

DHGS Deutsche Hochschule für Gesundheit und Sport

Sport und angewandte Trainingswissenschaft

Verbesserung der motorischen Kontrolle durch Gamification – Der Einfluss von Exergaming auf ausgewählte biomechanische Parameter der unteren Extremitäten

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Andreas Scheidl

Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Wittke

Zweitgutachter: Prof. Dr. Ralf Kriegel

Eingereicht am: 17.09.2025

Abstract

Die vorliegende Bachelorarbeit untersucht den Einfluss eines dreiwöchigen, KI-gestützten Exergame-Trainings mit dem ddrobotec Robotrainer Pro auf ausgewählte biomechanische Parameter der unteren Extremitäten bei sportlich aktiven, jungen Erwachsenen. Ziel war es, die Wirkung auf die motorische Kontrolle in den Dimensionen Wahrnehmung (Joint Position Sense, kurz: JPS, deutsch: Gelenkstellungssinn), Stabilität (Stiffness Control, kurz: SC, deutsch: Steifigkeitsregelung), Koordination (Movement Accuracy, kurz: MA, deutsch: Bewegungsgenauigkeit) und Anpassungsfähigkeit (Plyometric React Time, kurz: PRT, deutsch: plyometrische Reaktionszeit) zu prüfen.

Die Untersuchung wurde als Prä-Post-Längsschnittdesign mit 17 Proband:innen durchgeführt, die über drei Wochen hinweg zwei Exergame-basierte Trainingseinheiten pro Woche absolvierten. Die Datenerhebung erfolgte standardisiert über integrierte Testprotokolle des ddrobotec-Systems und wurde inferenzstatistisch ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen signifikante Verbesserungen in den Bereichen JPS, SC und PRT, während bei MA keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden konnten. Damit konnten drei der vier Hypothesen bestätigt werden. Die Befunde verdeutlichen, dass Exergaming-Interventionen kurzfristig und dimensionsspezifisch zur Optimierung der motorischen Kontrolle der unteren Extremitäten beitragen können.

Die Arbeit liefert damit einen empirischen Befund zur noch jungen Forschungslage, die bislang vor allem motivationale Effekte von Exergaming belegt hat. Sie unterstreicht die Relevanz biomechanisch valider Untersuchungen im sportwissenschaftlichen Kontext und zeigt Perspektiven für Training, Prävention und Rehabilitation auf.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1. Einleitung.....	7
2. Theoretischer Rahmen.....	8
2.1. Gamification & Exergaming.....	8
2.2. Motorische Kontrolle.....	12
3. Stand der Forschung.....	17
3.1. Empirische Befundlage in der Exergaming-Forschung.....	17
3.2. Forschungslücken und Relevanz der vorliegenden Arbeit.....	25
4. Methodik.....	26
4.1. Ableitung der Fragestellung und Hypothesen.....	26
4.2. Forschungsdesign.....	27
4.3. Stichprobenuntersuchung.....	28
4.4. Material: Der drobotec-Robotrainer.....	28
4.5. Durchführung der Intervention.....	29
4.6. Datenauswertung.....	31
4.7. Methodische Reflexion.....	32
5. Ergebnisse.....	33
5.1. Beschreibung der Stichprobe.....	33
5.2. Deskriptive Statistik.....	35
5.3. Inferenzstatistische Ergebnisse.....	41
6. Diskussion.....	44
7. Fazit.....	47
Literaturverzeichnis.....	49
Anhang A.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Begriffseinordnung Gamification	9
Abbildung 2: Verteilung der berücksichtigten Arbeiten nach Zielgruppe	20
Abbildung 3: Verknüpfung von Zielgruppen und thematischen Schwerpunkten berücksichtigter Arbeiten.....	21
Abbildung 4: Übersicht ddrobotec Robotrainer	29
Abbildung 5: Benutzeroberfläche ddrobotec Pro Exergames.....	30
Abbildung 6: Verteilung Sportkategorien Stichprobe.....	35
Abbildung 7: Übersicht Mittelwertänderungen JPS	39
Abbildung 8: Übersicht Mittelwertänderungen SC.....	39
Abbildung 9: Übersicht Mittelwertänderungen MA	39
Abbildung 10: Übersicht Mittelwertänderungen PRT	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Level Model (game design elements).....	10
Tabelle 2: Auswahl technologischer Werkzeuge zur Bewegungsanalyse	15
Tabelle 3: Übersicht empirischer Studien, Reviews, Entwicklungsarbeiten und Konferenzbeiträge zu Exergaming/ Gamification/ Biomechanik im Sport-, Präventions- und Rehabilitationskontext	19
Tabelle 4: Detailübersicht Stichprobenmerkmale.....	34
Tabelle 5: Übersicht geschlechtsspezifische Unterschiede Stichprobe.....	34
Tabelle 6: Testwerte Joint Position Sense	36
Tabelle 7: Testwerte Stiffness Control	37
Tabelle 8: Testwerte Movement Accuracy.....	37
Tabelle 9: Testwerte Plyometric React Time	38
Tabelle 10: Shapiro-Wilk Test.....	41
Tabelle 11: Zusammenfassung Ergebnisse Parameterverbesserung	43

Abkürzungsverzeichnis

ACL – Anterior Cruciate Ligament (Vorderes Kreuzband)

AI – Artificial Intelligence (Künstliche Intelligenz)

API – Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)

EMG – Elektromyografie

GMP – Generalized Motor Program (Generalisierte motorische Programme)

JPS – Joint Position Sense (Gelenkstellungssinn)

KI – Künstliche Intelligenz

MA – Movement Accuracy (Bewegungsgenauigkeit)

MW – Mittelwert

PRT – Plyometric React Time (plyometrische Reaktionszeit)

RCT – Randomized Controlled Trial (randomisierte kontrollierte Studie)

SC – Stiffness Control (Steifigkeitskontrolle)

SD – Standardabweichung

SDT – Self-Determination Theory (Selbstbestimmungstheorie)

SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

VR – Virtual Reality

ZNS – Zentrales Nervensystem

1. Einleitung

In den letzten Jahren hat sich der Einsatz digitaler Technologien im Sport- und Gesundheitswesen stark erweitert. Besonders **Exergaming**, verstanden als Kombination aus körperlicher Bewegung und interaktiven Spielelementen, hat sich zu einem innovativen Ansatz entwickelt, um Training und Rehabilitation attraktiver und effektiver zu gestalten. Durch den Einbezug gamifizierter Strukturen sollen Motivation, Engagement und letztlich auch die Leistungsentwicklung gefördert werden (Sailer et al. 2017; Staiano & Calvert, 2011). Während die Forschung hierzu bereits vielfältige Befunde zu motivationalen und psychosozialen Wirkungen liefert (Liu & Lipowski, 2021; Wibowo, 2024), ist die Evidenzlage hinsichtlich biomechanischer Effekte bislang unzureichend (Benzing & Schmidt, 2018; Hribernik et al., 2022). Besonders im Bereich der motorischen Kontrolle, der Fähigkeit, Bewegungen zielgerichtet, stabil und anpassungsfähig zu steuern, bestehen relevante Forschungslücken. Zwar weisen einige Exergaming-Studien positive Effekte auf Gleichgewicht und Motorik nach (Cacciata et al., 2019; Manser et al., 2024), jedoch liegen bislang nur wenige methodisch robuste Untersuchungen vor, die sich gezielt mit biomechanischen Parametern in sportlich aktiven Populationen befassen. Hinzu kommt, dass die meisten bisherigen Arbeiten auf einfachen Konsolensystemen beruhen, deren Messgenauigkeit begrenzt ist (Bond et al., 2021; Ramasamy et al., 2023).

Die vorliegende Arbeit setzt hier an: Sie untersucht den Einfluss eines standardisierten Exergame-Trainingsprogramms am drobotec Robotrainer Pro, der durch adaptive Widerstände, hochfrequente Datenerfassung und KI-gestützte Feedbacksysteme biomechanisch valide Messungen ermöglicht. Im Fokus stehen vier zentrale Parameter der motorischen Kontrolle der unteren Extremitäten: Joint Position Sense (Gelenkstellungssinn), Stiffness Control (Steifigkeitsregelung), Movement Accuracy (Bewegungsgenauigkeit) und Plyometric React Time (plyometrische Reaktionszeit), die jeweils spezifische Dimensionen motorischer Leistungsfähigkeit abbilden (Geraedts, 2019). Ziel der Arbeit ist es, differenzierte Erkenntnisse darüber zu gewinnen, inwiefern Exergame-basiertes Training messbare Effekte auf diese Parameter hat. Damit soll ein Beitrag geleistet werden, die Wirksamkeit moderner Exergame-Technologien im sportwissenschaftlichen Diskurs fundierter zu bewerten und praktische Implikationen für Training, Prävention und Rehabilitation abzuleiten.

2. Theoretischer Rahmen

2.1. Gamification & Exergaming

In den vergangenen Jahren hat sich der Einsatz spieltypischer Gestaltungsprinzipien weit über den Bereich der Unterhaltung hinaus auf zahlreiche Anwendungsfelder ausgedehnt. Besonders in pädagogischen und therapeutischen Kontexten werden spielbasierte Mechanismen zunehmend eingesetzt, um das Verhalten, die Motivation oder das Engagement von Nutzer:innen gezielt positiv zu beeinflussen (Sailer et al., 2013; 2017 und Sailer, 2016). Diese Anwendungen werden unter dem Begriff „Gamification“ zusammengefasst. Gamification bezeichnet nach Deterding et al. (2011, S. 9) die Nutzung von Spielelementen in spielfremden Kontexten. Im Gegensatz zur Entwicklung vollständiger Spiele (engl.: „serious games“) werden bei Gamification lediglich einzelne Elemente (engl.: „game design elements“ z. B. Punkte, Abzeichen, Ranglisten, narrative Rahmen, Avatare) in bestehende Anwendungssysteme integriert. Ziel ist es nicht, ein Spiel zu konstruieren, sondern durch die gezielte Übertragung struktureller Spielelemente bestimmte Verhaltensweisen zu initiieren oder verstärken. Gamification ist ebenso abzugrenzen vom „Playful Design“, das stärker auf explorative Spielformen rekurriert, während Gamification regelgeleitete und zielorientierte Spielmechaniken nutzt im Sinne der Unterscheidung zwischen „paidia“ und „ludus“ nach Caillois (1961)¹.

Im analytischen Sinne ist Gamification dabei vom Konzept der „Playfulness“ zu unterscheiden, wengleich sich in der praktischen Nutzung spielerische und spielhafte Zustände häufig überlagern. Während „Playfulness“ vor allem eine innere Haltung oder Einstellung gegenüber einer Tätigkeit beschreibt, ist Gamification eine bewusste Designstrategie. Gamifizierte Anwendungen können zwar spielerisches Denken und Verhalten fördern, verfolgen aber in ihrer Gestaltung primär die Absicht, strukturierte Nutzungserlebnisse, sogenannte „gameful experiences“, zu erzeugen. Gamification folgt somit einem strategischen Vorgehen durch die Nutzung von Spielelementen („gameful design“). Das Gestaltungsziel ist die Erzeugung spielnaher Erfahrungen durch diese Elemente (Deterding et al., 2011, S. 11–13). Einen Überblick zur Abgrenzung von Gamification zu ähnlichen Konzepten veranschaulicht Abbildung 1.

¹paidia (griech.: Spiel) bezeichnet freies, fantasievolles Spielen; ludus (lat.: Spiel) steht für regelgeleitetes, zielorientiertes Spiel (Caillois, 1961)

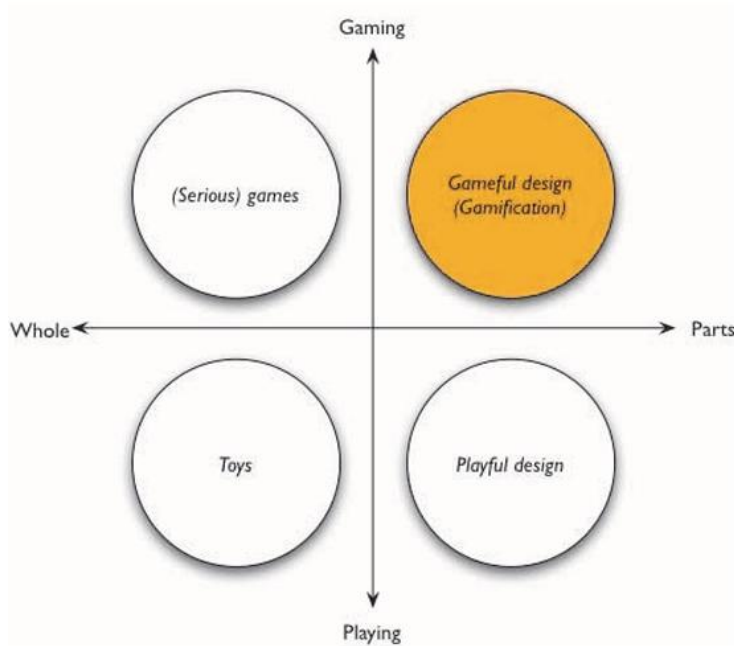


Abbildung 1: Begriffseinordnung Gamification

Quelle: Deterding et al., 2011, S. 13

Obwohl die meisten gamifizierten Anwendungen digital implementiert sind, ist Gamification nicht auf digitale Kontexte beschränkt, sondern bezieht sich allgemein auf jede Nutzung charakteristischer Spielelemente in nicht-spielerischen Zusammenhängen (Deterding et al. 2001, S. 11). In der Literatur werden diese „game design elements“ in unterschiedliche Gruppen eingeordnet. Deterding et al. (2011, S. 13–15) schlagen ein sogenanntes „level model“ vor, das fünf hierarchisch angeordnete Ebenen von Game-Design-Elementen unterscheidet, geordnet von konkret zu abstrakt (siehe Tabelle 1). Je nach Art adressieren sie unterschiedliche psychologische Prozesse und Bedürfnisse. Damit stellt sich zwangsläufig die Frage, auf welcher motivationalen Grundlage solche Interventionen wirken.

Um zu erklären, warum bestimmte Spielelemente Engagement fördern und andere nicht, bedarf es eines differenzierten Verständnisses menschlicher Motivation. In der einschlägigen Motivationsforschung lassen sich verschiedene Perspektiven unterscheiden, etwa behavioristische, kognitive oder interessentheoretische Zugänge (Rheinberg & Vollmeyer, 2018). Für den Kontext von Gamification hat sich jedoch insbesondere die Selbstbestimmungstheorie („Self-Determination Theory“, kurz: SDT) von Deci & Ryan (2000) als theoretisch tragfähig und empirisch anschlussfähig erwiesen (Sailer et al. 2016, S. 6).

Ebene	Beschreibung	Beispiele
Interface-Designmuster	Visuell-interaktive Designelemente und -lösungen	Abzeichen, Ranglisten, Levelanzeigen/ Fortschrittsbalken
Spielmuster und -mechaniken	Wiederkehrende Spielmechaniken des Spielablaufs, losgelöst von konkreter Oberfläche	Zeitlimits, knappe Ressourcen, Situationswechsel/-wendungen
Designprinzipien und -heuristiken	Bewertungs- und Entscheidungsregeln zur Gestaltung und Analyse	Dauerhaftes Spiel, Zielorientierung, vielfältige Spielstile
Spielmodelle	Abstrakte, konzeptuelle Modelle des Spielerlebnisses oder -aufbaus	MDA-Framework (Mechanics-Dynamics-Aesthetics) ¹ , Herausforderung, Fantasie, Neugier, Game Design Atoms ² , CEGE-Framework (Core Elements of the Gaming Experience) ³
Designmethoden	Vorgehensweisen zur systematischen Entwicklung von Spielerlebnissen	Spieltestungen, spielzentriertes und wertbewusstes Design

Tabelle 1: Level Model (game design elements)

nach Deterding et al (2011, S. 13-15)

¹Modell, das den Zusammenhang zwischen Spieldesign (Mechaniken), Spielerinteraktion (Dynamiken) und Spielerlebnis (Ästhetik) systematisch beschreibt

²Konzept von Schell (2008), der Spiele in kleinste Einheiten ("Atoms") zerlegt (etwa: Players, Goals, Rules, Feedback, Conflict, Interaction als Grundbausteine jedes Spiels)

³Konzept von Calvillo-Gómez et al. (2009) identifiziert u. a. Challenge, Curiosity, Control und Fantasy als Schlüsselfaktoren, die das subjektive Erleben im Spielgeschehen beeinflussen

Innerhalb der SDT unterscheidet man zwischen intrinsischer Motivation, einer Tätigkeit, die um ihrer selbst willen ausgeführt wird und extrinsischer Motivation, die durch externe Anreize oder Konsequenzen angestoßen wird (Deci & Ryan, 1985; Ryan et al., 2006). Entscheidend ist jedoch nicht die bloße Art des Anreizes, sondern das Ausmaß, in dem er als selbstbestimmt erlebt wird. So können auch extrinsische Anreize langfristig wirken, obwohl ihnen eine kürzere Wirkung als intrinsischen Anreize nachgesagt wird. Die Theorie postuliert drei grundlegende psychologische Bedürfnisse, deren Befriedigung als Voraussetzung für intrinsische Motivation gilt: Kompetenz, Autonomie und soziale Eingebundenheit (Deci & Ryan, 1985; Ryan & Deci, 2002). Gamifizierte Anwendungen zielen darauf ab, diese Bedürfnisse gezielt durch bestimmte Spielelemente anzusprechen. Punkte, Fortschrittsbalken, Badges oder Ranglisten vermitteln unmittelbares Feedback und machen Leistung sichtbar. So fördern sie das Gefühl von Kompetenz. Autonomie wiederum wird durch Wahlmöglichkeiten, narrative Gestaltung oder individuelle Avatare unterstützt, insbesondere dann, wenn die Spielwelt Entscheidungsfreiheit oder Handlungsbedeutung vermittelt. Das Bedürfnis nach sozialer Eingebundenheit lässt sich durch Teamfunktionen, kooperatives Spiel, soziale Vergleichsmöglichkeiten oder gemeinsame Zielrahmen aktivieren (Sailer et al., 2013, S. 7-8). Empirisch konnten Ryan et al. (2006) in vier Studien zeigen, dass die Zufriedenheit der drei Grundbedürfnisse sowohl das Spielerleben (z. B. Freude, Präsenz) als auch die Bereitschaft zu weiterem Spielverhalten vorhersagt. Besonders Autonomie und Kompetenz erwiesen sich dabei als besonders einflussreiche Faktoren. Ergänzende Befunde von Peng et al. (2012) bestätigen, dass die gezielte Gestaltung bestimmter Spielelemente, etwa durch dynamische Schwierigkeitsanpassung (Kompetenz) oder Avatar-basierte Entscheidungsfreiheit (Autonomie), die jeweilige Bedürfnisbefriedigung erhöhen kann. Mekler et al. (2015) zeigten hingegen, dass die isolierte Verwendung klassischer Elemente wie Punkte oder Ranglisten zwar zu Leistungssteigerungen führen kann, jedoch nicht zwangsläufig das motivationale Erleben stärkt, vor allem dann nicht, wenn sie primär als externe Anreize fungieren (Sailer et al., 2016, S. 7-9).

Die in der Selbstbestimmungstheorie beschriebenen Wirkmechanismen bieten nicht nur eine fundierte Grundlage für die Analyse von Gamification, sondern lassen sich auch auf spezifische Teilbereiche übertragen. Im Bereich Sport stößt man dabei auf sogenannte „Exergames“. Hierbei handelt es sich um digitale Spiele, deren Spielmechanik körperliche Bewegung als zentrales Steuerungselement voraussetzt. Technologische Fortschritte ermöglichten es, Bewegungen des gesamten Körpers in drei Dimensionen zu verfolgen, Reaktionszeiten und Beschleunigungen genau zu messen sowie die Geschwindigkeit und Kraft der Bewegungen zu erfassen (Staiano & Calvert, 2011, S. 94). Der Begriff Exergame setzt sich aus den englischen Wörtern „exercise“ und „game“ zusammen, wobei die Definition in der wissenschaftlichen Literatur uneinheitlich gehandhabt wird (Oh & Yang, 2010, S. 2–3). Vertreter:innen gesundheitswissenschaftlicher Disziplinen bevorzugen oft neutralere Bezeichnungen wie „active video game“ oder „interactive video game“ (Oh & Yang, 2010, S. 3), um Missverständnisse zu vermeiden. Grund ist, dass der Begriff

„exercise“ in der sportwissenschaftlichen Terminologie nach Caspersen et al. (1985, zitiert nach Oh & Yang, 2010, S. 6) eine gezielt geplante, geordnete und wiederkehrende Form körperlicher Betätigung, die darauf abzielt, Fitness zu verbessern oder aufrechtzuerhalten. Folgt man dieser engen Definition, gilt: Nur wenn ein Spiel mit entsprechender Trainingsabsicht und Regelmäßigkeit gespielt wird, erfüllt es die Kriterien eines Exergames. Fehlt diese Intention, handelt es sich trotz sichtbarer körperlicher Aktivität nicht um Exergaming im engeren Sinn. Zudem fördern manche Videospiele zwar Fitness-Komponenten wie Reaktionszeit oder Koordination, können aber vollständig im Sitzen durchgeführt werden (z.B. ein Ego-Shooter mit Maus- und Tastatursteuerung). Oh & Yang (2010, S.7) fürchten, dass eine zu weite Auslegung so fälschlicherweise auch solche sedentären Spielformen als Exergames einstufen. Sie behaupten außerdem, dass die mediale Berichterstattung sowie Forschung außerhalb gesundheitswissenschaftlicher Kontexte den Begriff häufig unkritisch und ohne Rückgriff auf die wissenschaftliche Definition übernommen haben, oft gleichbedeutend mit jeder Form spielerischer körperlicher Aktivität. Die Autoren schlagen daher eine funktionale Neudefinition vor (S. 10): Ein Exergame ist ein interaktives, digitales Spiel, das körperliche Bewegungen erfordert, die über sitzende Aktivität hinausgehen, und dabei Komponenten wie Kraft, Gleichgewicht oder Flexibilität integriert.

Für die vorliegende Arbeit wird der Begriff in Anlehnung an die Literatur wie folgt präzisiert: Im engeren Sinn ist eine Anwendung dann als Exergame einzustufen, wenn eine klare Trainingsintention besteht, die Aktivität strukturiert und wiederholt ausgeführt wird und dadurch messbare Leistungsverbesserungen erzielt werden, unabhängig von der Körperposition. Dies ist insbesondere für Anwendungen wie den drobotec relevant, die zwar im Sitzen ausgeführt werden, jedoch gezielt für das Training der unteren Extremitäten entwickelt wurden. Hier wird die Leistungsdiagnostik zum zentralen Kriterium, um den Übergang von spielerischer Bewegung zu strukturierter, fitnessorientierter Aktivität objektiv zu bestimmen.

2.2. Motorische Kontrolle

Die Motorische Kontrolle beschreibt die Fähigkeit des menschlichen zentralen Nervensystems (kurz: ZNS), zielgerichtete und koordinierte Bewegungen zu planen, auszuführen und bei Bedarf anzupassen. Sie umfasst die Prozesse, die notwendig sind, um sensorische Informationen aufzunehmen, zu verarbeiten und in motorische Kommandos umzuwandeln, welche anschließend die Muskulatur steuern (Geraedts, 2019, S. 9, 29). Damit bildet sie die Grundlage für die Steuerung von Fein- und Grobmotorik und die effiziente Umsetzung komplexer Bewegungsabläufe (Hulatt, 2024). Im sportlichen Kontext ermöglicht eine gut entwickelte motorische Kontrolle die Optimierung von Technik, Koordination und Stabilität und ist sowohl für die Leistungsdiagnostik als auch für die Leistungssteigerung zentral (Geraedts, 2019, S. 32).

Die motorische Kontrolle lässt sich in zwei zentrale Funktionsbereiche unterteilen (Geraedts, 2019, S. 30):

Posturale Kontrolle: Stabilisierung der Körperhaltung gegen die Schwerkraft als Grundlage für dynamische Bewegungen

Phasische Kontrolle: Steuerung der zielgerichteten Ausführung spezifischer Bewegungsaufgaben

Beide Formen sind eng miteinander verflochten: Dynamische Handlungen bspw. ein Wurf oder ein Sprung erfordern stets eine stabile Ausgangsposition, während posturale Anpassungen auch innerhalb der Bewegung kontinuierlich erfolgen.

Die motorische Kontrolle beruht auf einem komplexen Zusammenspiel mehrerer neurofunktioneller Komponenten. Zentrale Bausteine sind dabei die sensomotorische Integration, motorische Programme sowie rückgekoppelte Kontrollmechanismen. Die sensomotorische Integration ermöglicht es dem ZNS, Informationen aus verschiedenen sensorischen Kanälen (propriozeptive, visuelle oder vestibuläre Reize) aufzunehmen und in zielgerichtete Bewegungsreaktionen umzusetzen. Motorische Programme stellen gespeicherte Bewegungsmuster dar, die dem Gehirn erlauben, wiederkehrende oder komplexe Bewegungsabläufe ökonomisch und automatisiert zu steuern (Hulatt, 2024). Auf dieser funktionellen Basis wirken neurophysiologische Steuermechanismen, die Bewegungen planen, ausführen und anpassen. Die Feedforward-Kontrolle ist eine vorausschauende Strategie: Bewegungen werden vorbereitet und ausgelöst, bevor sensorisches Feedback verfügbar ist. Ergänzend kommt die Feedback-Kontrolle zum Einsatz, welche Bewegungsabweichungen während oder nach der Ausführung erkennt und gezielt korrigiert (Geraedts, 2019, S. 29–31; Seidler et al., 2004). In Form von Feedback-Schleifen sichern sie eine fortlaufende Optimierung der Bewegungsausführung in Echtzeit. Durch die koordinierte Zusammenarbeit dieser Komponenten entsteht eine anpassungsfähige, zielgerichtete und stabile Bewegungssteuerung sowohl im Alltag als auch im sportlichen Kontext (Hulatt, 2024).

Aufbauend auf diesen physiologischen Grundlagen existiert eine Vielzahl theoretischer Modelle zur Erklärung der motorischen Kontrolle. Die Modelle lassen sich grob in folgende Kategorien einteilen (Birklbauer, 2015, S. 7–10):

- Informationsverarbeitende Modelle
- Optimierungsmodelle und Effektivitätsprinzipien
- Frequenzkodierungsmodelle
- Systemdynamische Modelle

Informationsverarbeitende Modelle betrachten Bewegung als Abfolge definierter Verarbeitungsschritte. Dazu zählen kybernetisch-orientierte Modelle (Closed-Loop- und Open-Loop-Steuerung), programmorientierte Modelle, generalisierte motorische Programme (GMP), das Masse-Feder-Modell sowie Mischformen. Optimierungsmodelle und Effektivitätsprinzipien erklären Bewegung anhand der Minimierung von Zeit, Energie oder mechanischen Größen.

Frequenzkodierungsmodelle fokussieren auf die neuronale Kodierung von Bewegungsfrequenzen. Systemdynamische Modelle (z.B. die Gestaltpsychologie, der bewegungsphysiologische Ansatz nach Bernstein, der ökologische Ansatz nach Gibson, die Chaostheorie oder die Synergetik-Lehre) betonen die Selbstorganisation und die Wechselwirkung zwischen Organismus, Aufgabe und Umwelt. Parallel dazu unterscheidet die Forschung zwischen dem Motor Approach (Fokus auf interne Steuermechanismen) und dem Action Approach (Fokus auf die Kopplung von Wahrnehmung und Handlung), was die Wahl geeigneter Analysemethoden maßgeblich beeinflusst. Ergänzend liefert die biomechanische Perspektive eine physikalisch-technische Beschreibung von Bewegung. Sie untersucht die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Körpersegmenten, Gelenken, Muskeln und äußeren Kräften und zerlegt Bewegungen in messbare Größen wie Kraft, Impuls, Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Gelenkwinkel (Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft Landesverband Westfalen [DLRG], 2004, S. 5-8). Für die Leistungsdiagnostik im Sport, aber auch in rehabilitativen Kontexten, ist diese Herangehensweise zentral (Bizzini, 2000, S. 60).

Für die praktische Erfassung und Bewertung stehen zahlreiche diagnostische Methoden und technische Werkzeuge zur Verfügung. In der motorischen Entwicklungsdiagnostik sind besonders etabliert (Wagner et al., 2024):

- Entwicklungstest 6 Monate bis 6 Jahre (kurz: ET 6-6)
- Movement Assessment Battery for Children – Second Edition (kurz: MABC-2; deutsch: Bewegungs-Bewertungstest für Kinder – 2. Auflage)
- Bruininks-Oseretzky Test of Motor Proficiency – Second Edition (kurz: BOT-2; deutsch: Bruininks-Oseretzky-Test der motorischen Fähigkeiten – 2. Auflage)
- Test of Gross Motor Development – Third Edition (kurz: TGMD-3; deutsch: Test der grobmotorischen Entwicklung – 3. Auflage)
- Deutscher Motorik-Test 6–18 (kurz: DMT 6–18)
- Motorische Leistungsserie (kurz: MLS)
- European Fitness Badge (kurz: EFB; deutsch: Europäisches Fitnessabzeichen)

Diese Verfahren differieren in Altersfokus, Zielparametern und Testaufwand, liefern jedoch wertvolle Informationen zu motorischen Basiskompetenzen und deren Entwicklung. Ergänzend kommen sportmotorische Tests (Büsch & Utesch, 2021) zum Einsatz, die gezielt spezifische Fähigkeiten wie Kraft, Ausdauer, Beweglichkeit, Schnelligkeit oder Koordination messen. Gängige Verfahren sind die Bewegungsanalyse per Videoaufzeichnung, die eine qualitative Bewertung und Korrektur ermöglicht sowie die Elektromyographie (EMG), die Muskelaktivitäten während Bewegungen quantitativ erfasst. Darüber hinaus liefern biomechanische Modellierungen auf Basis mathematischer Strukturen Einblicke in Kraftverläufe und Bewegungsdynamiken (Hulatt, 2024). Für weniger aufwendige Erhebungen eignen sich einfache Verfahren wie Funktionstests, Selbst- und

Fremdeinschätzungsskalen oder Verhaltenstests (Bös & Tittlbach, 2021). Technologische Entwicklungen haben die diagnostischen Möglichkeiten erheblich erweitert (s. Tab. 2).

Werkzeug	Funktion
Motion-Capture-Systeme	Visualisierung und Quantifizierung von Bewegungen im dreidimensionalen Raum
Kraftmessplatten	Erfassung der Bodenreaktionskräfte, insbesondere bei Sprung- und Landebewegungen
VR-Simulatoren	Immersive Trainingsumgebungen zur Verbesserung von Bewegungspräzision und Koordination

Tabelle 2: Auswahl technologischer Werkzeuge zur Bewegungsanalyse

Eigene Darstellung in Anlehnung an Hulatt (2024)

Besonders in der neurologischen Rehabilitation kommen vermehrt robotergestützte Systeme zum Einsatz. Sie bieten präzise Bewegungsunterstützung, automatisiertes Feedback und objektive Leistungsdatenerfassung, wobei Bauarten von Endeffektor- bis zu Exoskelett-Systemen reichen. Diese Technik erlaubt sowohl passives als auch aktives Training und kann Rehabilitationsprozesse beschleunigen sowie individuell anpassen. Trotz ihres noch jungen Entwicklungsstands wird der Robotik-Einsatz als vielversprechender Ansatz für Therapie, Prävention und leistungsorientiertes Training bewertet (Müller & König, 2023).

Während im klassischen Setting äußere Lastgrößen (z. B. Gewicht, Wiederholungen, Zeit) festgelegt und progressiv angepasst werden, wird im Exergaming die Belastung vor allem durch Interaktionsanforderungen des Spiels reguliert, etwa durch Reaktionsgeschwindigkeit, Komplexität der Aufgaben oder adaptive Schwierigkeitsgrade. Moderne Systeme wie der in der späteren Intervention genutzte drobotec kombinieren beide Ansätze: Sie koppeln physiologische Steuergrößen (Widerstände, Bewegungsumfang) mit spielerisch motivierten Reizen (z. B. Parcours, Gegner, Zeitdruck). Dadurch entsteht eine doppelte Belastungssteuerung, die sowohl klassische trainingswissenschaftliche Prinzipien berücksichtigt als auch motivationale Faktoren adressiert.

Für die vorliegende Arbeit bilden die in Kapitel 2.1 und 2.2 dargestellten theoretischen Grundlagen den Ausgangspunkt, um zu untersuchen, inwiefern Exergaming-basierte Interventionen die motorische Kontrolle beeinflussen können. Die beschriebenen Modelle, Kontrollmechanismen, biomechanischen Perspektiven und Diagnoseverfahren dienen als Rahmen, um die erhobenen Messgrößen systematisch einzuordnen und ihre Bedeutung für Leistungsdiagnostik, Trainingssteuerung und rehabilitative Anwendungen zu bewerten. Auf dieser Grundlage wurden vier zentrale Dimensionen der motorischen Kontrolle abgeleitet: Wahrnehmung, Stabilität, Koordination und Anpassungsfähigkeit. Diese Dimensionen lassen sich empirisch durch spezifische

Kennwerte erfassen, die im Rahmen der Untersuchung operationalisiert wurden: Der Joint Position Sense (JPS) bildet die propriozeptive Wahrnehmung ab, Stiffness Control (SC) beschreibt die Stabilitätsregulation, Movement Accuracy (MA) steht für die koordinative Präzision und die Plyometric React Time (PRT) spiegelt die Anpassungsfähigkeit wider (vgl. Kap. 4). Durch die Messung dieser Parameter mit dem drobotec Robotrainer, der hochfrequente Datenerfassung und KI-gestütztes Feedback ermöglicht, wird eine biomechanisch valide Analyse gewährleistet, die den theoretischen Rahmen mit der praktischen Umsetzung verbindet.

3. Stand der Forschung

3.1. Empirische Befundlage in der Exergaming-Forschung

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Exergaming hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Neben konzeptionellen Arbeiten liegen mittlerweile zahlreiche empirische Studien vor, die Einsatzfelder und Effekte in Sport, Prävention und Rehabilitation beleuchten. Zur besseren Vergleichbarkeit der empirischen Studien wurde eine systematisierte Übersicht erstellt (s. Tab. 3). Diese fasst zentrale Angaben zu Studiendesign, Stichprobe, Intervention/ Inhalten, Ergebnissen und zur methodischen Bewertung zusammen und dient als Grundlage für die Ableitung der Forschungsrelevanz der vorliegenden Arbeit. Abbildung 2 veranschaulicht die Verteilung der Arbeiten nach Zielgruppen, während Abbildung 3 die Verbindung von Zielgruppen und thematischen Schwerpunkten verdeutlicht.¹

Autor(en) Jahr	Studien- typ	Zielgruppe bzw. Stich- probe/ Kontext	Zentrale In- halte/ Intervention	Zentrale Er- gebnisse	Methodik-be- wertung
Benzing & Schmidt (2018)	Systematic Review (SWOT)	Exergaming in Gesundheitsförderung (Kinder/ Jugendliche)	Potenziale & Grenzen in Fitness, Bildung, Gesundheit	Förderung körperlicher Aktivität, fehlende Langzeiteffekte	+ Breiter Überblick; – keine Metaanalyse, keine Primärdaten
Cacciata et al. (2019)	Systematic Review (PRISMA)	614 ältere Erwachsene (Ø 73,6 J., 9 RCTs + 10 weitere)	Exergaming vs. Kontrollgruppen, Fokus Lebensqualität & Funktion	Teilweise Verbesserungen, heterogene Befunde	+ PRISMA – uneinheitliche Designs
Bond et al. (2021)	Narrative Review	Herz-Kreislauf-Patient:innen, kardiologische Reha	Vergleich traditionelle CR vs. Exergaming/ VR	Potenzial: Motivation, Selbstwirksamkeit, Adhärenz;	+ Innovative Perspektive – keine systematische Evidenz

¹ Bei den Abbildungen nicht berücksichtigt wurden Tóth & Lógó (2018), Nor et al. (2020) und Hribernik et al. (2022), da diese Arbeiten keinen unmittelbaren Bezug zu Exergaming aufweisen

Tóth & Lógó (2018)	Querschnittsstudie	App-User (n unbekannt)	Gamification-Elemente in Sport-Tracking-Apps	Extrinsische Belohnungen → kurz Motivation ↑, Langzeitbindung gering	+ praxisnah – keine Validität, keine objektiven Daten
Liu & Lipowski (2021)	Interventionsstudie	150 Sportstudierende	Tennisunterricht mit/ohne Gamification	Gamification → höhere Motivation & Leistung	+ Kontrollgruppe – subjektiv gemessen, keine Langzeitdaten
Nor et al. (2020)	Narrative Review	33 VR-Studien im Sport	UX-Faktoren bei VR im Sport	Feedback/ Zielstruktur ↑ UX, Designmängel ↓ UX	+ praxisnah – nicht systematisch
Arufe-Giráldez et al. (2022)	Systematic Review	17 Schulstudien	Gamification in Schulsport	Motivation/ Engagement ↑, kaum Leistungsdaten	+ systematisch – begrenzte Datenbasis
Schutte (2024)	Laborstudie	22 Teilnehmende	Gamifiziertes vs. Standard-Feedback	Gamification → mehr Fehler, aber stabilere Kraftausführung	+ objektive Messung – kleine Stichprobe
Barratt (2019)	RCT (Thesis)	20 Schulter-OP-Patient:innen	Kinect-Exergames vs. Standard-Physio	Beide Gruppen Fortschritte, keine Unterschiede	+ RCT – kleine Stichprobe, keine Langzeitdaten
Ramasamy et al. (2023)	Laborstudie	7 Proband:innen	VR-Squats (DDA) vs. klassische Squats	Muskelaktivität ↓, Knieinstabilität ↓	+ EMG – sehr kleine Stichprobe
González-González et al. (2018)	Narratives Review	Kinder & Jugendliche	Exergaming/eSports in Prävention	Motivation ↑, Aktivität ↑	+ breiter Überblick – nicht systematisch
Utama-yasa et al. (2025)	Quasi-Experiment	30 Grundschul-kinder	6 Wochen PE ¹ : Kontrolle vs. Gamification vs. VR	VR → beste Koordination/Reaktion	+ differenzierte Tests – kleine Stichprobe

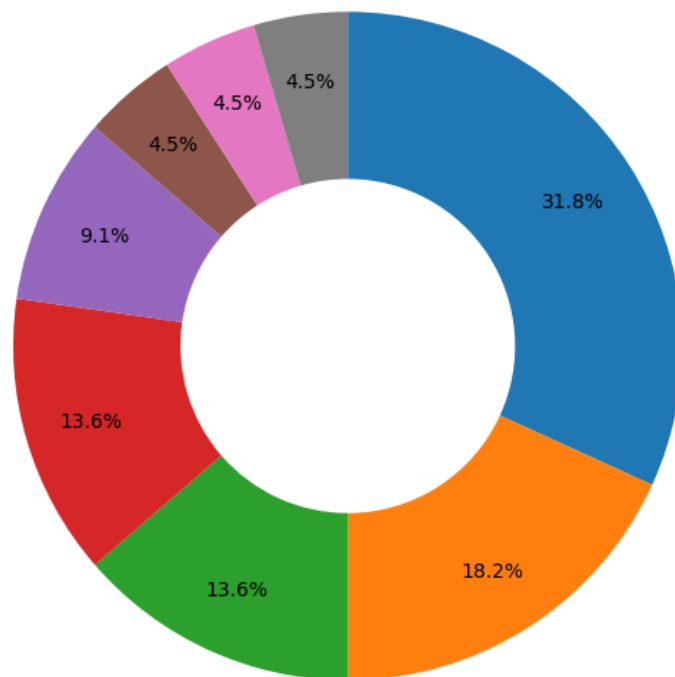
Wibowo (2024)	Präexperimentelle Studie	90 Grundschul-kinder	8 Wochen Gamification im PE ¹	Selbstwert, Zufriedenheit, Motorik ↑	+ große Stichprobe – ohne Kontrollgruppe
Hribernik et al. (2022)	Systematic Review	144 Studien	Real-Time Biomechanical Feedback	Großes Potenzial für Sport/Reha	+ breite Basis – sehr technisch, wenig Exergaming
Haas (et al.) (2020–2025)	6 Experimentelle Labor- und Vergleichsstudien)	7–24 Athlet:innen/ Patient:innen	ExerCube-Übungen (Squats, PUNCHES etc.)	Squats/Lunges später in Reha sinnvoll, Sprünge riskant; Frauen → höheres Risiko für Verletzung	+ präzise Analysen – kleine Stichproben
Graf et al. (2023, 2024)	Entwicklungsarbeiten	Reha-Projekte	Nutzerzentriertes Exergame-Design für Knie-Reha	Motivation ↑, physiotherapeutisch integriert	+ praxisnah, interdisziplinär – noch kein Wirksamkeitsnachweis
Martin-Niedecken et al. (2023)	Konferenzbeitrag	Überblick	Exergames in Prävention, Reha, Sport	Positive Effekte auf Kognition, Ausdauer, Motivation	+ breite Übersicht – keine eigenen Daten
Manser et al. (2024)	Meta-Analyse	31 RCTs (ältere Erwachsenen)	Exergaming für Kognition	Höchste Effekte bei ökologisch validen Formaten	+ hohe Evidenz – Fokus auf Kognition>
Müller & König (2024)	Interventionsstudie	28 ältere Erwachsene	12 Sessions mit variierenden Spielen/Schwierigkeit	Höheres Tempo ↑ Leistung, hohe Schwierigkeit ↓ Aktivität	+ differenzierte Messung – geringe Generalisierbarkeit

Tabelle 3: Übersicht empirischer Studien, Reviews, Entwicklungsarbeiten und Konferenzbeiträge zu Exergaming/ Gamification/ Biomechanik im Sport-, Präventions- und Rehabilitationskontext

¹PE=physical education (deutsch: Schulsportunterricht)

Abbildung 2: Verteilung der berücksichtigten Arbeiten nach Zielgruppe

Eigene Darstellung



- | | |
|--|---|
| ■ gesunde sportliche Proband:innen (7) | ■ Kinder (2) |
| ■ klinische Patient:innen (4) | ■ Studierende (1) |
| ■ Kinder/Jugendliche (3) | ■ klinische Patient:innen/ gesunde sportliche Proband:innen (1) |
| ■ Ältere Erwachsene (3) | ■ Breite Nutzergruppe (1) |

Abbildung 3: Verknüpfung von Zielgruppen und thematischen Schwerpunkten berücksichtigter Arbeiten

Eigene Darstellung

Zielgruppe	Reha	Sportpraxis Themenfeld	Sportpraxis/ Reha
Breite Nutzergruppe -	0	0	1
Kinder -	0	2	0
Kinder/Jugendliche -	0	3	0
Studierende -	0	1	0
gesunde sportliche Proband:innen	2	1	4
klinische Patient:innen	4	0	0
klinische Patient:innen/ gesunde sportliche Proband:innen	0	0	1
Ältere Erwachsene	1	2	0

Einen breiten Überblick bietet die SWOT-Analyse von **Benzing und Schmidt (2018)**, die Chancen und Risiken von Exergaming im Kinder- und Jugendbereich darstellt. Hervorgehoben werden Potenziale wie gesteigerte Motivation zur körperlichen Aktivität, eine hohe Attraktivität durch Spielmechaniken sowie die Möglichkeit zur Individualisierung und Spezifizierung des Trainings. Gleichzeitig verweisen die Autoren auf Schwächen in der praktischen Umsetzung, methodische Grenzen in der Evidenzlage und die Gefahr erhöhter Bildschirmzeit.

Einen Schwerpunkt der Forschung liegt auf motivationalen Effekten. In einer Interventionsstudie mit Sportstudierenden konnten **Liu und Lipowski (2021)** zeigen, dass gamifizierter Tennisunterricht im Vergleich zum konventionellen Unterricht zu signifikant höheren Werten bei intrinsischer Motivation und introjizierter Regulation führte. Zudem erbrachte die Interventionsgruppe bessere akademische Leistungen und berichtete ein gesteigertes Interesse am Tennislernen. Auch im schulischen Setting zeigen sich positive Resultate: **Wibowo (2024)** konnte nach einer achtwöchigen gamifizierten Intervention im Sportunterricht Verbesserungen in Selbstwertgefühl, Zufriedenheit und motorischen Fähigkeiten der Schüler:innen nachweisen.

Anders gelagert sind die Befunde zu Sport-Tracking-Anwendungen. **Tóth und Lógó (2018)** zeigten, dass diese Systeme primär auf extrinsische Belohnungsmechanismen (Abzeichen, Ranglisten, Intensitätswerte) und die systematische Datenerfassung setzen. Während solche Elemente in der Entdeckungs- und Einstiegsphase die Motivation erhöhen können, fehlen ihnen nachhaltige Spielmechaniken zur langfristigen Bindung. Für hoch intrinsisch motivierte Sportler:innen sind

diese Belohnungssysteme zudem weitgehend irrelevant. Ergänzend fassten **Arufe-Giráldez et al. (2022)** in einem systematischen Review positive Effekte gamifizierter Interventionen auf Motivation und Engagement im Schulsport zusammen, wiesen jedoch auf eine mangelnde Erfassung von Leistungsparametern hin.

Zunehmend werden auch funktionelle und physiologische Wirkungen untersucht. **Schutte (2024)** untersuchte in einer biomechanischen Analyse den Einsatz einer gamifizierten Feedback-Schnittstelle bei einer motorischen Aufgabe mit plantarer Flexion. Es zeigte sich, dass die Gamification-Gruppe in mehreren Tests größere Fehler bei der Kraftverfolgung machte, gleichzeitig aber in etwa der Hälfte der Tests ein gleichmäßigeres Drehmoment erzielte. Hinsichtlich des berichteten Engagements ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen, wenngleich die qualitative Inhaltsanalyse auf eine höhere Betonung von „Spaß“ in der Gamification-Gruppe hinwies. Insgesamt lassen die Befunde darauf schließen, dass Gamification zwar zu stabileren, jedoch weniger präzisen Bewegungen führen kann, ohne das wahrgenommene Engagement messbar zu steigern. **Cacciata et al. (2019)** führten ein systematisches Review zu Exergaming bei älteren Erwachsenen durch (19 Studien, >1.000 Teilnehmende) und berichteten in mehreren Studien über signifikante Verbesserungen in Gleichgewicht, Mobilität, Ganggeschwindigkeit und gesundheitsbezogener Lebensqualität. Gleichzeitig blieb die Evidenz heterogen: Unterschiede in Studiendesigns, Interventionsarten und Messmethoden erschwerten eindeutige Schlussfolgerungen. Einen spezifischen Blick auf die kardiologische Rehabilitation werfen **Bond et al. (2021)**, die Exergaming und Virtual Reality als vielversprechende Ansätze zur Steigerung von Motivation, Selbstwirksamkeit und Trainingsadhärenz einordnen, jedoch eine geringe Zahl hochwertiger klinischer Studien und deutliche Forschungslücken hervorheben.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal liegt in der eingesetzten Technologie. Während handelsübliche Systeme wie Wii Fit oder Kinect niedrigschwellig und kostengünstig sind, weisen sie Grenzen in Messgenauigkeit und Individualisierung auf. Demgegenüber ermöglichen robotergestützte High-End-Systeme präzisere Analysen, adaptive Widerstände und detailliertes Feedback. **Hribernik et al. (2022)** beschreiben in ihrem systematischen Review zu Real-Time-Biomechanical-Feedback-Systemen die Entwicklung solcher sensorbasierten Technologien und betonen deren Potenzial für motorisches Lernen und Rehabilitationsprozesse, auch wenn standardisierte Anwendungsprotokolle bisher fehlen.

Weitere Studien liefern ein differenziertes Bild: **Barratt (2019)** zeigte in einer randomisierten kontrollierten Untersuchung zur Schulterrehabilitation, dass Exergames vergleichbare funktionelle Fortschritte wie klassische Physiotherapie erzielen können, wenngleich keine signifikanten Gruppenunterschiede nachweisbar waren. **Ramasamy et al. (2023)** berichteten in einer experimentellen Studie mit sieben Proband:innen, dass ein VR-basiertes, feedbackgesteuertes Exergame im Vergleich zu konventionellen Kniebeugen sowohl eine signifikant geringere Muskelaktivität als

auch eine reduzierte Knieinstabilität bewirkte. Die Autoren interpretieren dies als effizientere Muskelkoordination und stabilere Bewegungsausführung mit Vorteilen gerade im Rehabilitationskontext. Auch im Schulkontext finden sich vielversprechende Ergebnisse: **Utamayasa et al. (2023)** untersuchten in einer quasi-experimentellen Studie 30 Grundschüler:innen, die entweder traditionellen Sportunterricht, gamifiziertes Sporttraining oder eine Kombination aus VR und Gamification in der Schulsportstunde erhielten. Insbesondere das sechswöchige VR-Programm führte zu signifikanten Verbesserungen in Koordination und Reaktionszeit (z. B. 7-m-Einbeinlauf). Zudem bevorzugten die Kinder die gamifizierten Formate deutlich gegenüber herkömmlichem Unterricht.

Bei älteren Erwachsenen untersuchten **Müller und König (2024)**, wie Intensität und Aufgabenkomplexität Exergaming beeinflussen. Ihre Befunde deuten darauf hin, dass höhere Geschwindigkeiten und Schwierigkeitsgrade kurzfristig Aktivität und Leistung steigern, jedoch schneller Ermüdung hervorrufen. **Manser et al. (2024)** konnten in einer systematischen Meta-Analyse zeigen, dass insbesondere ökologisch valide, interaktive Formate mit klarer Zielorientierung die größten Effekte erzielen.

Besonders prägnant sind die Ergebnisse des **Arbeitskreises Exergames (Martin-Niedecken et al., 2023)**, der auf dem dvs-Hochschultag verschiedene Studien präsentierte. Gezeigt wurden u. a. signifikante Verbesserungen exekutiver Funktionen (kognitive Flexibilität/ geteilte Aufmerksamkeit) bei jugendlichen Sportler:innen nach achtwöchigem Exergame-Training. Zudem wurde berichtet, dass Exergames im Vergleich zu moderatem Ausdauertraining ähnliche Verbesserungen kardiovaskulärer Risikofaktoren und sogar überlegene Steigerungen der Ausdauerleistung ermöglichen können. Parallel wurde ein interdisziplinärer Entwicklungsprozess vorgestellt, bei dem auf Basis biomechanischer Analysen, Nutzerbedarfen und evidenzbasierter Trainingsprinzipien rehabilitationsspezifische Exergames entwickelt wurden (Graf et al., 2023).

Ergänzend dazu wurden innerhalb des Arbeitskreises umfangreiche Studien von **Haas und Kolleg:innen (2020–2025)** durchgeführt, die ausführlich biomechanische Vorteile und Risiken im Reha-Bereich aufzeigen. Bereits in der Masterarbeit von Haas (2020) wurde deutlich, dass bestimmte Übungen im ExerCube¹ (z. B. Squats, Lunges) rehabilitativ sinnvoll eingesetzt werden können, während Sprünge mit einem erhöhten Risiko für ACL¹-Belastungen verbunden sind. Aufbauend darauf belegten Haas et al. (2023), dass dynamische Bewegungen wie High-Touches oder Punches in gesunden Athlet:innen erhöhte Knievalgus- und Rotationswinkel hervorrufen, die mit einem gesteigerten Verletzungsrisiko assoziiert sind. Weitere Studien bestätigten diese kritischen Befunde: Diese speziellen Exergame-Übungen führten bei weiblichen Athletinnen zu biomechanisch ungünstigeren Bewegungsmustern (Haas et al., 2024a, 2025), was das bekannte erhöhte ACL-Risiko von Frauen im Sport biomechanisch untermauert. Untersuchungen mit Patient:innen nach Knieverletzungen zeigten zudem, dass Exergames nicht in frühen Rehabilitationsphasen eingesetzt werden sollten, sondern erst in späten „Return-to-Sport“-Phasen sicher integrierbar sind (Haas et al., 2024b). Auch Fragen der Bewegungsvariabilität wurden adressiert. Haas et al. (2024c) zeigten in einem realistischen Exergaming-Szenario, dass Athlet:innen mit hoher Variabilität und risikobehafteten Bewegungsmustern gezielte Instruktionen benötigen, während Personen mit geringer Variabilität ausreichende Erholungszeiten brauchen, um Überlastungen zu vermeiden. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Exergaming in rehabilitativen Settings zwar motivierend und vielseitig einsetzbar ist, aber biomechanische Risiken nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

Die bisherige Evidenz zu Exergaming ist heterogen. Am stärksten belegt sind motivationale Effekte, die in verschiedenen Altersgruppen konsistent Verbesserungen von Motivation und Adhärenz zeigen. Funktionelle und physiologische Wirkungen, etwa auf Gleichgewicht oder kardiovaskuläre Parameter, sind zwar nachweisbar, aber methodisch weniger abgesichert. Für biomechanische Effekte liegen bislang nur kleine, spezialisierte Studien vor, die sowohl Chancen als auch Risiken aufzeigen. Insgesamt lässt sich Exergaming als vielversprechende Ergänzung klassischer Trainings- und Rehabilitationsmethoden einordnen, deren Einsatz jedoch sorgfältig an Zielgruppe und Kontext (bspw. Rehapphase oder Trainingsschwerpunkt) angepasst werden muss.

¹Der ExerCube ist ein immersives Exergaming-System, bei denen Spieler:innen in einem würfelförmigen Raum interaktive Projektionen erleben. Es verbindet körperliche Bewegungen mit kognitiven Aufgaben und passt Intensität sowie Schwierigkeitsgrad adaptiv an das Leistungsniveau an (Deutsches Gesundheitsprotal, 2024).

3.2. Forschungslücken und Relevanz der vorliegenden Arbeit

Trotz zahlreicher positiver Befunde weist die bisherige Forschung Lücken auf. Systematische Reviews (z. B. Cacciata et al., 2019; Manser et al., 2024) bemängeln kleine Stichproben, kurze Interventionszeiträume und fehlende Standardisierung. Auch Nor et al. (2020) betonen die Notwendigkeit einer systematischeren und differenzierteren Untersuchung. Auffällig ist zudem, dass die Mehrzahl der Studien Kinder, ältere Erwachsene oder klinische Patient:innen adressiert, während sportlich aktive Erwachsene bislang kaum systematisch untersucht wurden.

Ein weiterer kritischer Punkt betrifft die Technologie. Die meisten Arbeiten nutzen kommerzielle Konsolensysteme, die zwar niedrigschwellig einsetzbar sind, jedoch in Genauigkeit und Anpassungsfähigkeit limitiert bleiben. Demgegenüber liegen nur wenige Studien mit robotergestützten High-End-Systemen, die präzisere Bewegungsanalysen und adaptive Widerstände ermöglichen (Ramasamy et al., 2023; Schutte, 2024). Ein direkter systematischer Vergleich dieser Technologien mit klassischen Trainingsmethoden liegt bislang nicht vor.

Auch die Erhebung biomechanischer Parameter ist aktuell unzureichend. Zwar nutzen einzelne Arbeiten (Barratt, 2019; Ramasamy et al., 2023; Haas et al., 2023–2025) hochauflösende Messverfahren, doch fehlt es insgesamt an robusten längsschnittlichen Designs mit standardisierten Outcome-Maßen. Ungeklärt sind auch Fragen der Übertragbarkeit in den Leistungssport sowie mögliche Langzeiteffekte.

Die vorliegende Arbeit setzt hier an: Sie untersucht den Einfluss eines dreiwöchigen, KI-gestützten Exergaming-Trainings mit einem Roboter-System (ddrobotec) unter standardisierten Laborbedingungen. Im Zentrum stehen klar definierte Parameter der motorischen Kontrolle. Durch die Kombination präziser Messtechnik und einer homogenen Stichprobe sportlich aktiver Erwachsener soll eine belastbare Evidenzbasis entstehen, die den gezielten Einsatz robotergestützter Exergames in Trainings- und Rehabilitationsprogrammen fundiert.

4. Methodik

4.1. Ableitung der Fragestellung und Hypothesen

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Exergaming weist trotz zahlreicher positiver Befunde Forschungslücken auf (vgl. Kap. 3.2). Insbesondere fehlen methodisch robuste Untersuchungen mit sportlich aktiven Erwachsenen zu biomechanischen Parametern sowie Studien, die fortgeschrittene Technologien wie robotergestützte High-End-Systeme einsetzen. Während motivationale Effekte in der Literatur mehrfach nachgewiesen sind, liegen für Leistungssteigerung bislang nur wenige Befunde vor. Hier setzt die vorliegende Arbeit an.

Die Untersuchungsplanung orientiert sich an den in Kapitel 2.2 dargestellten theoretischen Grundlagen der motorischen Kontrolle. Die dargestellten Modelle verdeutlichen, dass motorische Kontrolle nicht eindimensional verstanden werden kann, sondern ein Zusammenspiel aus sensorischer Wahrnehmung, stabilisierender Regulation, koordinativer Präzision und adaptiver Handlungsfähigkeit erfordert. Für die empirische Forschung ist es daher notwendig, diese abstrakten Funktionsbereiche in überprüfbare Messgrößen zu übersetzen. Aufbauend auf dem funktionalen Rahmen von Geraedts (2019) sowie systemdynamischen Ansätzen (Seidler, Noll & Thiers, 2004; Birklbauer, 2015) lassen sich vier zentrale Dimensionen ableiten, die als Grundlage der Operationalisierung dienen:

- **Wahrnehmung** durch propriozeptive Prozesse
- **Stabilität** durch posturale und dynamische Regulation
- **Koordination** durch die präzise Steuerung komplexer Bewegungen
- **Anpassungsfähigkeit** durch reaktive Umschaltungen zwischen Wahrnehmung und Handlung

Damit wird das breite theoretische Spektrum der motorischen Kontrolle in ein empirisch handhabbares Modell überführt. Die gewählten Parameter repräsentieren jeweils eine zentrale Dimension, wodurch ein differenzierter Zugang zur Analyse der Effekte von Exergaming-Interventionen auf die motorische Kontrolle entsteht.

Für die empirische Erfassung werden diese Dimensionen pragmatisch auf vier messbare Parameter übertragen:

- **Joint Position Sense (JPS; deutsch: Gelenkstellungssinn)** als Indikator für Wahrnehmung,
- **Stiffness Control (SC; deutsch: Steifigkeitsregelung)** als Maß für Stabilität,

- **Movement Accuracy (MA; deutsch: Bewegungsgenauigkeit)** als Maß für Koordination sowie
- **Plyometric React Time (PRT; deutsch: plyometrische Reaktionszeit)** als Kennwert für Anpassungsfähigkeit

Auf dieser Grundlage wird folgende Fragestellung verfolgt:

Welchen Effekt hat ein dreiwöchiges, KI-gestütztes Exergaming-Training mit dem ddrobotec-Robotrainer Pro auf ausgewählte biomechanische Parameter der unteren Extremitäten bei sportlich aktiven Erwachsenen?

Daraus ergibt sich die übergeordnete Hypothese der Arbeit:

Ein dreiwöchiges Exergaming-Training mit zwei Einheiten pro Woche am ddrobotec-Robotrainer Pro verbessert die motorische Kontrolle der unteren Extremitäten in den genannten vier Dimensionen signifikant.

Zur Überprüfung werden folgende spezifische Hypothesen formuliert:

- **H1:** Signifikante Verbesserung von JPS.
- **H2:** Signifikante Verbesserung von SC.
- **H3:** Signifikante Verbesserung von MA.
- **H4:** Signifikante Verbesserung von PRT.

4.2. Forschungsdesign

Die Untersuchung wurde als quantitative empirische Studie im Rahmen eines Prä-Post-Längsschnittdesigns über einen Zeitraum von drei Wochen durchgeführt (16.05.–31.05.2025). Jede Teilnehmerin und jeder Teilnehmer absolvierte zwei Trainingseinheiten pro Woche, sodass insgesamt sechs Interventionseinheiten stattfanden. Das Vorgehen ist deduktiv angelegt: Die in Kapitel 2.2 dargestellten theoretischen Grundlagen der motorischen Kontrolle bilden die Basis für die Ableitung spezifischer Hypothesen, die anschließend empirisch anhand statistischer Verfahren überprüft werden. Damit folgt die Arbeit einem hypothesenprüfenden Ansatz. Aufgrund der explorativen Zielsetzung und des begrenzten Rahmens wurde bewusst auf die Einrichtung einer Kontrollgruppe verzichtet. Ziel war es, zunächst Hinweise auf die prinzipielle Wirksamkeit im biomechanischen Sinne eines dreiwöchigen Exergaming-Trainings mit einem robotergestützten High-End-System zu gewinnen. Die Rekrutierung erfolgte aus der Belegschaft eines Rehabilitationszentrums, das über einen ddrobotec Pro Robotrainer verfügt. Da das Gerät dort regelmäßig eingesetzt wird, war von einer gewissen Vorerfahrung der Teilnehmenden mit dem System auszugehen. Dieser Aspekt wurde im Rahmen der Rekrutierung zusätzlich erfragt und dokumentiert (s. Tab. 4 in Kap. 5.1, Spalte 8). Die Datenerhebung erfolgte

standardisiert über die integrierten Messprotokolle des Roboter-Systems, ergänzt durch die Erfassung demographischer Basisdaten über einen Fragebogen.

4.3. Stichprobenuntersuchung

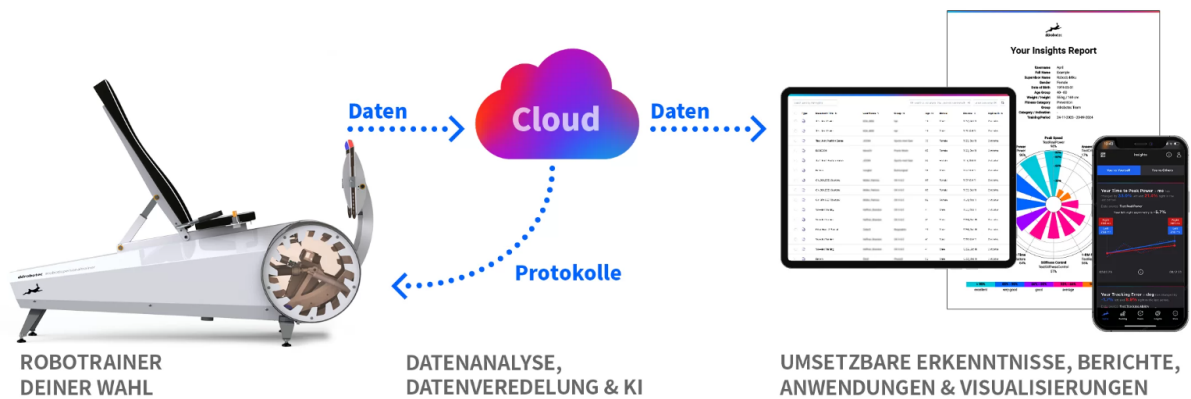
Die Stichprobe umfasste 17 sportlich aktive Erwachsene aus dem Mitarbeiterkreis eines renommierten Rehabilitationszentrums, das über einen ddrobotec Robotrainer Pro verfügt. Es handelt sich um eine Gelegenheitsstichprobe ohne Zufallsauswahl und zweckgerichteten Einschlusskriterien. Als Einschlusskriterium galt eine regelmäßige sportliche Aktivität, während akute Verletzungen der unteren Extremitäten ein Ausschlusskriterium darstellten. Aufgrund der spezifischen Rekrutierungsumgebung war von vergleichbaren Ausgangsbedingungen innerhalb der Stichprobe auszugehen. Die Teilnehmenden wurden im Fragebogen zu ihren regelmäßig ausgeübten Sportarten, ihrem wöchentlichen Trainingsumfang sowie relevanten gesundheitlichen Einschränkungen befragt. Probandenausfälle traten nicht auf, sodass alle Teilnehmenden in die Datenauswertung einbezogen werden konnten. Zusätzlich wurden demographische Basisdaten (z. B. Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht) erhoben, die der Kontextualisierung der Ergebnisse dienen und in Kapitel 5.1 detailliert dargestellt werden. Aufgrund der Rahmenbedingungen handelt es sich nicht um eine repräsentative Stichprobe im statistischen Sinne. Die Ergebnisse können daher nicht ohne Einschränkungen auf die Gesamtbevölkerung übertragen werden, liefern jedoch innerhalb der spezifischen Gruppe junger, sportlich aktiver Erwachsener wichtige Hinweise auf mögliche Trainingseffekte.

4.4. Material: Der ddrobotec-Robotrainer

Der ddrobotec Robotrainer Pro ist ein KI-gestütztes, robotisches Beintrainingssystem des Schweizer Unternehmens „Dynamic Devices“. Er basiert auf pneumatischen künstlichen Muskeln, hochpräziser Sensorik und einer Exergaming-Software. Das integrierte Steuerungssystem „DD Brain“ erfasst kontinuierlich mehrere tausend Datenpunkte pro Sekunde, passt Widerstände adaptiv an und liefert visuelles Echtzeit-Feedback. Auf diese Weise können Belastung und Trainingsintensität individuell und dynamisch angepasst werden. Das System wird seit mehreren Jahren international in Rehabilitation, Leistungssport und Gesundheitsförderung eingesetzt (Herstellerangaben, vgl. ddrobotec Webseite (Dynamic Devices, o.D.)). Es erlaubt die Durchführung validierter Tests und Trainingsprotokolle, mit denen unter anderem Links-Rechts-Asymmetrien, neuromotorische Fähigkeiten sowie neurokognitive Einschränkungen erfasst werden können. Die Ergebnisse werden unmittelbar in Form von Kennzahlen aufbereitet und stehen für die Trainingssteuerung zur Verfügung. Die Trainingsumgebung umfasst eine Vielzahl an Exergames, Drills und Testprotokollen, die Parameter wie Muskelkraft, Schnelkraft, Koordination, Ausdauer und Bewegungsgenauigkeit abbilden. Eine KI-gestützte Engine kombiniert individuelle Testergebnisse mit adaptiven Programmen und ermöglicht dadurch progressive, personalisierte Trainingspläne. Die Datenverarbeitung erfolgt über die ddrobotec

Cloud (Abb. 4), welche Analyse, Speicherung und Visualisierung unterstützt. Neben klassischen Reports bestehen verschiedene Zugriffsmöglichkeiten (Benutzeroberfläche, App, Partnerportal, API). Besonders hervorzuheben ist die sogenannte ddrobotec Datenblume, die über 50 validierte Biomarker in einer intuitiven Grafik darstellt und eine kontinuierliche Beobachtung kognitiver, sensomotorischer und physischer Leistungen ermöglicht. Insgesamt stellt der ddrobotec Robotrainer Pro ein innovatives System zur präzisen Erfassung und Förderung motorischer, kognitiver und physischer Leistungsdimensionen dar. Die Kombination aus Robotik, Exergaming und KI-gestützter Datenanalyse bildet eine neuartige Grundlage für trainings- und rehabilitationsbezogene Anwendungen.

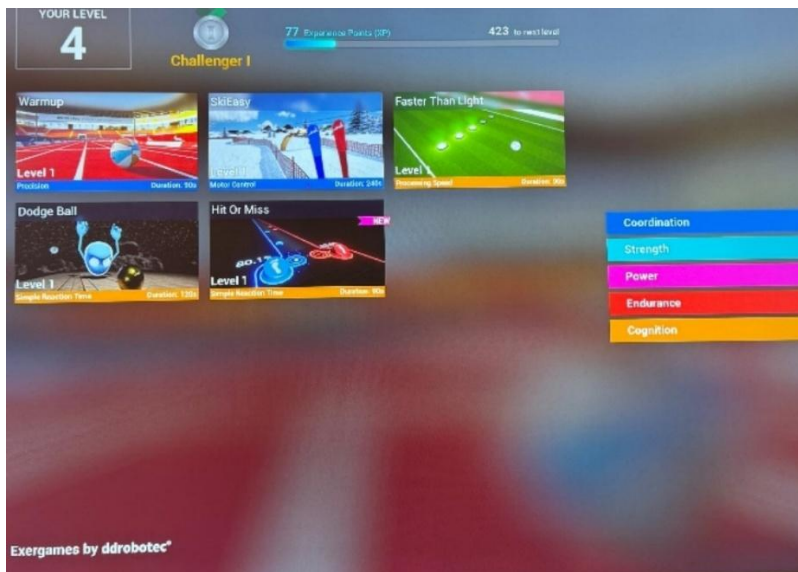
Abbildung 4: Übersicht ddrobotec Robotrainer



4.5. Durchführung der Intervention

Vor Beginn der Intervention erhielten alle Teilnehmenden eine Einweisung in die Nutzung des Geräts sowie in die Durchführung der Tests. Das Training erstreckte sich über drei Wochen und bestand aus jeweils zwei Trainingseinheiten pro Woche. Jede Einheit setzte sich aus einem standardisierten Warm-up-Protokoll (vier Übungen), zwei Durchgängen des „Ski Easy“-Exergames sowie zwei Durchgängen des „Dodgeball“ Games zusammen (Abb. 5). Die Durchführung erfolgte selbstverantwortlich durch die Teilnehmenden.

Abbildung 5: Benutzeroberfläche ddrobotec Pro Exergames



Das **Warm-up-Protokoll** (standardisiert) setzte sich aus folgenden vorkonfigurierten Übungen zusammen:

- **BASIC201**: Grundlagentraining unter konstanter Last (90 s)
- **Periodic Plyo**: periodisches plyometrisches Schnellkrafttraining (40 s)
- **PRO302**: moderates, exzentrisches, alternierendes Training mit variabler Last (120 s)
- **Wavelet Training**: schnell alternierende Beinbewegungen unter konstanter Last (60 s)

Nach den Aufwärmungsübungen absolvierten die Teilnehmenden in jeder Trainingseinheit jeweils zwei Durchläufe von den **Exergames**:

- **SkiEasy**: Ziel ist es, die Ziellinie möglichst schnell zu erreichen und dabei Slalom-Tore korrekt zu durchfahren (zeitkritischer, koordinativer Parcours)
- **DodgeBall**: schnelles alternierendes Betätigen der Pedale, um virtuellen Hindernissen auszuweichen (reaktiv-koordinative Anforderung)

Die Testungen wurden unmittelbar vor Beginn (Prä-Test) und nach Abschluss der Intervention (Post-Test) durchgeführt. Dabei wurden identische Bedingungen gewährleistet:

- gleiche Räumlichkeiten und Geräteeinstellungen
- konstante Tageszeit im Rahmen der üblichen Trainingszeiten
- standardisierte Instruktion durch die Versuchsleitung
- einheitliche Messprotokolle am ddrobotec

Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass beobachtete Veränderungen auf die Intervention zurückgeführt werden können und nicht durch externe Störvariablen bedingt sind.

Die eingesetzte **Testverfahren** können wie folgt spezifiziert werden:

- **Position Sense Test** (für JPS): Erfasst die Fähigkeit, einen vorgegebenen Kniewinkel ohne visuelles Feedback wiederholt präzise zu reproduzieren. Primärer Outcome: mittlere absolute Winkelabweichung vom Zielwinkel über mehrere Repetitionen [Einheit: degree (kurz: d, deutsch: Grad); niedriger = besser]
- **Stiffness Control Test** (für SC): Erfasst die dynamische Kniegelenksstabilität bei aperiodischen Störeinflüssen (variierende extern applizierte Kräfte), während ein Zielkniewinkel gehalten werden soll.
Primärer Outcome: Abweichung vom Zielwinkel [Einheit: degree (kurz: d, deutsch: Grad); niedriger = besser]
- **Tracking Ability Test** (für MA): Erfasst die Bewegungsgenauigkeit beim Verfolgen eines vorgegebenen Bewegungspfad (z. B. Kreis) durch Beugen/Strecken; die Bewegung ist auch bei kurzzeitigem Ausblenden des visuellen Stimulus fortzuführen. Primärer Outcome: Tracking-Fehler relativ zur Zieltrajektorie [Einheit: degree (kurz: d, deutsch: Grad); niedriger = besser; zusätzlich kann ein Links-Rechts-Symmetrieindex ausgewertet werden]
- **Negative Power Test** (für PRT): Plyometrisch inspirierter Reiz-Reaktions-Test mit schneller exzentrischer Phase. Erfasst u. a. Reaktionszeit vom visuellen Stimulus bis zum definierten Kraft-/Leistungs-Schwellenkriterium sowie Parameter der dynamischen Stabilität/Spitzengeschwindigkeit.
Primärer Outcome für diese Arbeit: Plyometric React Time [Einheit: milliseconds (kurz: ms, deutsch: Millisekunden); niedriger = besser]

Für alle in dieser Arbeit verwendeten Kennwerte gilt: Niedrigere Werte entsprechen einer besseren Leistung (vgl. Ergebnisdarstellung in Kap. 5). Eine beispielhafte Exergame-Einzel-Auswertung sowie die Ergebnisse der Parameter-Tests (Proband 2) und ein übersichtlicher Insights-Report (Probandin 15) sind im Anhang A dokumentiert.

4.6. Datenauswertung

Die Daten der Testungen wurden direkt durch den ddrobotec Robotrainer erhoben und nach Abschluss in Microsoft Excel exportiert. Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe von **Excel** sowie in **Google Colab unter Python**. Zum Einsatz kamen folgende Verfahren:

- **Deskriptive Statistik** (Berechnung von Mittelwerten und Standardabweichungen)
- **Shapiro-Wilk-Test** zur Prüfung der Normalverteilung der Differenzen
- **gepaarter t-Test** zur Analyse signifikanter Veränderungen zwischen Prä- und Postmessung
- **Berechnung von Effektgrößen** nach Cohen's d

Das **Signifikanzniveau** wurde auf $p < .05$ festgelegt.

4.7. Methodische Reflexion

Die vorliegende Untersuchung weist mehrere Stärken auf: Der Einsatz eines hochmodernen, robotischen Trainingssystems erlaubt präzise Messungen und eine exakte Steuerung der Belastung. Zudem wurde ein bislang wenig untersuchter Bereich (biomechanische Parameter bei jungen, sportlichen Erwachsenen) adressiert. Eine klare theoretische Fundierung durch das Modell der motorischen Kontrolle unterstreicht die wissenschaftliche Relevanz der Arbeit.

Gleichzeitig bestehen Limitationen: Die Stichprobe ist klein, es fehlt eine Kontrollgruppe, und die Interventionsdauer von drei Wochen ist kurz. Darüber hinaus handelt es sich um eine Gelegenheitsstichprobe, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Trotz dieser Einschränkungen liefert die Studie wichtige explorative Hinweise für den Einsatz von High-End-Exergaming in Training und Rehabilitation.

Im Hinblick auf die **Gütekriterien quantitativer Forschung kann die vorliegende** Untersuchung wie folgt bewertet werden:

- **Objektivität:** Die Durchführung der Tests erfolgte nach einheitlichen, softwaregestützten Protokollen am ddrobotec Robotrainer. Instruktionen und Rahmenbedingungen (Räumlichkeiten, Tageszeit, Geräteeinstellungen) wurden standardisiert, wodurch der Einfluss der Versuchsleitung minimiert wurde.
- **Reliabilität:** Die Messungen sind wiederholbar, da der Robotrainer identische Testprotokolle automatisiert ablaufen lässt und die Datenerfassung hochfrequent und konsistent erfolgt. Die kurze Interventionsdauer könnte zwar die Reliabilität längerfristiger Trainingseffekte einschränken, die Messzuverlässigkeit der Tests selbst ist jedoch gegeben.
- **Validität:** Die eingesetzten Tests erfassen die jeweils intendierten Dimensionen der motorischen Kontrolle (Wahrnehmung, Stabilität, Koordination, Anpassungsfähigkeit). Inhaltlich ist somit von einer hohen Konstruktvalidität auszugehen. Einschränkungen bestehen darin, dass externe Faktoren wie individuelle Tagesform nicht vollständig ausgeschlossen werden können.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Gütekriterien in wesentlichen Teilen erfüllt sind. Damit liefern die erhobenen Daten eine methodisch fundierte Grundlage, auch wenn die genannten Limitationen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

5. Ergebnisse

5.1. Beschreibung der Stichprobe

An der Untersuchung nahmen insgesamt 17 sportlich aktive Erwachsene teil, davon 7 Frauen und 10 Männer. Das Durchschnittsalter lag bei 26,1 Jahren (Spanne: 21–36 Jahre). Die Teilnehmenden wiesen eine durchschnittliche Körpergröße von 174,9 cm und ein durchschnittliches Gewicht von 70,9 kg auf. Das Durchschnittsalter der männlichen Teilnehmenden lag bei 27,8 Jahren (Range: 22–36 Jahre), während die weiblichen Proband:innen mit 24,4 Jahren im Mittel etwas jünger waren (Range: 21–28 Jahre). Hinsichtlich des wöchentlichen Trainingsumfangs zeigten die Männer mit durchschnittlich 8,8 Stunden (Spannweite: 3–22 Stunden) eine höhere Belastung als die Frauen (6,9 Stunden; Spannweite: 3–13 Stunden). Die sportartspezifische Verteilung verdeutlicht die Heterogenität der Stichprobe (s. Abb. 6). Von den insgesamt genannten Primärsportarten entfielen die meisten Nennungen auf Ausdauersportarten wie Laufen, Joggen oder Radfahren, gefolgt von klassischen Mannschaftssportarten und Kraftsport. Unter der Kategorie „Weitere“ wurden Aktivitäten wie Yoga, Golf oder Reiten erfasst. Diese breite sportliche Basis spiegelt die Vielfalt an Bewegungserfahrungen der Teilnehmenden wider und veranschaulicht zugleich, dass sich die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung nicht auf eine einzelne Sportartengruppe beschränken, sondern eine generalisierte, sportlich aktive Population abbilden. In Bezug auf die Vorerfahrung mit dem ddrobotec gaben sechs Teilnehmende an, das Gerät bereits genutzt zu haben, während elf Teilnehmende ohne Vorerfahrung in die Intervention starteten. Verletzungen innerhalb der letzten zwölf Monate waren selten und beschränkten sich auf drei Fälle (Kapselüberdehnung Knie, Hüftgelenkserguss, chronischer Patellasehnenriss). Akute Verletzungen, die die Teilnahme beeinträchtigt hätten, lagen nicht vor.

Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die demografischen und sportlichen Merkmale der Stichprobe.

ID	Alter	Geschlecht	Größe (cm)	Gewicht (kg)	Primäre Sportarten	Trainingshäufigkeit/ Woche (h)	Vorkenntnisse ddro- botec	Verletzungen letzte 12 Monate
1	25	m	168	72	Kraftsport, Fußball, Rennrad	8	Nein	Nein

2	36	m	182	78	Fußball, Tennis, Golf, Joggen, Rennrad	8	Ja	Nein
3	30	m	175	63	Fußball, Joggen	3	Ja	Nein
4	32	m	175	74	Fußball	5	Ja	Nein
5	27	w	168	59	Yoga/Pilates, Joggen	5	Ja	Kapselüberdehnung linkes Knie
6	26	m	183	72	Fußball, Ski Alpin, Golf	12	Ja	Nein
7	24	w	170	58	Reiten, Yoga, Joggen	4	Ja	Erguss Hüftgelenke
8	25	w	168	67	Spinning, Krafttraining, Hammerwurf	5	Nein	Nein
9	27	m	172	70	Fußball, Joggen, Athletiktraining	8	Nein	Nein
10	30	m	178	78	Radfahren, Joggen, Krafttraining	22	Ja	Nein
11	21	w	168	61	Fußball, Radfahren, Gym	10	Nein	Nein
12	22	w	168	75	Joggen, Poledance, Spinning	3	Nein	Nein
13	24	w	157	53	Kraftsport, Radfahren, Wandern, Joggen	13	Nein	Nein
14	23	m	178	72	Fußball	6	Nein	Nein
15	28	w	175	72	Laufen, Fitness, Rennrad, Yoga	8	Nein	Nein
16	22	m	190	86	Volleyball, Krafttraining	10	Nein	Patellasehnenriss
17	27	m	169	72	Fußball	6	Ja	Nein

Tabelle 4: Detailübersicht Stichprobenmerkmale

Geschlecht	Alter MW	Alter Min	Alter Max	Alter Spannweite	Std MW	Std Min	Std Max	Std	Spannweite	n
m	27.80	22	36	14	8.80	3	22	19		10
w	24.43	21	28	7	6.86	3	13	10		7

Tabelle 5: Übersicht geschlechtsspezifische Unterschiede Stichprobe

Wobei Std. die Trainingshäufigkeit in Stunden pro Woche angibt

Abbildung 6: Verteilung Sportkategorien Stichprobe



■ Ausdauer: 17 ■ Mannschaft: 11
■ Kraft: 8 ■ Weitere: 10

5.2. Deskriptive Statistik

Zur Analyse wurden die links- und rechtsseitigen Messwerte der unteren Extremitäten der einzelnen Teilnehmer:innen gemittelt, um eine doppelte Gewichtung zu vermeiden und repräsentative Gesamtwerte pro Person abzubilden. Damit standen für jeden Probanden pro Parameter die individuellen Messwerte links (**L**) und rechts (**R**), der daraus berechnete individuelle Mittelwert zwischen links und rechts [**MW (i)**] sowie die intraindividuelle Standardabweichung (**SD (i)**) bereit. In der untersten Zeile sind die vertikalen Mittelwerte über links [**MW (L)**] sowie rechts [**MW (R)**] aller Probanden zum Zeitpunkt **T0** und **T1** dargestellt, der daraus resultierende Gesamtmittelwert [**MW (g)**] plus die Standardabweichung über alle Teilnehmenden [**SD (g)**] dargestellt (s. Tab. 6-9). Damit wird sowohl die Streuung zwischen den Proband:innen als auch die Stabilität der Links-Rechts-Symmetrie innerhalb einer Person abgebildet.

Joint Position Sense (Einheit: d)									
ID	T0				T1				
	L	R	MW (i)	SD (i)	L	R	MW (i)	SD (i)	
1	8,8	5,5	7,2	2,3	10,9	9,4	10,2	1,1	
2	8,7	12,7	10,7	2,8	4,9	5,6	5,3	0,5	
3	9,0	12,0	10,5	2,1	4,3	4,8	4,6	0,4	
4	4,4	5,9	5,2	1,1	2,7	2,1	2,4	0,4	
5	5,9	4,8	5,4	0,8	7,1	4,9	6,0	1,6	
6	12,8	13,2	13,0	0,3	11,1	11,5	11,3	0,3	
7	11,8	11,3	11,6	0,4	7,3	5,2	6,3	1,5	
8	11,2	7,0	9,1	3,0	6,8	7,0	6,9	0,1	
9	12,8	11,7	12,3	0,8	10,5	10,6	10,6	0,1	
10	14,6	13,8	14,2	0,6	10,7	7,5	9,1	2,3	
11	4,0	11,0	7,5	4,9	7,3	5,7	6,5	1,1	
12	6,7	23,7	15,2	12,0	5,8	22,0	13,9	11,5	
13	11,5	8,2	9,9	2,3	5,8	5,2	5,5	0,4	
14	4,5	9,7	7,1	3,7	5,9	7,6	6,8	1,2	
15	5,0	7,8	6,4	2,0	2,9	6,6	4,8	2,6	
16	10,4	7,0	8,7	2,4	8,8	12,2	10,5	2,4	
17	21,8	18,1	20,0	2,6	3,7	12,3	8,0	6,1	

MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)	MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)
9,6	10,8	10,2	3,9	6,9	8,2	7,6	3,0

Tabelle 6: Testwerte Joint Position Sense

Stiffness Control (Einheit: d)									
ID	T0				T1				
	L	R	MW (i)	SD (i)	L	R	MW (i)	SD (i)	
1	6,3	4,9	5,6	1,0	6,3	5,0	5,7	0,9	
2	4,6	3,6	4,1	0,7	4,6	3,7	4,2	0,6	
3	4,8	4,3	4,6	0,4	3,9	3,5	3,7	0,3	
4	3,9	4,1	4,0	0,1	3,6	3,9	3,8	0,2	
5	3,4	2,4	2,9	0,7	4,0	3,1	3,6	0,6	
6	5,1	4,2	4,7	0,6	4,4	4,2	4,3	0,1	
7	4,7	4,0	4,4	0,5	4,0	3,7	3,9	0,2	
8	4,1	3,9	4,0	0,1	3,8	3,0	3,4	0,6	
9	5,4	6,3	5,9	0,6	4,7	5,0	4,9	0,2	
10	5,1	5,0	5,1	0,1	5,3	4,8	5,1	0,4	
11	3,6	3,2	3,4	0,3	3,4	3,4	3,4	0,0	

12	5,9	5,8	5,9	0,1	5,5	5,2	5,4	0,2
13	4,4	4,0	4,2	0,3	3,9	3,9	3,9	0,0
14	7,7	5,0	6,4	1,9	5,9	5,4	5,7	0,4
15	3,9	4,7	4,3	0,6	3,7	4,1	3,9	0,3
16	6,0	6,3	6,2	0,2	5,2	5,8	5,5	0,4
17	4,3	4,2	4,3	0,1	3,8	3,4	3,6	0,3

MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)	MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)
4,9	4,5	4,7	1,0	4,5	4,2	4,3	0,8

Tabelle 7: Testwerte Stiffness Control

Movement Accuracy (Einheit: d)									
ID	T0				T1				
	L	R	MW (i)	SD (i)	L	R	MW (i)	SD (i)	
1	32,7	22,9	27,8	6,9	15,2	15,0	15,1	0,1	
2	20,1	19,1	19,6	0,7	20,6	20,5	20,6	0,1	
3	14,9	14,9	14,9	0,0	14,2	14,0	14,1	0,1	
4	15,8	14,2	15,0	1,1	14,9	13,4	14,2	1,1	
5	16,2	15,5	15,9	0,5	19,2	17,3	18,3	1,3	
6	26,9	24,9	25,9	1,4	20,6	19,5	20,1	0,8	
7	18,6	15,6	17,1	2,1	15,3	16,0	15,7	0,5	
8	13,9	15,1	14,5	0,8	19,4	17,8	18,6	1,1	
9	17,4	18,2	17,8	0,6	20,2	21,6	20,9	1,0	
10	20,8	18,4	19,6	1,7	21,9	21,9	21,9	0,0	
11	18,7	19,5	19,1	0,6	17,4	18,1	17,8	0,5	
12	14,4	19,9	17,2	3,9	24,9	23,0	24,0	1,3	
13	18,3	17,4	17,9	0,6	17,2	16,7	17,0	0,4	
14	17	17,8	17,4	0,6	14,7	16,4	15,6	1,2	
15	26,2	26,4	26,3	0,1	17,9	17,9	17,9	0,0	
16	14	14,3	14,2	0,2	13,5	14,6	14,1	0,8	
17	21,4	20,6	21,0	0,6	18	17,0	17,5	0,7	

MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)	MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)
19,3	18,5	18,9	4,2	17,9	17,7	17,8	2,9

Tabelle 8: Testwerte Movement Accuracy

Plyometric React Time (Einheit: ms)								
ID	T0				T1			
	L	R	MW (i)	SD (i)	L	R	MW (i)	SD (i)
1	208,7	195,7	202,2	9,2	203,3	188,7	196,0	10,3
2	220,3	225,0	222,7	3,3	210,7	214,3	212,5	2,5
3	196,7	192,3	194,5	3,1	189,7	185,7	187,7	2,8
4	236,0	234,0	235,0	1,4	229,7	225,3	227,5	3,1
5	211,7	213,0	212,4	0,9	213,3	212,0	212,7	0,9
6	177,0	177,0	177,0	0,0	168,3	168,0	168,2	0,2
7	224,7	216,3	220,5	5,9	203	205,3	204,2	1,6
8	220,0	210,0	215,0	7,1	207,3	202,0	204,7	3,7
9	202,0	204,7	203,4	1,9	192,7	195,3	194,0	1,8
10	238,3	223,3	230,8	10,6	210,3	195,3	202,8	10,6
11	224,3	240,3	232,3	11,3	223	235,0	229,0	8,5
12	245,7	237,0	241,4	6,2	224,7	222,7	223,7	1,4
13	188,7	195,7	192,2	4,9	182	186,7	184,4	3,3
14	203,0	206,7	204,9	2,6	194,7	194,3	194,5	0,3
15	244,7	231,3	238,0	9,5	237,3	231,3	234,3	4,2
16	203,7	200,7	202,2	2,1	198,7	194,7	196,7	2,8
17	195,0	189,0	192,0	4,2	179,3	177,0	178,2	1,6

MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)	MW (L)	MW (R)	MW (g)	SD (g)
214,1	211,3	212,7	18,8	204,0	202,0	203,0	18,6

Tabelle 9: Testwerte Plyometric React Time

In den folgenden vier Diagrammen wird die jeweilige Mittelwertänderung dargestellt, aus der sich eine Verbesserung oder Verschlechterung der Parameter ableiten lässt.

Abbildung 7: Übersicht Mittelwertänderungen JPS

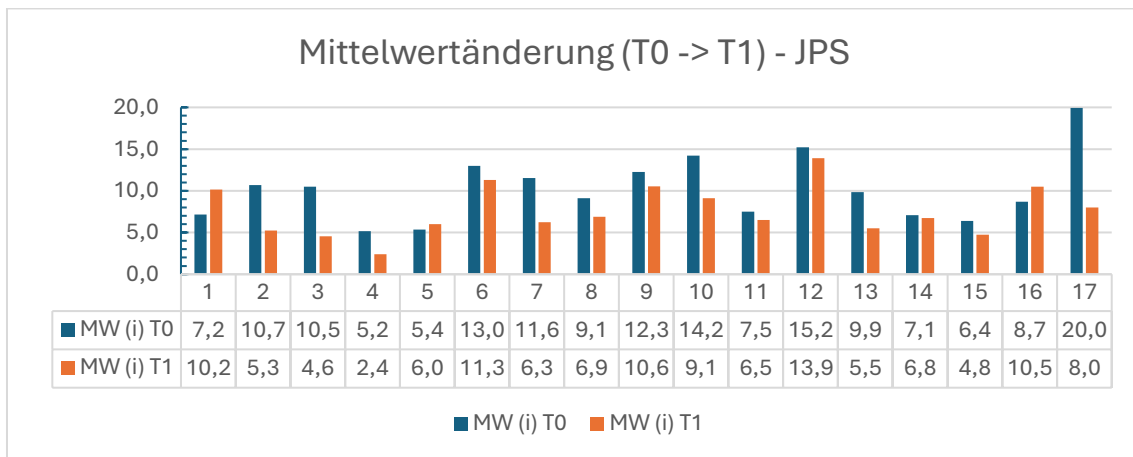


Abbildung 8: Übersicht Mittelwertänderungen SC

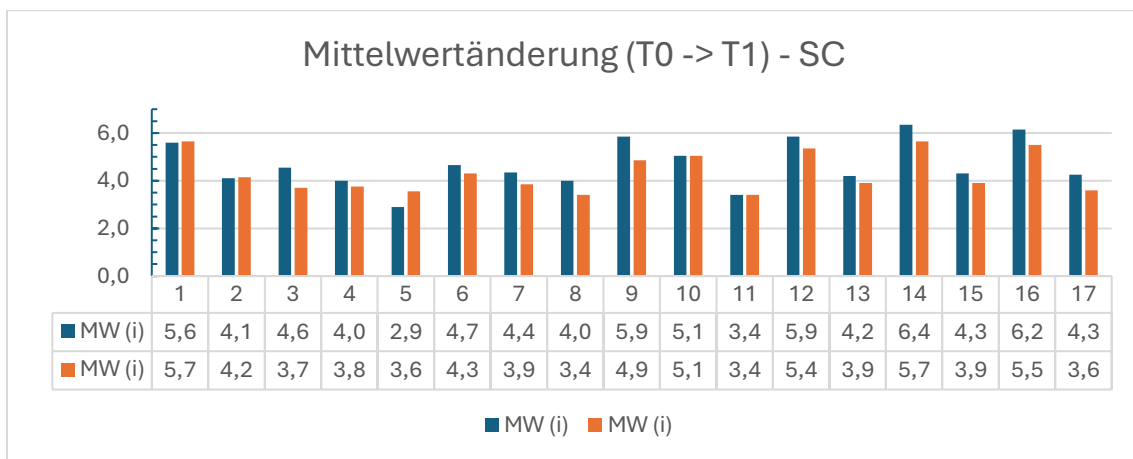


Abbildung 9: Übersicht Mittelwertänderungen MA

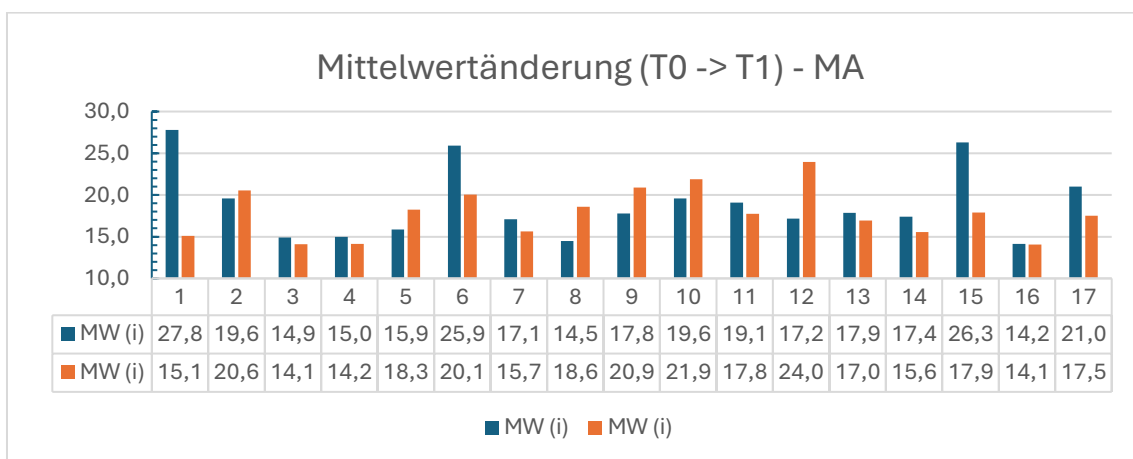
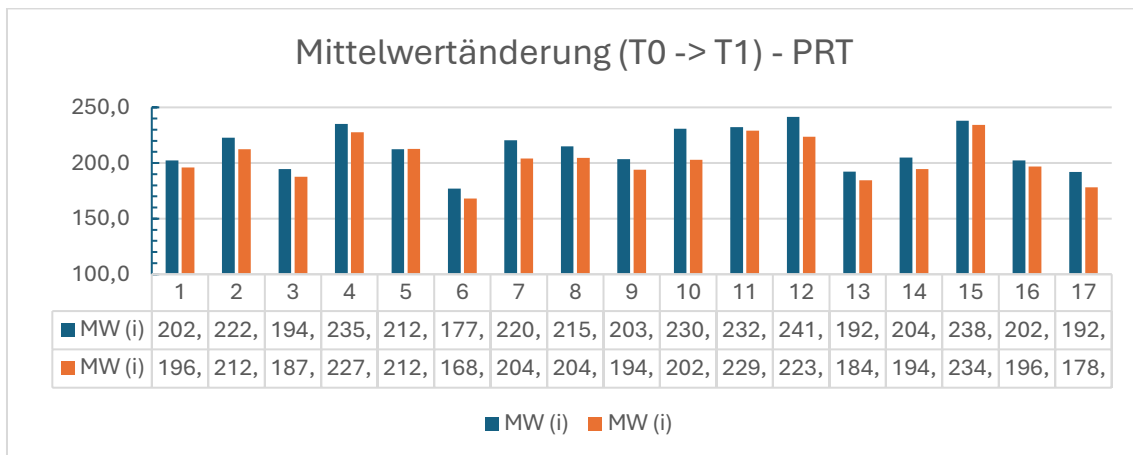


Abbildung 10: Übersicht Mittelwertänderungen PRT



Im Prä-Test (T0) zeigten sich für die vier untersuchten Dimensionen der motorischen Kontrolle folgende Ausgangswerte [MW (g) ± SD (g)] über die Gesamtstichprobe, n = 17]:

- Joint Position Sense: 10,2 ± 3,9 d
- Stiffness Control: 4,7 ± 1,0 d
- Movement Accuracy: 18,9 ± 4,2 d
- Plyometric React Time 212,7 ± 18,8 ms

Im Post-Test änderten sich die Werte wie folgt:

- Joint Position Sense: 7,6 ± 3,0 d
- Stiffness Control (Stabilität): 4,3 ± 0,8 d
- Movement Accuracy: 17,8 ± 2,9 d
- Plyometric React Time: 203,0 ± 18,6 ms

Eine erste deskriptive Einschätzung der Mittelwerte zeigt, dass sich die Ergebnisse in allen vier untersuchten Parametern im Post-Test im Vergleich zum Prä-Test verbessert haben. So nahmen die mittleren Abweichungen beim Joint Position Sense, bei der Stiffness Control und bei der Movement Accuracy ab, während sich die Plyometric React Time verkürzte. Rein optisch deutet dies auf eine positive Entwicklung der motorischen Kontrolle hin.

Ob diese Unterschiede jedoch statistisch signifikant sind, lässt sich allein anhand der Mittelwerte nicht beurteilen. Daher wurde im nächsten Schritt geprüft, ob die Verteilungen der Differenzwerte die Voraussetzung der Normalverteilung erfüllen, um anschließend geeignete statistische Testverfahren auszuwählen. Zur Prüfung der Verteilungseigenschaften wurde der

Shapiro-Wilk-Test durchgeführt (s. Tab. 10). Dabei ergab sich für alle vier Parameter eine hinreichende Normalverteilung.

	JPS	SC	MA	PRT
Differenzwerte $\Delta MW(T1-T0)$ (Spalte K der jeweiligen Tabellen)	3,0	0,1	-12,7	-6,2
	-5,5	0,1	0,9	-10,2
	-6,0	-0,9	-0,8	-6,8
	-2,8	-0,3	-0,9	-7,5
	0,7	0,7	2,4	0,3
	-1,7	-0,4	-5,9	-8,8
	-5,3	-0,5	-1,5	-16,4
	-2,2	-0,6	4,1	-10,4
	-1,7	-1,0	3,1	-9,3
	-5,1	0,0	2,3	-28,0
	-1,0	0,0	-1,4	-3,3
	-1,3	-0,5	6,8	-17,7
	-4,4	-0,3	-0,9	-7,8
	-0,4	-0,7	-1,9	-10,4
	-1,7	-0,4	-8,4	-3,7
	1,8	-0,7	-0,1	-5,5
	-12,0	-0,7	-3,5	-13,9
Shapiro-Wilk Test				
W	0,94	0,95	0,94	0,91
Shapiro-Wilk Test p	0,266	0,482	0,313	0,083
Normalverteilung?	X	X	X	X

Tabelle 10: Shapiro-Wilk Test

5.3. Inferenzstatistische Ergebnisse

Zur Überprüfung der Hypothesen wurden für alle Parameter die individuellen Differenzen zwischen Prä- und Posttest ($T1-T0$) berechnet. Diese Differenzen dienen als Grundlage für die t-Tests gegen 0. Zusätzlich wurden Effektgrößen nach Cohen's d berechnet und 95%-Konfidenzintervalle für die Mittelwerte angegeben.

Da es sich bei den erhobenen Parametern um Kennwerte handelt, bei denen niedrigere Werte eine bessere Leistung anzeigen (z. B. geringerer Fehler im JPS oder kürzere PRT), bedeutet ein negatives Vorzeichen der Differenz ($T1-T0 < 0$) eine Verbesserung der Leistung, während ein positives Vorzeichen ($T1-T0 > 0$) auf eine Verschlechterung hinweist.

Im Folgenden werden die Ergebnisse gegliedert nach Parametern dargestellt.

Joint Position Sense (Gelenkstellungssinn):

Die Analyse der Differenzen ergab einen Wert von $\Delta MW(g) = -2,7$ (SD = 3,5). Der t-Test zeigte eine signifikante Verbesserung, $t(16) = -3,1$; $p = ,006$. Die Effektgröße nach Cohen's d lag bei $-0,8$; was einem mittleren bis großen Effekt entspricht. Das 95%-Konfidenzintervall $[-4,4; -1,0]$ schließt den Wert 0 nicht ein. Damit konnte Hypothese H1, die eine Verbesserung des Gelenkstellungssinns erwartete, bestätigt werden.

Stiffness Control (Steifigkeitsregelung):

Für die Steifigkeitsregelung ergab sich ein mittlerer Differenzwert von $\Delta MW(g) = -0,4$ (SD = 0,4). Der t-Test zeigte eine signifikante Verbesserung, $t(16) = -3,4$; $p = ,003$. Mit $d = -0,8$ ist die Effektgröße groß. Das Konfidenzintervall $[-0,6; -0,2]$ verdeutlicht die Signifikanz. Hypothese H2 konnte damit bestätigt werden.

Movement Accuracy (Bewegungsgenauigkeit):

Die Analyse der Bewegungsgenauigkeit ergab im Mittel eine Abweichung von $\Delta MW(g) = -1,1$ (SD = 4,7). Der t-Test war nicht signifikant, $t(16) = -0,9$; $p = ,357$, und die Effektgröße fiel mit $d = -0,2$ gering aus. Das 95%-Konfidenzintervall $[-3,3; 1,2]$ umfasste den Wert 0. Hypothese H3, die von einer Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit ausging, konnte daher nicht bestätigt werden.

Plyometric Reaction Time (plyometrische Reaktionszeit):

Für die plyometrische Reaktionszeit ergaben sich deutliche Verbesserungen zwischen T0 und T1. Der mittlere Differenzwert betrug $\Delta MW(g) = -9,7$ (SD = 6,6). Der t-Test zeigte eine hochsignifikante Verbesserung, $t(16) = -6,1$; $p < ,001$. Mit $d = -1,5$ erreichte die Effektgröße einen sehr großen Wert. Das 95%-Konfidenzintervall $[-12,9; -6,6]$ lag vollständig im negativen Bereich. Damit konnte Hypothese H4, die eine Verbesserung der plyometrischen Reaktionszeit annahm, bestätigt werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass drei der untersuchten Parameter (Joint Position Sense, Stiffness Control, Plyometric Reaction Time) eine signifikante Verbesserung aufwiesen. Für die Bewegungsgenauigkeit ergab sich hingegen keine signifikante Veränderung. Damit konnten die Hypothesen H1, H2 und H4 bestätigt werden, während H3 nicht bestätigt werden konnte (s. Tab. 6).

Parameter	Hypo- these	Ergebnis	Effekt	Interpretation
<i>Joint Position Sense</i>	H1	Bestätigt	groß	Signifikante Verbesserung
<i>Stiffness Control</i>	H2	Bestätigt	groß	Signifikante Verbesserung
<i>Movement Accuracy</i>	H4	Nicht bestätigt	klein	Keine signifikante Veränderung
<i>Plyometric Reaction Time</i>	H3	Bestätigt	sehr groß	Deutlichste Verbesserung

Tabelle 11: Zusammenfassung Ergebnisse Parameterverbesserung

6. Diskussion

Ziel der Arbeit war es, die Effekte eines dreiwöchigen, KI-gestützten Exergaming-Trainings am ddrobotec Robotrainer Pro auf ausgewählte biomechanische Parameter der unteren Extremitäten bei sportlich aktiven Erwachsenen zu prüfen. Grundlage bildete der in Kapitel 2.2 dargestellte Rahmen der motorischen Kontrolle, der die Funktionsbereiche Wahrnehmung, Stabilität, Koordination und Anpassungsfähigkeit unterscheidet. Entsprechend wurden Joint Position Sense (JPS), Stiffness Control (SC), Movement Accuracy (MA) und Plyometric React Time (PRT) als spezifische Indikatoren herangezogen. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 aufgezeigten Forschungslücken, insbesondere des Mangels an biomechanisch präzisen Exergaming-Studien mit sportlich aktiven Erwachsenen und High-End-Systemen, adressierte die Arbeit ein klares Desiderat.

Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Muster und erweitern den bisherigen Forschungsstand, der Exergaming-Effekte bislang vor allem im Bereich Motivation und Adhärenz dokumentierte (Liu & Lipowski, 2021), während biomechanische Befunde selten berücksichtigt wurden (Benzing & Schmidt, 2018).

Für den Joint Position Sense wurde eine deutliche Reduktion der Winkelabweichungen beobachtet. Dies verdeutlicht, dass wiederholte Zielwinkelerfahrungen in Kombination mit unmittelbarem Feedback die propriozeptive Kalibrierung und die interne Abbildung des Systemzustands verbessern können. Damit wird eine Forschungslücke adressiert, da bisher überwiegend indirekte Gleichgewichtseffekte berichtet wurden (Wibowo et al., 2024), während propriozeptive Maße wie JPS nur selten im Fokus standen. Die robotische Messumgebung ermöglicht hier eine besonders präzise Erfassung. Lerneffekte lassen sich trotz standardisierter Durchführung (Kap. 4.5) nicht vollständig ausschließen, ihr Einfluss dürfte jedoch begrenzt sein.

Auch die Stiffness Control verbesserte sich, was für eine effizientere Kopplung von Feedforward- und Feedback-Mechanismen spricht (Seidler et al., 2004; Geraedts, 2019). Diese Ergebnisse unterstreichen die Relevanz roboterbasierter Exergames für die Stabilitätsförderung und stehen im Einklang mit Befunden von Schutte (2024) und Ramasamy et al. (2023). Gleichzeitig kontrastieren sie mit Studien, die nur teilweise Verbesserungen berichteten (Cacciata et al., 2019) oder keine Unterschiede zwischen Gruppen nachweisen konnten (Barratt et al., 2019). Die Spezifität der Trainingseffekte wird dadurch deutlich.

Für die Movement Accuracy zeigten sich keine signifikanten Veränderungen. Angesichts des hohen Ausgangsniveaus der Stichprobe ($MW(g) = 18,9$, $SD(g) = 4,2$) und der kurzen Interventionsdauer ist dies plausibel. Koordinative Feinabstimmungen erfordern längere und

variablere Trainingsprogramme (Golle et al., 2019). Die Arbeit differenziert damit die bisherige positive Befundlage, anstatt sie zu widerlegen. Während Schutte (2024) stabilere, aber weniger präzise Kraftverläufe unter Gamification berichtete, zeigten Utamayasa et al. (2023) nach sechs Wochen VR-Gamification signifikante Verbesserungen in Koordination und Reaktionszeit bei Kindern. Der Unterschied lässt sich sowohl auf die längere Dauer als auch auf die unterschiedliche Population zurückführen.

Die stärksten Veränderungen traten bei der Plyometric React Time (PRT) auf. Nach dem Training verkürzte sie sich signifikant, was auf eine verbesserte sensorisch-motorische Anpassungsfähigkeit hindeutet. Damit erweitert die Arbeit den bisherigen Forschungsstand, der Verbesserungen vor allem bei Kindern dokumentierte (Utamayasa et al., 2025), und zeigt, dass auch sportlich aktive Erwachsene profitieren können. Die eingesetzten Exergames SkiEasy und DodgeBall forderten zeitkritische, adaptive Reaktionen, was die Ergebnisse methodisch plausibel erklärt.

Insgesamt zeigt sich, dass Exergame-Training am drobotec Robotrainer die motorische Kontrolle der unteren Extremitäten dimensionspezifisch beeinflusst. Wahrnehmung und Stabilität reagierten kurzfristig, die Anpassungsfähigkeit besonders stark, während die Koordination stabil blieb. Dies unterstreicht die theoretische Annahme, dass verschiedene Funktionsdimensionen unterschiedliche Anpassungszeitskalen und Lernvoraussetzungen besitzen (Geraedts, 2019; Seidler et al., 2004). Empirisch ergänzt die Arbeit den Forschungsstand, indem sie biomechanisch valide Effekte nachweist.

Praktisch bedeutet dies, dass Exergaming insbesondere zur Förderung von Propriozeption, Stabilität und reaktiven Prozessen geeignet ist, etwa in Sportarten mit Richtungswechseln, Landungen und visuomotorischen Entscheidungsanforderungen. In der Prävention sind Verbesserungen in JPS und SC relevant, da Defizite in diesen Bereichen mit einem erhöhten Verletzungsrisiko, insbesondere am Knie, assoziiert sind (Bond et al., 2021). In der Rehabilitation bieten standardisierte Protokolle, objektivierbare Kennwerte und adaptive Belastung die Möglichkeit, Fortschritte transparent zu steuern. Für die Koordination sind dagegen längere und variablere Programme notwendig, um Feinadjustierungen zuverlässig zu fördern.

Die Interpretation der Ergebnisse ist durch mehrere Limitationen eingeschränkt. Erstens war die Stichprobe klein und nicht repräsentativ. Zweitens war die Interventionsdauer mit drei Wochen kurz. Drittens fehlte eine Kontrollgruppe, wodurch die Kausalität nur eingeschränkt beurteilt werden kann. Lerneffekte können nicht ausgeschlossen werden. Zudem bleibt unklar, wie nachhaltig die Effekte sind und ob sie sich auf komplexe sportliche Situationen übertragen lassen, was die ökologische Validität einschränkt. Darüber hinaus ist offen, ob die Befunde spezifisch an die Präzision robotischer Systeme gebunden sind oder auch mit einfacheren

Exergaming-Ansätzen reproduzierbar wären. Schließlich zeigen Befunde von Müller und König (2024), dass ungünstige Designelemente die Aktivität sogar verringern können.

Zukünftige Arbeiten sollten daher größere und heterogenere Stichproben einbeziehen, auch untrainierte, ältere oder leistungsorientierte Gruppen. Zudem sind längere Interventionszeiträume von acht bis zwölf Wochen mit variabler Aufgabenstellung empfehlenswert. Von hohem Erkenntniswert wäre ein direkter Vergleich zwischen High-End-Robotik und konsolenbasierten Exergames, um die Rolle der Mess- und Trainingspräzision zu quantifizieren. Darüber hinaus sollten sportnahe Leistungsmaße wie Agilität, Sprung- und Landequalität sowie verletzungsrelevante Risikomarker untersucht werden. Ergänzend sollten demografische Variablen wie Alter, Geschlecht oder sportliche Vorerfahrung berücksichtigt werden (vgl. Kap. 4.1), um differenzielle Effekte besser zu erfassen.

Insgesamt bestätigt die Studie zentrale theoretische Annahmen zu Gamification und Exergaming (Kap. 2.1), erweitert den empirischen Befundraum (Kap. 3) um biomechanische Evidenz und zeigt, dass ein kurzes, adaptives Exergaming-Programm mit robotischer Präzision Wahrnehmung, Stabilität und Anpassungsfähigkeit signifikant verbessern kann, während die Koordination stabil bleibt. Diese Differenzierung ist bedeutsam für Theorie, Praxis und Weiterentwicklung, da sie auf dimensionsspezifische Sensitivitäten verweist, eine gezielte Schwerpunktsetzung im Training erleichtert und weitere Forschungsperspektiven aufzeigt

7. Fazit

Die Arbeit hatte das Ziel, die Effekte eines dreiwöchigen, KI-gestützten Exergaming-Trainings am ddrobotec Robotrainer Pro auf zentrale Parameter der motorischen Kontrolle der unteren Extremitäten bei sportlich aktiven Erwachsenen zu untersuchen. Damit wurde eine Forschungslücke adressiert, da bisherige Studien vor allem motivationale Effekte von Exergaming beschrieben haben (Sailer et al., 2017; Staiano & Calvert, 2011; Liu & Lipowski, 2021), während biomechanisch valide Befunde selten sind (Benzing & Schmidt, 2018; Hribernik et al., 2022).

Die Ergebnisse zeigen, dass Exergaming mit roboterbasierter Präzision in kurzer Zeit signifikante Anpassungen in drei von vier untersuchten Dimensionen der motorischen Kontrolle bewirken kann. Sowohl der Joint Position Sense als auch die Stiffness Control verbesserten sich signifikant, was auf eine gesteigerte propriozeptive Genauigkeit und eine effizientere Stabilitätsregulation schließen lässt. Besonders deutlich war der Effekt auf die Plyometric React Time, die eine optimierte sensomotorische Umschaltfähigkeit widerspiegelt. Nur die Movement Accuracy zeigte keine signifikante Veränderung, was plausibel auf das hohe Ausgangsniveau der Stichprobe und die kurze Trainingsdauer zurückgeführt werden kann (Golle et al., 2019). Insgesamt konnten damit drei der vier Hypothesen bestätigt werden.

Für die Praxis bedeutet dies, dass Exergaming mit Systemen wie dem ddrobotec gezielt eingesetzt werden kann, um Propriozeption, Stabilität und Reaktionsfähigkeit zu fördern. Dies eröffnet Anwendungsmöglichkeiten im sportartspezifischen Training, in der Prävention, etwa zur Reduktion von Verletzungsrisiken (Bond et al., 2021) sowie in der Rehabilitation, wo standardisierte Protokolle und objektivierbare Messgrößen Fortschritte transparent dokumentieren können. Für die Verbesserung koordinativer Feinanpassungen sind hingegen möglicherweise längere und variabelere Programme erforderlich.

Zugleich machen die Befunde deutlich, dass weitere Forschung notwendig ist. Zukünftige Studien sollten größere und heterogenere Stichproben einbeziehen, längere Interventionszeiträume prüfen und Kontrollgruppen-Designs nutzen. Darüber hinaus ist ein Vergleich zwischen High-End-Robotik und konsolenbasierten Exergames sinnvoll, um die Rolle der Mess- und Trainingspräzision zu klären. Schließlich gilt es, die Übertragbarkeit auf sportnahe Leistungsmaße sowie die Wirkung demografischer Faktoren wie Alter, Geschlecht oder Vorerfahrung zu untersuchen.

Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass Exergaming nicht nur ein motivatorisches Werkzeug darstellt, sondern auch dimensionsspezifische Anpassungen in der motorischen Kontrolle der unteren Extremitäten bewirken kann. Damit wird der theoretische Rahmen aus Kapitel 2.2

empirisch erörtert, der Forschungsstand biomechanisch erweitert und ein praxisnaher Beitrag zur Weiterentwicklung evidenzbasierter Trainings- und Rehabilitationskonzepte geleistet.

Literaturverzeichnis

- Arufe-Giráldez, V., Sanmiguel-Rodríguez, A., Ramos-Álvarez, O., & Navarro-Patón, R. (2022). Gamification in physical education: A systematic review. *Education Sciences*, 12(8), 540. <https://doi.org/10.3390/educsci12080540>
- Barratt, A. E. (2019). *The use of exergames in postoperative shoulder rehabilitation* [Doctoral dissertation, University of Salford]. ProQuest Dissertations Publishing.
- Benzing, V., & Schmidt, M. (2018). Exergaming for children and adolescents: Strengths, weaknesses, opportunities and threats. *Journal of Clinical Medicine*, 7(11), 422. <https://doi.org/10.3390/jcm7110422>
- Birklbauer, J. (2006). *Modelle der Motorik: Eine vergleichende Analyse moderner Kontroll-, Steuerungs- und Lernkonzepte* (Spektrum Bewegungswissenschaft, Bd. 5). Meyer & Meyer.
- Bizzini, M. (2000). *Sensomotorische Rehabilitation nach Beinverletzungen: Mit Fallbeispielen in allen Heilungsstadien*. Georg Thieme Verlag.
- Bond, S., Laddu, D. R., Ozemek, C., Lavie, C. J., & Arena, R. (2021). Exergaming and virtual reality for health: Implications for cardiac rehabilitation. *Current Problems in Cardiology*, 46(3), 100472. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2019.100472>
- Bös, K., & Tittlbach, S. (2021). Diagnose motorischer Fähigkeiten und Funktionen in der bewegungsbezogenen Prävention und Gesundheitsförderung. In M. Tiemann & M. Mohokum (Hrsg.), *Prävention und Gesundheitsförderung* (S. 1–15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62426-5_126
- Büsch, D., & Utesch, T. (2021). Sportmotorische Tests: Messverfahren für die Sportpraxis und Sportwissenschaft. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (S. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4_70-1
- Cacciata, M., Stromberg, A., Lee, J. A., Sorkin, D., Lombardo, D., Clancy, S., Nyamathi, A., & Evangelista, L. S. (2019). Effect of exergaming on health-related quality of life in older adults: A systematic review. *International Journal of Nursing Studies*, 93, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2019.01.010>
- Caillois, R. (1961). *Man, play, and games* (M. Barash, Trans.). Free Press of Glencoe.
- Calvillo-Gámez, E. H., Cairns, P., & Cox, A. L. (2010). Assessing the core elements of the gaming experience. In R. Bernhaupt (Hrsg.), *Evaluating user experience in games* (S. 47–71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-963-3_4
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Springer.
- Deterding, S., Khaled, R., Nacke, L. E., & Dixon, D. (2011). Gamification: Toward a definition. In *CHI 2011 extended abstracts on human factors in computing systems* (S. 12–15). ACM. <https://doi.org/10.1145/1979742.1979575>

- Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft Landesverband Westfalen. (2004, Oktober). *Grundlagen der Biomechanik / sportliche Technik* [PDF-Dokument]. https://westfalen.dlrg.de/fileadmin/groups/13000000/Layout_2019/Fuer_Mitglieder/Fachbereiche/Schwimmen/Ausbildungsunterlagen/Gundlagen_der_Biomechanik___Sportliche_Technik_-_Skript.pdf
- Dynamic Devices AG. (o. D). ddrobotec®. Abgerufen am 13. September 2025, von <https://ddrobotec.com/>
- Geraedts, P. (2019). *Motorische Entwicklung und Steuerung: Eine Einführung für Physiotherapeuten, Ergotherapeuten und Trainer*. Springer.
- Golle, K., Mechling, H., & Granacher, U. (2019). Koordinative Fähigkeiten und Koordinations-training im Sport. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (Kap. 51-1). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4_51-1
- González-González, C. S., Gómez del Río, N., & Navarro-Adelantado, V. (2018). Exploring the benefits of using gamification and videogames for physical exercise: A review of state of art. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 5(2), 46–52. <https://doi.org/10.9781/IJIMAI.2018.03.005>
- Graf, E., Haas, M., Wild, L., Schneeberger, L., & Martin-Niedecken, A. L. (2023). Forschungs-basiertes Exergame-Design für die Sportrehabilitation. Beitrag präsentiert beim dvs-Sport-wissenschaftlichen Hochschultag, Bochum, Deutschland.
- Graf, E., Martin-Niedecken, A., & Haas, M. (2024). Therapie mit Spiel und Spaß: Ein neu ent-wickelt Exergame zur Knierehabilitation. *pt Zeitschrift für Physiotherapeuten*, 76(6), 38–43. <https://doi.org/10.21256/zhaw-30934>
- Haas, M. (2020). *Biomechanical analysis of selected risk and protective factors for an anterior cruciate ligament (re-) rupture during a training with the ExerCube* (Masterarbeit, ETH Zü- rich). ETH Research Collection. <https://doi.org/10.21256/zhaw-28312>
- Haas, M. C., Martin-Niedecken, A. L., Wild, L., Schneeberger, L., & Graf, E. S. (2023). Biome- chanical analysis of the knee during an immersive, high-intensity exergame training in healthy athletes. *Poster präsentiert auf dem Scandinavian Sports Medicine Congress*, Co- penhagen, Denmark. <https://doi.org/10.21256/zhaw-26952>
- Haas, M., Martin-Niedecken, A. L., Wild, L., Schneeberger, L., & Graf, E. (2024a). Biomechan- ical risk factors for ACL injury differ between the sexes when performing a high-intensive exergame. *Current Issues in Sport Science*, 9(2). <https://doi.org/10.36950/2024.2ciss044>
- Haas, M., Martin-Niedecken, A. L., Wild, L., Schneeberger, L., & Graf, E. (2024b). Comparison of biomechanical risk factors for ACL injury between patients and healthy subjects during exergaming. *Current Issues in Sport Science*, 9(2). <https://doi.org/10.36950/2024.2ciss045>
- Haas, M., Martin-Niedecken, A. L., Wild, L., Schneeberger, L., & Graf, E. (2024c). Intra- and inter-subject variability in a realistic, non-standardized exergaming scenario. In *Proceedings*

- of the 42nd International Society of Biomechanics in Sports Conference (S. 350–355). Northern Michigan University. <https://doi.org/10.21256/zhaw-31220>
- Haas, M. C., Martin-Niedecken, A. L., Wild, L., Schneeberger, L., & Graf, E. S. (2025). Biomechanical risk factors for ACL injury during a high-intensity exergame differ between the sexes based on exercise type. *PLOS ONE*, *20*(5), e0324702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324702>
- Hribernik, M., Umek, A., Tomažič, S., & Kos, A. (2022). Review of real-time biomechanical feedback systems in sport and rehabilitation. *Sensors*, *22*(8), 3006. <https://doi.org/10.3390/s22083006>
- Hulatt, L. (2024, 17. September). Motorische Kontrolle. In *StudySmarter*. Abgerufen am 10. August 2025, von <https://www.studysmarter.de/schule/sport/bewegungslehre/motorische-kontrolle/>
- Hunicke, R., LeBlanc, M., & Zubek, R. (2004). MDA: A formal approach to game design and game research. *AAAI Workshop on Challenges in Game AI*, 1–5.
- Liu, T., & Lipowski, M. (2021). Sports gamification: Evaluation of its impact on learning motivation and performance in higher education. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(3), 1267. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031267>
- Manser, P., Herold, F., & de Bruin, E. D. (2024). Components of effective exergame-based training to improve cognitive functioning in middle-aged to older adults: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, *99*, 102385. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2024.102385>
- Martin-Niedecken, A. L., Haas, M., Ketelhut, S., & Graf, E. (2023). Exergames – innovative Trainingsansätze für Prävention, Rehabilitation und Sport!? Beitrag präsentiert beim dvs-Sportwissenschaftlichen Hochschultag, Bochum, Deutschland. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/29810>
- Mekler, E. D., Brühlmann, F., Tuch, A. N., & Opwis, K. (2015). Towards understanding the effects of individual gamification elements on intrinsic motivation and performance. *Computers in Human Behavior*, *45*, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.08.048>
- Müller, F., & König, A. (2023). Robotik zur Unterstützung der neurologischen Rehabilitation – ein Überblick. In M. Groß, B. Hennig, S. Kappel, & F. Wallhoff (Hrsg.), *Assistive Technologien, technische Rehabilitation und Unterstützte Kommunikation* (S. 1–12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64118-7_16
- Müller, H., Skjæret-Maroni, N., Bardal, E. M., Vereijken, B., & Baumeister, J. (2024). Exergaming interventions for older adults: The effect of game characteristics on gameplay. *Experimental Gerontology*, *197*, 112610. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2024.112610>
- Nor, N. N., Sunar, M. S., & Kapi, A. Y. (2020). User experience of gamified virtual reality (VR) in sport: A review. In H. Santos, G. Pereira, M. Budde, S. Lopes, & P. Nikolic (Hrsg.),

- Science and Technologies for Smart Cities* (S. 460–472). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-51005-3_36
- Oh, Y., & Yang, S. (2010). Defining exergames & exergaming. [Konferenzbeitrag].
- Peng, W., Lin, J.-H., Pfeiffer, K. A., & Winn, B. (2012). Need satisfaction supportive game features as motivational determinants: An experimental study of a self-determination theory guided exergame. *Media Psychology*, 15(2), 175–196.
<https://doi.org/10.1080/15213269.2012.673850>
- Ramasamy, P., Renganathan, G., & Kurita, Y. (2023). Force feedback-based gamification: Performance validation of squat exergame using pneumatic gel muscles and dynamic difficulty adjustment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(10), 6371–6378.
<https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3306285>
- Rheinberg, F., & Vollmeyer, R. (2018). *Motivation* (9. Aufl.). Kohlhammer Verlag.
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, 55(1), 68–78.
<https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2002). Overview of self-determination theory: An organismic dialectical perspective. In R. M. Ryan & E. L. Deci (Hrsg.), *Handbook of self-determination research* (S. 3–33). University of Rochester Press.
- Ryan, R. M., Rigby, C. S., & Przybylski, A. K. (2006). The motivational pull of video games: A self-determination theory approach. *Motivation and Emotion*, 30(4), 344–360.
<https://doi.org/10.1007/s11031-006-9051-8>
- Sailer, M. (2016). *Die Wirkung von Gamification auf Motivation und Leistung: Empirische Studien im Kontext manueller Arbeitsprozesse* (1. Aufl.). Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-14309-1>
- Sailer, M., Hense, J. U., Mandl, H., & Klevers, M. (2013). Psychological perspectives on motivation through gamification. *Interaction Design and Architecture(s) Journal*, 19, 28–37.
<https://doi.org/10.55612/s-5002-019-002>
- Sailer, M., Hense, J., Mayr, S. K., & Mandl, H. (2017). How gamification motivates: An experimental study of the effects of specific game design elements on psychological need satisfaction. *Computers in Human Behavior*, 69, 371–380.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.12.033>
- Schell, J. (2008). *The art of game design: A book of lenses*. Morgan Kaufmann.
- Schutte, N. S. (2024). Exergames and psychological well-being: A meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 15, 1357923. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1357923>
- Seidler, R. D., Noll, D. C., & Thiers, G. (2004). Feedforward and feedback processes in motor control. *NeuroImage*, 22(4), 1775–1783. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.05.003>

- Staiano, A. E., & Calvert, S. L. (2011). Exergames for physical education courses: Physical, social, and cognitive benefits. *Child Development Perspectives*, 5(2), 93–98. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00162.x>
- Tóth, Á., & Lógó, E. (2018). The effect of gamification in sport applications. In *2018 9th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)* (S. 69–74). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CogInfoCom.2018.8639934>
- Utamayasa, I. G. D., Kusuma, A. I., & Ariani, L. P. T. (2025). Innovation in metaverse virtual reality technology and gamification physical education learning styles on students' motor skills. *Pedagogical Research*, 24(3), Article e12345. <https://doi.org/10.55860/pd3pdm39>
- Wagner, M., Jekauc, D., Mechling, H., & Bös, K. (2024). Motorische Entwicklungsdiagnostik. In R. Dohrenbusch (Hrsg.), *Psychologische Begutachtung* (S. 1–25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64801-8_138-1
- Wibowo, C. (2024). Enhancing self-esteem, satisfaction, and motor skills through gamification in elementary physical education. *Theory and Methods of Physical Education and Sports*, 2024(3), 15–23. <https://doi.org/10.17309/tmfv.2024.3.03>

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und in der Bearbeitung und Abfassung keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe. Die vorliegende Bachelorarbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, 17.09.2025

Ort, Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Schmid'. The signature is written in a cursive style with a large, stylized 'A' and 'S'.

Unterschrift

Anhang A

Einzelwertung Proband 2

Exergame Bericht



2025-Jun-15 17:25:03

Username	Geschlecht	Alter	Gewicht / Grösse	BM	Fitnesskategorie	Gruppe/Team
[REDACTED]	M	36 years	78 kg / 182 cm	23.5	Athletisch	COROX

Protokoll	Fähigkeiten	Perzentil	Einstufung	uScore
1 Ballvin Dodge Ball [Hard]	Kognition	73.6%	gut	2271.1
2 Ballvin Dodge Ball [Hard]	Kognition	59.9%	durchschnittlich	1900.0
3 Ballvin SkiEasy [Hard]	Koordination	63.6%	gut	8029.1
4 Ballvin SkiEasy [Hard]	Koordination	80.7%	gut	7895.4

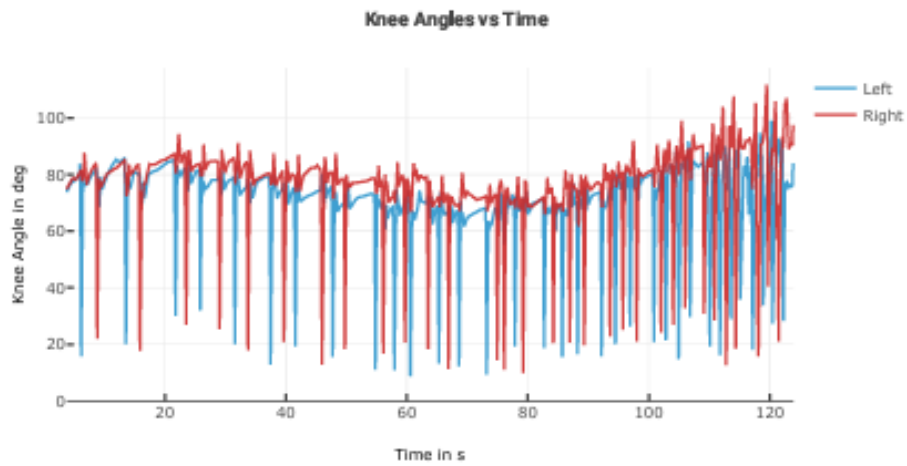
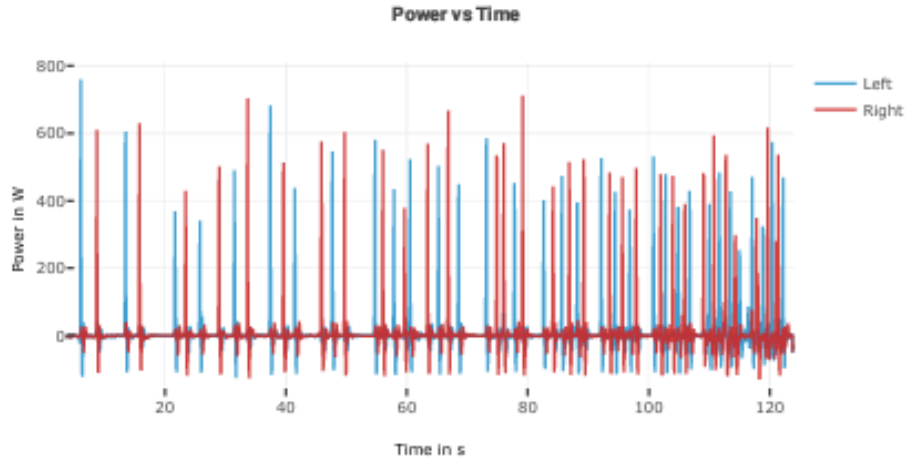
Das Perzentil vergleicht dein Messwert mit den Werten von Nutzerinnen in deiner Alters- und Geschlechtsgruppe. Es wird als Prozentsatz der User:innen mit einer Messgrösse unter deiner ausgedrückt.



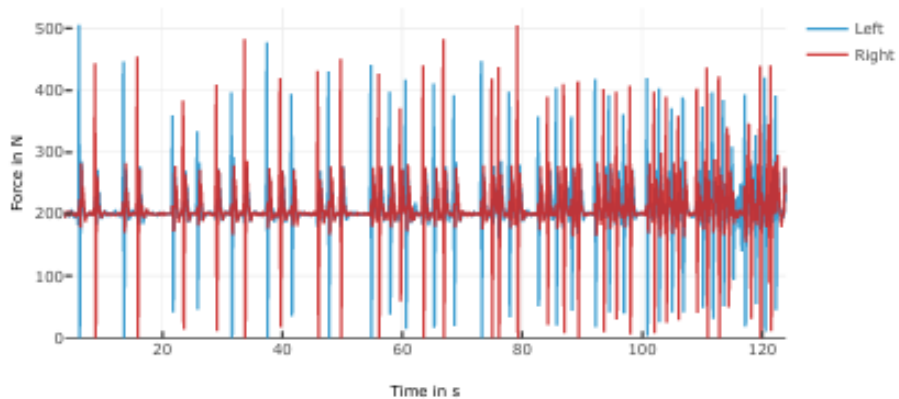
Ballvin Dodge Ball [Hard], Protokoll 1/4

Einstellungen

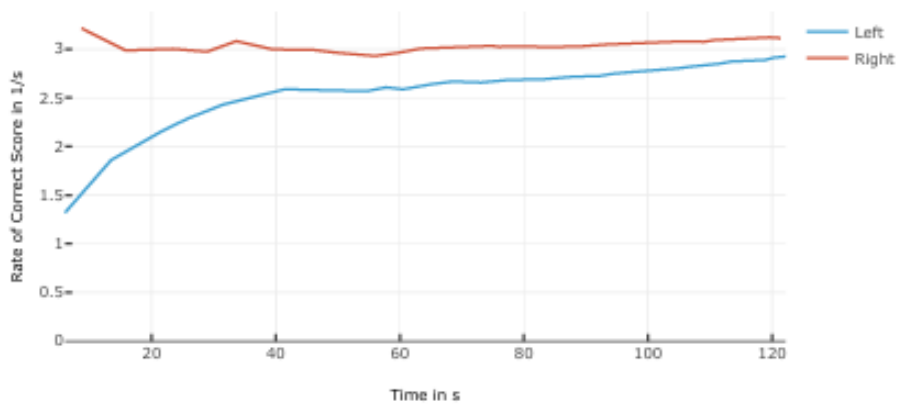
Avg power in W	Peak speed in m/s	Avg force in N	Rate of correct score in 1/s	Reaktionszeit in ms	Anzahl erfolgreiche Versuche	Anzahl Versuche						
24.5	25.5	1.6	1.5	207.8	207.8	2.9	3.1	342.0	321.2	32.0	30.0	63.0



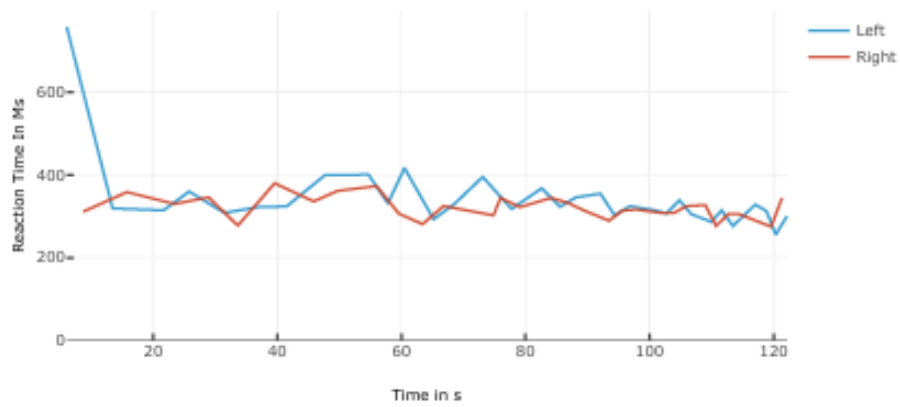
Force vs Time



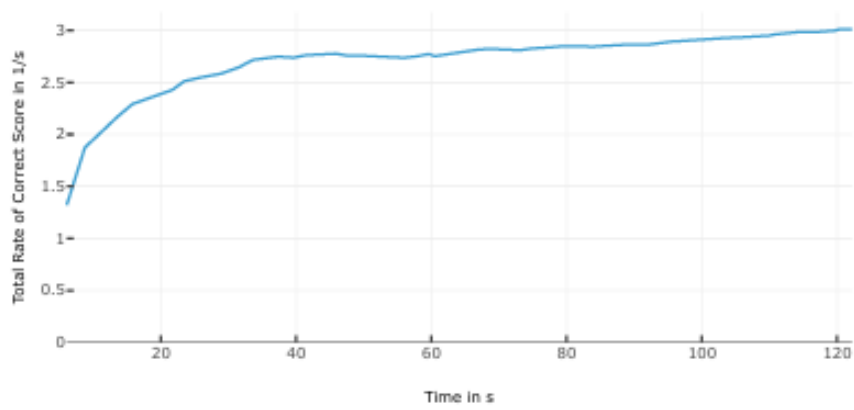
Rate of Correct Score in 1/s



Reaction Time In Ms



Total Rate of Correct Score in 1/s

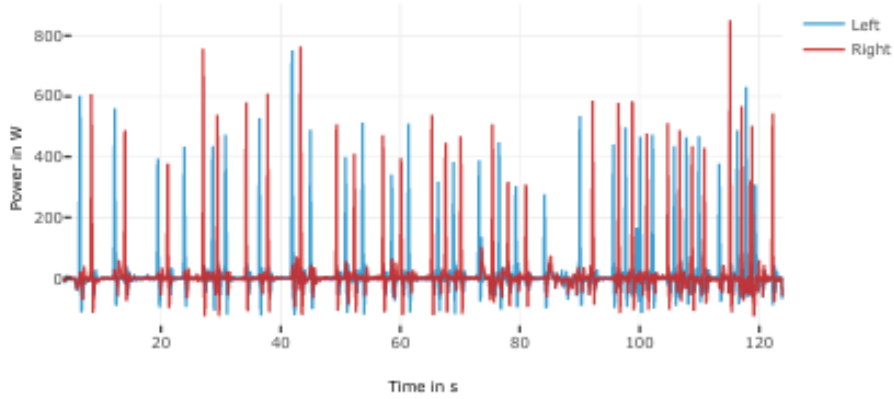


Ballvin Dodge Ball [Hard], Protokoll 2/4

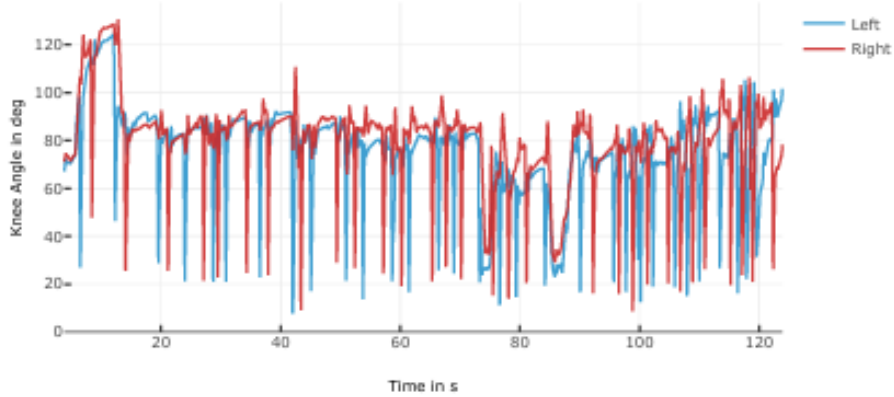
Einstellungen

Avg power in W		Peak speed in m/s		Avg force in N		Rate of correct score in 1/s		Reaktionszeit in ms		Anzahl erfolgreiche Versuche		Anzahl Versuche
26.5	27.3	1.6	1.7	208.4	208.4	2.8	2.7	353.9	369.9	27.0	28.0	63.0

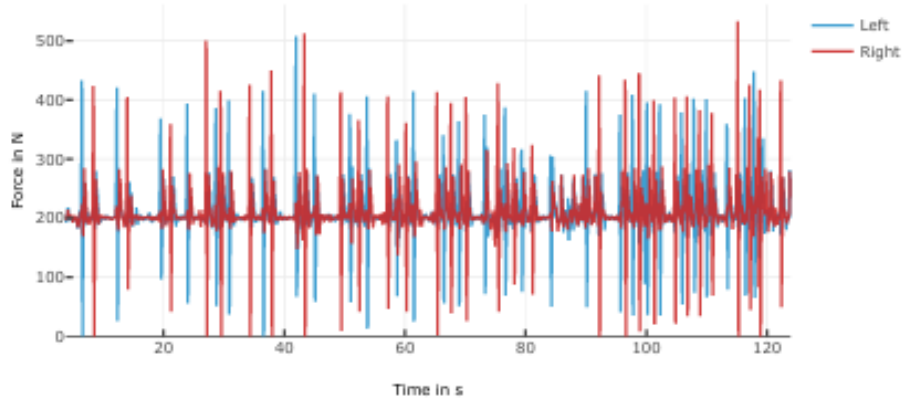
Power vs Time



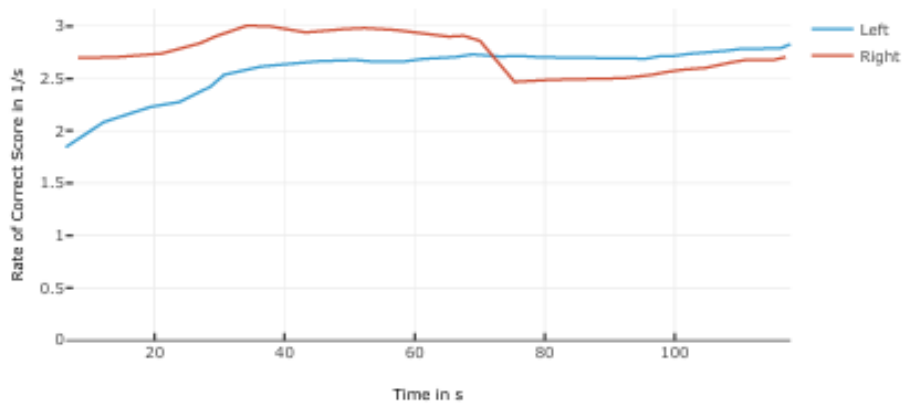
Knee Angles vs Time

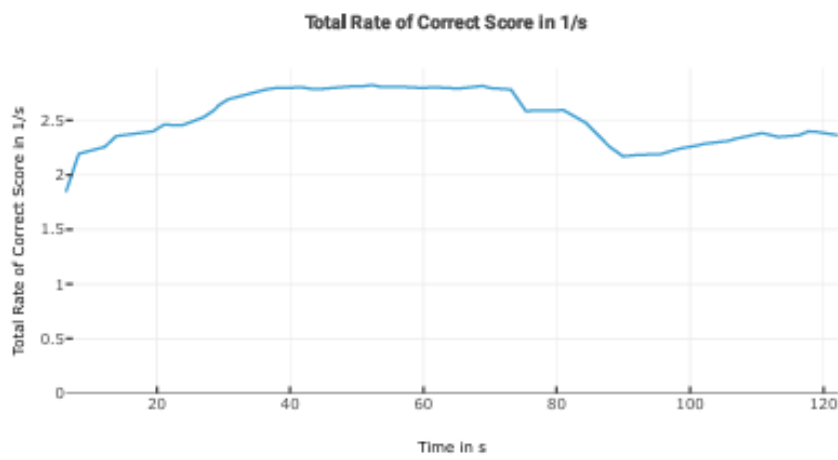
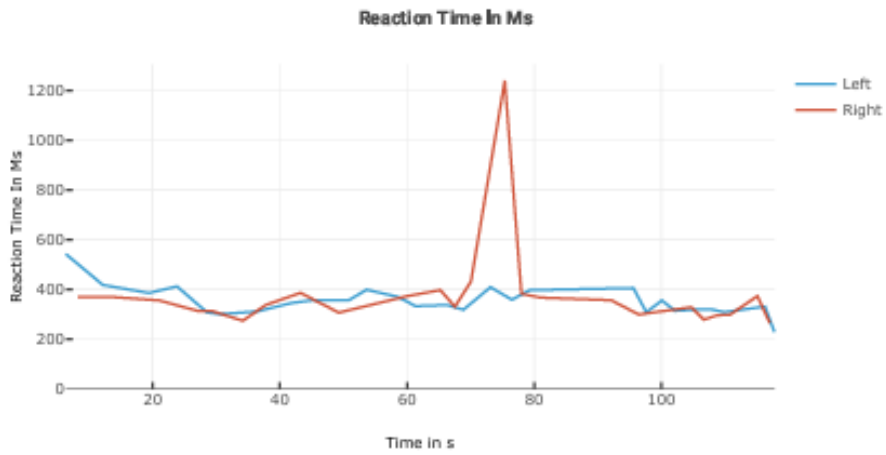


Force vs Time



Rate of Correct Score in 1/s

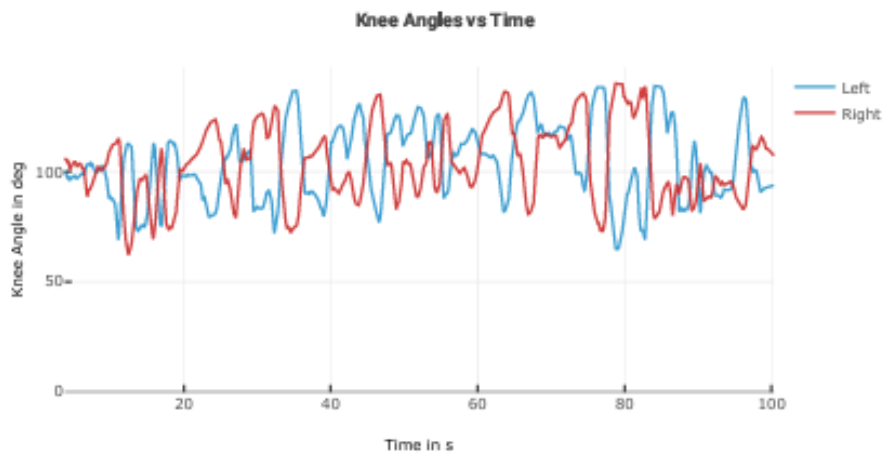
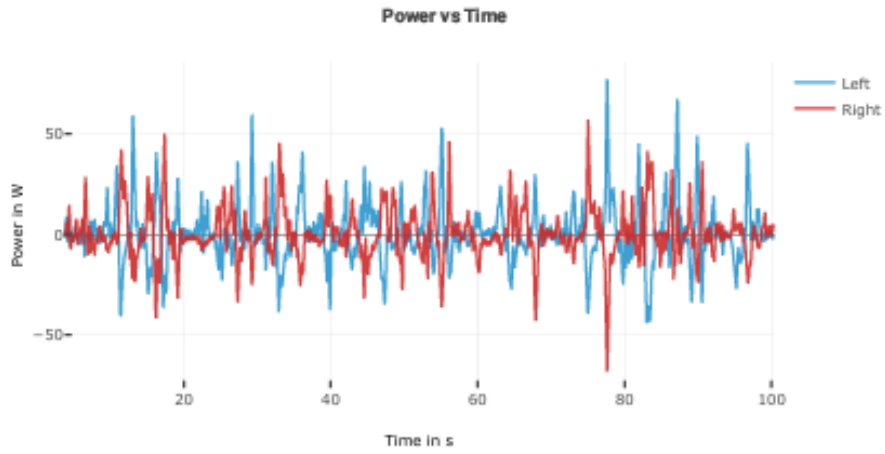


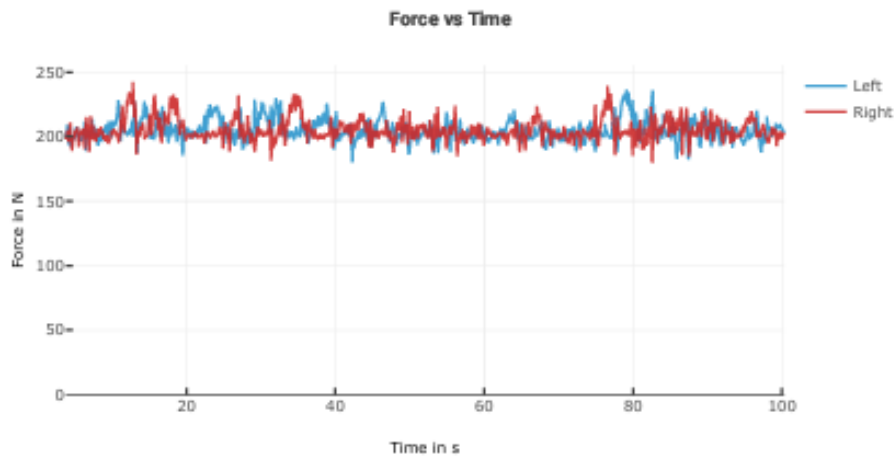


Balvin SkiEasy [Hard], Protokoll 3/4

Einstellungen

Avg power in W		Peak speed in m/s		Avg force in N	
9.1	8.3	0.4	0.3	205.0	205.1



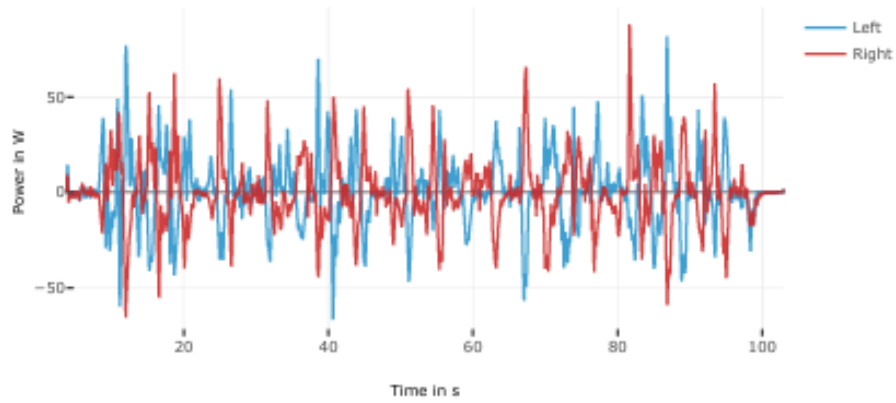


Balvin SkiEasy [Hard], Protokoll 4/4

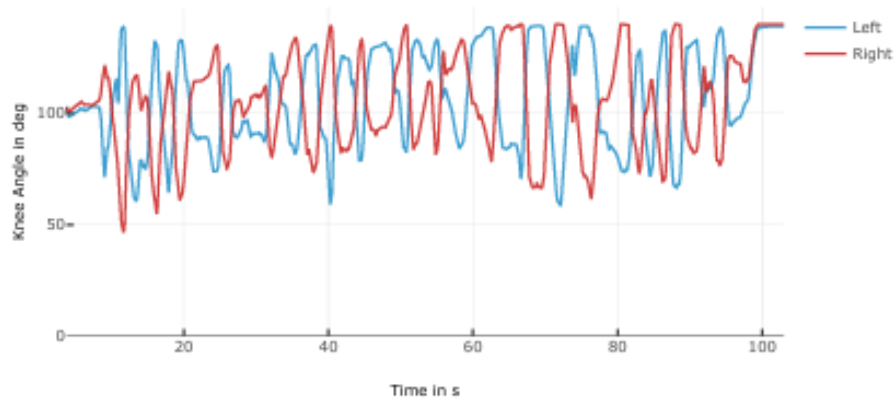
Einstellungen

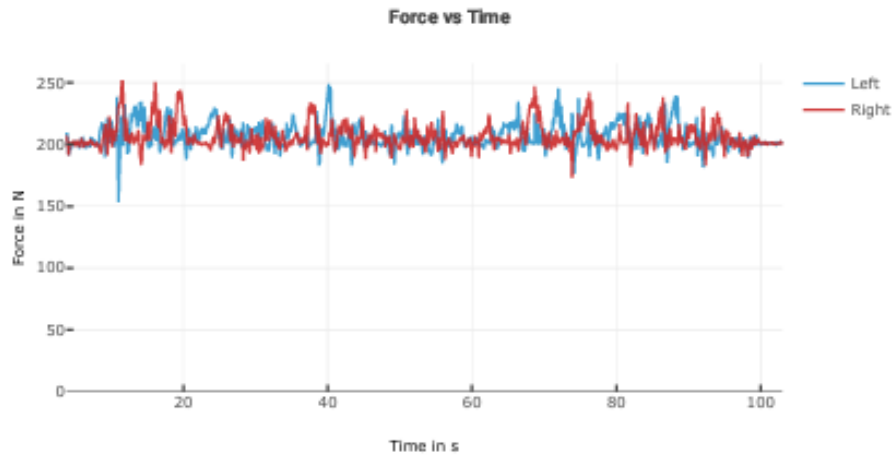
	Avg power in W	Peak speed in m/s	Avg force in N			
	11.8	11.7	0.4	0.4	206.5	206.4

Power vs Time



Knee Angles vs Time





Parameter-Tests (Proband 2)



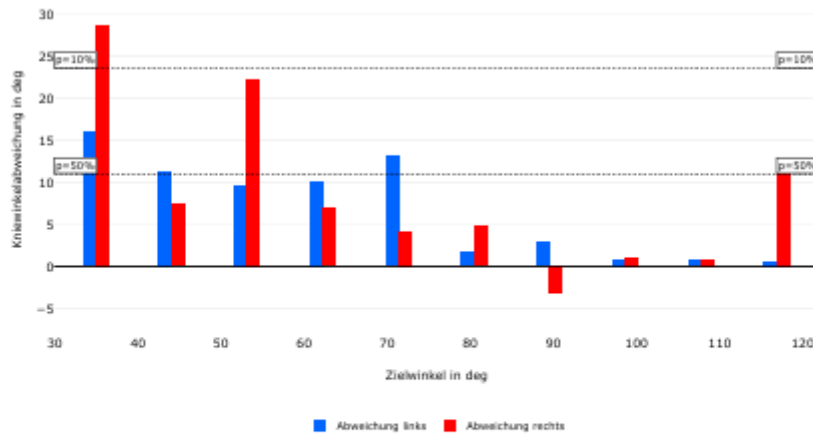
Test des Kniegelenkstellungssinn

Username	Geschlecht	Alter	Gewicht / Größe	BMI	Fitnesskategorie	Gruppe/Team
[REDACTED]	M	36 years	78 kg / 182 cm	23.5	Athletisch	COBOX

Propriozeption ist für neuromotorische Kontrolle unerlässlich. Der Kniegelenkstellungssinn ist die Fähigkeit, einen bestimmten Kniewinkel ohne visuelles Feedback präzise zu reproduzieren. Verletzte Gelenke reproduzieren einen Zielwinkel schlechter als gesunde. Diese Fähigkeit wird als die Abweichung von einem Zielwinkel gemessen.

Deine Abweichung links **8.7 deg** Deine Abweichung rechts **12.7 deg**

In deiner Alters- und Fitnesskategorie bist du besser als
52% aller Männer **durchschnittlich**
28% aller Männer **ausreichend**





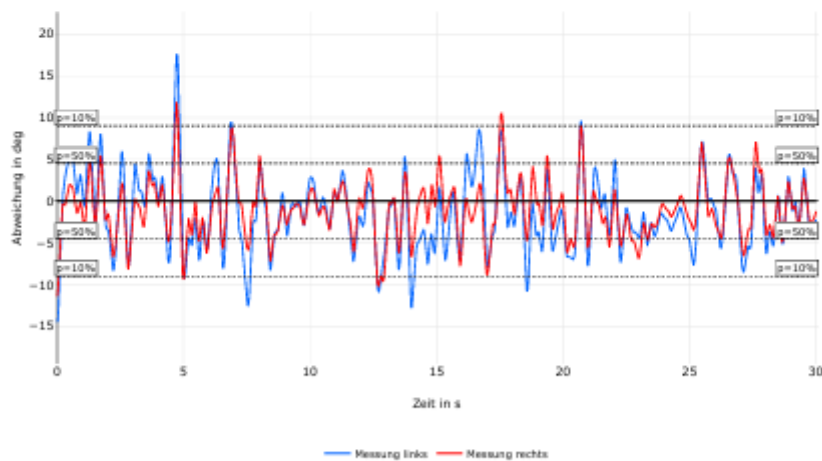
Test der Kniegelenk-Steifigkeitsregelung

Username	Geschlecht	Alter	Gewicht / Größe	BMI	Fitnesskategorie	Gruppe/Team
[REDACTED]	M	36 years	78 kg / 182 cm	23.5	Athletisch	COROX

Die Fähigkeit das Kniegelenk aktiv zu stabilisieren ist beim Gehen, Joggen, Treppensteigen oder Ski fahren von grosser Bedeutung. Durch Stärkung deiner Beinmuskulatur, stabilisierst du dein Knie und verbesserst das Ausführen einer Bewegung. Die Kniestabilität wird als Abweichung von einem Zielkniewinkel gemessen, während auf dein Bein eine sich ändernde Kraft einwirkt.

Deine Abweichung links **4.6 deg** Deine Abweichung rechts **3.6 deg**

In deiner Alters- und Fitnesskategorie bist du besser als
60% aller Männer **durchschnittlich**
83% aller Männer **gut**





Test Tracking Ability

Objektiviert die Propriozeption, den Kniegelenkstellungssinn, und die motorische Kontrolle. Bleib im Kreis, indem du deine Beine beugst und streckst. Bewege dich weiter, wenn der Kreis verschwindet.

2025-May-23 15:47:46

Username	Geschlecht	Alter	Gewicht / Grösse	BM	Fitnesskategorie	Gruppe/Team
	M	36 years	78 kg / 182 cm	23.5	Athletisch	COROX

Einstellungen

Last pro Bein [kg]	Aufwärmdauer [s]	Testzeit [s]	Min Kniewinkel [deg]	Max Kniewinkel [deg]	Lastdifferenz L/R [%]
27.3	18.0	36.0	5.0	125.0	0.0

Resultat

57.0%

Dein uScore im Vergleich zu NutzerInnen in deiner Alters- und Geschlechtsgruppe.



Deine L/R Seiten-Symmetrie ist sehr gut (bal<10.0%).

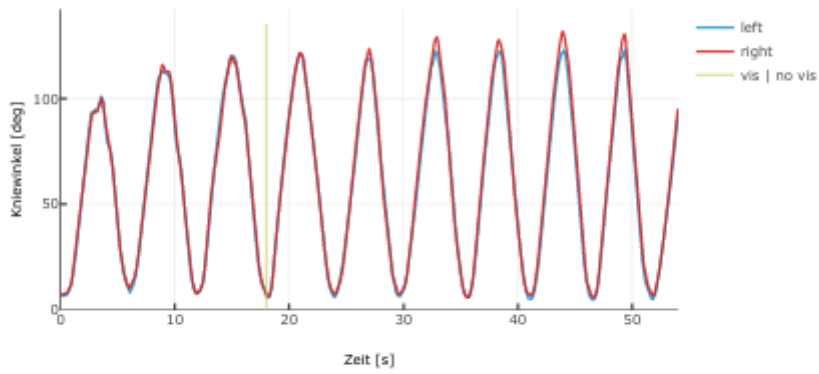
Die propriozeptive Genauigkeit von deinem linken Bein ist ausreichend (p=30.3%).

Die propriozeptive Genauigkeit von deinem rechten Bein ist durchschnittlich (p=38.2%).

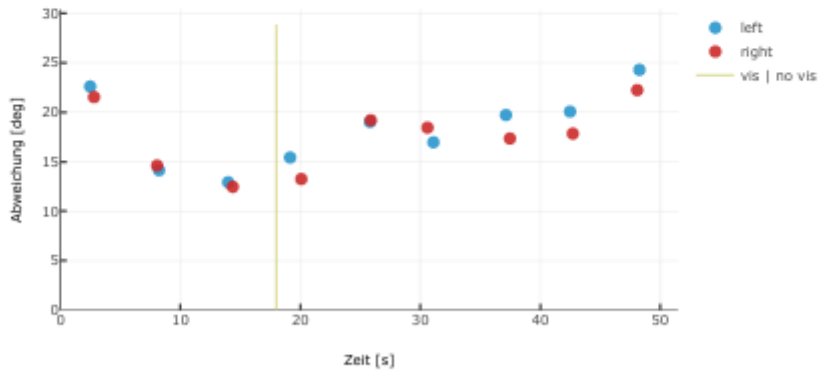
Satz	Abweichung in deg		L/R Diff. m/ F/ in deg	L/R Diff. /o /F in deg	uScore	uScore	uScore
1	20.15	19.08	-0.03	-2.20	601.8	610.8	606.3
					-5.28%	+1.48%	

Verlauf

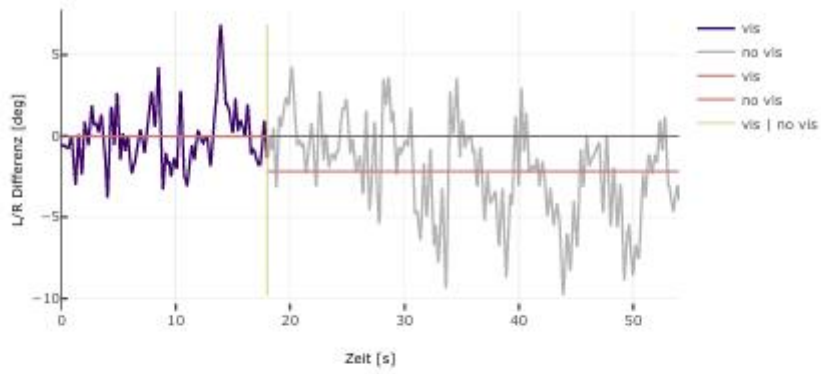
Kniewinkel vs Zeit



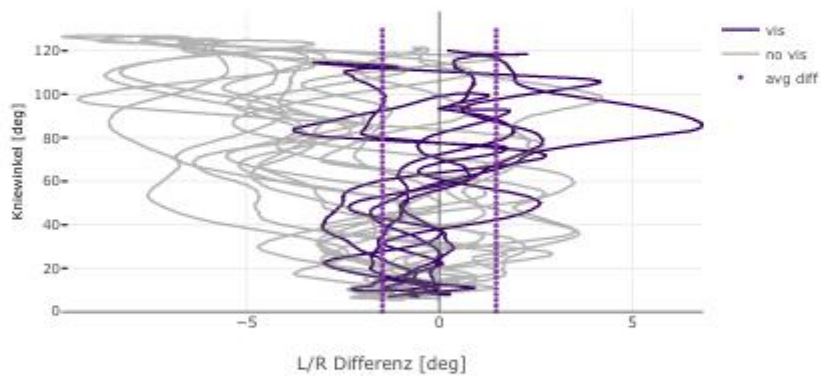
Abweichung vs Zeit



L/R Asymmetrie vs Zeit



Cursor-Position vs Zeit





Test Negative Power

Misst Reaktionszeit, dynamische Stabilität und Spitzengeschwindigkeit. Inspiriert vom Drop Jump.

2025-May-23 15:49:38

Username	Geschlecht	Alter	Gewicht / Grösse	BM	Fitnesskategorie	Gruppe/Team
[REDACTED]	M	36 years	78 kg / 182 cm	23.5	Athletisch	COROX

Einstellungen

Testlast/Bein [kg]	Testwinkel [deg]	Anzahl Sätze	Pausendauer [s]	Benutzte Beine
66.3	70.0	4	4.0	L/R

Resultat

60.5%

Dein uScore im Vergleich zu Nutzerinnen in deiner Alters- und Geschlechtsgruppe.

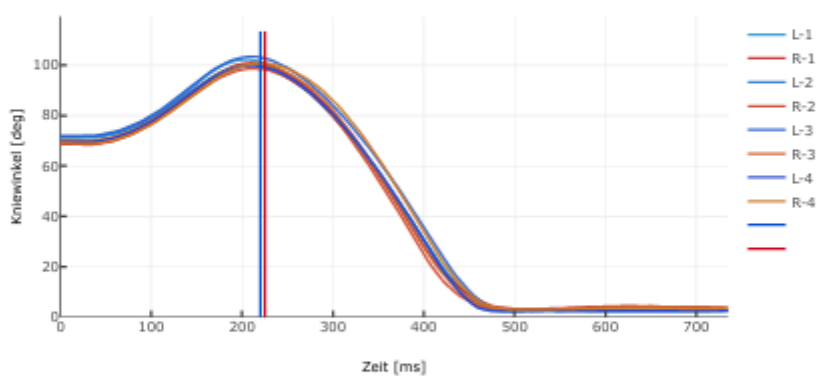


Deine L/R Seiten-Symmetrie ist grossartig (bal<5.0%).
Die Reaktionszeit deines linken Beins ist gut (p=67.5%).
Die Reaktionszeit deines rechten Beins ist durchschnittlich (p=59.3%).

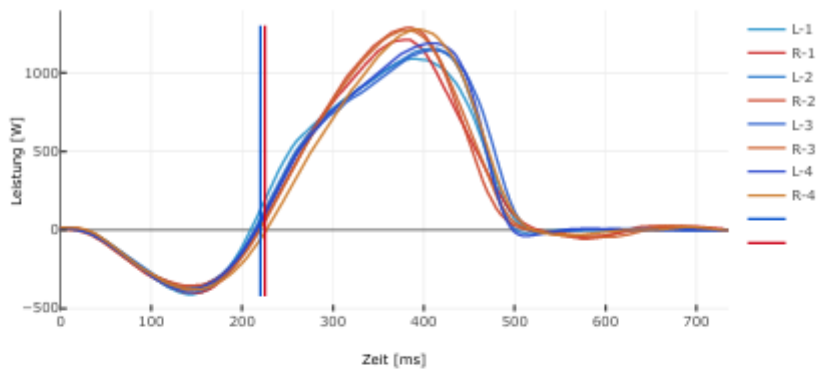
Satz	Overshoot in deg		Reaktionszeit in ms		Spitzengeschw. in m/s		Spitzenleist. in W/kg		PPI		uScore	
1	32.3	31.0	217.0	222.0	1.33	1.44	13.8	15.7	2.6	3.0	636.2	626.1
	-4.06%		+2.25%		+7.34%		+11.87%		+14.88%		-1.59%	
2	30.1	28.7	221.0	226.0	1.36	1.46	14.6	16.4	3.1	3.6	629.2	622.5
	-4.70%		+2.21%		+6.80%		+11.02%		+14.73%		-1.07%	
3	33.4	30.5	223.0	227.0	1.36	1.45	14.5	16.2	2.8	3.4	622.3	618.0
	-8.69%		+1.76%		+6.13%		+10.43%		+16.70%		-0.68%	
4	29.8	30.8	223.0	234.0	1.38	1.46	14.9	16.2	3.0	3.3	626.9	603.7
	+3.03%		+4.70%		+5.42%		+7.95%		+7.48%		-3.69%	

Verlauf

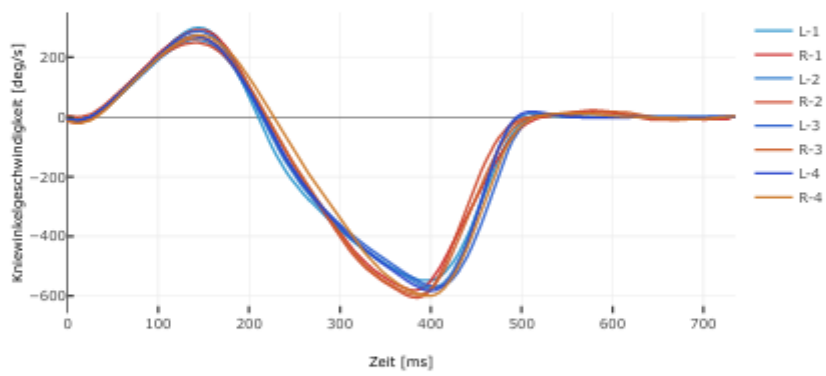
Kniewinkel vs Zeit



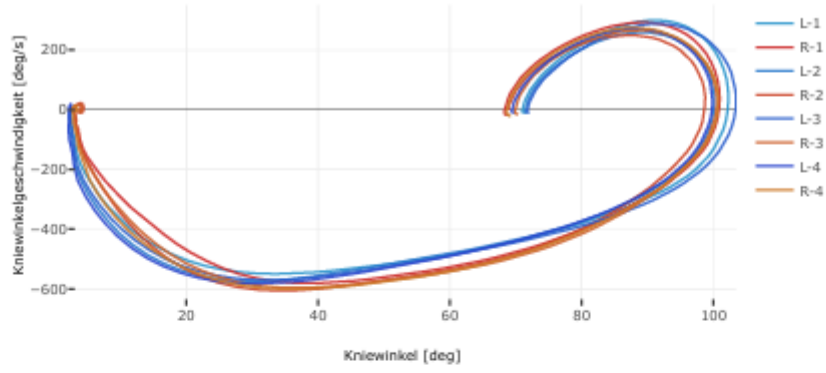
Leistung vs Zeit



Kniewinkelgeschwindigkeit vs Zeit



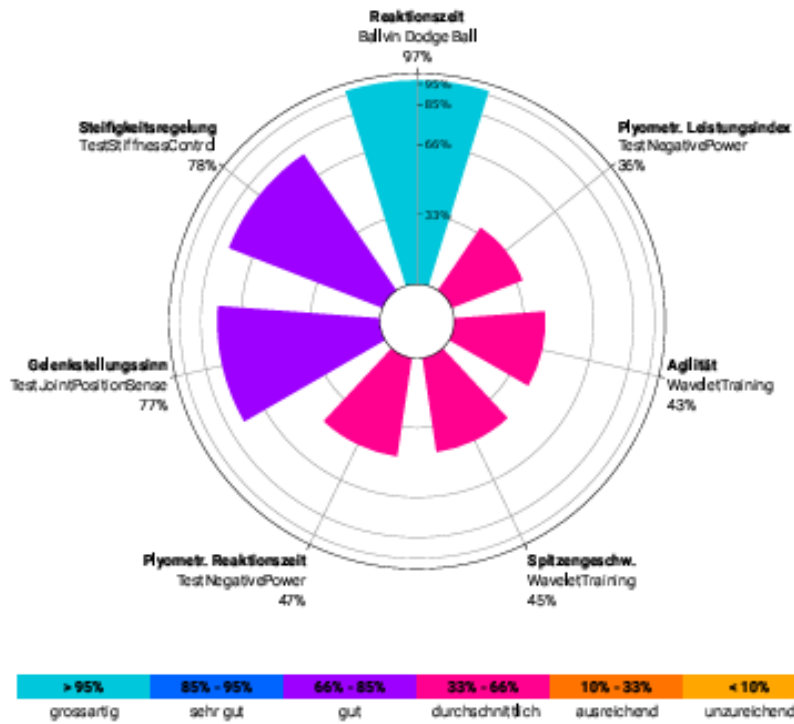
Kniewinkelgeschwindigkeit vs Kniewinkel

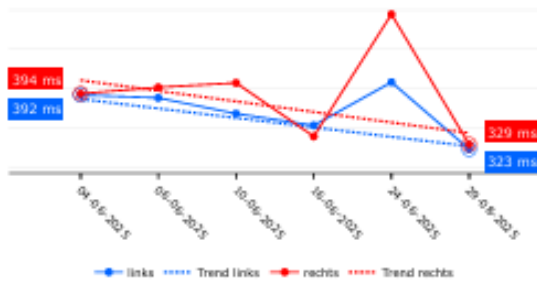




Dein Insights Bericht

Username [Redacted]
Vollständiger Name [Redacted]
Supervisor *
Geschlecht Weiblich
Geburtsdatum 2003-08-21
Altersgruppe 15 - 25
Gewicht / Grösse 61 kg / 167 cm
Fitnesskategorie Fitness
Gruppe/Team COROX
Kategorie / Indikation *
Trainingsintervall 06-03-2025 - 29-08-2025





Reaktionszeit grossartig

Datenquelle: Ball in Dodge Ball

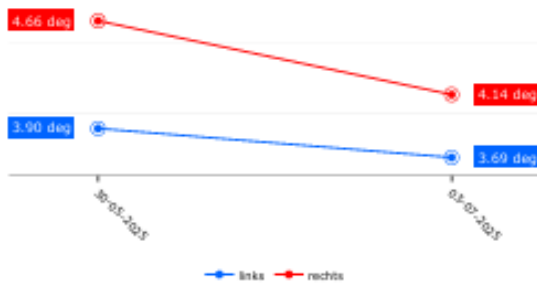
Trend in einem 86-Tage-Zeitraum:

+15.5% **+16.3%**

links rechts

L/R Asymmetrie: **grossartig** (1.9%)

Die Reaktionszeit ist die Zeitspanne zwischen der Wahrnehmung, der möglichen Verarbeitung eines sensorischen Reizes und der motorischen Reaktion auf den Reiz. Die Reaktionszeit kann in jedem Alter trainiert werden. Tafel ist besetzt



Steifigkeitsregelung gut

Datenquelle: Test Stiffness Control

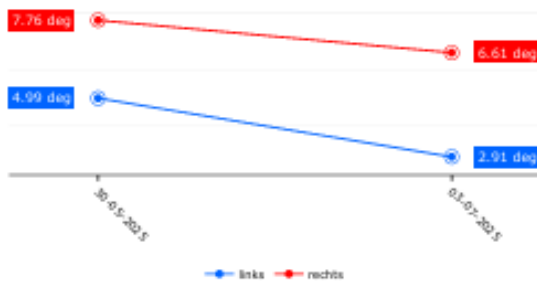
Trend in einem 34-Tage-Zeitraum:

+5.3% **+11.3%**

links rechts

L/R Asymmetrie: **gut** (10.8%)

Die Fähigkeit des Kniegelenks aktiv zu stabilisieren ist beim Gehen, Joggen, Treppensteigen oder Skifahren von grosser Bedeutung. Durch Stärkung der hier Beinmuskulatur, stabilisiert du dein Knie und verbesserst das Ausführen einer Bewegung. Die Kniestabilität wird als Abweichung von einem Zielkniewinkel gemessen, während auf dein Bein ein sich ändernde Kraft einwirkt. Tafel ist besetzt



Position Sense gut

Datenquelle: Test Joint Position Sense

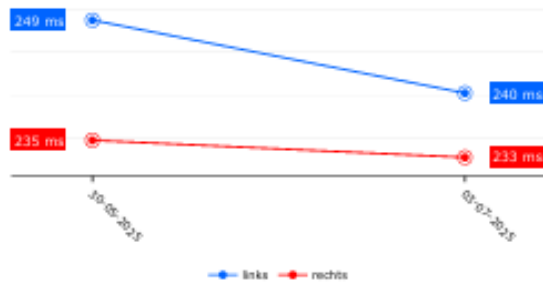
Trend in einem 34-Tage-Zeitraum:

+41.7% **+14.8%**

links rechts

L/R Asymmetrie: -- (56.0%)

Propriozeption ist für neuromotorische Kontrolle unerlässlich. Der Kniegelenksstellungsin ist die Fähigkeit, einen bestimmten Kniewinkel ohne visuelles Feedback präzise zu reproduzieren. Verletzte Gelenke reproduzieren einen Zielwinkel schlechter als gesunde. Diese Fähigkeit wird als die Abweichung von einem Zielkniewinkel gemessen. Tafel ist besetzt



Plyometric Reaction Time

durchschnittlich

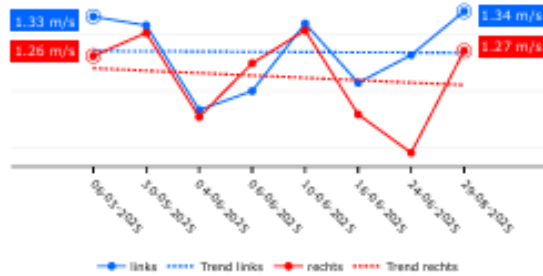
Datenquelle: Test Negative Power

Trend in einem 34-Tage-Zeitraum:

+3.4% **+0.9%**
links rechts

L/R Asymmetrie: **grossartig** (3.1%)

Die Reaktionszeit ist die Zeitspanne zwischen der Wahrnehmung, der möglichen Verarbeitung eines sensorischen Reizes und der motorischen Reaktion auf den Reiz. Die Reaktionszeit kann in jedem Alter trainiert werden. [Hier ist](#) [beispiel](#)



Spitzengeschw.

durchschnittlich

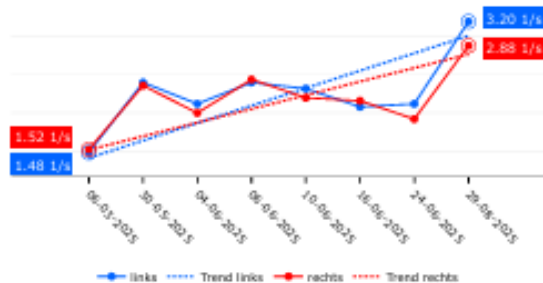
Datenquelle: Wavet Training

Trend in einem 176-Tage-Zeitraum:

-0.3% **-2.4%**
links rechts

L/R Asymmetrie: **sehr gut** (5.2%)

Die Geschwindigkeit ist ein Mass dafür, wie schnell du deine Beinbewegungen machst. Die Spitzengeschwindigkeit auf dem ddrrobotec korreliert sehr gut mit deiner Gehgeschwindigkeit. Sie ist ein zuverlässiges Mass für die Beurteilung und Überwachung deines Funktionsstatus und deiner allgemeinen Gesundheit. Die Geschwindigkeit wird in m/s gemessen.



Wiederholungsrate

durchschnittlich

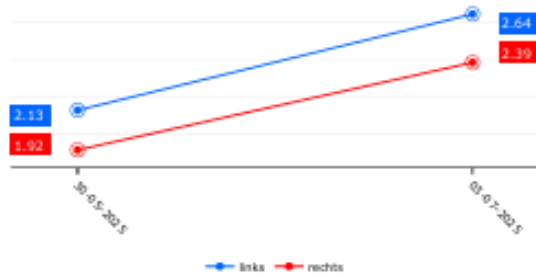
Datenquelle: Wavet Training

Trend in einem 176-Tage-Zeitraum:

+114.0% **+82.8%**
links rechts

L/R Asymmetrie: **sehr gut** (9.9%)

Die Wiederholungsrate ist ein Mass dafür, wie schnell du deine Beinbewegungen machst. Dieses Mass korreliert sehr gut mit deiner Gehgeschwindigkeit. Sie ist ein zuverlässiges Mass für die Beurteilung und Überwachung deines Funktionsstatus und deiner allgemeinen Gesundheit. Die Wiederholungsrate wird in 1/s gemessen.



Plyometr. Leistungsindex

durchschnittlich

Datenquelle: Test Negative Power

Trend in einem 34-Tage-Zeitraum:

+24.1% links **+24.3%** rechts

L/R Asymmetric: **sehr gut** (98%)

Der plyometrische Leistungsindex (PPI) ist das Verhältnis zwischen der Spitzenleistung in der positiven (konzentrischen) Phase und der Spitzenleistung in der negativen (exzentrischen) Phase. Es ist ein Maß für die Reaktivität und zeigt, wie eine Person mit plyometrischen Aktivitäten umgeht und sie ausführt.