Minuten die Anwendung der Mechanismen der dynamischen Stabilität verbessert und die erlernten Stabilitätskontrollmechanismen auf simulierte ebenerdige Stolperereignisse transferiert werden können. Dabei zeigten sich primär bei solchen Teilnehmenden eine Verbesserung, welche bereits vor dem Training eine niedrige dynamische Gangstabilität im Vergleich zu den restlichen Teilnehmenden aufzeigte. Weiterführend konnte keine Beibehaltung der Adaptationen in der Transferbewegung Stolpern 6 Monate später festgestellt werden. Die Gangperturbationen Rutschen und Fehltreten wiesen nach dem Training in beiden Gruppen keinen Transfereffekt auf. Abschließend zeigte sich in der fragenbogenbasierten Evaluation eine positive Bewertung sowohl des mechanischen als auch des VR-basierten Perturbationstrainings. Weiterführend berichteten die Mitarbeitenden beider Praxisunternehmen in ihrem Arbeitsumfeld von den Transfer positiv beeinflussenden Faktoren.

Zusammenfassung der Weiterführende Auswertung des IFA

Auf Basis der klassischen Ganganalyse wurden Ansätze zur automatisierten Detektion von SRF-Events innerhalb kontinuierlicher Messdaten entwickelt, mit dem Ziel, bei lang andauernden Messungen (über mehrere Stunden) Situationen mit erhöhtem SRF-Risiko zu identifizieren. Es zeigt sich, dass die Unterscheidung der Baseline von SRF-Events auch mit dem biomechanischen Modell funktioniert und dieses auch automatisiert auf kontinuierliche längere Messungen angewendet werden kann. Die Klassifizierungsgenauigkeit sowie Klassenunterscheidung konnten mit einem Machine-Learning-Ansatz gegenüber einem konventionellen schwellwertbasierten Ansatz verbessert werden.

Die einzelnen Perturbationen zeigten unterschiedlich starke Wirkungen in den Messparametern, was die unterschiedliche Intensität der einzelnen Störungen widerspiegelt. Die Strecke des Rutschens und die

Tiefe des Einsackens beim Fehltreten hatten die Gangstabilität geringer beeinflusst als die sehr massive Störung beim Stolpern über die Bodenplatte.

Für die Zukunft ist es spannend, den gewonnenen Datensatz aus diesem Projekt zur Entwicklung und zum Training von KI-Ansätzen zur SRF-Erkennung zu verwenden und im Weiteren die Übertragbarkeit auf Datensätze aus realen Arbeitsumgebungen zu analysieren und die Möglichkeiten der automatisierten Detektion von SRF-Ereignissen weiter zu erproben.

Veröffentlichungen und Vorträge

Im Laufe der Projektzeit wurden frühzeitig vorliegende Ergebnisse und Erkenntnisse sowie das Studiendesign bereits auf mehreren Fachkongressen vorgetragen. Im September 2022 wurden das Projekt sowie das geplante Studiendesign auf dem 22. Workshop zur Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit (PASiG) an der SRH-Hochschule für Gesundheit in Gera vorgestellt. Zudem wurden erste fragebogenbasierte Ergebnisse der VR-SRF-Schulungssimulation auf dem 23. PASiG-Workshop in Dortmund präsentiert. Im Tagungsband der beiden Workshops wurde entsprechend ein Langbeitrag veröffentlicht.:

- Kaufmann, M., Krugmann, L., Kluge, A., Weber, A., Hartmann, U., Karamanidis, K., Ellegast, R. (2022). Entwicklung zusätzlicher Trainingselemente zur Prävention von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen unterstützt durch den Einsatz von virtueller Realität am Beispiel von Unternehmen der Stahlerzeugung und der Post- und Paketzustellung (ENTRAPon). In Sabine Rehmer & Clarissa Eickholt (Hrsg.): 22. Workshop Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit – Transfer von Sicherheit und Gesundheit, 585-588.
- Kluge, A., Schmitz, T., Kaufmann, M., Krugmann, L., Weber, A., Hartmann, U., Karamanidis, K., Ellegast, R. (2024). Ins Stolpern, aber nicht zu Fall gebracht. Erste Ergebnisse der Erhebungsphase im Projekt ENTRAPon. In Jan Dettmers, Anita Tisch & Rüdiger Trimpop (Hrsg.): 23. Workshop Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit – Gesundheitsförderliche Arbeit = attraktive Arbeit? Arbeitsgestaltung in Zeiten des Fachkräftemangels, 457-460.

Im Dezember 2022 wurde das Projekt beim Fachgespräch Ergonomie der DGUV in Sankt Augustin in einem Fachvortrag sowie mit einem entsprechenden Langbeitrag vorgestellt:

- Schneider, M., Weber, A., Kaufmann, M., Kluge, A., Hartmann, U., Karamanidis, K., Ellegast, R., Kluge, A. (2023). Entwicklung zusätzlicher Trainingselemente zur Prävention von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen unterstützt durch den Einsatz von virtueller Realität am Beispiel von Unternehmen der Stahlerzeugung sowie Post- und Paketzustellung (ENTRAPon). In DGUV (Hrsg.): 8. DGUV Fachgespräch Ergonomie. 83-86.

Weiterführend wurden erste Erkenntnisse der KI-gestützten Analyse der Parcoursdaten auf der 25. International Conference on Human-Computer Interaction (HCI) in Kopenhagen präsentiert. Zudem wurde ebenfalls ein Langbeitrag verfasst:

- Schneider, M., Weber, A., Kaufmann, M., Kluge, A., Hartmann, U., Karamanidis, K., Ellegast, R. (2023). Generation of consistent slip, trip and fall kinematic data via instability detection and recovery performance analysis for use in machine learning algorithms for (near) fall detection. In: Duffy, V.G. (eds) Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. HCII 2023. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 14029. 298–305 . https://doi.org/10.1007/978-3-031-35748-0_22

Weiterführend wurde die Datenakquirierung sowie die anschließende Umsetzung der Qualitätssicherung der Daten für die Anwendung von "Machine Learning" Algorithmen in einer wissenschaftlichen Publikation in einer internationalen Fachzeitschrift veröffentlicht:

- Schneider, M., Reich, K., Hartmann, U., Hermanns, I., Kaufmann, M., Kluge, A., Fiedler, A., Frese, U. & Ellegast, R. (2024). Acquisition of data on kinematic responses to unpredictable gait perturbations: collection and quality assurance of data for use in machine learning algorithms for (near-)fall detection. *Sensors* 2024, 24(16), 5381. <https://doi.org/10.3390/s24165381>

Abschließend wurden die VR-SRF-Schulungssimulation mit dem Szenario der "Lagerhalle" ebenfalls im Dezember 2022 beim Fachgespräch Ergonomie der DGUV in Sankt Augustin in einer Posterpräsentation sowie mit einem entsprechenden Langbeitrag vorgestellt:

- Zimmermann, J., Lungfiel, A., Bohlscheid, A. (2023). BGHW-Lagerhallensimulator in Virtual Reality – Simulationsschulungstool für das ENTRAPon-Projekt in DGUV Report 1/2023: 8. DGUV Fachgespräch Ergonomie, S.169 ff., ISBN (online) 978-3-948657-58-1

9. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Seit Projektbeginn wurden vier Review-Artikel zum Thema "Perturbation-based balance training" veröffentlicht (Chodkowska et al., 2024, McCrum et al., 2022, Schoeneberg et al., 2024, Taylor et al., 2022). Die Artikel beschäftigen sich, u. a. mit den unterschiedlichen Arten der mechanischen Perturbation (z. B. Zug- und Druckeinwirkungen auf die Hüfte, Verschiebungen des Bodens/Laufbandes), den Auswerteparametern sowie den Auswirkungen auf die biomechanischen Sturzmechanismen und die Anwendbarkeit im klinischen Kontext. Zusammenfassend kommen die Reviews zu der Schlussfolgerung, dass störungsbasiertes Gleichgewichtstraining ein vielversprechender Ansatz zur Sturzprävention ist. Das aufgabenspezifische Training des Gleichgewichts durch wiederholte Exposition gegenüber plötzlichen Störungen könnte einen Paradigmenwechsel darstellen, der die Wirksamkeit und Effizienz von Übungen zur Sturzprävention verbessern könnte. Jedoch sind die bisherigen Studien aufgrund der Vielzahl der Störungsparadigmen und Auswerteparameter nur schwer untereinander vergleichbar. Dies kann den Fortschritt bei der Übertragung von Forschungsergebnissen aus diesem Bereich in den klinischen Bereich behindern. Die Ergebnisse der Reviews bestätigen nochmals die Wirksamkeit von störungsbasiertem Gleichgewichtstraining und damit die Wahl der Trainings in diesem Forschungsprojekt. Zudem wurden zahlreiche Artikel zum Thema "Perturbation-based balance training (PBT)" veröffentlicht. Der Fokus vieler dieser Artikel liegt auf der Untersuchung der Auswirkungen dieses Trainings bei älteren Personen oder solchen mit Gleichgewichtsstörungen. Unter anderem wurde das laufbandgestützte Perturbationstraining im Vergleich zu herkömmlichen Trainings untersucht (vgl. Brüll et al., 2023). Hierbei zeigte das laufbandgestützte Training deutlichere Effekte in Bezug auf die reaktive Gleichgewichtskontrolle, während das herkömmliche Training zu einer besseren Generalisierung der Gleichgewichtsfähigkeiten führt. In einer weiteren Studie wurden adaptive Anpassungen in der Muskelaktivität der Beine nach Absolvierung eines laufbandgestützten Trainings durch wiederholte Beschleunigung des Laufbandes nachgewiesen. Allerdings konnte nach dem Training kein Transfer dieser Anpassungen auf das ebenerdige Stolpern auf einem Gangsteg festgestellt werden (Phu et al., 2024). Zwei Studien haben den Einfluss von PBT auf die Anzahl von Stürzen im Alltag untersucht. Eine Studie ergab trotz einer signifikanten Reduktion der Stürze im Laborumfeld eine nicht signifikante 22%ige Reduktion im Alltag (Nørgaard et al., 2024). Hingegen konnte eine andere Studie eine beachtliche Reduktion der Alltagsstürze um 64% in einer Untersuchung mit älteren Probanden feststellen (Rieger et al., 2024). Hinsichtlich VR-basierter Trainings gibt es bisher nur wenige neue Studien. Eine dieser Studien, in der nicht-immersive VR für das Training genutzt wurde, zeigte, dass die Effekte der Störungen von der Höhe der Störungen und dem Geschlecht der Probanden abhängig waren (Hao et al., 2023).

6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Die Analyse der Arbeitsbedingungen und Eigenschaften der Mitarbeitenden beider Praxisunternehmen zeigte Risikofaktoren und den Bedarf für gezielte Maßnahmen zur Reduktion von SRF-Ereignissen. Das Training mit der VR-SRF-Schulungssimulation wurde von den Teilnehmenden sehr positiv aufgefasst. Durch diese proaktive Anwendung konnte die Wahrscheinlichkeit des Erkennens von Sturzgefährdungen gesteigert werden. Mitarbeitende können Gefährdungen durch erlernte Handlungsempfehlungen selbst beseitigen oder melden. Szenarien der VR-SRF-Schulungssimulation inklusive Gefährdungen und Handlungsempfehlungen sollten an reale Arbeitsbedingungen angepasst werden, um die bestmögliche Sensibilisierung zu ermöglichen und den Transfer auf die reale Arbeitsumgebung zu gewährleisten. Vorgesetzte sollten einbezogen werden, um ein förderliches Umfeld zur Umsetzung des Gelernten vorzubereiten und Handlungsempfehlungen zu geben. Für die VR-SRF-Schulungssimulation (und das VR-basierte Perturbationstraining) sollte außerdem auf Prävalenzen hinsichtlich Cyber- bzw. Motion-Sickness geachtet werden.

Die Ergebnisse des reaktiven Perturbationstrainingsprogramms bestätigen, dass ein VR- oder mechanisch basiertes Perturbationstraining auf dem Laufband für 20 Minuten die Anwendung der Mechanismen der dynamischen Stabilität verbessert und die erlernten Stabilitätskontrollmechanismen auf simulierte ebenerdige Stolperereignisse transferiert werden können. Weiterführend könnten gerade Mitarbeitende, welche eine geringe dynamische Gangstabilität aufweisen, verstärkt von dem Training profitieren. Um zudem eine signifikante Reduktion von Stolperunfällen in der Arbeitswelt durch physische Interventionen effektiv zu erreichen, wird empfohlen, die Trainingsdosis individualisiert anzupassen. Bei der Anwendung der Trainingsinterventionen im beruflichen Kontext sollte allerdings berücksichtigt werden, dass die Mitarbeitenden im Vorhinein die körperlichen Voraussetzungen erfüllen. In der Eingewöhnungsphase auf dem Laufband vor dem Perturbationstraining sollte zudem darauf geachtet werden, dass die Mitarbeitenden mit der angelegten Ausrüstung (z. B. den Fußmanschetten) die vorgegebene Ganggeschwindigkeit einhalten können, ohne sich körperlich zu überfordern. Zudem sollte in Folgestudien analysiert werden, ob eine Anpassung des Laufbandtrainings in Anlehnung an das Perturbationstraining von Yang et al. (Yang et al., 2013, Yang et al., 2018) zu einem Transfereffekt für das Rutschen auf dem SRF-Parcours führt. Simultane Untersuchungen können außerdem für das Fehltreten mit dem SRF-Parcours als Trainingsintervention durchgeführt werden, wobei die Umsetzung dieses Trainingselements im beruflichen Kontext bei Firmen weiterhin als schwierig eingestuft wird. Schließlich sollte das Sturzrisiko in Beruf und Alltag mittels datengestützter Technologien erfasst werden, um das allgemeine Sturzrisiko der betroffenen Personen abschätzen zu können, aber um auch die Wirksamkeit der Trainingsinterventionen auf dem Laufband auf die Reduktion von Stürzen aufgrund von SRF-Ereignissen zu evaluieren.

10. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Zusammen mit dem Abschlussbericht wurde die erste Version eines Trainingshandbuches verfasst, in welchem basierend auf den Erkenntnissen des Projektes erste Vorschläge und Anleitungen zur Nutzung der Trainingselemente im beruflichen Kontext vorgestellt werden. Im Januar 2025 ist ein Treffen mit dem Forschungsbegleitkreis angesetzt, in welchem die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus dem Projekt basierend auf den Ergebnissen der Studie vorgestellt werden. Da sich innerhalb des Forschungsbegleitkreises auch Vertreter der DGUV sowie unterschiedlicher Berufsgenossenschaften (Handels- und Warenlogistik, Holz und Metall und Verkehr) befinden, soll im Rahmen dieses Termins gemeinsam eine Umsetzung der Trainingselemente mit Unterstützung bzw. durch die DGUV und die Berufsgenossenschaften besprochen werden. Basierend auf diesem Treffen sowie weiteren Folgeterminen soll zudem das Trainingshandbuch weiter iterativ optimiert und angepasst werden. Abschließend soll das Projekt im Rahmen eines IFA-Reports publiziert werden. Die Ergebnisse des reaktiven Perturbationstrainingsprogramms sollen zudem in zwei Publikationen in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht werden. Zudem befindet sich eine weitere Publikation über das „Stadtszenario“ der VR-SRF-Schulungssimulation gerade in der Vorbereitung:

- Zimmermann, J., Lungfiel, A., Bohlscheid, A., Nickel, P. (in Vorbereitung). VR-SRF-Simulationsschulungstools für das ENTRAPon-Projekt - Erstellung einer Stadtumgebung für Post- und Paketzustellende in Virtueller Realität (VR), zur Ergänzung des „BGHW-Lagersimulators“ in Schulungsanwendungen zur Prävention von Sturzunfällen durch Stolpern, Rutschen und Fehltreten (SRF)

Zur weiteren Verwertung der Ergebnisse plant das IFA, die auf dem Parcours erzeugten Messdaten für Verfahren des maschinellen Lernens bzw. der künstlichen Intelligenz zur Detektion von (beinahe) SRF-Ereignissen im Feld zu nutzen. Damit sollen für die Präventionen Gefahrenstellen für SRF-Ereignisse unter Verwendung von Messverfahren detektiert oder dem Träger der Sensorik ein Hinweis über das eigene Risiko für SRF-Events gegeben werden können. Dazu ist geplant, Teile des Projektes auf folgenden Konferenzen und Kongressen vorzustellen:

- M. Schneider, K. Seeser-Reich, C. Schiefer, A. Weber, U. Hartman, K. Karamanidis, A. Kluge, R. Ellegast: Einsatz maschineller Lernverfahren zur Erkennung von Beinahe-Stürzen in hochbelasteten Arbeitsumgebungen: Analyse kinematischer Daten und KI-Modellen; Poster auf der GfA Frühjahrskonferenz 2025 in Aachen
- M. Schneider, K. Seeser-Reich, C. Schiefer, A. Weber, U. Hartman, K. Karamanidis, A. Kluge, R. Ellegast: Einsatz maschineller Lernverfahren zur Erkennung von Beinahe-Stürzen in hochbelasteten Arbeitsumgebungen: Analyse kinematischer Daten und KI-Modellen; Beitrag für den Kongress der A+A 2025 in Düsseldorf eingereicht.

11. Literaturverzeichnis

Alli, B.O. (2008). Fundamental principles of occupational health and safety. International Labour Organization (ILO), Geneva

BAuA (2021). *Mechanische Gefährdungen > 1.5 Sturz, Ausrutschen, Stolpern, Umknicken*. https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefaehrdungsbeurteilung/Expertenwissen/Mechanische-Gefaehrdungen/Sturz-Ausrutschen-Stolpern-Umknicken/Sturz-Ausrutschen-Stolpern-Umknicken_node.html, 10.4.2021

BAuA (2013). *Technische Regeln für Arbeitsstätten, Fußböden, ASR A 1.5/ 1,2*. Ausgabe: Februar 2013. zuletzt geändert GMBI 2019, S. 70. <https://www.baua.de › Regelwerk › ASR › pdf>

Bentley, T. A. (1998). Slip, trip and fall accidents occurring during the delivery of mail. *Ergonomics*, 41(12), 1859-1872. 10.1080/001401398186027.

Bentley, T. A., & Haslam, R. A. (2001). Identification of risk factors and countermeasures for slip, trip and fall accidents during the delivery of mail. *Applied Ergonomics*, 32(2), 127-134.

Bentley, T. (2009). The role of latent and active failures in workplace slips, trips and falls: An information processing approach. *Applied Ergonomics*, 40, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.04.009>

BGHM (2021). *Vorsicht, Rutschgefahr! Stolpern, Ausrutschen, Stürzen - Die häufigsten Unfallursachen bei der Arbeit*. <https://www.bghm.de/bghm/presseservice/text-portal-fuer-interne-kommunikation/vorsicht-rutschgefahr>

BGHW: In diesem Lkw steckt was drin. BGHW aktuell 3/2019, 18–21 (2019). <https://www.bghw.de/medien/bghw-aktuell-die-zeitschrift-fuer-mitgliedsbetriebe/bghw-aktuell-03-19/> bghw-aktuell-3-19. Accessed 17 Feb 2023

BG-Verkehr (2021). *Stolpern, Rutschen, Stürzen*. <https://www.bg-verkehr.de/arbeitsicherheit-gesundheit/branchen/gueterkraftverkehr/animationsfilme/stolpern-rutschen-stuerzen> Webcode: 21550256

Bierbaum, S., Peper, A., Karamanidis, K., & Arampatzis, A. (2010). Adaptational responses in dynamic stability during disturbed walking in the elderly. *Journal of Biomechanics*, 43(12), 2362–2368. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.04.025>

Bierbaum, S., Peper, A., Karamanidis, K., & Arampatzis, A. (2011). Adaptive feedback potential in dynamic stability during disturbed walking in the elderly. *Journal of Biomechanics*, 44(10), 1921–1926. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.04.027>

Blum, J., Rockstroh, C. & Göritz, A. S. (2019). Heart rate variability biofeedback based on slow-paced breathing with immersive virtual reality nature scenery. *Frontiers in Psychology*, 10, 2172. DOI:10.3389/fpsyg.2019.02172

Bohlscheid, A.; Lungfiel, A.; Zimmermann, J. (2024). In Virtueller Realität Gefahrenquellen für Stürze bei der Post- und Paketzustellung erkennen, Nr. 0459, Ausgabe 06/2024, 2 S. In: *Aus der Arbeit des IFA. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)*, Berlin

Bridger, R. S., Brasher, K. & Day, A. J. (2012). Sustaining safety at work: accidents, cognitive failure and stress. 2012 Southeast Asian Network Of Ergonomics Societies Conference (SEANES), 58, 1–5. <https://doi.org/10.1109/seanes.2012.6299568>

Brodie, M. A., Okubo, Y., Sturnieks, D. L., & Lord, S. R. (2018). Optimizing successful balance recovery from unexpected trips and slips. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 13(4), 17-00558-17-00558. <https://doi.org/10.1299/jbse.17-00558>

Brüll, L., Hezel, N., Arampatzis, A., & Schwenk, M. (2023). Comparing the effects of two perturbation-based balance training paradigms in fall-prone older adults: A randomized controlled trial. *Gerontology*, 69(7), 910–922. <https://doi.org/10.1159/000530167>

Butler, A. A., Lord, S. R., Taylor, J. L. & Fitzpatrick, R. C. (2014). Ability versus hazard: Risk-Taking and falls in older people. *The Journals Of Gerontology Series A*, 70(5), 628–634. <https://doi.org/10.1093/gerona/glu201>

Caban-Martinez, A. J., Courtney, T. K., Chang, W., Lombardi, D. A., Huang, Y., Brennan, M. J., Perry, M. J., Katz, J. N. & Verma, S. K. (2014). Preventing slips and falls through leisure-time physical activity: Findings from a study of limited-service restaurants. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110248>

Canada, B., Stephan, Y., Sutin, A. R. & Terracciano, A. (2019). Personality and falls among older adults: Evidence from a longitudinal cohort. *The Journals Of Gerontology Series B*, 75(9), 1905–1910. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbz040>

Champney, R.K., Carroll, M., Surpris, G., Cohn, J. (2015). Conducting training transfer studies in virtual environments. In: Hale, K.S., Stanney, K.M. (eds.) *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*, 781–795.

Chodkowska, K., Borkowski, R., & Błażkiewicz, M. (2024). Perturbations during gait on a split-belt treadmill: A scoping review. *Applied Sciences*, 14(21), 9852. <https://doi.org/10.3390/app14219852>

Cohn, J., Nicholson, D., Schmorow, D. (2009). The PSI handbook of virtual environments for training and education. Vol. 3: *Integrated systems, training evaluations, and future directions*. Praeger Security International, Westport

Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 232, 66-69.

Deutsche Post DHL (2021). <https://www.dpdhl.com/de/ueberuns/unternehmensbereiche/post-paket-deutschland.html>

DGUV Information 208-046 Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Zeitungszustellung, August 2015

DGUV Information 208–041: Bewertung der Rutschgefahr unter Betriebsbedingungen. German Social Accident Insurance (DGUV), Berlin (2019)

DGUV Information 208–181: Maßnahmen zur Vermeidung von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin (in Vorbereitung)

DGUV Information 208-035 Okt. 2020 Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Zustellen von Sendungen Handlungshilfe für Führungskräfte in Betrieben mit Kurier-, Express- und Postdienstleistungen, <https://www.bg-verkehr.de/medien/medienkatalog/dguv-informationen/dguv-information-208-035-zustellen-von-sendungen>

DGUV (2020). Statistik Arbeitsunfallgeschehen 2019. <https://www.dguv.de/de/zahlen-fakten/index.jsp>

DGUV (2022). Statistik Arbeitsunfallgeschehen 2021. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. [publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4590]

DGUV Regel 108-003 April 1994 – aktualisierte Fassung Oktober 2003. Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr

Di Pilla, S. (2017). Slip and fall controls for pedestrian and community safety. In: Hsiao, H. (ed.) *Fall Prevention and Protection. Principles, Guidelines, and Practices*. 321–339. CRC Press, Boca Raton

Eastgate, R.M., Wilson, J.R., D'Cruz, M. (2015) Structured development of virtual environments. In: Hale, K.S., Stanney, K.M. (eds.) *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*, pp. 353–390. CRC Press, Boca Raton

Ellegast, R., Hermanns, I. and Schiefer, C. "Workload Assessment in Field Using the Ambulatory CUELA System," Berlin, Heidelberg, 2009: Springer Berlin Heidelberg, in *Digital Human Modeling*, pp. 221-226.

Ellegast, R. and Kupfer, J. "Portable posture and motion measuring system for use in ergonomic field analysis," *Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design*, pp. 47-54, 2000 2000.

Elfering, A., Grebner, S., & Boillat, C. (2013). Busy at work and absent-minded at home: Mental workload, cognitive failure, and domestic falls. *Swiss Journal of Psychology*, 72(4), 219. DOI:10.1024/1421-0185/a000114.

Epro, G., McCrum, C., Mierau, A., Leyendecker, M., Brüggemann, G.-P., & Karamanidis, K. (2018a). Effects of triceps surae muscle strength and tendon stiffness on the reactive dynamic stability and adaptability of older female adults during perturbed walking. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 124(6), 1541–1549. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00545.2017>

Epro, G., Mierau, A., McCrum, C., Leyendecker, M., Brüggemann, G.-P., & Karamanidis, K. (2018b). Retention of gait stability improvements over 1.5 years in older adults: Effects of perturbation exposure and triceps surae neuromuscular exercise. *Journal of Neurophysiology*, 119(6), 2229–2240. <https://doi.org/10.1152/jn.00513.2017>

EU OSH Framework Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work (with amendments 2008). Official Journal of the European Union L 183, 29/06/1989, pp. 1–8 (2008)

Eurostat: Accidents at work – statistics on causes and circumstances. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_on_causes_and_circumstances#Contact_mode_of_injury. Accessed 17 Feb 2023

Fung, J., Richards, C. L., Malouin, F., McFadyen, B. J. & Lamontagne, A. (2006). A treadmill and motion coupled virtual reality system for gait training post-stroke. *Cyber Psychology & Behavior*. 9(2).

Gomoll, K., Nickel, P., Huis, S. (2018). Development of a VR based qualification module in trainings on risk assessments according to the EU Directive on Safety of Machinery. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2018)*, Oct 10–12, 2018, INRS, Nancy, France, pp. 306–311.

Goldstein, I. L. (1993). Training in Organisation. *Needs assessment, development and evaluation*. Brooks/Cole.

Goldstein, I. L. & Ford, J. K. (2002). Training in Organisations. *Needs Assessment, Development, and Evaluation (4th edition)*. Cengage Learning

Grabiner, M. D., Koh, T. J., Lundin, T. M., & Jahnigen, D. W. (1993). Kinematics of Recovery From a Stumble. *Journal of Gerontology*(M97-M102)

Hao, J., High, R., & Siu, K.-C. (2023). Gender-specific visual perturbation effects on muscle activation during incline treadmill walking: a virtual reality study. *Ergonomics* (66), 704–715. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2113152>

Haslam, R. A., & Bentley, T. A. (1999). Follow-up investigations of slip, trip and fall accidents among postal delivery workers. *Safety Science*, 32(1), 33–47.

Heyer, Y. (2018). Entwicklung von Mensch-System-Interaktionen zur Sensibilisierung für Stolper-, Rutsch- und Sturzgefahren mit Hilfe virtueller Realität. Bachelorarbeit Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus Remagen.

Hof, A. L., Gazendam, M. G. J., & Sinke, W. E. (2005). The condition for dynamic stability. *Journal of Biomechanics*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.03.025>

Hsiao, H (2014). Fall prevention research and practice: a total worker safety approach. *Industrial health*.

Hsiao, H. (2017). Fall prevention and protection: a public health matter. In: Hsiao, H. (ed.) *Fall Prevention and Protection. Principles, Guidelines, and Practices*, 3–17. CRC Press, Boca Raton

International Social Security Association, International Prevention Section of the ISSA on Machine and System Safety, Human Factors Working Group. <https://www.safe-machines-at-work.org/human-factors/work-organisation-design-issues/osh-and-work-system-design>. Accessed 17 Feb 2023

Irmer, Julien Patrick; Kern, Marcel; Schermelleh-Engel, Karin; Semmer, Norbert K.; Zapf, Dieter (2019): The instrument for stress-oriented task analysis (ISTA). In: *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie A&O*, 63 (4), 217–237. DOI:10.1026/0932-4089/a000312.

ISO 9241–394: Ergonomics of human-system interaction — Part 394: Ergonomic requirements for reducing undesirable biomedical effects of visually induced motion sickness during watching electronic images. ISO, Geneva (2020)

Jäger, M. (2018). Extended compilation of autopsy-material measurements on lumbar ultimate compressive strength for deriving reference values in ergonomic work design: The Revised Dortmund Recommendations. *EXCLI Journal*, 17, 362–385. <https://doi.org/10.17179/excli2018-1206>

Kangas, M., Konttila, A., Lindgren, P., Winblad, I., & Jämsä, T. (2008). Comparison of low-complexity fall detection algorithms for body attached accelerometers. *Gait & Posture*, 28(2), 285–291.

Karamanidis, K., Epro, G., McCrum, C., & König, M. (2020). Improving Trip- and Slip-Resisting Skills in Older People: Perturbation Dose Matters. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 48(1), 40–47. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000210>

Kavosi, Z., Ranaei Kordshouli, H., Zare Saadabadi, M., & Ghorbanian, A. (2018). The factors related to the employees' job stress: A meta- analysis. *Health Management & Information Science*, 5(4), 145–151. https://jhmi.sums.ac.ir/article_42722.html

Kempf, H.-D. (2010). Verhaltensprävention und Verhältnisprävention. In: Kempf H.-D. (Hrsg.), *Die neue Rückenschule*. Springer Medizin Verlag

Kennedy, Robert S.; Lane, Norman E.; Berbaum, Kevin S.; Lilienthal, Michael G. (1993): Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220. DOI:10.1207/s15327108ijap0303_3.

Kern, F., Winter, C., Gall, D., Käthner, I., Pauli, P. & Latoschik, M. E. (2019). Immersive virtual reality and gamification within procedurally generated environments to increase motivation during gait rehabilitation. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces* 23-27 March, Osaka, Japan

Khaday, S., Li, K. W., Li, N., & Chen, Y. (2021, April). A survey on the risk perception of slips, trips, and falls of coal mine workers in china. In: *2021 3rd International Conference on Management Science and Industrial Engineering*. 120-125.

Kluge, A. et. al. (2023) Ins Stolpern aber nicht zu Fall gebracht. Erste deskriptive Ergebnisse im Projekt ENTRAPon in AOW Newsletter Nr. 69

König, M., Epro, G., Seeley, J., Potthast, W., & Karamanidis, K. (2019a). Retention and generalizability of balance recovery response adaptations from trip perturbations across the adult life span. *Journal of Neurophysiology*, 1884–1893. <https://doi.org/10.1152/jn.00380.2019>

König, M., Epro, G., Seeley, J., Catalá-Lehnen, P., Potthast, W., & Karamanidis, K. (2019b). Retention of improvement in gait stability over 14 weeks due to trip-perturbation training is dependent on perturbation dose. *Journal of Biomechanics*, 84, 243–246. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.12.011>

Lackey, S. J., Salcedo, J. N., Szalma, J. L., & Hancock, P. A. (2016). The stress and workload of virtual reality training: the effects of presence, immersion and flow. *Ergonomics*, Volume (59), No. 8, 1060-1072.

Lawson, G., Shaw, E., Roper, T., Nilsson, T., Bajorunaite, L., Batool, A. (2019): Immersive virtual worlds: multi-sensory virtual environments for health and safety training (University of Nottingham Research report). *Institution of Occupational Safety and Health*, Wigston.

Lehto, M.R., Cook, B.T. (2012). Occupational health and safety management. In: Salvendy, G. (ed.) *Handbook of human factors and ergonomics*, pp. 701–733. Wiley, Hoboken

Liu, J., Lockhart, T. E., Parijat, P., McIntosh, J. & Chiu, Y.-P. (2015). Comparison of slip training in VR environment and on moveable platform. *Biomed Sci Instrum.*, 51, 189-97.

Lungfiel, A.; Nickel, P.; Zimmermann, J. (2023). Mit dem BGHW-Lagersimulator für Sturzgefahren sensibilisieren Nr. 0448, Ausgabe 06/2023, 2 S. In: *Aus der Arbeit des IFA*. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

Makransky, G., Borre-Gude, S. & Mayer R. E. (2019). Motivational and cognitive benefits of training in immersive virtual reality based on multiple assessments. *Wiley Journal of Computer Assisted Learning*, 35, 691-707.

McCrum, C., Epro, G., Meijer, K., Zijlstra, W., Brüggemann, G.-P., & Karamanidis, K. (2016). Locomotor stability and adaptation during perturbed walking across the adult female lifespan. *Journal of Biomechanics*, 49(7), 1244–1247. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.02.051>

McCrum, C., Bhatt, T.S., Gerards, M. G., Karamanidis, K., Rogers, M., Lord, S., & Okubo, Y. (2022). Perturbation-based balance training: Principles, mechanisms and implementation in clinical practice. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.1015394>

Mewes, D.: Slips, trips and falls. OSHwiki networking knowledge <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/slips-trips-and-falls> . Accessed 17 Feb 2023

Mohr, J.-O. (2017). Fit gegen das Stolpern – Projektstudie der HFUK Nord. In DGUV (Hrsg), 6. DGUV-Fachgespräch Ergonomie (125-127). Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV).

- Nakamura, T., Oyama, I., Fujino, Y., Kubo, T., Kadowaki, K., Kunimoto, M., ... & Matsuda, S. (2016). Evaluation and simplification of the occupational slip, trip and fall risk-assessment test. *Industrial Health*, 54(4), 354-360. DOI:10.2486/indhealth.2015-0125.
- Nicholson, D., Schmorow, D., Cohn, J. (2009).: The PSI handbook of virtual environments for training and education. Vol. 2: VE components and training technologies. Praeger Security International, Westport
- Nickel, P., Lungfiel, A., Trabold, R.-J. (2017): Reconstruction of near misses and accidents for analyses from virtual reality usability study. In: Barbic, J., D'Cruz, M., Latoschik, M.E., Slater, M., Bourdot, P. (eds.) *Virtual Reality and Augmented Reality*. LNCS, vol. 10700, pp. 182–191. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72323-5_12
- Nickel, P., Lungfiel, A. (2024). Evaluation of joystick built-in emergency stop function for mobile elevating work platform safety and human factors and ergonomics in accident prevention. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 78(4). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00449-y>
- Niegemann, H. (2019). Instructional Design. In: Niegemann, H., Weinberger, A. (eds) *Handbuch Bildungstechnologie* (Springer Reference Psychologie). Springer, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54373-3_7-1
- Nørgaard, J. E., Andersen, S., Ryg, J., Andreasen, J., Oliveira, A. d. S. C., Stevenson, A. J. T., Danielsen, M. B. B., & Jorgensen, M. G. (2024). Perturbation-based balance training of older adults and effects on physiological, cognitive and sociopsychological factors: A secondary analysis from a randomised controlled trial with 12-month follow-up. *BMJ Open*, 14(8), e080550. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-080550>
- Nyan, M. N., Tay, F. E. H., & Murugasu, E. (2008). A wearable system for pre-impact fall detection. *Journal of Biomechanics*, 41(16), 3475–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.08.009>
- Özdemir, A. (2016). An analysis on sensor locations of the human body for wearable fall detection devices: Principles and practice. *Sensors*, 16(8), 1161.
- Ohly, S., & Fritz, C. (2010). Work characteristics, challenge appraisal, creativity, and proactive behavior: A multi-level study. *Journal of Organizational Behavior*, 31(4), 543-565. <https://doi.org/10.1002/job.633>
- Okubo, Y., Brodie, M. A., Sturnieks, D. L., Hicks, C., Carter, H., Toson, B., & Lord, S. R. (2018). Exposure to trips and slips with increasing unpredictability while walking can improve balance recovery responses with minimum predictive gait alterations. *PloS One*, 13(9), e0202913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202913>
- Okubo, Y., Brodie, M. A., Sturnieks, D. L., Hicks, C., & Lord, S. R. (2019). A pilot study of reactive balance training using trips and slips with increasing unpredictability in young and older adults: Biomechanical mechanisms, falls and clinical feasibility. *Clinical Biomechanics*, 67, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.05.016>
- Oliveras, C., Cunill, M., Gras, M.E., & Sullman, M.J. (2002). Effect of time pressure on feelings of stress, activation and arousal and drivers' risk-taking behaviour. *ADA412433 Europe Chapter of the Human Factors and Ergonomics Society Meeting*. 5.
- Pai, Y.-C., Bhatt, T., Yang, F., & Wang, E. (2014). Perturbation training can reduce community-dwelling older adults' annual fall risk: A randomized controlled trial. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 69(12), 1586–1594.
- Pang, I., Okubo, Y., Sturnieks, D., Lord, S. R., & Brodie, M. A. (2019). Detection of near falls using wearable devices. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, 42(1), 48–56.

Paridon, H. (2005). Entstehung von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen. Dresden: Institut für Arbeit und Gesundheit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IAG)

Parijat, P., Lockhart, T. E., & Liu, J. (2015a). Emg and kinematic responses to unexpected slips after slip training in virtual reality. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 62(2), 593–599. <https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2361324>

Parijat, P., Lockhart, T. E., & Liu, J. (2015b). Effects of perturbation-based slip training using a virtual reality environment on slip-induced falls. *Annals of Biomedical Engineering*, 43(4), 958–967. <https://doi.org/10.1007/s10439-014-1128-z>

Phu, S., Sturnieks, D. L., Song, P. Y. H., Lord, S. R., & Okubo, Y. (2024). Neuromuscular adaptations to perturbation-based balance training using treadmill belt accelerations do not transfer to an obstacle trip in older people: A cross-over randomised controlled trial. *Human Movement Science*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2024.103273>

Projekt-5173 des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) im Auftrag der Berufsgenossenschaft Handel und Logistik (BGHW) zum Thema "Unfallverhütung in Einzelhandelsszenarien mit Unterstützung von Virtual-RealityTechniken". <https://www.dguv.de/ifa/forschung/projektverzeichnis/ifa5173.jsp>. Zugriff am 17. Februar 2023

Psotka, J. (1995). Immersive training systems: Virtual reality and education and training. *Instructional Science*, 23, 405-431, Kluwer Academic Publishers

Radomsky, M. C., Ramani, R. V., & Flick, J. P. (2001). Slips, trips & falls in construction & mining: causes & controls. *Professional Safety*, 46(9), 30.

Randeniya, N., Ranjha, S., Kulkarni, A., & Lu, G. (2019, June). Virtual reality-based maintenance training effectiveness measures – a novel approach for rail industry. *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*.

Rey-Becerra, E., Barrero, L.H., Ellegast, R. & Kluge, A. (2021). The effectiveness of virtual safety training in work at heights: A Literature Review. *Applied Ergonomics*, 94.

Rieger, M. M., Papegaaij, S., Steenbrink, F., van Dieën, J. H., & Pijnappels, M. (2024). Effects of perturbation-based treadmill training on balance performance, daily life gait, and falls in older adults: React randomized controlled trial. *Physical Therapy*, 104(1). <https://doi.org/10.1093/ptj/pzad136>

Ritzmann, S.; Hagemann, V.; Kluge, A. (2014): The training evaluation inventory (TEI) - Evaluation of training design and measurement of training outcomes for predicting training success. In: *Vocations and Learning*, 7(1), 41–73. DOI:10.1007/s12186-013-9106-4.

Rockstroh, C., Blum, J. & Göritz, A. S. (2019). Virtual Reality in the application of heart rate variability biofeedback. *International Journal of Human-Computer Studies*, 130, 209-220.

Rockstroh, C., Blum, J. & Göritz, A. S. (2020). A mobile VR-based respiratory biofeedback game to foster diaphragmatic breathing. *Virtual Reality*.

Rockstroh, C., Blum, J., Hardt, V. & Göritz, A. S. (2020). Design and evaluation of a virtual restorative walk with room-scale virtual reality and impossible spaces. *Frontiers in Virtual Reality*, 1, 598282.

Rosenblatt, N. J., Marone, J., & Grabiner, M. D. (2013). Preventing trip-related falls by community-dwelling adults: A prospective study. *Journal of the American Geriatrics Society*, 61(9), 1629–1631.

Schäfer, K., Klockmann, H.-C., Wetzel, C., Mahlberg, J. (2022): Schwere Arbeitsunfälle im Handel und in der Warenlogistik. *DGUV Forum* 11(2022), 9–17

Schallberger, U.; Venetz, Martin (1999): Kurzversionen des MRS-Inventars von Ostendorf (1990) zur Erfassung der fünf "grossen" Persönlichkeitsfaktoren. Universität Zürich: *Berichte aus der Abteilung Angewandte Psychologie*. 30,1–51.

Schubert, T.; Friedmann, F.; & Regenbrecht, H. (2001): The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3), 266–281.

Schmorrow, D., Cohn, J., Nicholson, D. (2009): The PSI handbook of virtual environments for training and education. *Learning, Requirements, and Metrics*, 1. Praeger Security International, Westport

Schoeneberg, B., McNeal, B., Reisner, J., Friesen, A., Reed, T., & Goodwin, J. (2024). The efficacy of perturbation-based balance training among older adults: A systematic review. *Physical & Occupational Therapy in Geriatrics*, 42(4), 339–355. <https://doi.org/10.1080/02703181.2024.2319241>

Semmer, Norbert; Zapf, Dieter; Dunckel, Heiner (1995): Assessing stress at work: A framework and an instrument. *Work and Health: Scientific Basis of Progress in the Working Environment*, 105–113.

Simeonov, P. (2017). Fall risk associated with restricted and elevated support surfaces. In Hsiao, H. (Hrsg.), *Fall prevention and protection: Principles, guidelines and practices*. 119-140, CRC Press, Boca Raton

Simpson, B.D., Cowgill, J.L., Gilkey, R.H., Weisenberger, J.M. (2015). Technological considerations in the design of multisensory virtual environments: how real does it need to be? In: Hale, K.S., Stanney, K.M. (eds.) *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*, pp. 313–333. CRC Press, Boca Raton

Skelton, D. A. (2001). Effects of physical activity on postural stability. *Age & Ageing*, 30(4). 33-39. https://doi.org/10.1093/ageing/30.suppl_4.33

Soltani, P., & Andrade, R. (2021). The influence of virtual reality head-mounted displays on balance outcomes and training paradigms: A systematic review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.531535>

Sowndararajan, A., Wang, R., & Bowman, D. A. (2008). Quantifying the benefits of immersion for procedural training. *Proceedings of the 2008 Workshop on Immersive Projection Technologies/Emerging Display Technologies - IPT/EDT '08. the 2008 workshop*.

Straub, L. & Kluge A. (2020). Trainingsbedarfsanalyse für VR-basierte Trainings zur Prävention von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen. *Komplexität und Lernen*, September 2020, 2-6.

Süptitz, F., Karamanidis, K., Moreno Catalá, M., & Brüggemann, G.-P. (2012). Symmetry and reproducibility of the components of dynamic stability in young adults at different walking velocities on the treadmill. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(2), 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.12.007>

Swaen, G., Burns, C. J., Collins, J. J., Bodner, K. M., Dizor, J. F., Craun, B. A., & Bonner, E. M. (2014). Slips, trips and falls at a chemical manufacturing company. *Occupational Medicine*, 64(2), 120-125.

Swedler, D. I., Verma, S. K., Huang, Y., Lombardi, D. A., Chang, W., Brennan, M. & Courtney, T. K. (2015). A structural equation modelling approach examining the pathways between safety climate, behaviour

performance and workplace slipping. *Occupational And Environmental Medicine*, 72(7), 476–481. <https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102496>

Taylor, Z., Walsh, G. S., Hawkins, H., Inacio, M., & Esser, P. (2022). Perturbations during gait: A systematic review of methodologies and outcomes. *Sensors* (Basel, Switzerland), 22(15). <https://doi.org/10.3390/s22155927>

Thayer, P. W. & Teachout, M. S. (1995). A climate for transfer model (AL/HR-TP-1995-0035). Brooks Air Force Base, Texas.

Verma, A., Khan, S. D., Maiti, J., & Krishna, O. B. (2014). Identifying patterns of safety related incidents in a steel plant using association rule mining of incident investigation reports. *Safety Science*, 70, 89-98.

Wang, T.-Y., Bhatt, T., Yang, F., & Pai, Y.-C. (2012). Adaptive control reduces trip-induced forward gait instability among young adults. *Journal of Biomechanics*, 45(7), 1169–1175. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.02.001>

Weber, A., Friemert, D., Hartmann, U., Epro, G., Seeley, J., Werth, J., Nickel, P., & Karamanidis, K. (2021). Obstacle avoidance training in virtual environments leads to limb-specific locomotor adaptations but not to interlimb transfer in healthy young adults. *Journal of Biomechanics*, 120, 110357.

Weber, A., Nickel, P., Hartmann, U., Friemert, D., & Karamanidis, K. (2019). Capture of stability and coordination indicators in virtual training scenarios for the prevention of slip, trip, and fall (STF) accidents. In *Lecture Notes in Computer Science*, p. 210–219. Springer International Publishing.

Weber, A., Nickel, P., Hartmann, U., Friemert, D., & Karamanidis, K. (2020). Contributions of training programs supported by VR techniques to the prevention of STF accidents. In *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Posture, Motion and Health*, pp. 276–290. Springer International Publishing.

Wetzel, Ch. (2013) FP 288 „Rutschhemmungsmatrix“ Wissenschaftlicher Abschlussbericht. Bergische Universität Wuppertal

Wetzel, C., Windhövel, U., Mewes, D., Ceylan, O. (2015) Slipping on pedestrian surfaces: methods for measuring and evaluating the slip resistance. *Int. J. Occup. Saf. Ergon. (JOSE)* 21(3), 256–267. <https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1081767>

Wetzel, C. (2022): Sturzunfälle. Es ist noch immer gut gegangen – oder eben nicht! *Sicher ist sicher* 12/2022, pp. 528–533. <https://doi.org/10.37307/j.2199-7349.2022.12.06>

Wetzel, C., Lungfiel, A., Nickel, P. (2023). BGHW Warehouse Simulation – Virtual reality supports prevention of slip, trip and fall (STF) accidents. In: Duffy, V.G. (eds) *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management*. HCII 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14028. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35741-1_21

Wickens, C.D., Hollands, J.G., Banbury, S., Parasuraman, R. (2013): Engineering Psychology and Human Performance. Pearson, Upper Saddle River

Yang, F., Bhatt, T., & Pai, Y.-C. (2013). Generalization of treadmill-slip training to prevent a fall following a sudden (novel) slip in over-ground walking. *Journal of Biomechanics*, 46(1), 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.10.002>

Yang, F., Cereceres, P., & Qiao, M. (2018). Treadmill-based gait-slip training with reduced training volume could still prevent slip-related falls. *Gait & Posture*, 66, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.08.029>

Zimmermann J.; Lungfiel A.; Bohlscheid A. (2023). BGHW-Lagerhallensimulator in Virtual Reality – Simulationsschulungstool für das ENTRAPon-Projekt in DGUV Report 1/2023: 8. DGUV Fachgespräch Ergonomie, S.169 ff., ISBN (online) 978-3-948657-58-1

Zirwatul Aida, R., Ibrahim, R. & Ohtsuka, K. (2012). Review of the job demand-control and job demand-control-support models: Elusive moderating predictor effects and cultural implications. *Southeast Asia Psychology Journal*, 1, 10–21. <http://www.cseap.edu.my/sapi>

12. Anhang

- Fragebögen die online zur Verfügung gestellt werden
 - Entrapon Fragebogen T0 (pdf)
 - Entrapon Fragebogen T2 & T3 (pdf)
 - ENTRAPon_Fragebögen_Übersicht (pdf)
 - Sturzmonitorings (pdf)
- Weitere Anhänge
 - Aus der Arbeit des IFA 0448 zum BGHW-Lagersimulator
 - Aus der Arbeit des IFA 0459 zur ENTRAPon-Stadtumgebung
 - Trainingshandbuch

0448

Aus der Arbeit des IFA

Stand: 06/2023

Mit dem BGHW-Lagersimulator für Sturzgefahren sensibilisieren

Problem

Die Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BGHW) unterstützt bereits die betriebliche Sicherheitsarbeit beim Thema „Sicher zu Fuß und auf dem Rad“ mit einem Transporter, auf dem sich verschiedene Simulatoren und Exponate zum Demonstrieren und Trainieren befinden: dem „mobil“. Das IFA wiederum hat umfangreiche Erfahrungen darin, in virtueller Realität (VR) Gefahrenstellen zu simulieren und so anschaulich und unmittelbar Risiken erlebbar zu machen, ohne dass jemand tatsächlich in Gefahr gerät.

Idee war es daher, gemeinsam für das „mobil“ ein neues Exponat zu entwickeln: einen Simulator, der typische Gefahrenstellen in Lagerhallen virtuell nachbildet, die das Stolpern, Rutschen oder Fehltreten (SRF) begünstigen.

Die Beschäftigten sollen ihre aktive Rolle in der Unfallprävention erleben, für typische Gefahren sensibilisiert werden und mithilfe des Exponats neue Erfahrungen in den Arbeitsalltag mitnehmen.

Aktivitäten

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung und Lösung der Problematik des eingeschränkten Bewegungsraums in VR wurde das Exponat mit Head Mounted Display (HMD) und einem omnidirektionalen Laufband entwickelt. Dieses Laufband ermöglicht den Beschäftigten Bewegungen in alle Richtungen, ohne wirklich durch den Raum laufen zu müssen.



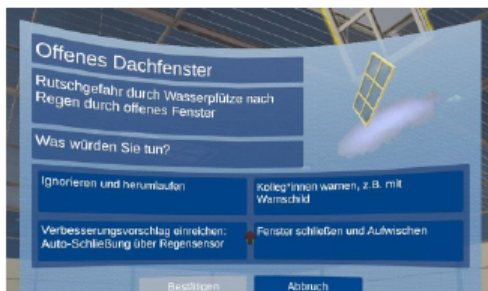
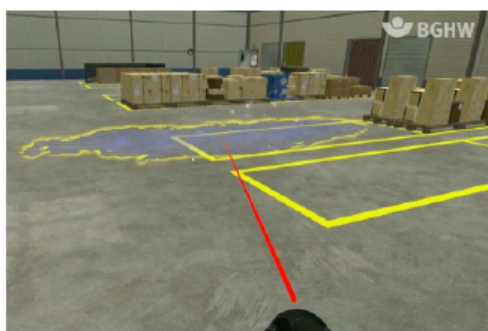
BGHW-Lagersimulator im „mobil“

Die Simulation einer Lagerhalle als VR-Anwendung umfasst viele unterschiedliche Gefährdungsstellen, wie zum Beispiel herumliegende Kabel oder umgefallene Behälter, die von den Beschäftigten identifiziert werden müssen. Mithilfe passender Präventionsmaßnahmen können die jeweiligen Gefährdungen anschließend beseitigt werden. Die vorgegebenen Alternativen verdeutlichen den Beschäftigten, dass sie immer selbst aktiv werden, d. h., die Gefahrenstellen selbst beseitigen oder weitere Maßnahmen veranlassen können.

Ergebnisse und Verwendung

Das entwickelte Exponat „BGHW-Lagersimulator“ wurde durch die BGHW auf ihren Transporter „mobil“ montiert. Betriebe können das „mobil“ seit 2019 beispielsweise für Gesundheits- oder Verkehrssicherheitstage buchen. Unter Anleitung von Trainerinnen und Trainern haben erste Einsätze des BGHW mobil z. B. auf der Fachtagung der BGHW gezeigt, dass das Ziel, durch den Einsatz neuer Technologien möglichst viele Altersgruppen auf SRF-Gefahren und Lösungen hinzuweisen, sehr gut erreicht wird.

Die verwendeten Programme und Techniken der VR lassen sich auch auf andere Branchen übertragen und um weitere Szenarien ergänzen.



Fund einer Gefahrenstelle (oben) und Auswahlen ü mit Maßnahmen (unten)

Nutzerkreis

Betriebe, in denen Stolper-, Rutsch- und Sturzunfälle auftreten können.

Fachliche Anfragen

- IFA, Abteilung Unfallprävention: Digitalisierung – Technologien
- Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BGHW)

Literaturanfragen

- IFA, Abteilung Fachübergreifende Aufgaben

Weiterführende Informationen

- Faltblatt „Die BGHW macht mobil – Sicher zu Fuß und auf dem Rad“. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik Prävention. 3. Auflage 2021. Bonn
kompendium.bghw.de/?alias=bghw_falt_b12f041_1_
- Informationsvideos für den „Showtruck“ und das „mobil“. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Mannheim.
www.bghw.de/arbeitschutz/wie-wir-sie-im-arbeitschutz-unterstuetzen/showtruck-und-mobil/

Herausgegeben von:

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)
 Glinkastraße 40 · 10117 Berlin
 Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
 E-Mail: info@dguv.de · Internet: www.dguv.de
 ISSN (Internet): 2190-006X
 ISSN (Druckversion): 2190-0051

Bezug:

www.dguv.de/publikationen Webcode: p022389

Verfasst von:

A. Lungfiel, Dr. P. Nickel, J. Zimmermann
 Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
 Alte Heerstraße 111 · 53757 Sankt Augustin

<https://publikationen.dguv.de/forschung/ifa/aus-der-arbeit-des-ifa/4743/mit-dem-bghw-lagersimulator-fuer-sturzgefahren-sensibilisieren-aus-der-arbeit-des-ifa-nr.-0448?c=33>

0459

Aus der Arbeit des IFA

Stand: 06/2024

In Virtueller Realität Gefahrenquellen für Stürze bei der Post- und Paketzustellung erkennen

Problem

In Betrieben kommt es bekanntermaßen immer wieder zu Personenunfällen, die auf Stolpern, Rutschen oder Fehltreten (SRF) zurückzuführen sind. Auch bei der Post- und Paketzustellung treten viele SRF-Unfälle auf. Oftmals sind im Weg der Zustellperson liegende Gegenstände (wie ein umgefallener E-Roller) die Stolperursache, aber auch Wetterereignisse wie Regen und Schnee können zu einer erhöhten Gefährdung der Beschäftigten führen.

Gerade weil sich Zustellerinnen und Zusteller nicht nur auf dem eigenen Firmengelände, sondern vor allem im öffentlichen Raum und auf fremden Privatgrundstücken bewegen, ist es wichtig, sie für mögliche Gefährdungen zu sensibilisieren.

Aktivitäten

Das von der DGUV geförderte Projekt ENTRAPon (FF-FP 0470) hat als Ziel, Trainingselemente zu entwickeln, die mit Hilfe von Anwendungen in Virtueller Realität (VR) die Prävention von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen unterstützen.

Ein Teil dieser Trainingselemente baut auf dem vom IFA entwickelten BGHW-Lagersimulator auf. Die Trainierenden sollen mit Hilfe eines omnidirektionalen Laufbands durch ein virtuelles Szenario navigieren, Gefährdungen aufdecken und eine mögliche Lösung auswählen. Dabei tragen die Teilnehmenden ein Head Mounted Display (HMD), auch VR-Brille genannt.



Training in virtueller Realität

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Arbeits-, Organisations- und Wirtschaftspsychologie der Ruhr-Universität Bochum und dem Arbeitsbereich Ergonomie und Virtuelle Realität am RheinAhrCampus der Hochschule Koblenz wurde ein weiteres virtuelles Szenario entwickelt. Es bildet innerhalb einer virtuellen Stadtumgebung spezifische Gefahrenstellen für Zustelldienste ab, sodass für die Trainierenden eine höhere Identifikation mit der virtuellen Umgebung ermöglicht wird. Dabei werden spezifische Gefahrenquellen einer Arbeit unter freiem Himmel mitberücksichtigt. Diese sind jahreszeitenabhängig, entstehen aber auch häufig durch wechselnde Witterungsverhältnisse oder werden durch externe Gegebenheiten wie Baustellen oder Verkehr hervorgerufen.

Im öffentlichen Raum ist es den Zustellenden aber nicht immer möglich, Gefahren sofort oder eigenständig zu beseitigen. Laub, Pfützen, lose Stufen oder Anderes können nicht einfach entfernt oder ausgetauscht werden. Allerdings: Auch wenn die Gefahr nicht zu beseitigen ist, kann man die Kolle-

ginnen und Kollegen darauf aufmerksam machen und die eigene Bewegung den Gegebenheiten anpassen.

Ist eine Zustellung wegen bestimmter Gegebenheiten zu riskant, können die Zustellenden diese außerdem abbrechen und die Kundinnen und Kunden auf die Gefahr aufmerksam machen. Solche Lösungsmöglichkeiten sind ebenfalls im Simulationsschulungstool implementiert und sollen bei den Trainierenden zu einem bewussteren Umgang mit Gefahrenstellen führen.

Im Rahmen der ENTRAPon-Studie wurde das neue Stadtszenario von Beschäftigten der Deutschen Post DHL getestet und das Trainingselement erstmals evaluiert.

Ergebnisse und Verwendung

Ein neues virtuelles Stadtszenario mit SRF-Gefährdungen für Zustellerinnen und Zusteller wurde erarbeitet und in einer Studie getestet. Die Studienteilnehmenden füllten Fragebögen aus, in denen sie einschätzten, wie gut sie mit der Anwendung zurechtkamen.

Die Auswertung zeigt, dass es den Teilnehmenden leichtfällt, die Aufgabe zu verstehen, und dass die Schulungssimulation als nützlich empfunden wurde. Cyber Sickness (Übelkeit, die mit dem Eintauchen in eine computergenerierte Umgebung einhergehen kann) trat nur selten auf. Der Spaßfaktor ist sehr hoch und die meisten Teilnehmenden gehen davon aus, dass sie die gemachten Erfahrungen in ihre Arbeit integrieren können und sie bewusster mit Gefahrenquellen umgehen werden.

Nutzerkreis

Betriebe der Post- und Paketzustellung



Straße im Stadtszenario

Fachliche Anfragen

- IFA, Abteilung Unfallprävention: Digitalisierung – Technologien

Literaturanfragen

- IFA, Abteilung Fachübergreifende Aufgaben

Weiterführende Informationen

- Lungfiel, A.; Nickel, P. und Zimmermann, J.: Mit dem BGHW-Lagersimulator für Sturzgefahren sensibilisieren (Aus der Arbeit des IFA Nr. 0448). 6/2023
publikationen.dguv.de/ › Webcode: p022389
- Zimmermann J.; Lungfiel A.; Bohlscheid A.: BGHW-Lagerhallsimulator in Virtual Reality – Simulationsschulungstool für das ENTRAPon-Projekt in DGUV Report 1/2023: 8. DGUV Fachgespräch Ergonomie, S.169 ff., ISBN (online) 978-3-948657-58-1
publikationen.dguv.de/ › webcode: p022452

Herausgegeben von:

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)
Glinkastraße 40 · 10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
E-Mail: info@dguv.de · Internet: www.dguv.de
ISSN (Internet): 2190-006X
ISSN (Druckversion): 2190-0051

Bezug:

www.dguv.de/publikationen Webcode: p022593

Bearbeitet von:

Albert Bohlscheid, Andy Lungfiel, Jan Zimmermann
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Alte Heerstraße 111 · 53757 Sankt Augustin
Tel. 030 13001-0/Fax: -38001
E-Mail: ifa@dguv.de · Internet: www.dguv.de/ifa

<https://publikationen.dguv.de/forschung/ifa/aus-der-arbeit-des-ifa/4947/in-virtueller-realitaet-gefahrenquellen-fuer-stuerze-bei-der-post-und-paketzustellung-erkennen-aus-de>