

# **Implizite Lernprozesse bei zyklischen Bewegungen**

Abschlussarbeit zur Erlangung des  
Master of Science in Sportwissenschaften  
Option Unterricht

eingereicht von

**Jana Kratzer**

an der  
Universität Freiburg, Schweiz  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche und Medizinische Fakultät  
Abteilung Medizin  
Department für Neuro- und Bewegungswissenschaften

in Zusammenarbeit mit der  
Eidgenössischen Hochschule für Sport Magglingen

Referent  
Prof. Wolfgang Taube

Betreuer  
PD Dr. Benedikt Lauber

Andelfingen, Juli 2020

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
1    Einleitung .....	4
1.1    Lernen.....	4
1.2    Motorisches Lernen.....	4
1.3    Explizites und implizites Lernen.....	7
1.4    Zyklische Bewegungen .....	13
1.5    Theoriebezug zur Masterarbeit.....	16
1.6    Ziel und konkrete Fragestellung.....	17
2    Methode.....	19
2.1    Untersuchungsgruppe.....	19
2.2    Studiendesign .....	20
2.3    Instrumente.....	22
2.4    Datenauswertung.....	23
3    Resultate.....	25
3.1    Vergleiche von Pre- und Post-Test.....	25
3.2    Vergleiche innerhalb der Lernphase .....	32
3.3    Vergleiche innerhalb des Post-Tests .....	41
3.4    Hypothesenüberprüfung der konkreten Fragestellung .....	42
4    Diskussion .....	43
4.1    Interpretation der Resultate .....	43
4.2    Beantwortung der Fragestellung .....	46
4.3    Kritische Betrachtung der Studie .....	48
4.4    Ausblick .....	49
5    Schlussfolgerung .....	51
5.1    Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.....	51
5.2    Konsequenzen der wichtigsten Erkenntnisse .....	51
Literatur .....	52
Dank .....	58

## Zusammenfassung

**Einleitung.** Die Fähigkeit des motorischen Lernens ermöglicht es dem Menschen, sich neue Bewegungen anzueignen, zu präzisieren und in bestimmten Situationen bewusst oder unbewusst auszuführen. Das Ziel des motorischen Lernens ist stets eine möglichst automatisierte Bewegung – der Prozess dahin kann jedoch auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit impliziten motorischen Lernprozessen. Bis heute wurden in Studien zu implizitem Lernen vorwiegend Bewegungen untersucht, die zu einem grossen Teil vom primären motorischen Kortex (M1) gesteuert werden. Inwiefern implizites Lernen bei zyklischen Bewegungen stattfindet, die weniger oder gar nicht durch den M1 gesteuert werden, sondern vorwiegend über zentrale Mustergeneratoren (CPGs) im Rückenmark, ist noch nicht bekannt. Die vorliegende Studie untersucht aus diesem Grund kurzfristige, implizite Lernprozesse bei der zyklisch-alternierenden Bewegung des Radfahrens.

**Methoden.** 33 Sportstudierende wurden in eine implizite Gruppe (IG) und eine Kontrollgruppe (KG) eingeteilt. Der Test wurde auf dem Radergometer durchgeführt, wobei im Pre- und Post-Test die zu erbringende Leistung (ZEL) für beide Gruppen konstant war, während der Lernphase aber nur für die KG. Bei der IG wechselte die ZEL während dieser Zeit in regelmässigen Abständen. Eine Mixed-Anova mit Messwiederholung diente den statistischen Auswertungen in SPSS, um die Variationskoeffizienten sowie die Ist-Soll-Differenzwerte verschiedener Parameter zu vergleichen. Zudem wurde für die Lernphase eine Korrelation der Zeit und der Differenzwerte zwischen Ist- und Sollwerten der Trittfrequenz berechnet.

**Resultate.** Alle Variationskoeffizienten nahmen bei der IG vom Pre- zum Post-Test zu. Die Variationskoeffizienten erhöhten sich bei der Leistung vom Pre- zum Post-Test bei der IG signifikant ( $p < 0.001$ ). Die Differenzwerte der Ist- und Soll-Werte der Trittfrequenz korrelierten bei der IG negativ mit der Dauer der Lernphase ( $p = 0.034$ ). Die Abweichung der Ist- von den Soll-Werten wurde im Verlaufe der Lernphase kleiner.

**Diskussion & Schlussfolgerung.** Die IG passte sich während der Lernphase an die Widerstandsänderungen an und führte die Aufgabe über die Zeit präziser aus. Ein Transfer des Lernpattern auf die Bedingung im Post-Test konnte jedoch nicht eindeutig gezeigt werden. Die Erhöhungen aller Variationskoeffizienten bei der IG sind aber Indikatoren dafür, dass die Widerstandsänderungen während der Lernphase dennoch zu kurzfristigen Anpassungen bzw. einem Lernprozess führten. Für aussagekräftigere Ergebnisse zu impliziten Lernprozessen bei zyklischen Bewegungen sind weitere Untersuchungen notwendig.

# **1 Einleitung**

Die folgenden Ausführungen liefern Informationen über die theoretischen Hintergründe der Themen dieser Studie, fassen die bereits vorliegenden Forschungsergebnisse zusammen und zeigen Forschungslücken auf. Die konkrete Fragestellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, wird am Schluss der Einleitung erläutert.

## **1.1 Lernen**

Verschiedene Sprachen, präzise Bewegungen, diverse Zahlen und Fakten zu Ereignissen können vom Menschen in einem Ausmass gelernt und abgespeichert werden, wie es keinem anderen Lebewesen möglich ist. Die menschliche Lernfähigkeit scheint beinahe uneingeschränkt zu sein (Young & Wasserman, 2005). In der Fachliteratur existieren etliche Definitionen von Lernen, wobei die Schwerpunkte unterschiedlich gesetzt werden (Brunner & Zeltner, 1980; Lenzen, 1989). Meistens wird erwähnt, dass Lernen auf Erfahrung basiert, eine Veränderung im Organismus hervorruft, die relativ konstant ist, und dass der Prozess nicht auf Reifung oder innere temporäre Zustände zurückgeführt werden kann.

In dieser Arbeit wird auf die Definition von Hannover, Zander & Wolter (2014) Bezug genommen: „Von Lernen wird gesprochen, wenn es auf der Grundlage von Erfahrung (selbst Erlebtem oder Wahrgenommenem) beabsichtigt oder unbeabsichtigt zu einer relativ dauerhaften Veränderung im Wissen oder Verhalten des Individuums kommt (S. 155).“

Das Lernen wird im «engeren» Verständnis erst durch einen Konsolidierungsprozess (Überführung des Wissens vom Kurzzeitgedächtnis in das Langzeitgedächtnis) abgeschlossen (Odendahl, 2016). Press, Casement, Pascual-Leone & Robertson (2005) schreiben dazu, dass die motorische Konsolidierung mehrere Stunden beansprucht.

In dieser Arbeit werden lediglich kurzfristige Lernprozesse bzw. -effekte untersucht, weshalb nicht vertiefter auf den Konsolidierungsprozess eingegangen wird.

## **1.2 Motorisches Lernen**

Im Bereich des motorischen Lernens oder auch Bewegungslernens wurde und wird viel geforscht. Forschungsfragen sind beispielsweise, wie ein Kind laufen, eine Kunstturnerin die Ausführung eines Tschussowitinas oder ein Golfspieler die perfekte Schlagtechnik lernt. Sind es reine Imitationen, geschieht das Lernen durch zufälliges Ausprobieren oder doch mit Hilfe von gezielten Instruktionen?

«Das motorische Lernen umfasst die vielfältigen Prozesse des Erwerbs, des Erhalts und der Veränderung von motorischen, aber auch sensorischen und kognitiven Strukturen (Witte, 2018, S. 106)». Viele Wiederholungen einer Bewegung führen zu schnelleren und gleichmässigeren Ausführungen. Ist eine Bewegung erstmal erlernt, kann diese automatisiert und ohne bewusst gesetzten Aufmerksamkeitsfokus ausgeführt werden (Seitz, 2001).

Der motorische Lernprozess wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst: vom Lerntyp, von der Motivation und der momentanen psychischen Verfassung, der Aufmerksamkeits- und Konzentrationsfähigkeit, der Auffassungsgabe, der Intelligenz und dem Vorstellungsvermögen, den bereits gemachten Bewegungserfahrungen, der Lernfähigkeit allgemein und von den äusseren Bedingungen (Lehrperson, Lernumgebung, ...) (Weineck, 2010).

Der motorische Prozess wird anhand verschiedenster Modelle beschrieben. Lapczyny, Engeln, Krzywinski und Groh (2018) fassten in ihrer Studie zwei mögliche Ansätze zum Aufbau des Lernprozesses zusammen (Abbildung 1). Einerseits wählten sie das 1967 entstandene Phasenmodell von Fitts und Posner, welches eher den psychologischen Erklärungsansatz beinhaltet, andererseits das Modell von Meinel und Schnabel (2007), welches den phänomenologischen Erklärungsansatz vertritt. Somit können die von aussen sichtbaren Entwicklungen als auch die kognitive Dimension des motorischen Lernprozesses berücksichtigt werden (Lapczyny et al., 2018).

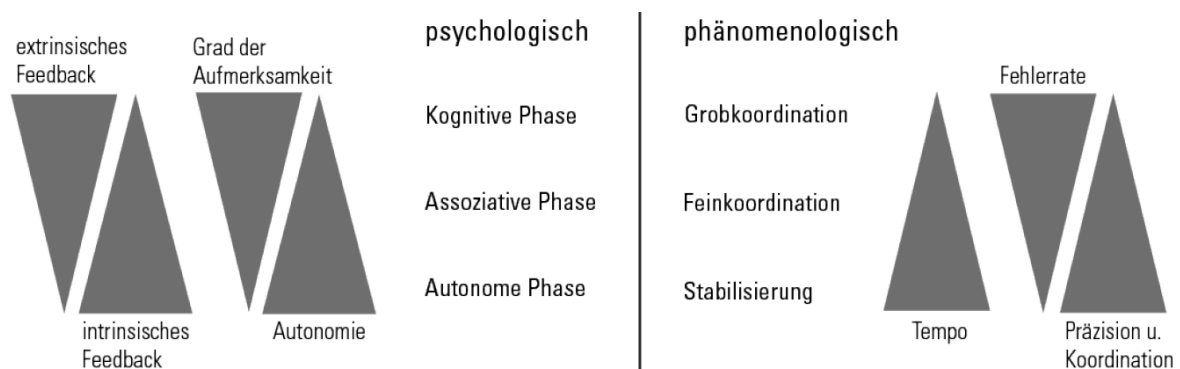


Abbildung 1. Psychologischer (nach Fitts und Posner, 1967) sowie phänomenologischer (nach Meinel und Schnabel, 2007) Erklärungsansatz von motorischen Lernprozessen (Lapczyny et al., 2018, S. 163).

Der Lernprozess wird grob in drei Phasen aufgeteilt, wobei die Übergänge zwischen den Phasen jeweils fließend sind. Die Bekanntmachung mit einer neuen Bewegung und die Aneignung des ganzheitlichen elementaren Bewegungsablaufes (Grobkoordination) sind charakteristisch für

die erste Phase. Die Aufmerksamkeit wird bewusst auf verschiedene, bis anhin noch unbekannte Details des Bewegungsablaufs gerichtet (kognitive Phase). Ein falsches Bewegungstempo sowie unpräzise und eckige Bewegungen sind typisch für diese Phase. Es folgt die Verfeinerung der Bewegung (Feinkoordination). Die Bewegung wird zunehmend dynamischer und die Bewegungsausführung nahezu fehlerfrei; sie ist jedoch noch störungsanfällig. Die Bewusstheit liegt zu diesem Zeitpunkt auf der gesamten Bewegung und nicht mehr auf einzelnen Details. Die assoziative Stufe wurde erreicht. Wird der Bewegungsablauf auch bei Störungen von aussen nicht beeinflusst, befindet sich der oder die Lernende in der abschliessenden Phase (Stabilisierung). Der Bewegungsablauf kann auch ohne bewusste Aufmerksamkeit korrekt ausgeführt werden und ist somit weitgehend automatisiert (autonome Phase) (Lapcyna et al., 2018; Weineck, 2010). Was die traditionellen Modelle zum Lernprozess alle gemeinsam haben, schreiben Anderson (1983) sowie Fitts und Posner (1967, zitiert nach Maxwell, Masters, Kerr & Weedon, 2001):

Traditional theories postulate that motor skills are initially acquired explicitly via cognitive processing which is verbally based. As learning proceeds, the skill becomes automated or implicit. That is, the verbal rules used to perform the skill are “forgotten”, and task-relevant information processing becomes unconscious. (S. 1049)

Die aktuelle Forschung legt das Augenmerk zunehmend auf weniger traditionelle Theorien. Motorisches Lernen hat zwar stets das Ziel einer möglichst autonomen, stabilen und automatisierten Bewegung, der Prozess zu diesem Ziel kann jedoch auf unterschiedliche Weise initiiert und gestaltet werden (siehe Kapitel 1.3 Explizites und implizites Lernen).

**1.2.1 Biologische Grundlagen & Gedächtnissysteme.** Die Plastizität des zentralen Nervensystems (ZNS) sowie die biomechanischen Eigenschaften der Nervenzellen bilden die Basis, dass neue Bewegungen gelernt werden können. Unter Plastizität wird die Eigenschaft des Nervensystems und des Gehirns verstanden, sich in Abhängigkeit von Erfahrungen zu verändern. Durch das Lernen von Bewegungen kommt es zu Veränderungen in allen Teilen des ZNS (Geraedts, 2020).

Das Gedächtnis nimmt im Allgemeinen Informationen auf, speichert und verarbeitet sie und ruft Informationen ab. Während motorischer Abläufe finden im Gedächtnis komplexe, aufeinander abgestimmte Prozesse statt. Auch bei automatisierten Bewegungen sind jeweils verschiedene Hirnstrukturen involviert. Das Gedächtnis kann bezüglich Speicherdauer und -

kapazität in das sensorische Gedächtnis (Ultrakurzzeitgedächtnis), in das Kurzzeit- und in das Langzeitgedächtnis unterteilt werden. Von Bedeutung ist auch das Arbeitsgedächtnis. Es nimmt laut Jäncke (2013) «eine Sonderstellung ein, denn es ist nicht nur eine Speicherstruktur, sondern v. a. ein System, in dem Informationen bearbeitet werden» (S. 476).

Beim Langzeitgedächtnis wird zwischen dem expliziten (deklarativen) und dem impliziten (non-deklarativen) Gedächtnis unterschieden. Im expliziten Gedächtnis sind vorwiegend bewusst gelernte Fakten (semantisches Wissen), Erlebnisse und Erfahrungen (episodisches Wissen) abgespeichert, im impliziten Gedächtnis unbewusst Wahrgenommenes (perzeptuelles Wissen) und bereits erlernte Bewegungsabläufe sowie Fertigkeiten (prozedurales Wissen) (Jäncke, 2013). Inhalte des impliziten Gedächtnisses können schlecht verbalisiert und kaum willentlich verändert werden (Seitz, 2001).

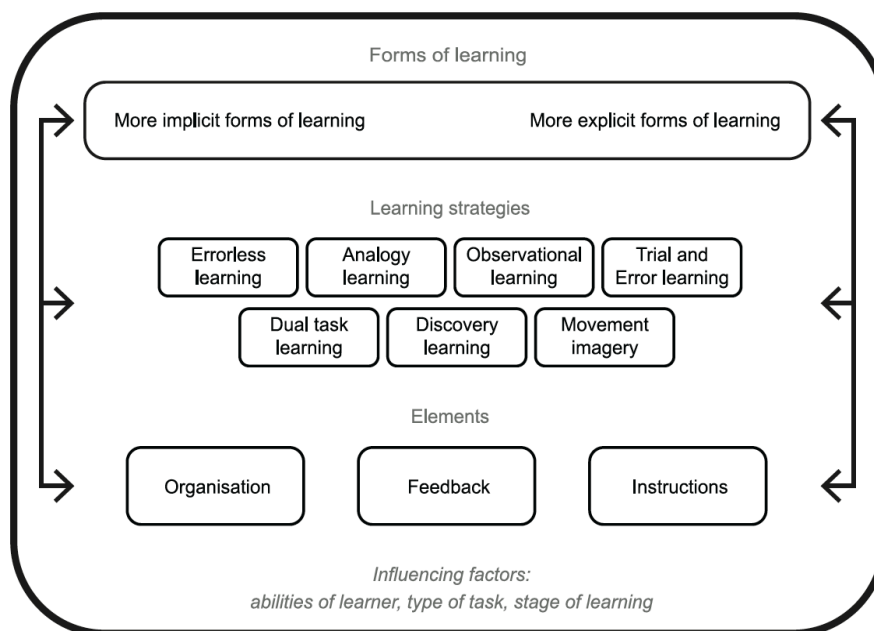
### **1.3 Explizites und implizites Lernen**

Lernprozesse werden in der Literatur häufig in implizite und explizite Prozesse unterteilt. Die Einteilung basiert auf der Erkenntnis, «dass deklaratives und prozedurales Wissen in neuroanatomisch unterschiedlich lokalisierten Gedächtnisspeichern abgelegt ist» (Konczak, 2006, S.624). Erkenntnisse dazu wurden beispielsweise aus Studien mit dem Epilepsie-Patienten H. M. gewonnen. Bei diesem Patienten wurden Teile des Gehirns entfernt, was zur Folge hatte, dass er sich keine Fakten und Wörter mehr merken konnte. Das bewusste Speichern sowie Abrufen von Wissen waren für ihn unmöglich. Neue Bewegungsmuster konnte H. M. aber erlernen und über mehrere Tage behalten, auch wenn er sich jeweils nicht daran erinnern konnte, dass er die Aufgabe bereits einmal ausgeführt hatte (Konczak, 2006).

Die zwei Lernmechanismen unterscheiden sich zwar deutlich in ihren Eigenschaften, hängen aber trotzdem zusammen und können deswegen nicht separat betrachtet werden (Mazur, 2006). In Untersuchungen wurde beobachtet, dass Instruktionen und bewusste Lenkung der Aufmerksamkeit und Konzentration den Lernprozess begünstigen können, obwohl unbestritten ist, dass motorische Fertigkeiten vorwiegend durch viele Wiederholungen und meist unbewusste Übungsvorgänge erlernt werden. Das explizite Wissen allein reicht somit nicht, eine motorische Aufgabe korrekt auszuführen. Ein bewusster Lernprozess muss deshalb als interaktiver Prozess zwischen explizitem und implizitem Gedächtnis betrachtet werden (Odendahl, 2016). In der Wissenschaft gibt es unterschiedliche Meinungen zu den verschiedenen Lernmechanismen und deren Abgrenzung voneinander (Mazur, 2006). In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass es sowohl implizite als auch explizite Lernmechanismen und -formen gibt. Der explizite

Lernmechanismus widerspiegelt eher den traditionellen Ansatz von Lernprozessen, der implizite eher einen moderneren (siehe Kapitel 1.1 Motorisches Lernen).

Kleynen et al. (2015) erstellten in ihrer Studie ein Übersichtsschema über mögliche praxisnahe Anwendungsformen von impliziten bzw. expliziten Lernformen (Abbildung 2). Ihre Resultate basieren auf Expertenmeinungen. Die Experten und Expertinnen waren sich einig, dass eine explizite Lernumgebung durch Anweisungen, klare Instruktionen und Feedbacks arrangiert wird. Beim impliziten Lernen werden hingegen keine oder möglichst wenig Informationen zur Aufgabe und wenig bis gar keine Feedbacks gegeben. Ein externer Aufmerksamkeitsfokus und das ganzheitliche Ausführen einer Bewegung kann das implizite Lernen unterstützen. Die Fähigkeiten der lernenden Person, die Art der Aufgabe sowie der Lernstatus scheinen zudem einen Einfluss auf die zu wählende Lernform zu haben.



*Abbildung 2.* Die drei Elemente Organisation, Feedback und Instruktion zeigen die drei Möglichkeiten auf, wie ein Lernprozess eher implizit oder explizit initiiert werden kann. Die Lernstrategien/Lernmethoden sind so angeordnet, dass man sieht, bei welcher Strategie vermehrt implizit bzw. explizit gelernt wird (Kleynen et al., 2015, S. 11).

Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschliesslich mit impliziten Lernprozessen, deshalb wird das explizite Lernen im Folgenden nur kurz beschrieben.

**1.3.1 Explizites Lernen.** Das explizite Lernen findet unter Aufmerksamkeitszuwendung willensgesteuert statt. Es kann sprachlich oder handlungstechnisch jederzeit auf das gelernte Wissen zurückgegriffen werden (Bednorz & Schuster, 2002). Fakten, wie beispielsweise

Geburtstage, Namen oder Hauptstädte eines Landes werden bewusst gelernt und können, wie auch Ereignisse und Erinnerungen, bewusst abgerufen werden (Lopes, 2011). Mazur (2006) bezeichnet das explizite Lernen kurz als «Erwerb verbalisierbaren regelbasierten Wissens» (S. 527). Das explizite motorische Lernen beschreibt Bewegungslernen, welches durch klare Kommunikation der Ziele und Informationen zu einer Ausführung erfolgt.

**1.3.2 Implizites Lernen.** Im Gegenteil zum expliziten Lernen findet das implizite Lernen beiläufig und ohne konstanten Aufmerksamkeitsfokus statt. „Implizites Lernen ist das unaufgeforderte Lernen und Nutzen von Regelmäßigkeiten in der Umwelt, das zu einer Verhaltensänderung führt, ohne dass darüber eine bewusste Erkenntnis vorliegt“ (Mazur, 2006, S.543).

Kindliches Lernen, das Erlernen der Muttersprache, regelkonformes Verhalten sowie viele motorische Fähigkeiten, wie zum Beispiel das Laufen lernen, geschehen nebenbei. Die Aktivitäten sind auf Fortschritte ausgerichtet und das Wissen in Bezug auf das Gelernte ist nicht bewusst abrufbar. Dieses Wissen wird im prozeduralen Gedächtnis mit Hilfe von generalisierten motorischen Programmen abgespeichert (Zhu, Poolton & Masters, 2014). Das implizite Lernen wird häufig mittels Anpassungen an die Umgebung oder externe Reize hervorgerufen (Bednorz & Schuster, 2002). Kurz zusammengefasst wird das implizite Lernen als «Erwerb regelbasierten Wissens ohne Bewusstheit darüber (Mazur, 2006, S. 527) » definiert.

In der Literatur gibt es viele Begriffe für implizites Lernen, die teilweise als Synonyme, teilweise als spezifische Formen des impliziten Lernens gebraucht werden. In dieser Arbeit wird nicht auf das Verstärkungslernen (Belohnung-Bestrafung) und das inzidentelle Lernen (entdeckendes / intuitives Lernen) eingegangen. Prozedurales Lernen und unbewusstes Lernen werden in der Literatur sowie in dieser Arbeit oft als Synonyme von implizitem Lernen verwendet und sind schwierig voneinander abzugrenzen (Lopes, 2011).

**Forschung zu implizitem Lernen.** Erste Forschungen zum impliziten Lernen wurden in den sechziger Jahren von Reber durchgeführt. Als Grundlage der Forschung dienten Beobachtungen von alltäglichen Sachverhalten wie etwa die Sozialisierung oder das Erlernen der Muttersprache. Reber untersuchte das implizite Lernen von Gesetzmäßigkeiten anhand von künstlichen Grammatiken. Die Probanden, die keine explizite Informationen zu einer allfälligen Regelmässigkeit der künstlichen Grammatik bekamen, schnitten in der Studie deutlich besser ab als jene, die darauf aufmerksam gemacht wurden, dass die künstliche Grammatik auf einer Regel basiert. Reber begründete diese Beobachtungen damit, dass die Probanden ohne das Wissen einer möglichen Regel einen tieferen kognitiven Arbeitsaufwand betreiben mussten (Bednorz

& Schuster, 2002). Die Wissenschaft beschäftigt sich seit diesen ersten Experimenten vertieft mit implizitem Lernen und dessen Vorkommen bei verschiedenen motorischen Aufgaben. Implizites motorisches Lernen wird als ein Lernprozess definiert, bei welchem keine oder nur wenig bewusste Kenntnisse zur Bewegung bekannt sind und diese während des Lernens nicht oder nur leicht grösser werden. Demnach werden bei einer impliziten Trainingsmethode keine oder kaum Anweisungen gegeben. Die zu lernende Bewegung wird durch Repetitionen implizit erlernt und gefestigt (Kleynen et al., 2014). In Studien wurde implizites Lernen häufig anhand von Adaptationslernen, Sequenzlernen oder dem Fertigkeitenerwerb (Erlernen einer neuen motorischen Fertigkeit) untersucht.

*Adaptationslernen.* Beim Adaptationslernen findet eine Verringerung von systematischen Fehlern statt, die durch veränderte interne Bedingungen (z. B. Muskelermüdung) oder externe Bedingungen (z. B. Krafteinfluss) hervorgerufen werden (Krakauer, 2009). Studien zu Anpassungen durch visuomotorische Rotation brachten der Wissenschaft einige neue Erkenntnisse für das Verständnis von impliziten Lernprozessen, aus welchen etliche Prinzipien hervorgingen. Dabei löst eine sensomotorische Richtungsdiskrepanz einen adaptiven Prozess aus, bis Handlung und Wahrnehmung wieder zusammenpassen (Bock, 2001). Typischerweise werden den Probanden Aufgaben gestellt, bei welchen sie einen Cursor auf dem Bildschirm mit einer Computermaus von einem Start- zu einem Zielpunkt bewegen müssen. Die Beziehung zwischen der Richtung der Hand- und der Cursorbewegung wird so manipuliert, dass die Cursorbewegung in Bezug zur Handbewegung jeweils gegen den Uhrzeigersinn rotiert. Die Probanden müssen sich an die neue visuomotorische Beziehung anpassen, was beim Wegfallen der Manipulation zu unpräzisen Bewegungen führt (Krakauer, 2009).

Neben den Studien, bei welchen die Adaptationsleistungen mittels visueller Verzerrung erzeugt werden, gibt es auch einige Untersuchungen, die diese Adaptation durch Kraftfelder hervorgerufen. Hier müssen die Probanden gewisse Präzisionsaufgaben unter externem Krafteinfluss durchführen. Die Probanden müssen während verschiedener Zeige- oder Greifaufgaben externe Kräfte ausgleichen, die häufig durch einen Roboterarm lateral erfolgen (Hegele, 2020).

Die abrupte Beseitigung der systematischen Fehler führt bei beiden Anpassungsaufgaben zu «falschen» Bewegungen, welche der ursprünglichen Diskrepanz bzw. Krafteinwirkung entgegengesetzt gerichtet erfolgt (Saijo & Gomi, 2010).

*Sequenzlernen.* Um das Sequenzlernen besser zu verstehen, welches ebenfalls auf impliziten Lernprozessen basiert, wird unter anderem die Serial Reaction Time - Aufgabe (SRTT) eingesetzt (Robertson & Takács, 2018). Bei dieser Aufgabe müssen die Probanden auf unterschiedliche visuelle Reize mit einer passenden motorischen Antwort reagieren. Es wird die Reaktionszeit von sich wiederholenden Sequenzen oder von Zufallsfolgen erhoben. Die Probanden wissen jeweils nicht, dass sich die Reizabfolge wiederholt. Unbewusst wird aber eine Abfolge gelernt (Shanks & Channon, 2002; Robertson & Takács, 2018).

*Fertigkeitenerwerb.* Um die Studien zum Erlernen einer motorischen Fertigkeit besser zu verstehen, werden zuerst eine Auswahl von impliziten Trainingsmethoden beschrieben (siehe auch Abbildung 2). Als Trainingsmethode, um einen impliziten Lernprozess zu starten, eignet sich das Errorless-Learning (fehlerfreies Lernen). Maxwell et al. (2001) beschreiben diese Lernstrategie als ein passives Lernen, bei welchem die Lernumgebung so arrangiert wird, dass die lernende Person möglichst wenig Fehler macht. Für die eben genannte Studie wurde dies durch eine stufenweise Distanzvergrößerung bei einer Golfaufgabe erreicht. Da während der Aufgabe keine Fehler gemacht wurden und die Bewegung durchaus erfolgreich war, musste sich die lernende Person keine Gedanken zu einer allfälligen Bewegungsverbesserung machen. Die Errorless-Gruppe in der Studie von Maxwell et al. (2001) konnte ihre Leistung im Vergleich zur Trial-and-Error-Gruppe (explizites Lernen) auch unter einer Testbedingung mit einer Zweitaufgabe aufrechterhalten.

Die folgenden Studien befassten sich mit dem motorischen Fertigkeitenerwerb und zeigen Vorteile von implizitem Lernen gegenüber explizitem auf.

Kal, Prosées, Winters und van der Kamp (2018) untersuchten in ihrem Review, inwiefern implizites Lernen verglichen mit explizitem Lernen zu stärkeren Automatismen von motorischen Fertigkeiten führt. Sie schlossen Studien ein, bei welchen die Probanden älter als 18 Jahre waren, solche, die implizite und explizite Lernprozesse miteinander verglichen und relativ komplexe Sportbewegungen wie Werfen, Kicken oder Balancieren untersuchten, sowie jene, die die Stufe der Automatisierung nach der Trainingsphase mittels einer Dual-Task-Leistung massen. Zusammenfassend schreiben sie, dass es einige Hinweise dafür gibt, dass implizites motorisches Lernen die Bewegungsautomatisierung verbessert. Sie erwähnen aber auch, dass das implizite Bewegungslernen im Vergleich zum expliziten Bewegungslernen in den verwendeten Studien oft nur kleine positive Effekte in Bezug auf Bewegungsautomatismen mit sich brachte. Dies weist darauf hin, dass die Vorteile von implizitem Bewegungslernen betreffend Automatismen zwar teilweise vorhanden, wissenschaftlich aber noch nicht vollständig geklärt sind.

Poolton, Masters und Maxwell (2005) zeigten, dass implizites Bewegungslernen vor allem am Anfang einer Trainingsphase zu stabileren Leistungen führt. Sie untersuchten zwei Gruppen: Die eine Gruppe (explizite Gruppe) bekam vor der Trainingsphase Hinweise zu einer korrekten Ausführung des Golfschlages, die andere Gruppe (implizit-explizite Gruppe) bekam diese Inputs erst etwa in der Mitte der Lernphase. Sie startete das Lernen demzufolge mit der Methode des Errorless-Learning. Das Arbeitsgedächtnis der expliziten Gruppe schien von Beginn an mit der eigenen Bewegungsüberprüfung beschäftigt gewesen zu sein. Im Vergleich zur implizit-expliziten Gruppe musste das Arbeitsgedächtnis während der ganzen Trainingsphase arbeiten. Die Leistung, welche mit der Präzision der Golfschläge von verschiedenen Distanzen gemessen wurde, war nach der Trainingsphase zwischen den zwei Gruppen nicht unterschiedlich. Beim Transfertest waren die Schläge der implizit-expliziten Gruppe jedoch deutlich präziser. Die Probanden mussten beim Transfertest eine kognitive Zweitaufgabe ausführen, was die Leistung der implizit-expliziten Gruppe signifikant weniger beeinflusste.

Poolton, Masters und Maxwell (2007) untersuchten implizite und explizite Lernprozesse auf deren Robustheit und längerfristige Abspeicherung sowie auf das Vorhandensein von deklarativem Wissen zur Bewegungsausführung. Die Robustheit wurde nach einer Trainingsphase mittels der Präzisionsleistung im Rugbywurf einerseits während einer kognitiven Aufgabe, andererseits direkt nach einer physischen (anaeroben) Ermüdung gemessen. In beiden Tests schnitten die Probanden, die implizit (mittels Errorless-Learning) gelernt hatten, besser ab als jene, die explizit (mittels Trial-and-Error-Learning) gelernt hatten. Die implizite Gruppe hatte weniger deklaratives Wissen zur Bewegung erworben wie die explizite Gruppe. Ein Jahr nach dem ersten Test wurde ein zweiter Test durchgeführt. In diesem zeigte sich erstaunlicherweise eine Annäherung der Präzisionsleistung des Wurfes der expliziten Gruppe an die implizite Gruppe. Auch unter physischer Ermüdung war die explizite Gruppe im zweiten Test besser als im ersten. Es könnte sein, dass eine Konsolidierung der Erinnerung stattgefunden hatte und sich so Wissen entwickelte und über die Zeit stabiler wurde.

Eine, auf der soeben beschriebenen Studie aufbauende, Untersuchung von Masters, Poolton und Maxwell (2008) ergab, dass eine implizit gelernte Bewegungsaufgabe zudem auch unter aerober Ermüdung stabiler bleibt.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass psychischer sowie physischer Druck implizit gelernte Bewegungen weniger zu beeinflussen scheinen als explizit gelernte.

## 1.4 Zyklische Bewegungen

Die allgemeine Grundstruktur von sportmotorischen Bewegungen kann in zyklische Bewegungen (z. B. Laufen, Radfahren, Rudern) und azyklische Bewegungen (z. B. Wurf, Sprung) unterteilt werden. Azyklische Bewegungen werden in drei Phasen gegliedert: in die Vorbereitungs-, in die Haupt- und in die Endphase. Die Übergänge zwischen den Phasen sind fließend. Bei azyklischen Bewegungen ist das Bewegungsziel durch eine einmalige Aktion erreichbar. Die Reihenfolge der Bewegungen ist nicht umkehrbar. Der Bewegungsablauf bei zyklischen Bewegungen wiederholt sich mehrfach, wobei die jeweilige Endphase einer Bewegung mit der Vorbereitungsphase zusammenfällt. Dies führt dazu, dass zyklische Bewegungsabläufe in zwei Phasen eingeteilt werden: in eine Haupt- und eine Zwischenphase. Zyklische Bewegungen werden weiter in symmetrische (z. B. Rudern), alternierende (z. B. Radfahren) und asynchron alternierende (z. B. Brustschwimmen) Bewegungen unterschieden. Es gibt auch kombinierte Bewegungsaufgaben wie zum Beispiel eine Tanz- oder Gymnastikkür oder das Hürdenlaufen (Meinel & Schnabel, 2007).

**1.4.1 Funktionsebenen der Motorik.** Grundlage einer jeden Bewegungssteuerung sind die motorischen Systeme der verschiedenen Ebenen des ZNS, die über Bahnen miteinander in Verbindung stehen. Grob kann man das ZNS auf funktioneller Ebene in drei Systeme einteilen: in das Rückenmark, den Hirnstamm mit den Basalganglien und in das Grosshirn. Das Rückenmark ist vorwiegend für die Reflexmotorik zuständig, welche auch als unterste Funktionsebene der Motorik bezeichnet wird. Hier gehören zum Beispiel frühkindliche Reflexe wie der Saug- oder Greifreflex, andere angeborene Reflexe wie der Schluckreflex sowie wichtige Reflexe für die Motorik wie beispielsweise der monosynaptische Dehnreflex dazu (Geraedts, 2020).

Der Hirnstamm und die Basalganglien steuern die komplexere automatische Motorik und kontrollieren bereits automatisierte Bewegungen wie das Binden von Schnürsenkeln oder Zuknöpfen eines Hemdes. Auch Radfahren oder Schwimmen (zyklische Bewegungen) kommen ohne anhaltende Aufmerksamkeit auf die auszuführende Bewegung aus und sind nicht auf eine bewusste kognitive Anstrengung angewiesen. Sie basieren auf zuvor erlernten motorischen Erinnerungen (Dharani, 2015). Zum Grosshirn gehört die Grosshirnrinde mit den kortikalen Arealen. Das Grosshirn wird in fünf verschiedene Lappen aufgeteilt, welche alle für unterschiedliche sensorische und motorische Funktionen zuständig sind (Geraedts, 2020). In den hinteren Zonen des Frontallappens (auch Stirnlappen oder lat. Lobus frontalis) liegt als Teil der Grosshirnrinde der Motorkortex. Er ist zuständig für die Willkürmotorik, also für bewusst gesteuerte Bewegungsprozesse.

**Aktivität des primären motorischen Kortex (M1) beim Bewegungslernen.** Hallet (o. d.) schreibt, dass der M1 bei seriellen Reaktionszeitaufgaben (z. B. SRTT), wie sie bei Untersuchungen zum impliziten Sequenzlernen oft durchgeführt werden, involviert ist. Neben den kortikalen Strukturen sind sowohl während als auch nach der Aufgabenausführung auch subkortikale Strukturen beteiligt (Kantak, Mummidisetty & Stinear, 2012). Bock (2001) schreibt, dass es spezifisch bei sensomotorischen Anpassungsaufgaben (z. B. visuomotorische Rotation) nicht nur zu einer erhöhten Aktivität einer Hirnregion kommt, sondern sich diese über das ganze Gehirn erstreckt, und Hallet (o. d.) spezifiziert, dass beim Adaptionslernen unter Einfluss eines Kraftfeldes die Aktivität des M1 deutlich erhöht ist. Bei Anpassungsaufgaben jeglicher Art ist zudem das Kleinhirn aktiv (Foerde, 2010). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der M1 sowohl beim Sequenzlernen als auch beim Adaptionslernen involviert ist, aber je nach Aufgabe andere an der Motorik beteiligte Hirnregionen den Lernprozess unterstützen (Sturm, 2019).

Beim Erlernen von komplexeren Fertigkeiten, die aus räumlich-zeitlich-strukturierten Bewegungen bestehen, sind der M1 und weitere motorische Kortexgebiete aktiv (Konczak, 2006).

Ob überhaupt oder inwiefern der M1 bei zyklischen Bewegungen aktiv ist, ist unklar. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass er weniger involviert ist und die Bewegung nach einer subkortikalen Startaktivierung rein spinal kontrolliert werden kann (siehe 1.4.2 Zentraler Muskelgenerator (CPG)).

**Speicherung.** Das Kleinhirn, die Basalganglien und der Motorkortex sind an der impliziten Erinnerung beteiligt, überwacht wird sie von der Großhirnrinde (Dharani, 2015). Kleinhirnstrukturen und die Basalganglien sind spezifisch für das prozedurale Gedächtnis zuständig (Geraedts, 2020) und „im prozeduralen Gedächtnis, als ein Teil des impliziten Gedächtnisses werden automatisierte zyklische Bewegungen, wie das Gehen, Laufen, Radfahren oder Schwimmen, gespeichert (Witte, 2018, S. 117)“. Das prozedurale Wissen wird in generalisierten motorischen Programmen gespeichert, welche Aktionen automatisch steuern (Zhu, Poolton & Masters, 2014).

**1.4.2 Zentraler Mustergenerator (CPG).** Beim Ausführen von zyklischen Bewegungen wie beispielsweise beim Gehen oder beim Radfahren, koordiniert das menschliche Nervensystem, wie bei allen Bewegungen, die verschiedenen neuronalen Kommandos. Diese werden speziell bei rhythmischen Bewegungen nicht in Einzelbewegungen abgespeichert, sondern in Mustern (engl. Pattern) (Caggiano et al., 2018). Zyklische oder auch stereotype Bewegungen basieren

somit auf zentralen Mustergeneratoren (CPG). Darunter werden Netzwerke aus verschalteten Inter- und Motoneuronen verstanden, die ein regelmässiges Muster der agonistisch und antagonistisch beteiligten Muskeln hervorrufen. Die Steuerung von zyklischen Bewegungen hängt von drei Systemen ab: Neben den spinal organisierten CPG wird ein supraspinaler Input und eine sensorische Reizantwort der beteiligten Muskeln gebraucht. Die CPG müssen von übergeschalteten Hirnarealen aktiviert werden und können erst danach selbstständige, regelmässige Aktionspotentiale aussenden (Zehr, 2005). Dietz (2002) schreibt, dass die Wissenschaft die CPG bei Säugetieren generell akzeptiert, die Experimente aber vor allem mit Tieren durchgeführt wurden. Die Schaltkreise scheinen zumindest bei Vierbeinern die Hemmung und Aktivierung der Muskulatur vollständig zu regulieren. Beim Menschen können aufrechte, zyklische Bewegungen, wie zum Beispiel der Gang, nicht ausschliesslich spinal kontrolliert werden. Bei einer kompletten Läsion des Rückenmarks ist kein Schreitmuster mehr vorhanden; es müssen noch mindestens zehn Prozent der absteigenden Bahnen intakt sein. Die supraspinale Kontrolle scheint vor allem zu Beginn einer zyklischen Bewegung notwendig zu sein, um die CPG zu aktivieren, danach nimmt die kortikale Aktivität deutlich ab. Auch verschiedene neuere Studien untersuchten die Organisation der neuronalen Schaltkreise. Dafür eignen sich Untersuchungen zu Lernprozessen bei repetitiven menschlichen Bewegungen. Häufig wurde bis anhin das Gehen untersucht, zum Beispiel mit Hilfe des geteilten Laufbands (engl. split-belt treadmill) (u. a. Helm & Reisman, 2015). Helm und Reismann (2015) fassten in ihrem Review Ergebnisse aus Studien zusammen, welche Schlaganfallpatienten sowie gesunde Personen bei verschiedenen Aufgaben auf dem geteilten Laufband (split-belt treadmill) untersuchten. Bei beiden Gruppen konnten Effekte im Gangmuster erzielt werden, indem man die Probanden auf einem geteilten Laufband laufen liess, dessen zwei Bänder unterschiedliche Geschwindigkeiten aufwiesen. Bei den Schlaganfallpatienten resultierte ein kurzfristig verbessertes Gangbild, bei den gesunden Probanden eine Asymmetrie. Das Ziel von Studien, die das Split-Belt-Paradigma untersuchen, ist, die Anpassungsfähigkeit des Nervensystems, vor allem auch bei Schlaganfallpatienten, zu erforschen und so Methoden für eine verbesserte Rehabilitation des Bewegungsapparats zu entwickeln. Zych, Rankin, Holland und Severini (2019) untersuchten in ihrer Studie, inwiefern durch räumliche und zeitliche Asymmetrien auf dem Radergometer Adaptationen hervorgerufen werden können. Beschleunigungsdaten der Kurbelarme wurden ausgewertet, um motorische Adaptationen festzustellen. Bei den zeitlichen Symmetrien konnten solche Anpassungen nachgewiesen werden. Die Lernphase dauerte zehn Minuten, die Pre- und Post-Tests je fünf Minuten. Die Trittfrequenz musste bei 75 rpm gehalten werden.

## **1.5 Theoriebezug zur Masterarbeit**

In der vorliegenden Arbeit werden kurzfristige implizite Lernprozesse bei der zyklisch alternierenden Bewegung des Radfahrens untersucht. In den unzähligen Studien über implizites Lernen wurden bis anhin häufig serielle Reaktionsaufgaben (Sequenzlernen) und Adaptationsaufgaben (visuomotorische Rotation & Kraftfeld) untersucht. Für Untersuchungen zu implizitem Fertigkeitenerwerb wurden jeweils Bewegungen mit relativ komplexen Dynamiken gewählt (z. B. Werfen, Springen, Greifen, Schlagen, Putten etc.) (Kleynen et al. 2015). Es handelte sich dabei um offene Fertigkeiten (open-loop), was bedeutet, dass Verbesserungen nicht während der Bewegung ausgeführt werden können. Eine fortlaufende Regelung der Bewegung ist vor allem aufgrund der Schnelligkeit und Komplexität der Bewegung nicht möglich (Jäncke, 2013). Sowohl beim Fertigkeitenerwerb, als auch beim Adaptations- und Sequenzlernen ist die neuronale Steuerung kortikal und subkortikal organisiert, wobei der M1 bei allen diesen Bewegungen involviert ist (Sturm, 2019). Beim Radfahren handelt es sich um eine geschlossene Fertigkeit (closed-loop). Inwiefern der M1 bei zyklischen Bewegungen involviert ist, ist unklar. Rhythmische Bewegungen werden spinal vom Lokomotionsgenerator moduliert und supraspinal laufend kontrolliert und angepasst (Haus, 2005).

Es liegen wenig Studien zu impliziten motorischen Lernprozessen bei offenen Fertigkeiten vor, die vorliegenden führten die Untersuchung mit Balancieraufgaben durch (u. a. Orrell, Eves & Masters, 2006). Studien zu impliziten, motorischen Lernprozessen bei einer offenen, zyklischen Bewegung, bei welcher der M1 nicht oder viel weniger involviert zu sein scheint als bei den bereits untersuchten Aufgaben, sind mir keine bekannt. Aus diesem Grund setzt die vorliegende Studie an dieser Forschungslücke an und untersucht den kurzfristigen impliziten Lernprozess bei zyklischen Bewegungen.

## 1.6 Ziel und konkrete Fragestellung

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe von gleichmässigen Widerstandsänderungen einen impliziten Lernprozess auf dem Radergometer zu initiieren. Es wird untersucht, ob die «andere» neuronale Kontrolle von zyklischen Bewegungen im Vergleich zu bereits erforschten Bewegungsaufgaben einen Einfluss auf das implizite motorische Lernen hat.

Hierfür wurde folgende konkrete Fragestellung formuliert:

- I. Findet bei zyklischen Bewegungen unter impliziten Lernbedingungen ein kurzfristiger Lernprozess statt?

Folgende Hypothesen wurden formuliert, um die Fragestellung wissenschaftlich zu überprüfen:

- H<sub>0</sub>: Bei zyklischen Bewegungen resultiert unter impliziten Lernbedingungen kein kurzfristiger Lerneffekt.
- H<sub>1</sub>: Bei zyklischen Bewegungen resultiert unter impliziten Lernbedingungen ein kurzfristiger Lerneffekt.

Die folgenden Unterfragestellungen und Hypothesen dienen der Analyse, um zu testen, ob ein impliziter Lernprozess stattfindet. Mit deren Hilfe wird die konkrete Fragestellung beantwortet und die dazugehörigen Hypothesen überprüft.

- a) Verändert sich der Variationskoeffizient der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe?

H<sub>2</sub>: Die Variationskoeffizienten der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit verändern sich vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe nicht signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe.

H<sub>3</sub>: Die Variationskoeffizienten der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit verändern sich vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe.

- b) Verändert sich die Differenz der Ist- und Soll-Werte der Parameter Trittfrequenz und Leistung vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe?

H<sub>4</sub>: Die Ist-Soll-Differenz-Werte der Parameter Trittfrequenz und Leistung verändern sich vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe nicht signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe.

H<sub>5</sub>: Die Ist-Soll-Differenz-Werte der Parameter Leistung und Trittfrequenz verändern sich vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe.

- c) Können die Sportstudierenden der impliziten Gruppe die Trittfrequenz im Verlauf der Lernphase stabiler halten?

H<sub>6</sub>: Die Sportstudierenden der impliziten Gruppe können die Trittfrequenz im Verlauf der Lernphase nicht stabiler halten.

H<sub>7</sub>: Die Sportstudierenden der impliziten Gruppe können die Trittfrequenz im Verlauf der Lernphase stabiler halten.

- d) Findet bei der impliziten Gruppe eine Ökonomisierung der Leistung während der Lernphase statt? Wirkt sich eine allfällige Ökonomisierung auf die zentrale Beanspruchung aus?

H<sub>8</sub>: Bei der impliziten Gruppe findet während der Lernphase keine Ökonomisierung der Leistung statt.

H<sub>9</sub>: Bei der impliziten Gruppe findet während der Lernphase eine Ökonomisierung der Leistung statt, die sich auf die zentrale Beanspruchung auswirkt.

- e) Bei einem allfälligen Lerneffekt der impliziten Gruppe: Findet bei der impliziten Gruppe innerhalb des Post-Tests ein Wash-Out-Effekt statt?

H<sub>10</sub>: Bei der impliziten Gruppe findet kein Wash-Out-Effekt statt.

H<sub>11</sub>: Bei der impliziten Gruppe findet ein Wash-Out-Effekt statt.

## 2 Methode

### 2.1 Untersuchungsgruppe

Die Tests wurden mit 33 Sportstudierenden der Universität Freiburg und der Eidgenössischen Hochschule für Sport Magglingen (EHSM) durchgeführt. Alle Probanden füllten einen medizinischen Fragebogen aus und gaben ihr schriftliches Einverständnis zum Testverfahren. Die Testpersonen wurden zufällig in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt. Eine Gruppe ( $n = 19$ : 11 weiblich, 7 männlich) musste während der Lernphase unter Einhaltung der gegebenen Trittfrequenz Widerstandsänderungen ausgleichen (implizite Gruppe = IG), die andere Gruppe ( $n = 15$ : 8 weiblich, 7 männlich) diente als Kontrollgruppe (= KG) und hatte während der Lernphase nur die Aufgabe, die vorgegebene Trittfrequenz zu halten. Die zwei Gruppen wurden hinsichtlich des Alters (IG:  $mean = 25.67 \pm 3.41$  Jahre, KG:  $mean = 27.33 \pm 5.08$  Jahre, Mann-Whitney-U-Test:  $U = 115.50$ ,  $Z = -0.711$ ,  $p = 0.477$ ), des Gewichts (IG:  $mean = 68.56 \pm 13.7$  kg, KG:  $mean = 69.47 \pm 12.28$  kg, ungepaarter t-Test:  $t(31) = -0.199$ ,  $p = 0.843$ ) und des Aktivitätslevels betreffend des Radfahrens verglichen. Um dieses Aktivitätslevel zu bewerten, gaben die Probanden jeweils einen Durchschnittswert ihrer wöchentlichen Radkilometer an (IG:  $mean = 45.83 \pm 43.67$  km, KG:  $mean = 40.33 \pm 42.57$  km, Mann-Whitney-U-Test:  $U = 118.00$ ,  $Z = -0.619$ ,  $p = 0.536$ ). Aus der durchschnittlichen Herzfrequenz während der Lernphase und dem, mit der 1970 von William Haskell und Sam Fox entwickelten Formel:  $220 - \text{Lebensalter}$  (Graf & LaRosee, 2014), errechneten Maximalpuls, konnte zusätzlich ein prozentualer Schwierigkeitsfaktor (% HFmax) der Lernphase errechnet werden (IG:  $mean = 73.17 \pm 8.38$  % HFmax, KG:  $mean = 66.52 \pm 6.07$  % HFmax, t-Test:  $t(31) = 2.254$ ,  $p = 0.031$ ). In der IG war folglich die Intensität während der Lernphase signifikant höher als bei der KG. Nach der Einteilung der Trainingsbereiche von Neumann (1994) befand sich die KG im Grundlagenbereich (60-70 % der max. O<sub>2</sub>-Aufnahme), die IG bereits im Entwicklungsbereich 1 (70-80 % der max. O<sub>2</sub>-Aufnahme) (Weineck, 2010). Dies muss bei den Auswertungen berücksichtigt werden. Die Gruppen lagen aber trotzdem in einem aeroben Trainings- und somit tiefen Intensitätsbereich (Weineck, 2010).

## 2.2 Studiendesign

Alle Probanden nahmen an einem Messtermin im Labor der Universität Freiburg teil. Der Termin dauerte pro Probanden ungefähr eine Stunde und setzte sich aus einer Information zur Studie, dem Ausfüllen eines Fragebogens, dem Unterzeichnen der Einverständniserklärung sowie dem Warm-Up (4' Radergometer bei Widerstand  $1.5 \times \text{kg Körpergewicht}$ ) und dem Testprotokoll auf dem Radergometer zusammen. Dieses bestand bei beiden Gruppen aus einem Pre-Test, einer Lernphase sowie einem Post-Test. Pre- und Posttest dauerten je vier Minuten, wobei die Trittfrequenz möglichst gleichmässig zu halten war. Die zu erbringende Leistung (ZEL) war während dieser Zeit konstant ( $1.5 \times \text{kg Körpergewicht}$ ). Aus dem Pre-Test wurde die Durchschnitttrittfrequenz ausgerechnet, welche in einer Range von 60 rpm bis 90 rpm liegen musste. Diese Range wurde so gewählt, weil Bachl (1985) aus seinen Untersuchungsergebnissen aus dem Labor schloss, dass Trittfrequenzen von sechzig bis neunzig Umdrehungen pro Minute ökonomisch gesehen am effizientesten sind (Buchegger, 2008). Auf einem Fahrradcomputer bekamen die Probanden während der zwanzigminütigen Lernphase die Rückmeldung zu ihrer Trittfrequenz. Die Aufgabe während dieser Zeit war es, die Trittfrequenz konstant auf ihrer Durchschnitttrittfrequenz (des Pre-Tests) zu halten. Währenddessen die ZEL bei der KG unverändert blieb, änderte sich die ZEL bei der IG alle fünfzehn Sekunden (range  $1 \times \text{kg Körpergewicht}$  bis  $3 \times \text{kg Körpergewicht}$ ) in einer vordefinierten Abfolge (siehe Abbildung 3). Die Probanden wussten nicht, wann der Widerstand wie änderte. Sie mussten ihren Kraftaufwand ständig anpassen, um die Aufgabe, die Trittfrequenz aufrechtzuerhalten, zu erfüllen. Das Protokoll wurde in Anlehnung an die Studie von Meunier et al. (2007) und Mazzocchio et al. (2006) erstellt. Ein wesentlicher Unterschied zu diesen Studien ist, dass die Pre- und Post-Tests keine Widerstandsänderungen enthielten und so nicht in der eigentlichen Lernaufgabe geprüft wurde. Zudem dauerte die Lernphase bei den erwähnten Studien nur sechzehn Minuten und die Trittfrequenz wurde mit 60 rpm vorgegeben.

Im direkten Anschluss an die Lernphase fand beim Studiendesign der vorliegenden Arbeit ein Übergang von dreissig Sekunden in den Post-Test statt. Während des Übergangs wurde der Fahrradcomputer mit der Anzeige der Trittfrequenz wieder abgedeckt.

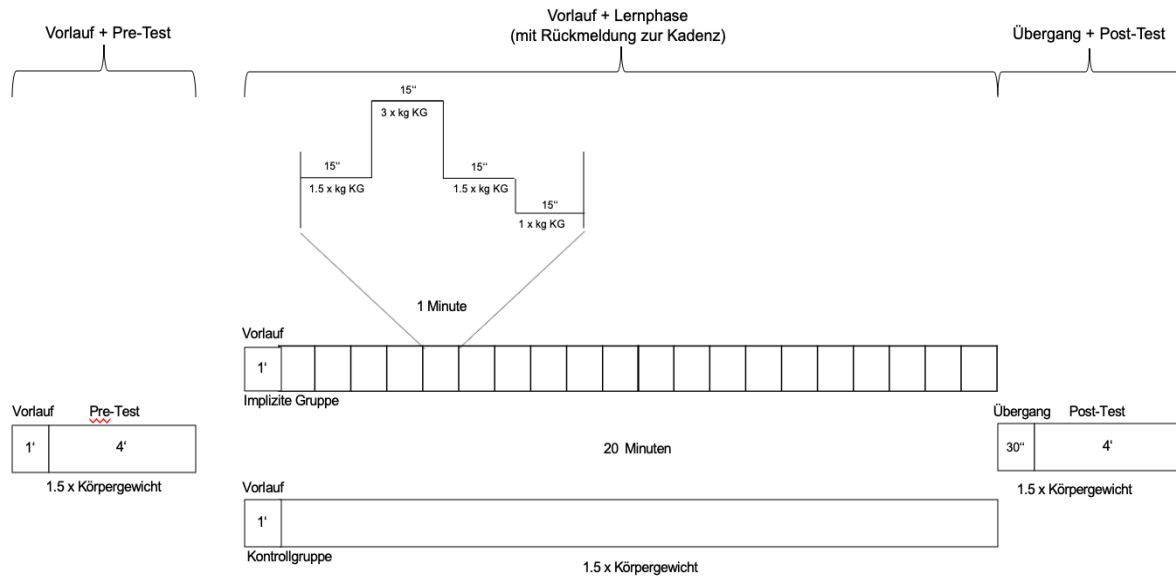


Abbildung 3. Testablauf für die IG sowie KG. Die abgebildete Minute während der Lernphase (bei der IG) ist repräsentativ für jede Minute dieser Phase. Im Pre- und Posttest wurden den Probanden keine Informationen zur Trittfrequenz gegeben.

**2.2.1 Test des Testprotokolls.** Da die Angaben zu den Ausprägungen der Widerstandsänderungen der Lernphase in der genannten Studie von Meunier et al. (2007) nicht konkret angegeben wurden, absolvierten zwei Testprobanden im Vorfeld der Datenerhebung verschiedene Testprotokolle mit unterschiedlich starken Schwankungen in der ZEL und unterschiedlichen Abfolgen. Es wurde darauf geachtet, dass die Widerstandsabfolgen nicht zu intensiven Belastungen führten. So wollte verhindert werden, dass der Lernprozess von einer allfälligen Ermüdung beeinflusst wird. Die gemessenen Daten stellen keine Bestandteile der offiziellen Daten dar und die Testprobanden nahmen nicht mehr als Probanden an der Studie teil.

## 2.3 Instrumente

**2.3.1 SRM High Performance Ergometer.** Für jeden Probanden wurden Einstellungen des Sattels und des Lenkers in der Vertikalen und Horizontalen vorgenommen. Die Sattelhöhe wurde so eingestellt, dass die Ferse bei gestrecktem Bein die Pedale an der tiefsten Kurbelposition berührt. In der horizontalen Stellung der Kurbel sollte die Patella über der Pedalachse stehen (SRM GmbH, 2017). Der Lenker wurde so eingestellt, dass der Proband eine für ihn bequeme Position einnehmen konnte. Alle Probanden absolvierten den Test mit Hallenschuhen und nutzten kein Klick-System.

**2.3.2 PowerControl 7.** Der SRM-Computer wurde vorne auf dem Lenker positioniert. Während der Pre- und Posttests wurde der Computer vollständig abgedeckt. Nur in der Lernphase konnten die Probanden ihre Trittfrequenz auf dem Computer überwachen und so mit Hilfe des visuellen Feedbacks konstant halten. Die Trittfrequenz wurde im Sekundentakt aufgezeichnet.

**2.3.3 Suunto Herzfrequenz-Gurt.** Jeder Proband trug während der ganzen Testzeit einen Brustgurt, der die Herzfrequenz aufzeichnete. Es handelte sich um einen Suunto Dual Comfort. Vor dem Gebrauch wurde er jeweils nass gemacht, damit die Übertragung von Anfang an gut funktioniert.

**2.3.4 SRM Ergometer Software.** In dieser Software wurden die Probanden alle als neue Athleten oder Athletinnen abgespeichert und das körpertgewichtsspezifische Trainingsprotokoll musste jeweils kurz vor dem Test individuell erstellt werden. Mit der Software wurden die Leistung [W], die Herzfrequenz [bpm], die Trittfrequenz [rpm] und die Geschwindigkeit [km/h] während des Pre-Tests, der Lernphase und des Post-Tests aufgezeichnet. Die Software regulierte danach die Widerstände gemäss dem Trainingsprotokoll automatisch.

**2.3.5 SRMX Software.** Die in der SRM Ergometer Software aufgenommenen Daten wurden in die SRMX Software geladen und erste Parameter konnten direkt aus dieser Software über den zeitlichen Aspekt hinaus veranschaulicht werden. Die Software diente als Datenbank der Daten, die über die SRM Ergometer Software aufgenommen wurden.

## 2.4 Datenauswertung

Die Daten aus der Datenbank der SMRX Software wurden in Excel (Microsoft Excel für Mac 2018, Microsoft Corporation, Redmond, USA) importiert und in einer Datenmatrix dargestellt. Statistische Verfahren wurden in SPSS (IBM SPSS Statistics, Version 26, Inc., Chicago, IL) vorgenommen. Post-hoc-Tests wurden im Programm Jamovi (Version 1.1.9.0) berechnet.

Die Variationskoeffizienten der Leistung, der Geschwindigkeit und der Trittfrequenz des Pre- und des Post-Tests beider Gruppen wurden verglichen. Ausserdem wurde der Verlauf dieser Koeffizienten während der Lernphase pro Gruppe analysiert (erste vier Minuten vs. letzte vier Minuten). Als dritter Vergleich der Variationskoeffizienten wurde die erste Minute des Post-Tests mit der letzten Minute des Post-Tests verglichen. Für den statistischen Vergleich wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test alle Variablen für jeweils beide Gruppen auf eine Normalverteilung geprüft. Auch die Homogenität der Fehlervarianzen wurde für die Vergleiche, die mit einer Varianzanalyse gemacht wurden, mit Hilfe des Levene-Tests begutachtet. Bei einer Verletzung der Annahme der Varianzhomogenität wurden die betroffenen Variablen mit der Log10-Transformation umgewandelt. War nur die Normalverteilungsannahme verletzt, wurde die Varianzanalyse mit Messwiederholung ohne Transformierung gemacht, da die Mixed- Anova mit Messwiederholung nach Arnold-Berkovits, Hancock und Nevitt (2000) ausreichend robust ist. Eine Mixed- (zweifaktorielle) Anova mit Messwiederholung wurde für die bereits genannten Vergleiche durchgeführt. Es wurde bei allen drei Vergleichen auch ein ungepaarter Vergleichstest (ungepaarter t-Test bei Normalverteilung, Mann-Whitney-U-Test bei nicht-Normalverteilung) zu einem allfälligen Unterschied im Ausgangsniveau (Pre-Test, erste 4 Minuten in der Lernphase, erste Minute im Post-Test) zwischen den zwei Gruppen (IG vs. KG) durchgeführt. Resultierte aus der Varianzanalyse eine signifikante Interaktion des Messzeitpunkts und der Gruppe, wurden zusätzlich Post-hoc-Tests mittels Bonferroni-Korrektur vorgenommen.

Es wurden weiter Vergleiche mit den absoluten Differenzen der Ist- und Soll-Werte der Parameter Leistung und Trittfrequenz im Pre- und Post-Test für beide Gruppen durchgeführt. Um die Aufgabenausführung in der Lernphase sowie eine allfällige Ökonomisierung genauer anzuschauen, wurden zudem in der Lernphase die Differenzwerte der Ist- und Soll-Werte der Trittfrequenz und der Leistung analysiert. Statistische Vergleiche wurden auch bei diesen Auswertungen mit einer Mixed-Anova mit Messwiederholung gemacht und das Vorgehen der Vergleiche der Variationskoeffizienten konnte übernommen werden.

Für die Lernphase wurden die Variationskoeffizienten der drei Parameter Leistung, Trittfrequenz und Geschwindigkeit der ersten und letzten vier Minuten nur für die IG mit einem Paarvergleichstest (gepaarter t-Test bei Normalverteilung, Wilcoxon-Test bei nicht-

Normalverteilung) auf signifikante Unterschiede geprüft. In Excel wurde der Verlauf der absoluten Ist- und Soll-Leistung in der Lernphase und im Post-Test über die Zeit für beide Gruppen in einem Diagramm abgebildet. Auch die Ist- und Soll-Werte der Trittfrequenz sowie die Daten der Herzfrequenz wurden so verlaufsmässig über die Zeit dargestellt. Für die Lernphase wurde eine Korrelation der Zeit und der Ist-Soll-Differenzen der Trittfrequenz gerechnet. Ausserdem wurde mit den durchschnittlichen Herzfrequenzen eine Mixed-Anova mit Messwiederholung durchgeführt (Gruppe x Messzeitpunkt (erste vier Minuten vs. letzte vier Minuten)). Bei allen Auswertungen mit Herzfrequenzdaten musste eine Probandin der Kontrollgruppe ausgeschlossen werden, da bei ihr die Herzfrequenzmessung nicht zuverlässig funktionierte und mehrere Minuten nicht aufgezeichnet wurden. Um die Bedeutsamkeit eines Resultats zu beurteilen, wurde zusätzlich die Effektstärke ausgerechnet. Bei allen statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von  $p = 0.05$  angenommen.

### 3 Resultate

Für die Beantwortung der konkreten Fragestellung, ob ein kurzfristiger Lerneffekt bei zyklischen Bewegungen auf dem Radergometer unter impliziten Lernbedingungen resultiert, wurden unter dem zeitlichen Aspekt drei unterschiedliche Vergleiche gemacht: Vergleiche zwischen Pre- und Post-Test, solche innerhalb der Lernphase sowie innerhalb des Post-Tests. Der Resultate-Teil ist nach diesen drei Vergleichen aufgeteilt. Innerhalb der Vergleiche der Lernphase wird zusätzlich auf die Qualität der Aufgabenausführung und auf eine allfällige Ökonomisierung der Leistung während der Lernphase und deren Auswirkung auf die zentrale Beanspruchung eingegangen. Resultate zu den Unterfragestellungen a) und b) werden im ersten Abschnitt aufgelistet, jene zu c) und d) im zweiten Teil und jene zu Unterfragestellung e) im dritten. Am Schluss jedes Teiles werden die Hypothesen aufgegriffen und bestätigt oder widerlegt. Die Hypothesen zur konkreten Fragestellung werden abschliessend überprüft.

#### 3.1 Vergleiche von Pre- und Post-Test

Folgend werden Vergleiche zwischen den zwei Gruppen betreffend Variationskoeffizienten und Differenzen der Ist- und Soll-Werte von verschiedenen Parametern ausgeführt.

##### 3.1.1 Variationskoeffizienten verschiedener Parameter im Pre- und Post-Test.

Tabelle 1

*Deskriptive Werte zu den Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit beim Pre- und beim Post-Test für die IG sowie die KG*

Gruppe	Trittfrequenz		Leistung		Geschwindigkeit	
	M	SD	M	SD	M	SD
Implizite Gruppe (n = 18)						
Pre	0.016	0.006	0.094	0.020	0.014	0.005
Post	0.031	0.037	0.137	0.036	0.016	0.009
Kontrollgruppe (n = 15)						
Pre	0.013	0.006	0.109	0.038	0.013	0.006
Post	0.012	0.005	0.119	0.046	0.011	0.005

*Anmerkung.* M = Mittelwert, SD = Standardabweichung. Die Leistungswerte wurden in Watt gemessen, die Trittfrequenz in Umdrehungen pro Minute und die Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde. Die Variationskoeffizienten beziehen sich somit auf diese Einheiten.

Die Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit wurden beim Pre- sowie beim Post-Test für die IG und für die KG deskriptiv ausgewertet und danach auf statistische Unterschiede geprüft. In Tabelle 1 sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit aufgelistet. Auffällig ist, dass die Mittelwerte der Variationskoeffizienten aller Parameter bei der IG im Post-Test höher sind als beim Pre-Test. Bei der KG gibt es diesen Unterschied nicht.

**Trittfrequenz.** Abbildung 4 veranschaulicht, wie sich die Mittelwerte der Variationskoeffizienten der Trittfrequenz zwischen Pre- und Post-Test innerhalb der IG und KG veränderten (siehe auch Tabelle 1). Die Variationskoeffizienten der Trittfrequenz beim Pre-Test unterschieden sich zwischen den Gruppen nicht signifikant ( $t_{31} = 1.183, p = 0.246$ ). Für die statistische Varianzanalyse wurden die Pre- und Post-Werte mit der Log10-Transformation umgewandelt, da die Homogenität der Fehlervarianzen zwischen den Gruppen laut Levene-Test für die Werte des Post-Tests nicht gegeben war ( $p < 0.05$ ). Es trat keine signifikante Interaktion zwischen Messzeitpunkt (Pre-Post) und Gruppe (IG-KG) auf ( $F_{1, 31} = 3.093, p = 0.088, \eta^2 = 0.091$ ). Es gab keinen signifikanten Effekt der Zeit ( $F_{1, 31} = 0.372, p = .546, \eta^2 = 0.012$ ), aber einen signifikanten Gruppeneffekt ( $F_{1, 31} = 5.847, p = 0.022, \eta^2 = 0.159$ ).

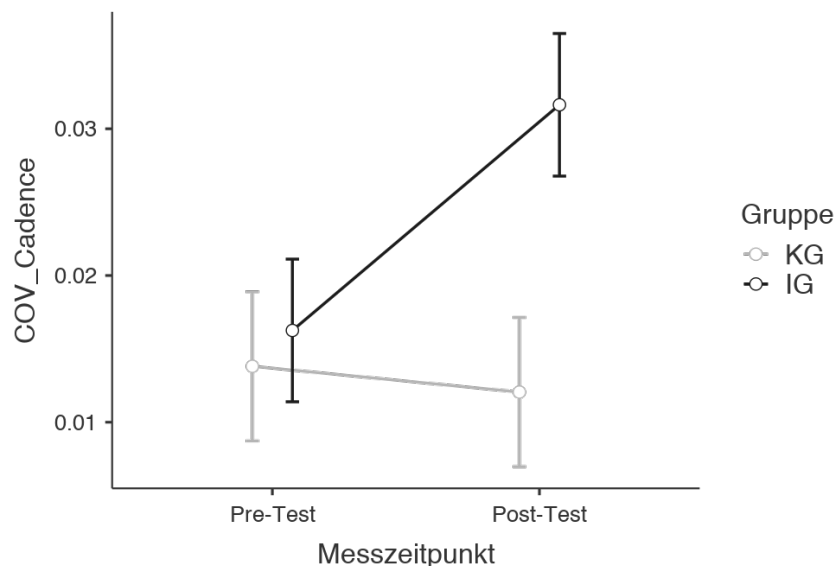


Abbildung 4. Veränderung der Mittelwerte und der Standardfehler der Variationskoeffizienten der Trittfrequenz vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe (IG) und der Kontrollgruppe (KG). COV\_Cadence = Variationskoeffizienten der Trittfrequenz. Die Trittfrequenz wurde in Umdrehungen pro Minute (rpm) gemessen – die Variationskoeffizienten beziehen sich somit auf die Umdrehungszahlen.

**Leistung.** In Abbildung 5 wird die Veränderung der Mittelwerte der Variationskoeffizienten der Leistung vom Pre- zum Post-Test für die IG sowie die KG (siehe auch Tabelle 1) grafisch dargestellt. Die Ausgangslage der Variationskoeffizienten der Leistung im Pre-Test unterschied sich zwischen den zwei Gruppen nicht signifikant (exakter Mann-Whitney-U-Test:  $U = 103.00$ ,  $p = 0.259$ ).

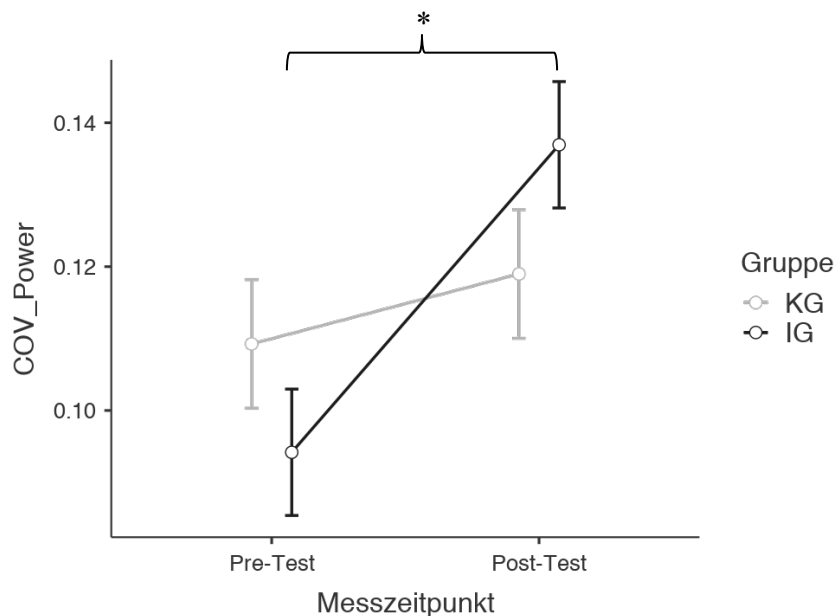


Abbildung 5. Veränderung der Mittelwerte und Standardfehler der Variationskoeffizienten der Leistung vom Pre- zum Post-Test bei der Lern- (IG) und der Kontrollgruppe (KG). COV\_Power = Variationskoeffizienten der Leistung. Die Leistung wurde in Watt gemessen – die Variationskoeffizienten beziehen sich somit auf Wattwerte. \* =  $p < 0.001$

Bei den statistischen Auswertungen zur Veränderung des Mittelwerts der Variationskoeffizienten der Leistung vom Pre- zum Post-Test zwischen den zwei Gruppen ergab es eine signifikante Interaktion von Gruppe (IG-KG) und Messzeitpunkt (Pre-Post) ( $F_{1,31} = 8.70$ ,  $p = 0.006$ ,  $\eta^2 = 0.219$ ). Zudem trat ein signifikanter Haupteffekt der Zeit ( $F_{1,31} = 21.983$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.415$ ), jedoch keiner der Gruppe ( $F_{1,31} = 0.017$ ,  $p = 0.899$ ,  $\eta^2 = 0.001$ ) auf. Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test zeigte einen signifikanten Unterschied ( $t_{31} = -5.66$ ,  $p < 0.001$ ) in der Veränderung der Variationskoeffizienten der Leistung vom Pre- zum Post-Test bei der IG.

**Geschwindigkeit.** In Abbildung 6 ist die Veränderung der Mittelwerte des Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit vom Pre- zum Post-Test für beide Gruppen (siehe auch Tabelle 1) grafisch dargestellt. Die Ausgangslage im Pre-Test unterschied sich zwischen den Gruppen nicht signifikant ( $t_{31} = 0.442, p = 0.662$ ). Es trat keine signifikante Interaktion von Gruppe (IG-KG) und Messzeitpunkt (Pre-Post) ( $F_{1,31} = 2.084, p = 0.159, \eta^2 = 0.063$ ) auf. Weder der Messzeitpunkt ( $F_{1,31} = 0.003, p = 0.954, \eta^2 < 0.01$ ) noch die Gruppe ( $F_{1,31} = 2.567, p < 0.119, \eta^2 = 0.076$ ) verzeichnete einen signifikanten Haupteffekt.



Abbildung 6. Veränderung der Mittelwerte und der Standardfehler der Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe (IG) und der Kontrollgruppe (KG). COV\_Speed = Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit wurde in Kilometern pro Stunde gemessen – die Variationskoeffizienten beziehen sich somit auf die Geschwindigkeit.

### 3.1.2 Absolute Differenzen zwischen Ist- und Soll-Werten der Parameter Trittfrequenz und Leistung im Pre- und Post-Test.

**Trittfrequenz.** Die Aufgabe aller Probanden war es, die Trittfrequenz während des Pre- und des Post-Tests möglichst gleichmässig zu halten. Der Ist-Wert entspricht dem Durchschnitt der tatsächlich gefahrenen Trittfrequenz, der Soll-Wert dem Durchschnittswert des Pre-Tests. Die Differenz zwischen Ist- und Soll-Werten wurde für jede Sekunde ausgerechnet, um daraus anschliessend einen durchschnittlichen Differenzwert der Trittfrequenz zu errechnen. Die Differenz zwischen Ist- und Soll-Werten der Trittfrequenz wurde vom Pre- zum Post-Test in beiden Gruppen höher (IG:  $Md = 0.80$  zu  $Md = 1.68$ , KG:  $Md = 0.71$  zu  $Md = 1.42$ ) (Abbildung 7).

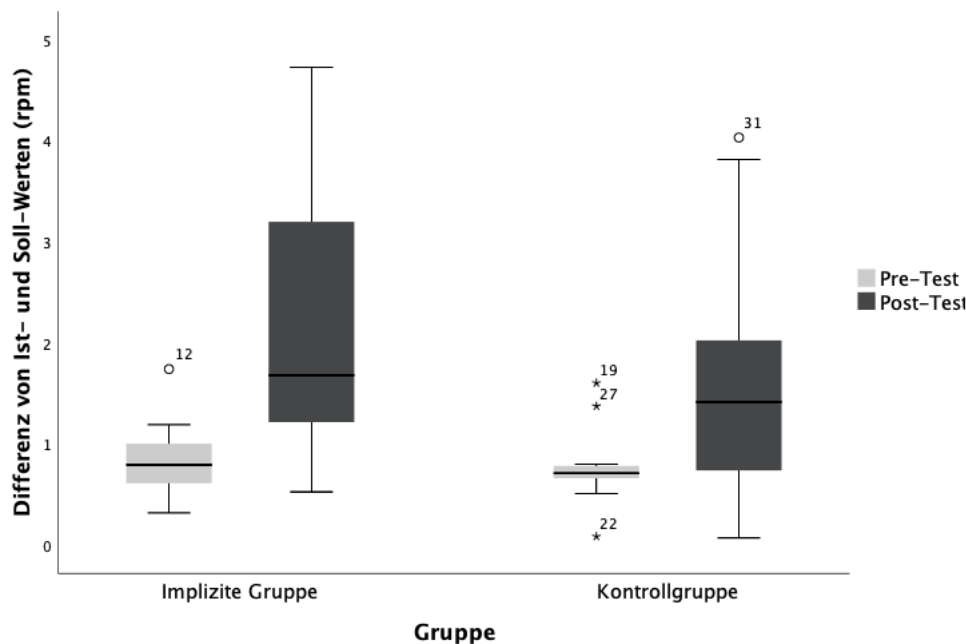


Abbildung 7. Box-Plots der durchschnittlichen Differenzen von den Ist- und Soll-Werten der Trittfrequenz im Pre- und Post-Test, aufgeteilt nach den zwei Gruppen: Implizite Gruppe ( $n = 18$ ) und Kontrollgruppe ( $n = 15$ ). \* = extremer Ausreisser, ° = milder Ausreisser.

Es trat keine signifikante Interaktion zwischen Gruppenzugehörigkeit (IG-KG) und Messzeitpunkt (Pre-Post) auf ( $F_{1, 31} = 1.094$ ,  $p = 0.304$ ,  $\eta^2 = 0.034$ ). Der Messzeitpunkt erreichte jedoch einen signifikanten Effekt ( $F_{1, 31} = 24.279$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.439$ ). Es resultierte kein signifikanter Gruppeneffekt ( $F_{1, 31} = 1.671$ ,  $p = 0.206$ ,  $\eta^2 = 0.051$ ).

Betreffend Abweichungen kann der grafischen Abbildung (Abbildung 8) keine eindeutige Tendenz entnommen werden.

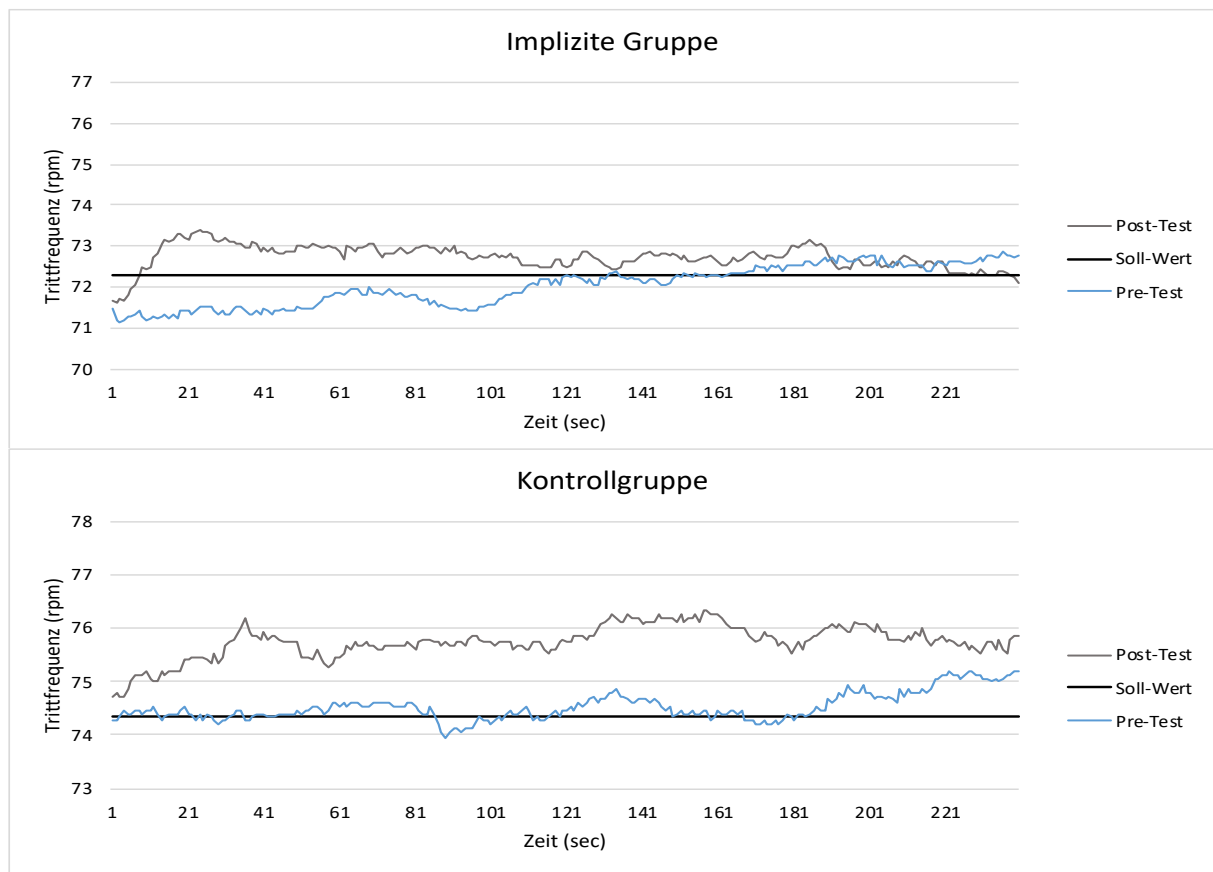


Abbildung 8. Durchschnittlicher Verlauf der Trittfrequenz während der Pre- und Post-Tests (je vier Minuten) für die implizite Gruppe und die Kontrollgruppe. Der Soll-Wert (schwarz) entspricht dem Durchschnitt der Trittfrequenz aus dem Pre-Test. Die Linien der Pre- und Post-Tests entsprechen dem jeweiligen Ist-Wert.

**Leistung.** Die tatsächliche Leistung wurde im Sekundentakt aufgezeichnet und danach mit dem dazugehörigen Soll-Wert der Leistung ( $1.5 \times \text{kg Körpergewicht}$ ) verglichen. Aus den einzelnen Differenzen pro Sekunde wurde ein Mittelwert ausgerechnet. Bei der Leistung vergrößerte sich die Differenz aus den Ist- und Soll-Werten vom Pre- zum Post-Test bei beiden Gruppen (IG:  $Md = 11.46$  zu  $Md = 16.79$ , KG:  $Md = 11.69$  zu  $Md = 11.93$  (Abbildung 9). Die beiden Gruppen hatten beim Pre-Test ein vergleichbares Ausgangsniveau in der Differenz der Ist-Soll-Werte (exakter Mann-Whitney-U-Test:  $U = 131.00$ ,  $p = 0.901$ ). Um eine Mixed-Anova durchführen zu können, wurden die Daten mit der Log10-Transformation umgewandelt. Auch nach der Transformation lag keine Varianzgleichheit vor (Levene-Test:  $p < 0.05$ ).

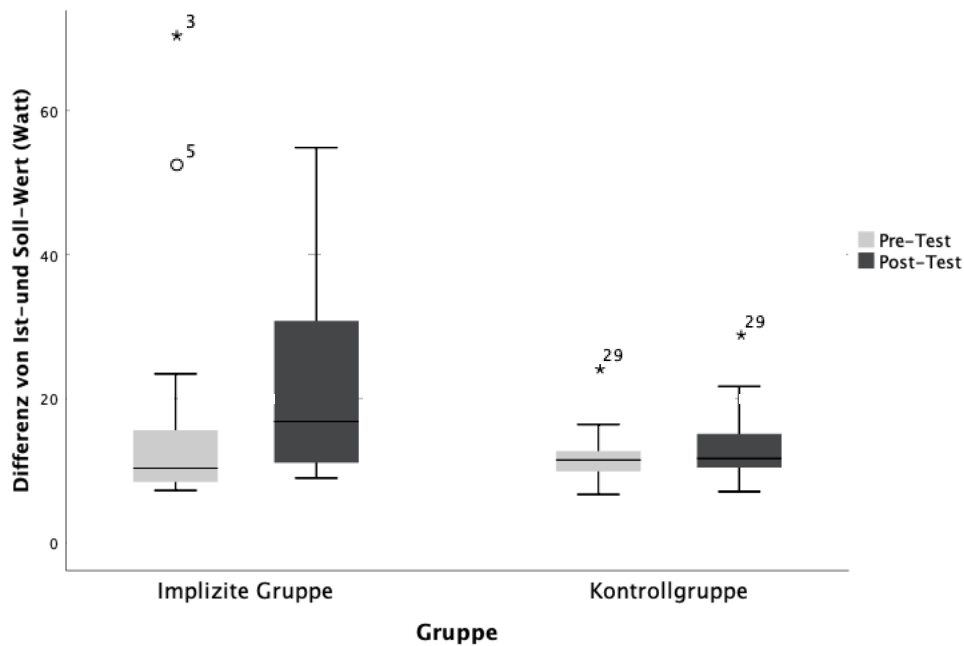


Abbildung 9. Box-Plots der Differenzen von den Ist- und Soll-Werten der Leistung im Pre- und Post-Test, aufgeteilt nach den zwei Gruppen: IG ( $n = 18$ ) und KG ( $n = 15$ ). \* = extremer Ausreisser, ° = milder Ausreisser.

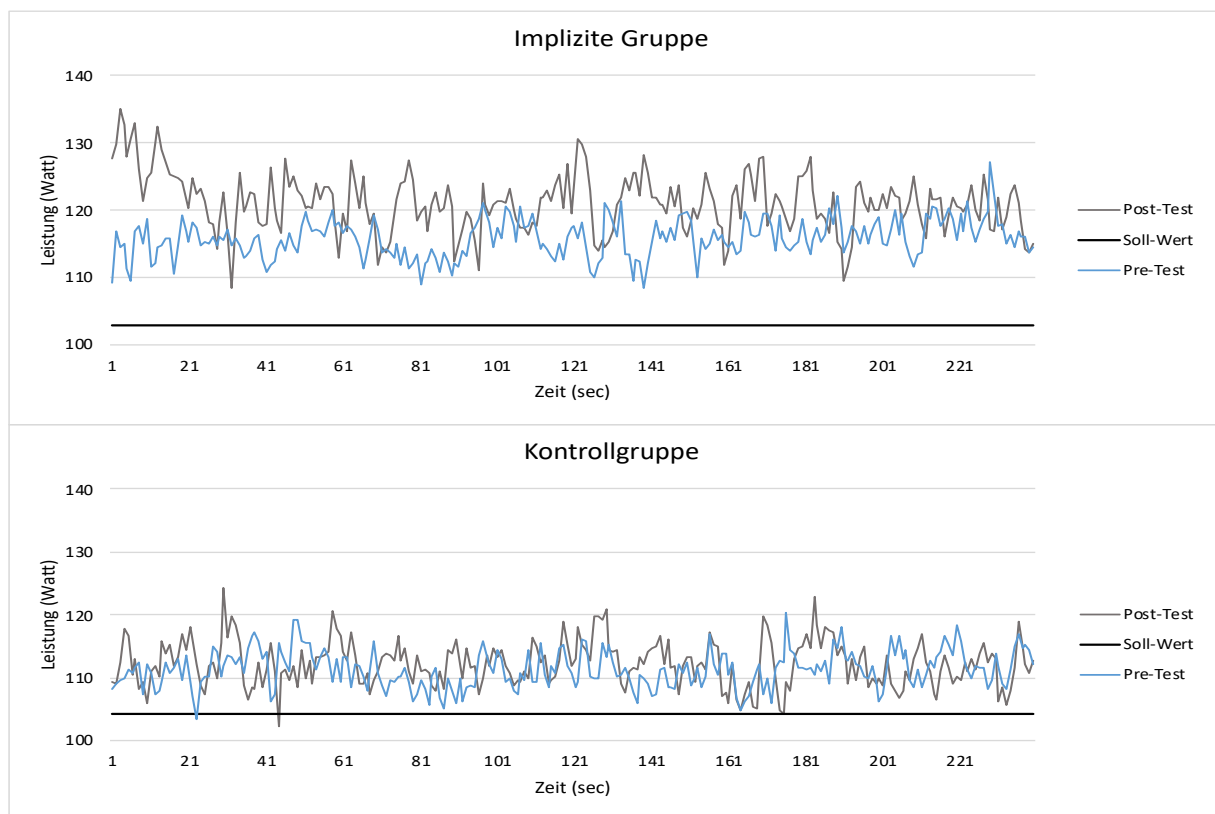


Abbildung 10. Durchschnittlicher Verlauf der Leistung während der Pre- und Post-Tests (je vier Minuten). Der Soll-Wert (schwarz) entspricht dem Durchschnitt aus den errechneten Soll-Wattzahlen pro Probanden ( $1.5 \times \text{Körpergewicht}$ ). Mittelwert: Implizite Gruppe = 102.83 Watt, Kontrollgruppe = 104.20 Watt. Die durchschnittliche Leistung während der Pre- und Post-Tests unterschied sich zwischen den zwei Gruppen nicht signifikant ( $t_{31} = -0.199$ ,  $p = 0.843$ ). Pre- und Post-Test-Linien entsprechen den jeweiligen Ist-Werten.

Aus diesem Grund wurde die Mixed-Anova mit den Rohdaten ausgeführt. Es gab keine statistisch signifikante Interaktion zwischen dem Messzeitpunkt (Pre-Post) und den zwei Untersuchungsgruppen (IG-KG) ( $F_{1,31} = 1.160, p = 0.290, \eta^2 = 0.036$ ). Auch der Messzeitpunkt sowie die Gruppe alleine zeigten keinen signifikanten Haupteffekt (Messzeitpunkt:  $F_{1,31} = 3.915, p = 0.057, \eta^2 = 0.112$ , Gruppe:  $F_{1,31} = 1.76, p = 0.194, \eta^2 = 0.054$ ).

Vergleicht man den Verlauf der Ist- und Soll- Leistung während des Post-Tests auf einer grafischen Abbildung (Abbildung 10), so lässt sich feststellen, dass die IG vor allem am Anfang des Post-Tests grössere und schwankendere Abweichungen vom Soll-Wert verzeichnete als die KG.

**3.1.3 Hypothesenüberprüfung zu a) und b).** Inwiefern sich die Variationskoeffizienten der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit zwischen den Gruppen und Messzeitpunkten unterscheiden, wurde mit Unterfragestellung a) untersucht.  $H_2$  kann teilweise bestätigt werden. Die Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit und der Trittfrequenz verändern sich vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht signifikant.  $H_3$  kann nicht vollständig bestätigt werden. Lediglich die Variationskoeffizienten der Leistung verzeichneten einen signifikanten Zeit-Gruppen-Unterschied.

Für die Unterfragestellung b) wurden die Ist- und Soll-Werte der Trittfrequenz und der Leistung zwischen den zwei Gruppen und Messzeitpunkten miteinander verglichen.  $H_4$  und  $H_5$  müssen aus statistischer Betrachtungsweise widerlegt werden. Die Ist-Soll-Differenz-Werte der Parameter Trittfrequenz und Leistung veränderten sich vom Pre- zum Post-Test bei der impliziten Gruppe verglichen mit der Kontrollgruppe nicht signifikant. Es kann aber aus den deskriptiven Werten und grafischen Auswertungen herausgelesen werden, dass die Leistung der impliziten Gruppe im Post-Test mehr vom Soll-Wert abwich als im Pre-Test.

## **3.2 Vergleiche innerhalb der Lernphase**

Die Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit wurden für die ersten und letzten vier Minuten der Lernphase für beide Gruppen ausgewertet.

**3.2.1 Variationskoeffizienten verschiedener Parameter in den ersten und letzten vier Minuten der Lernphase.** In der Tabelle 2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Variationskoeffizienten der untersuchten Parameter für beide Gruppen aufgelistet.

Tabelle 2

*Deskriptive Werte zu den Variationskoeffizienten der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit bei den ersten und letzten vier Minuten der Lernphase*

Gruppe	Trittfrequenz		Leistung		Geschwindigkeit	
	M	SD	M	SD	M	SD
Implizite Gruppe (n = 18)						
Adj_1	0.022	0.010	0.466	0.161	0.024	0.009
Adj_2	0.027	0.026	0.455	0.119	0.015	0.007
Kontrollgruppe (n = 15)						
Adj_1	0.007	0.003	0.117	0.334	0.006	0.002
Adj_2	0.010	0.009	0.116	0.044	0.006	0.003

*Anmerkung.* M = Mittelwert, SD = Standardabweichung. Adj\_1 = erste vier Minuten der Lernphase, Adj\_2 = letzte vier Minuten der Lernphase.

Für die Varianzanalyse wurden die Mittelwerte der Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit der ersten vier Minuten und jene der letzten vier Minuten mit der Log10-Transformation umgewandelt, da bei keinem Parameter eine Varianzhomogenität vorlag (Levene-Test:  $p < 0.05$ ). Es muss beachtet werden, dass die Ausgangslage in den ersten vier Minuten bei allen drei Variablen zwischen den Gruppen bereits signifikante Unterschiede aufwies (Trittfrequenz:  $t_{19.708} = 6.133$ ,  $p < 0.001$ , Leistung:  $t_{18.736} = 8.947$ ,  $p < 0.001$ , Geschwindigkeit:  $U < 0.001$ ,  $Z = -4.881$ ,  $p < 0.001$ ). Weder bei den Variationskoeffizienten der Trittfrequenz ( $F_{1,31} = 0.961$ ,  $p = 0.335$ ,  $\eta^2 = 0.030$ ) noch bei jenen der Leistung ( $F_{1,31} = 0.129$ ,  $p = 0.722$ ,  $\eta^2 = 0.009$ ) resultierte eine signifikante Interaktion des Messzeitpunkts (Pre-Post) und der Gruppenzugehörigkeit (IG-KG). Die Interaktion von Messzeitpunkt (Pre-Post) und Gruppe (IG-KG) war bei den Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit jedoch signifikant ( $F_{1,31} = 19.903$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.391$ ). Ein nach Bonferroni korrigierter Post-hoc-Test zeigte einen signifikanten Unterschied in den Variationskoeffizienten der ersten und letzten vier Minuten bei der IG ( $t_{31} = 6.214$ ,  $p < 0.001$ ). Bei der KG veränderten sich die Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit von den ersten vier Minuten zu den letzten vier Minuten nicht signifikant ( $t_{31} = -0.368$ ,  $p = 1.000$ ) (Abbildung 11).

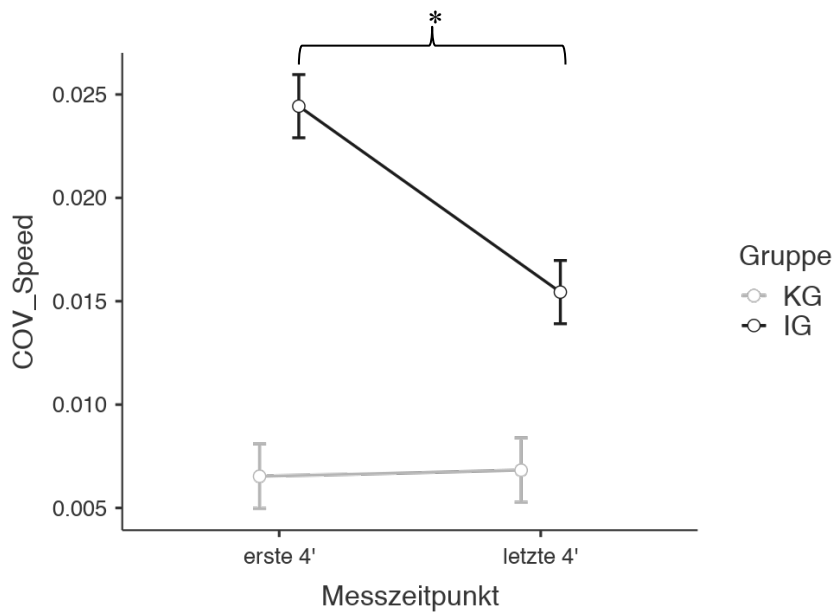


Abbildung 11. Veränderung der Mittelwerte und der Standardfehler der Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit von den ersten vier Minuten der Lernphase zu den letzten vier Minuten. COV\_Speed = Variationskoeffizient der Geschwindigkeit. \* =  $p < 0.001$

Da die IG während der Lernphase Widerstandsänderungen ausgleichen musste und die ZEL bei der KG unverändert blieb, ist ein Vergleich mit der Varianzanalyse wenig aussagekräftig. Folgende Auswertungen wurden nur mit den Daten der IG gemacht, um festzustellen, inwiefern sich die untersuchten Parameter im Verlaufe der Lernphase veränderten. Dafür wurden ebenfalls die ersten und letzten vier Minuten analysiert.

Der Tabelle 2 kann entnommen werden, dass sich die Mittelwerte der Variationskoeffizienten der Leistung sowie jene der Geschwindigkeit von den ersten vier Minuten zu den letzten vier Minuten verkleinerten. In Tabelle 3 ist zudem zu sehen, dass lediglich die Veränderung der Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit signifikant ausfiel. Mit einem  $r = 0.756$  kann laut Cohen (1992) von einem starken Effekt gesprochen werden.

Tabelle 3

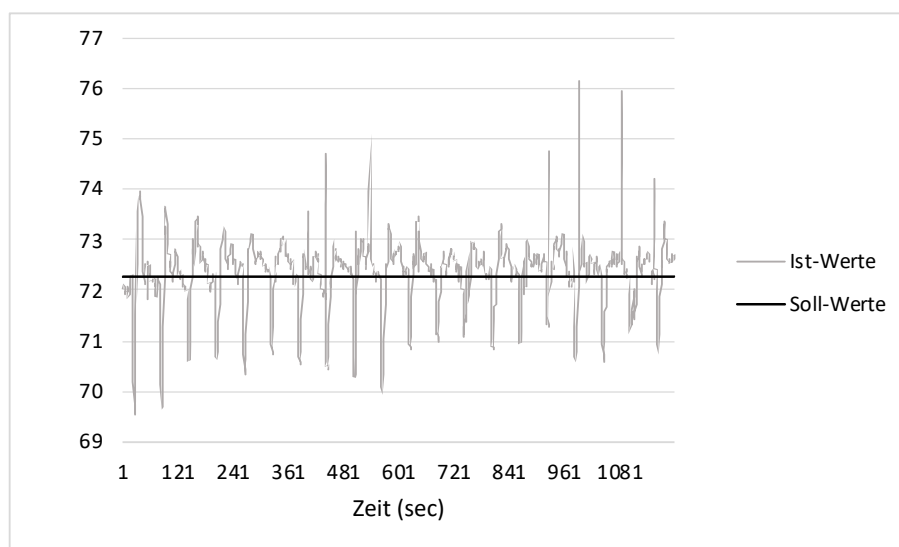
*Statistische Auswertungen der Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit in der Lernphase für die implizite Gruppe (n = 18)*

	Paarvergleichstest	t- bzw. z- Wert	p-Wert	r - Wert
COV_Cadence_Adj1				
COV_Cadence_Adj2	Wilcoxon-Test	0.283	0.799	
COV_Power_Adj1				
COV_Power_Adj2	t-Test	0.709	0.488	
COV_Speed_Adj1				
COV_Speed_Adj2	Wilcoxon-Test	-3.245	> 0.001	0.756

*Anmerkung.* Der Paarvergleichstest wurde jeweils je nach Verteilung der Daten gewählt (Test auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test – bei  $p > 0.05$  wurde der t-Test gewählt, bei  $p < 0.05$  der Wilcoxon-Test). Adj\_1 steht für die ersten 4 Minuten der Lernphase, Adj\_2 für die letzten 4 Minuten.

**3.2.2 Aufgabenausführung – Differenzen der Ist-Soll-Werten der Trittfrequenz.** Nun folgen Auswertungen zur Frage, ob die Sportstudierenden der IG die Trittfrequenz im Verlauf der Lernphase stabiler halten konnten und so die Lernaufgabe gegen Ende der Lernphase exakter ausführten als zu Beginn. Dafür wurden die Differenzen aus den Ist- und Soll-Werten der Trittfrequenz im Verlaufe der Lernphase analysiert.

Wie im Diagramm in Abbildung 12 zu sehen ist, lassen die erhobenen Daten optisch keine Aussage zu einer allfälligen effizienteren Aufgabenausführung gegen Ende der Lernphase zu.



*Abbildung 12.* Durchschnittliche Abweichungen der tatsächlich getretenen Trittfrequenz vom Soll-Wert während der Lernphase. Die Auswertungen beinhalten lediglich die Daten der IG (n = 18).

Dies zeigte sich auch in den statistischen Auswertungen des Vergleichs der ersten vier Minuten und der letzten vier Minuten. Der Mittelwert der Differenzwerte aus den Ist- und Soll-Werten der Trittfrequenz in den letzten vier Minuten war zwar kleiner als in den ersten vier Minuten, sie unterschieden sich aber nicht signifikant voneinander (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4

*Auswertungen zu Differenzwerten zwischen Ist- und Soll- Werten der Trittfrequenz der IG für die ersten und letzten vier Minuten der Lernphase*

	Deskriptive Statistik		Normalverteilung		Paarvergleichstest	
	M	SD	Shapiro-Wilk-Test		exakter Wilcoxon-Test	
Implizite Gruppe (n = 18)						
Adj_1	1.04	0.48	p = 0.018	keine NV	Z = -1.220	p = 0.233
Adj_2	0.94	0.55	p = 0.004	keine NV		

*Anmerkung.* 13 der 18 Probanden der impliziten Gruppe (IG) hatten in den letzten vier Minuten einen tieferen Differenzwert als in den ersten 4 Minuten. Adj\_1 = erste vier Minuten der Lernphase, Adj\_2 = letzte vier Minuten der Lernphase.  $M$  = Mittelwert der Differenzen zwischen Ist- und Soll-Werten der Trittfrequenz,  $SD$  = Standardabweichung.

In Abbildung 13 ist eine abnehmende Tendenz der Abweichungen der Ist- von den Soll-Werten im Verlauf der Lernphase zu erkennen. Die Dauer der Lernphase (in Sekunden) sowie die Differenz der Ist- und Soll-Werte der Trittfrequenz korrelieren signifikant ( $r = -0.061$ ,  $p = 0.034$ ,  $n = 1200$ ). Der Korrelationskoeffizient von  $-0.061$  entspricht nach Cohen (1992) einem schwachen negativen Effekt.

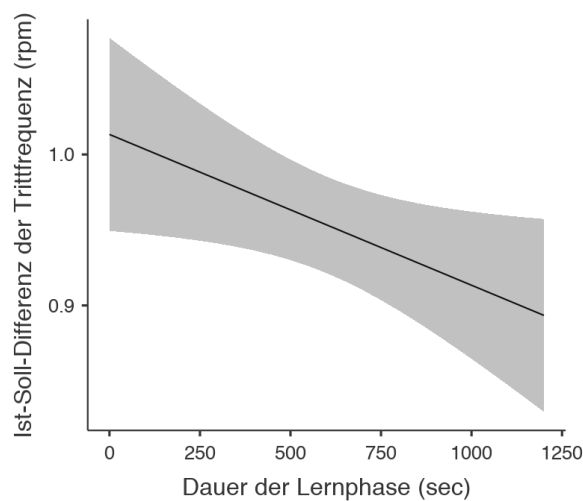


Abbildung 13. Tendenz der Differenzwerte der Ist- und Soll-Trittfrequenz während der Lernphase für die IG ( $n = 18$ ). Die Differenz ist in Umdrehungen pro Minute angegeben (rpm).

**3.2.3 Ökonomisierung – Differenzen der Ist-Soll-Werte der Leistung und Auswirkung auf die Herzfrequenz.** Um die Fragestellung zu beantworten, ob bei der IG eine Ökonomisierung der Leistung während der Lernphase stattfand und ob sich eine allfällige Ökonomisierung auf die zentrale Beanspruchung auswirkte, wurden die folgenden Auswertungen gemacht.

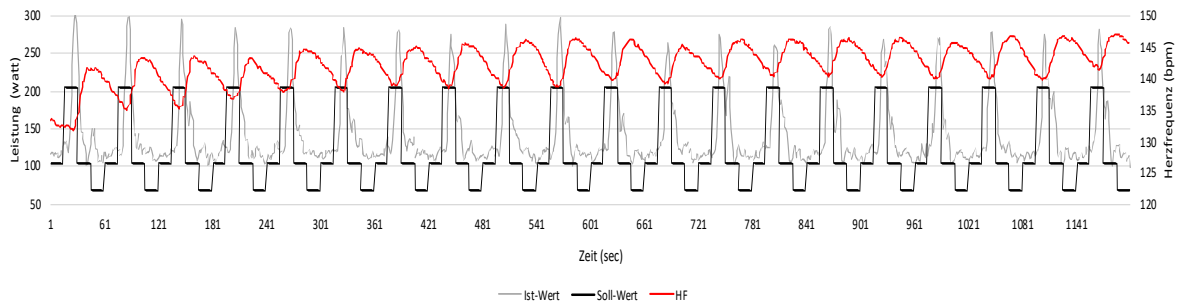


Abbildung 14. Verlauf der durchschnittlichen Leistung (Ist-Wert, grau), der durchschnittlichen Soll-Leistung (schwarz) und der durchschnittlichen Herzfrequenz der IG (rot) während der Lernphase für die implizite Gruppe. HF = Herzfrequenz.

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass sich die durchschnittliche Leistung pro Sekunde im Verlaufe der Lernphase bei der IG nicht klar dem Soll-Wert annäherte. Die Ausschläge zu Beginn jeder Widerstandsverdoppelung variieren zwar, nehmen aber nicht deutlich ab. Es kann folglich nicht von einer effizienteren Aufgabenausführung gesprochen werden. Gegen Ende der Lernphase stieg die zentrale Beanspruchung (HF), sie kann nicht in einen Zusammenhang mit einer Ökonomisierung gesetzt werden. Da auf Abbildung 14 keine Tendenz festzustellen ist, wurden die Leistung und die Herzfrequenz noch individuell ausgewertet und im folgenden Abschnitt beleuchtet. Als Vergleichswerte wurden die Daten der KG miteinbezogen.

**Leistung.** Die mittlere Leistung während der Lernphase (IG:  $M = 141.82 \pm 27.82$  Watt, KG:  $M = 110.50 \pm 17.43$  Watt) unterschied sich zwischen den Gruppen signifikant ( $t_{31} = 3.780$ ,  $p = 0.001$ ). Durchschnittlich mussten die Probanden der IG eine Leistung von  $1.75 \times$  Kilogramm Körpergewicht aufrechterhalten, jene der KG nur  $1.5 \times$  Kilogramm Körpergewicht. Dies muss bei den folgenden Ergebnissen stets berücksichtigt werden. Die Differenz zwischen Ist- und Soll-Werten nahm von den ersten vier Minuten zu den letzten vier Minuten bei beiden Gruppen ab, die Abnahme bei der IG fiel aber ungefähr dreimal grösser aus als bei der KG (Tabelle 5).

Tabelle 5

*Deskriptive Kennwerte zu den Differenzwerten zwischen Ist- und Soll-Werten der Leistung für die IG und die KG während der ersten und letzten vier Minuten der Lernphase*

	Deskriptive Statistik	
	M	SD
Implizite Gruppe (n = 18)		
Adj_1	53.15	16.31
Adj_2	50.09	13.43
Kontrollgruppe (n = 15)		
Adj_1	12.56	4.19
Adj_2	11.77	4.69

*Anmerkung.* *M* = Mittelwert. *SD* = Standardabweichung. Adj\_1 = erste vier Minuten der Lernphase, Adj\_2 = letzte vier Minuten der Lernphase. Alle Werte sind Wattangaben.

Die Differenzwerte zwischen Ist- und Soll-Werten der Leistung unterschieden sich zwischen den zwei Gruppen bereits in den ersten vier Minuten signifikant (exakter Mann-Whitney-U-Test:  $U = 0.000$ ,  $p < 0.001$ ). Für die Mixed-Anova wurden die Daten mit einer Log10-Transformation umgewandelt, da in den ersten vier Minuten sowie in den letzten vier Minuten zwischen den Gruppen keine Homogenität der Fehlervarianzen vorlag (Levene-Test:  $p < 0.05$ ). Es resultierte keine signifikante Interaktion der Gruppe (IG-KG) und der Zeit (erste 4'-letzte 4') der Differenz der Ist-Soll-Werte der Leistung ( $F_{1,31} = 0.300$ ,  $p = 0.588$ ,  $\eta^2 = 0.010$ ). Es zeigte sich aber ein signifikanter Zeit- und Gruppeneffekt (Zeit:  $F_{1,31} = 5.681$ ,  $p = 0.023$ ,  $\eta^2 = 0.155$ , Gruppe:  $F_{1,31} = 216.975$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.875$ ).

**Herzfrequenz.** Im vierminütigen Pre-Test (Widerstand für beide Gruppen bei 1.5 x kg Körpergewicht) unterschieden sich die Herzfrequenzwerte der zwei Gruppen nicht signifikant (ungepaarter t-Test:  $t_{30} = 1.251$ ,  $p = 0.221$ ). In Abbildung 15 ist der Verlauf der durchschnittlichen Herzfrequenzdaten während der 20-minütigen Lernphase für beide Gruppen abgebildet. Eine steigende Tendenz ist bei beiden Gruppen zu erkennen. Die Höhe der Durchschnittsherzfrequenzen pro Sekunde ist bei der IG deutlich höher (IG:  $M = 142.22 \pm 17.18$  bpm, KG:  $M = 128.43 \pm 13.27$  bpm). Der Unterschied ist signifikant ( $t_{30} = 2.48$ ,  $p = 0.019$ ).

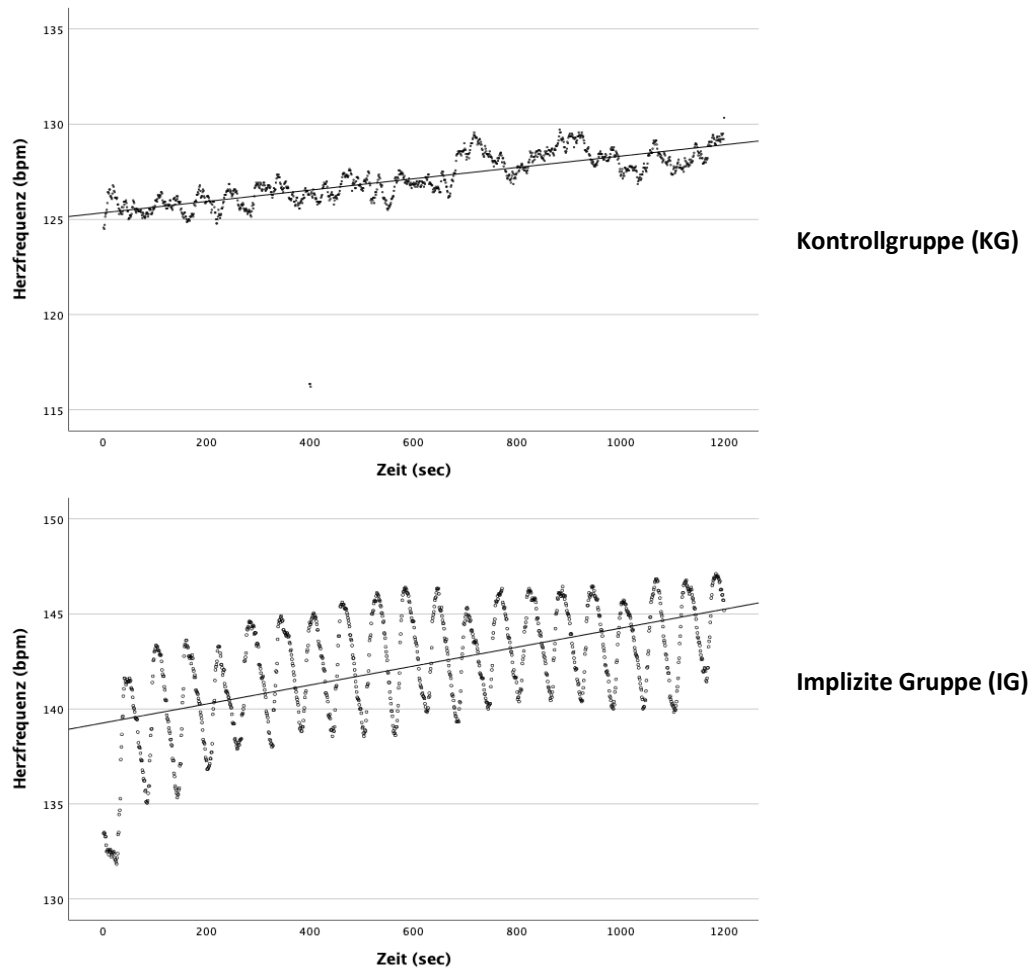


Abbildung 15. Verlauf der durchschnittlichen Herzfrequenz der Probanden der KG ( $n = 14$ ) (Abbildung oben) und der IG ( $n = 18$ ) (Abbildung unten) während der Lernphase.

In der Tabelle 6 sind Werte zur Herzfrequenz für beide Gruppen für die ersten und letzten vier Minuten der Lernphase aufgelistet. Bei beiden Gruppen stiegen die Mittelwerte der Herzfrequenz an.

Es trat keine signifikante Interaktion der Gruppe (IG-KG) und der Zeit (erste 4'-letzte 4') ( $F_{1,30} = 2.018, p = 0.166, \eta^2 = 0.063$ ) auf. Es zeigte sich aber ein signifikanter Zeiteffekt ( $F_{1,30} = 19.500, p < 0.001, \eta^2 = 0.394$ ) und ein signifikanter Gruppeneffekt ( $F_{1,30} = 7.479, p = 0.010, \eta^2 = 0.200$ ).

Tabelle 6

*Auswertungen zu den Herzfrequenzdaten während der ersten und letzten vier Minuten der Lernphase für die IG und KG*

	Deskriptive Statistik	
	M	SD
Implizite Gruppe ( $n = 18$ )		
Adj_1	138.97	15.15
Adj_2	143.82	18.29
Kontrollgruppe ( $n = 14$ )		
Adj_1	125.71	11.53
Adj_2	128.19	12.98

*Anmerkung.* Adj\_1 = erste vier Minuten der Lernphase, Adj\_2 = letzte 4 Minuten der Lernphase. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung.

Die Ausgangslage der durchschnittlichen Herzfrequenzwerte in den ersten vier Minuten unterschied sich zwischen den zwei Gruppen bereits signifikant (exakter Mann-Whitney-U-Test:  $U = 64.500$ ,  $Z = -2.549$ ,  $p = 0.010$ ). Dies muss bei den Interpretationen berücksichtigt werden. Es wurde trotzdem eine Mixed-Anova mit Messwiederholung durchgeführt. Dabei konnte keine signifikante Interaktion von Gruppe (IG-KG) und Messzeitpunkt (erste 4'-letzte 4') festgestellt werden ( $F_{1,30} = 2.018$ ,  $p = 0.166$ ,  $\eta^2 = 0.063$ ). Der Messzeitpunkt sowie die Gruppe als individuellen Hauptfaktor waren je signifikant (Messzeitpunkt:  $F_{1,30} = 19.500$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.394$ , Gruppe:  $F_{1,30} = 7.479$ ,  $p = 0.010$ ,  $\eta^2 = 0.200$ ).

**3.2.4 Hypothesenüberprüfung zu c) und d).** Ob die Sportstudierenden der impliziten Gruppe die Trittfrequenz im Verlauf der Lernphase stabiler halten können, wurde mit der Unterfragestellung c) untersucht.  $H_6$ , die davon ausging, dass die Trittfrequenz nicht stabiler gehalten werden konnte, kann widerlegt werden. Die Trittfrequenz der Probanden der impliziten Gruppe korrelierte negativ mit der laufenden Zeit der Lernphase.  $H_7$  kann demzufolge bestätigt werden. Mit den vorhandenen Daten konnte keine Ökonomisierung der Leistung festgestellt und somit auch keine Zusammenhänge zwischen einer Ökonomisierung und der Herzfrequenz erkannt werden.  $H_8$ , die von keiner Ökonomisierung ausging, muss bestätigt werden.  $H_9$  kann komplett verworfen werden.

### 3.3 Vergleiche innerhalb des Post-Tests

Die folgenden Vergleiche beinhalten die erste und die letzte Minute des Post-Tests. Die Veränderung der Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit wurde zwischen den Gruppen verglichen.

**3.3.1 Variationskoeffizienten verschiedener Parameter in der ersten und letzten Minute des Post-Tests.** Die Mittelwerte der Variationskoeffizienten aller drei Parameter nahmen bei der IG von der ersten Minute zur letzten Minute ab. Eine solche Abnahme konnte man aber auch bei der KG erkennen (Tabelle 7).

Tabelle 7

*Deskriptive Werte zu den Variationskoeffizienten der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit während der ersten und letzten Minute im Post-Test*

Gruppe	Trittfrequenz		Leistung		Geschwindigkeit	
	M	SD	M	SD	M	SD
Implizite Gruppe ( $n = 18$ )						
Post_1	0.013	0.014	0.156	0.059	0.012	0.014
Post_2	0.011	0.004	0.115	0.030	0.009	0.005
Kontrollgruppe ( $n = 15$ )						
Post_1	0.010	0.005	0.123	0.053	0.009	0.005
Post_2	0.007	0.004	0.112	0.046	0.006	0.004

*Anmerkung.*  $M$  = Mittelwert,  $SD$  = Standardabweichung. Post\_1 = erste Minute des Post-Tests, Post\_2 = letzte Minute des Post-Tests.

Es ergab bei keinem Parameter eine signifikante Interaktion zwischen Gruppe (IG-KG) und Messzeitpunkt (erste-letzte Minute des Post-Tests). Bei den Variationskoeffizienten der Leistung wurde ein signifikanter Effekt der Zeit (erste-letzte Minute des Post-Tests) festgestellt (Tabelle 8).

Tabelle 8

*Statistische Auswertungen aus der Mixed-Anova-Gruppe (IG-KG) x Messzeitpunkt (erste Minute-letzte Minute des Post-Tests) – für die Variationskoeffizienten der Leistung, der Trittfrequenz und der Geschwindigkeit*

	Zeitpunkt x Gruppe	<i>p</i> -Wert	$\eta^2$	Messzeit- punkt	<i>p</i> -Wert	$\eta^2$	Gruppe	<i>p</i> -Wert	$\eta^2$
COV_Cadence	$F_{1,31}$ < 0.001	0.989	< 0.001	$F_{1,31} =$ 1.906	0.117	0.058	$F_{1,31} =$ 2.118	0.156	0.064
COV_Power	$F_{1,31} =$ 2.868	0.100	0.100	$F_{1,31} =$ 8.302	<b>0.007</b>	0.211	$F_{1,31} =$ 1.435	0.240	0.044
COV_Speed	$F_{1,31}$ <0.001	0.990	< 0.001	$F_{1,31} =$ 2.087	0.159	0.063	$F_{1,31} =$ 1.721	0.199	0.053

*Anmerkung.* Die Ausgangslagen der Variationskoeffizienten waren in der ersten Minute zwischen den zwei Gruppen bei allen drei Parametern vergleichbar (exakter Mann-Whitney-U-Test: Leistung:  $U = 89.00$ ,  $Z = -1.663$ ,  $p = 0.100$ , Trittfrequenz:  $U = 113.00$ ,  $Z = -0.795$ ,  $p = 0.437$ , Geschwindigkeit:  $U = 123.00$ ,  $Z = 0.434$ ,  $p = 0.682$ ). COV\_Cadence = Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, COV\_Power = Variationskoeffizienten der Leistung, COV\_Speed = Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit. Fett hervorgehoben ist ein signifikanter *p*-Wert ( $p < 0.05$ ).

**3.3.2 Hypothesenüberprüfung zu e).** Mit der Unterfragestellung e) wurde untersucht, ob innerhalb des Post-Tests ein Wash-Out-Effekt erkennbar ist. Weder  $H_{10}$  noch  $H_{11}$  können abschliessend bestätigt oder widerlegt werden. Auch wenn aus den statistischen Tests keine signifikanten Werte resultierten und bei beiden Gruppen eine ähnliche Tendenz festgestellt werden konnte, kann die deutlich grösser ausgefallene Verkleinerung der Variationskoeffizienten der IG im Verlauf des Post-Tests auf einen Wash-Out-Effekt hindeuten.

### 3.4 Hypothesenüberprüfung der konkreten Fragestellung

Die Frage, ob bei zyklischen Bewegungen unter impliziten Lernbedingungen ein kurzfristiger Lernprozess stattfindet, diente als Ausgangslage für diese Arbeit.

$H_1$ , welche besagt, dass bei zyklischen Bewegungen unter impliziten Lernbedingungen ein kurzfristiger Lernprozess resultiert, kann mit Vorbehalt bestätigt werden. Auch wenn nicht in allen untersuchten Parametern eine signifikante Veränderung stattfand, sind die Tendenzen der Variationskoeffizienten und der Ist-Soll-Werte genügend aufschlussreich, um von einem kurzfristigen Lernprozess zu sprechen.  $H_0$  kann somit verworfen werden.

## 4 Diskussion

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, implizite Lernprozesse bei zyklischen Bewegungen zu untersuchen. In der Diskussion wird die konkrete Fragestellung mit Hilfe der Beantwortung der aufgestellten Unterfragestellungen beantwortet und diskutiert. Ergebnisse werden interpretiert und mit der vorhandenen Studienlage verglichen. Ausserdem werden Stärken und Schwächen der Studie aufgezeigt, Aspekte des Studiendesigns hinterfragt, Limitationen der Studie aufgeführt und so Verbesserungsmöglichkeiten für weitere Studien dargelegt. Ein Ausblick zu möglichen weiterführenden Fragestellungen rundet die Diskussion ab und zeigt auf, in welchen Bereichen noch Forschungspotential liegt.

### 4.1 Interpretation der Resultate

Dieser Teil der Arbeit ist wiederum so aufgebaut, dass zuerst die Resultate des Vergleichs des Pre- und Post-Tests, danach die Resultate der Lernphase und zum Schluss jene innerhalb des Post-Tests interpretiert werden.

**4.1.1 Pre-Test - Post-Test.** Bei der IG erhöhten sich die Mittelwerte der Variationskoeffizienten der Parameter Trittfrequenz, Leistung und Geschwindigkeit vom Pre- zum Post-Test, bei der KG war dieser Effekt nur bei der Leistung festzustellen. Die Erhöhung der Variationskoeffizienten bei der IG ist ein Indikator dafür, dass das Widerstandsänderungsmuster während der Lernphase unbewusst gelernt wurde und dies zu einer höheren Variabilität der verschiedenen Variationskoeffizienten im Post-Test führte.

**Trittfrequenz.** Bei den Variationskoeffizienten der Trittfrequenz resultierte kein signifikanter Zeit-Gruppen-Effekt, obschon sich deren Mittelwert bei der IG vom Pre- zum Post-Test knapp verdoppelte und bei der KG beinahe unverändert blieb. Mit  $p = 0.022$  konnte ein signifikanter Gruppeneffekt festgestellt werden. Die IG hatte durchschnittlich eine deutlich höhere Variation in der Trittfrequenz als die KG (Pre- und Post-Test zusammen).

Die Differenz zwischen Ist- und Soll-Werten stieg bei beiden Gruppen vom Pre- zum Post-Test an. Die Trittfrequenz im Allgemeinen erhöhte sich vom Pre- zum Post-Test bei beiden Gruppen deutlich, was die grösseren Differenzwerte erklärt. Die Mediane verdoppelten sich jeweils vom Pre- zum Post-Test bei der IG sowie bei der KG. Diese Beobachtungen aus den deskriptiven Auswertungen konnten statistisch mit einem signifikanten Zeiteffekt ( $p < 0.001$ ) auch

nachgewiesen werden. Einen Zeit-Gruppeneffekt resultierte aber auch hier nicht. Der Anstieg der Differenzwerte bei der IG könnte auf einen Lerneffekt zurückzuführen sein. Da die Erhöhung aber auch bei der KG stattfand, muss diese Annahme verworfen werden. Weshalb beide Gruppen im Post-Test eine höhere Frequenz verzeichneten, kann mit den vorliegenden Daten wissenschaftlich nicht erklärt werden.

**Leistung.** Bei den Variationskoeffizienten der Leistung konnte ein signifikanter Zeit-Gruppeneffekt festgestellt werden ( $p = 0.006$ ). Die Variationskoeffizienten der Leistung der IG erhöhten sich vom Pre- zum Post-Test signifikant ( $p < 0.001$ ). Die Mediane der Differenz der Ist- und Soll-Werte erhöhten sich zwar bei beiden Gruppen, bei der IG fiel die Zunahme aber rund zwanzigmal grösser aus (IG: + 5.33 Watt, KG: + 0.24 Watt). Aus dem grafischen Verlauf der Leistung kann gedeutet werden, dass die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Werten vor allem am Anfang des Post-Tests bei der IG grösser ausfiel als bei der KG. Obwohl bei den Differenzwerten der Leistung keine signifikante Zeit-Gruppen-Interaktion festgestellt werden konnte, weisen die Veränderungen der Variationskoeffizienten der Leistung sowie jene der Differenzwerte auf eine durch die Lernphase ausgelöste Adaptation bei der IG hin.

**Geschwindigkeit.** Zwar deuten auch die deskriptiven Werte zu den Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit mit der Erhöhung bei der IG und einer Verkleinerung der KG vom Pre- zum Post-Test auf einen möglichen kurzfristigen Lerneffekt bei der IG hin, mit der Teststatistik konnte aber keinen signifikanten Zeit-Gruppeneffekt festgestellt werden. Mazzocchio et al. (2006) und Meunier et al. (2007) analysierten in ihren Studien ebenfalls die Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit, um einen Lernprozess zu untersuchen. Sie testeten aber im Pre- und Post-Test auch mit Widerstandsänderungen, wie sie in der Lernphase nur von der Interventionsgruppe geübt wurden. Mit einer Verkleinerung der Variationskoeffizienten vom Pre- zum Post-Test wurde in diesen Studien folglich das Vorhandensein eines Lernprozesses bewiesen. Bei Meunier et al. (2007) wurde kein signifikanter Zeit-Gruppen-Effekt festgestellt, bei Mazzocchio et al. (2006) war die Verbesserung der Interventionsgruppe jedoch hochsignifikant. (Der Lerneffekt bei diesen Gruppen kann aber gut nachvollzogen werden, da nur die Interventionsgruppe in der Testaufgabe üben konnte.) Für die vorliegende Studie können aus den Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit wenig Rückschlüsse gezogen werden.

**4.1.2 Lernphase.** Die Variationskoeffizienten der ersten und letzten vier Minuten der Lernphase wurden zwischen den Gruppen analysiert. Bei allen drei Parametern war jedoch die Ausgangslage signifikant unterschiedlich, was auf das unterschiedliche Testprotokoll zurückzuführen ist (Widerstandsänderungen vs. konstanter Widerstand). Es wurde trotz der unterschiedlichen Ausgangslagen für jeden Parameter eine Varianzanalyse durchgeführt. Nur bei der Geschwindigkeit resultierte ein signifikanter Zeit-Gruppeneffekt ( $p < 0.001$ ). Bei der IG fiel der Durchschnitt der Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit in den letzten vier Minuten signifikant tiefer aus als jener der ersten vier Minuten der Lernphase (Post-hoc-Test:  $p < 0.001$ ). Bei der KG resultierte kein signifikanter Unterschied. Dies lässt darauf schliessen, dass sich die IG durchaus unbewusst an die Widerstandsänderungen anpassen konnte.

Nach Seitz (2001) führen viele Wiederholungen einer Bewegung zu gleichmässigeren Ausführungen. Die grafische Darstellung der Ist- und Soll-Trittfrequenzen während der Lernphase der IG lassen keine deutliche Aussage zu einer allfälligen effizienteren bzw. gleichmässigeren Aufgabenausführung gegen Ende der Lernphase zu. Die Mittelwerte der Differenzen zwischen den Ist- und Soll-Werten verkleinerten sich zwar von den ersten vier Minuten zu den letzten vier Minuten, die Veränderung war aber nicht signifikant. Die Dauer der Lernphase sowie die Differenzwerte aus den Ist- und Soll-Werten der Trittfrequenz korrelieren miteinander ( $p = 0.034$ ). Es handelt sich um einen schwachen negativen Effekt. Die Korrelation lässt vermuten, dass sich die IG im Verlaufe der Lernphase an das Widerstandspattern anpassen und so die Trittfrequenzzahl immer stabiler beim Soll-Wert halten konnte, was auch explizit die Aufgabenformulierung für die Lernphase war. Es kann gefolgert werden, dass die IG die Aufgabenausführung während der Lernphase im Verlaufe der Zeit immer besser ausführen konnte.

Werden die Herzfrequenzdaten in die Auswertungen miteinbezogen, ist auffällig, dass die durchschnittliche Herzfrequenz der IG während der Lernphase signifikant höher war als jene der KG ( $p = 0.019$ ), obwohl die Ausgangslage im Pre-Test durchaus vergleichbar war und kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen vorlag. Ein Grund für die höheren Herzfrequenzwerte ist sicherlich die höhere mittlere Leistung, denn die IG musste während der Lernphase den Faktor 0.25 x Kilogramm Körpergewicht mehr treten als die KG. Trotz der ungleichen Ausgangslage in den ersten vier Minuten der Lernphase wurde eine Varianzanalyse berechnet, woraus aber keine Interaktion der Zeit und der Gruppe resultierte. Die Auswertungen ergaben einen signifikanten Gruppen- ( $p = 0.010$ ) und Zeiteffekt ( $p < 0.001$ ). Dies verdeutlicht, dass die Herzfrequenz während der Lernphase bei beiden Gruppen von den ersten vier zu den

letzten vier Minuten signifikant höher ausfiel und dass die IG, wie bereits erwähnt, durchschnittlich eine höhere Herzfrequenz hatte als die KG.

Um eine allfällige Ökonomisierung festzustellen, wurden die Ist- und Soll-Werte der Leistung analysiert. Grafisch näherten sich die Ist-Werte den Soll-Werten nicht klar an und es kann nicht von einer effizienteren Aufgabenausführung ausgegangen werden. Weder die Herzfrequenz noch die Differenzwerte der Ist- und Soll-Leistung eignen sich demzufolge, eine Ökonomisierung der Leistung festzustellen.

**4.1.3 Post-Test.** Die Variationskoeffizienten der Trittfrequenz, der Leistung und der Geschwindigkeit wurden von der ersten Minute des Post-Tests zur letzten Minute bei beiden Gruppen kleiner. Die Verkleinerung fiel bei der IG höher aus, dennoch konnte keine signifikante Interaktion der Zeit und der Gruppe festgestellt werden. Mit  $p = 0.007$  lag ein signifikanter Zeiteffekt innerhalb der Leistung vor, was bedeutet, dass die Variabilität der Leistung im Verlaufe des Post-Tests gruppenübergreifend signifikant abnahm. Mit diesen Resultaten kann zwar spekuliert werden, dass bei der IG ein Wash-Out-Effekt stattfand, da die KG jedoch auch Verkleinerungen im Variationskoeffizient verzeichnete, kann nicht auf einen eindeutigen Effekt gefolgert werden.

## **4.2 Beantwortung der Fragestellung**

Die Unterfragestellungen (a-e) werden im folgenden Abschnitt nur nochmals aufgegriffen, wenn sie wichtige Informationen für die Beantwortung der konkreten Fragestellungen liefern.

Kann in dieser Studie von einem Lernprozess gesprochen werden? Nach Hannover et al. (2014) wird erst von Lernen gesprochen, wenn es zu einer relativ dauerhaften Veränderung im Wissen oder Verhalten des Individuums kommt. Von dauerhaftem Lernen oder Lernen im «engeren» Sinn kann, aufgrund der Ausgangslage des Studiendesigns in dieser Arbeit, nicht gesprochen werden. Der Lerneffekt wurde nur kurzfristig untersucht. Für die Beantwortung der konkreten Fragestellung der vorliegenden Arbeit lohnt es sich, die Definition der Bewegungsanpassung (engl. motor adaptation) noch differenzierter anzuschauen. Shadmehr und Mussa-Ivaldi (1994, zitiert nach Quattrocchi, 2017) schreiben: «Motor adaptation is a specific form of motor learning which refers to error reduction in response to a novel perturbation. The perturbation can be internal, such as fatigue, or external, such as a force-field» (S. 33). In der Untersuchung dieser Arbeit wurden die Probanden der IG durch die Widerstandsänderungen von aussen dazu gezwungen, ihre Bewegung bzw. den Kraftaufwand alle fünfzehn Sekunden anzupassen.

Adaptives Bewegungsklernen findet täglich statt und erlaubt es uns, bei bereits gelernten und gefestigten Bewegungen schnell auf Umweltveränderungen zu reagieren. Diese Anpassungen treten schnell auf, sind aber instabil und verschwinden rasch wieder (Quattrocchi, 2017).

Einige untersuchte Parameter, wie zum Beispiel die Variationskoeffizienten der Leistung, deuten auf ein kurzfristiges Bewegungsklernen hin. Die Variabilität der Leistung fiel im Post-Test bei der IG signifikant höher aus als im Pre-Test. Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen ist, dass sich die Probanden der IG im Gegensatz zu jenen der KG während der Lernphase unbewusst das Widerstandspattern angeeigneten. Die Differenzwerte der Ist- und Soll-Werte der Leistung erhöhten sich bei beiden Gruppen vom Pre- zum Post-Test. Die Erhöhung bei der IG fiel jedoch deutlich grösser aus als jene der KG, was ebenfalls auf Anpassungen, welche durch die Lernphase hervorgerufen wurden, zurückgeführt werden kann.

Es existieren verschiedene Studien, die motorische Adaptationen bereits untersuchten – unter anderem von Reisman, Wityk, Silver und Bastian (2007), die Untersuchungen mit dem geteilten Laufband machten oder Zych et al. (2019), die auf dem Radergometer Experimente durchführten. Zych et al. (2019) wählten in ihrem Studiendesign statt Widerstandsänderungen räumliche sowie zeitliche Asymmetrien, an welche sich die Probanden anpassen mussten. Bei beiden Studien konnten nur kurzfristige Lerneffekte nachgewiesen werden, wobei Reisman, Wityk, Silver & Bastian (2007) dies auf die kurze Trainingsphase von nur fünfzehn Minuten zurückführte. In Anbetracht dieser Aussage kann angenommen werden, dass auch zwanzig Minuten zu kurz sind, um ein Pattern zu verinnerlichen und dieses danach bei gleichbleibender Leistung (ohne Widerstandsänderungen) aufrechtzuerhalten. Zudem schreibt Zych et al. (2019): «In fact, when the asymmetry is removed the motor plan is optimized for rejecting the perturbation but not for “unperturbed” cycling” (S. 17). Je länger die Lernphase dauerte, desto exakter führten die Probanden die Aufgabe (das Halten der Durchschnittsfrequenz des Pre-Tests) aus. Es kann deshalb angenommen werden, dass sich die IG während der Lernphase immer besser an die Widerstandsänderungen angepasst hatte. Auch die Variabilität der Geschwindigkeit war bei der IG während der letzten vier Minuten der Lernphase signifikant tiefer ausgefallen als während der ersten vier Minuten. Die Daten des Post-Tests dieser Arbeit weisen nicht eindeutig auf einen Wash-Out-Effekt hin. Die Variationskoeffizienten der Leistung der ersten Minute des Post-Test nahmen zur letzten Minute des Post-Tests bei beiden Gruppen ab, die Abnahme fiel aber bei der IG grösser aus. Demnach decken sich die Resultate mit der Aussage von Quattrocchi (2017), dass zwar relativ schnell auf Umwelteinflüsse (hier Widerstandsänderungen) reagiert werden kann, die Adaptation aber auch schnell wieder verschwindet, wenn der Einfluss (Widerstandsänderung) ausbleibt.

Zusammenfassend kann durchaus davon ausgegangen werden, dass unter impliziten Lernbedingungen auch bei zyklischen Bewegungen ein kurzfristiger Lerneffekt resultiert. Auch wenn viele Parameter auf motorische Anpassungen hinweisen, sind nicht alle Resultate der vorliegenden Arbeit eindeutig ausgefallen, weshalb im folgenden Abschnitt die Studie kritisch betrachtet wird.

### **4.3 Kritische Betrachtung der Studie**

Stärken und Schwächen der Studie werden in diesem Kapitel diskutiert und mögliche Folgen beschrieben.

**4.3.1 Stärken.** Die Probanden befanden sich alle in einem ähnlichen Altersrange, studieren oder studierten Sportwissenschaften und hatten vor der Testdurchführung keinerlei Informationen zum Testablauf. Das Untersuchen einer KG erlaubte es uns, einen allfälligen Lerneffekt lediglich auf die Lernphase zurückzuführen. Die Objektivität der Testdurchführung war gegeben, da die Tests durchgehend von den zwei gleichen Personen angeleitet wurden, sie immer im selben Labor stattfanden und mit den gleichen Messgeräten gemessen wurde. Die Informationen zur Testdurchführung wurden standardisiert gegeben. Die Ergebnisse aus den Messgeräten waren unabhängig von der Person, die die Messgeräte bediente.

Wulf, Shea und Lewthwaite (2010) fassten in ihrem Review Literatur zu vier Faktoren zusammen, die den motorischen Lernprozess beeinflussen. Der Aufmerksamkeitsfokus stellt einen dieser Faktoren dar. Dazu schreiben sie, dass ein externer Aufmerksamkeitsfokus den Lernprozess beschleunigen oder die ersten Stufen des Lernens verkürzen kann. Unbewusste oder automatische Prozesse werden durch einen externen Fokus gefördert. In der vorliegenden Arbeit war die Aufmerksamkeit während der Lernphase bei beiden Gruppen stets extern auf die präzise «Trittfrequenzerhaltung» gelenkt. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch dieses Untersuchungsdesign eine innere Fokussierung der Probanden auf ihre eigene Bewegung, die häufig eine bewusstere Steuerung zur Folge hat, grösstenteils umgangen werden konnte (Wulf et al., 2010).

Zudem berichten Mazur (2006), Kleynen et al. (2015) und Bednorz & Schuster (2002), dass implizites Lernen grösstenteils mittels Anpassungen an die Umgebung stattfindet. Im Studiendesign kann das Anpassen an die Widerstandsänderungen als solches Phänomen betrachtet werden.

**4.3.2 Schwächen.** Betreffend Probanden und deren Auswahl gibt es in der vorliegenden Studie einige Schwachpunkte. Wie und ob überhaupt motorisches Lernen stattfindet, hängt von persönlichen Faktoren des Lernenden ab – so auch von der Motivation, von der momentanen psychischen Verfassung, von der Aufmerksamkeits- und Konzentrationsfähigkeit sowie von den Bewegungserfahrungen (Weineck, 2010). Es ist möglich, dass vor allem die Motivation sowie die Aufmerksamkeits- und Konzentrationsfähigkeit der Probanden das Ausführen der Lernaufgabe beeinflusste und so der Lerneffekt im Post-Test mit diesen unterschiedlich präzisen Aufgabenausführungen zusammenhängt.

Bei der Rekrutierung der Probanden wurde das Fitnesslevel betreffend Ausdauerfähigkeit nicht berücksichtigt. Auch die spezifische Fitness auf dem Rad diente nicht als Kriterium für die Probandensuche. Dies hatte zur Folge, dass einige Probanden in ihrer Freizeit aktiv den Rennrad- bzw. Mountainbikesport ausüben, andere jedoch kaum einmal auf dem Rad sitzen. In der Studie wurde zudem keine Randomisierung bei der Gruppeneinteilung vorgenommen. Die Zugehörigkeit zu einer Gruppe wurde durch den Zeitpunkt der Messung definiert. Man hätte die Studierenden entweder nach dem Zufallskriterium oder aber nach der Leistung in einem Vortest bzw. nach Gewöhnung einteilen können. Meunier et al. (2007) zeigen in ihrer Studie auf, dass das Fitnesslevel die trainingsinduzierten Veränderungen, demnach auch den Lernprozess, signifikant beeinflusste: wenig trainierte Probanden verbesserten sich stärker und passten sich demnach mehr an den Trainingsreiz an, als gut trainierte. Im Weiteren war die Durchschnittleistung pro Kilogramm Körpergewicht bei der IG und der KG während der Lernphase nicht gleich hoch. Man hätte, wie dies Meunier et al. (2007) machten, die Durchschnittleistung pro Kilogramm Körpergewicht des Lernpatterns ausrechnen und diesen Durchschnitt für die KG verwenden sollen, um von beiden Gruppen eine vergleichbare physische Aktivität zu erfordern. Somit hätte sich lediglich das Niveau des «Skill-Erwerbs» unterschieden.

#### **4.4 Ausblick**

Die vorliegende Arbeit bietet durchaus Gründe, weshalb die Forschung im Bereich des impliziten Lernens bei zyklischen Bewegungen weitergeführt werden sollte. Es ist nicht abschliessend geklärt, wie implizites Lernen bei Bewegungen funktioniert, die weniger oder gar nicht mittels des M1 gesteuert werden.

Die Resultate der vorliegenden Arbeit könnten in einem ersten Schritt mit jenen der Arbeit, welche die expliziten Vorgänge bei gleichem Studiendesign untersuchte, gegenübergestellt werden. Auf diese Weise könnten Aussagen über allfällige Vorteile von implizitem bzw.

explizitem Lernen bei zyklischen Bewegungen herausgearbeitet und mit der vorhandenen Literatur verglichen werden.

Einerseits wäre es ausserdem spannend, kurzfristige Lernprozesse bei zyklischen Bewegungen noch genauer zu untersuchen, um eindeutigere Ergebnisse zu erhalten und darauf aufbauend der Frage der neuronalen Kontrolle bzw. der neuronalen Vorgänge bei Lernprozessen während zyklischer Bewegungen nachzugehen. Andererseits wäre es auch interessant zu erforschen, wie und ob überhaupt bei einer solchen oder ähnlich angelegten Untersuchung das Lernen längerfristig stattfindet. Helm & Reisman (2015) schreiben, dass das motorische Lernen über eine längere Zeit geschehen muss und dass das Lernen von «Offline-learning-Phasen» und Konsolidierung beeinflusst wird.

Des Weiteren könnten die EMG-Daten ausgewertet und analysiert werden. Um zu klären, ob überhaupt und inwiefern der Körper in der Lage ist, die Leistung über die Zeit zu ökonomisieren, könnten in einer zukünftigen Arbeit VO<sub>2</sub>max-Messungen durchgeführt werden.

## **5 Schlussfolgerung**

### **5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse**

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war es, zu untersuchen, inwiefern bei zyklischen Bewegungen ein impliziter Lernprozess hervorgerufen werden kann. Zur Überprüfung der konkreten Fragestellung wurden 33 Sportstudierende der Universität Fribourg und der EHSM in zwei Gruppen eingeteilt, in eine IG und eine KG.

Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Einige der analysierten Parameter veränderten sich vom Pre- zum Post-Test so, dass angenommen werden kann, dass die Lernphase ein unbewusstes kurzfristiges Bewegungslernen bzw. Anpassen hervorrief. Die Variationskoeffizienten sowie die Ist-Soll-Differenzwerte der Leistung deuten am klarsten auf solch einen Prozess hin. Während der Lernphase passte sich die IG an die Widerstandsänderungen an. Die Trittfrequenz konnte über die Zeit stabiler gehalten werden und die Variabilität in der Geschwindigkeit nahm von den ersten vier Minuten zu den letzten vier Minuten ab. Die Probanden passten sich folglich klar an die Lernaufgabe an, konnten das Gelernte aber nur minim auf die Post-Test-Bedingung übertragen. Das Widerstandsänderungsmuster wurde im Post-Test nicht wiedererkannt.

### **5.2 Konsequenzen der wichtigsten Erkenntnisse**

Der minime Transfer der Anpassung während der Lernphase deutet darauf hin, dass motorische Adaptationen von externen Reizen gut induziert werden können, ein Transfer auf eine andere Aufgabenbedingung aber mehr Effort von den Lernenden, mehr Zeit oder eine andere, eventuell repetitive Aufgabenstellung benötigt. Diese Erkenntnisse lassen darauf schliessen, dass die Pre-Post-Vergleiche bei einem angepassten Studiendesign möglicherweise eindeutiger ausfallen würden. Um implizites motorisches Lernen bei zyklischen Bewegungen deutlicher hervorzurufen bzw. nachzuweisen sind weitere Untersuchungen notwendig.

## Literatur

- Arnold-Berkovits, I., Hancock, G. & Nevitt, J. (2000). Bootstrap resampling approaches for repeated measure designs: Relative robustness to sphericity and normality violations. *Educational and psychological measurement*, 60(6), 877-892. doi: 10.1177/00131640021970961
- Bednorz, P. & Schuster, M. (2002). *Einführung in die Lernpsychologie*. München: Ernst Reinhardt.
- Bock, O. (2001). Mechanismen der sensomotorischen Adaptation beim Menschen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52(12), 338-342.
- Brunner, R. & Zeltner, W. (1980). *Lexikon zur Pädagogischen Psychologie und Schulpädagogik*. München: Ernst Reinhard.
- Buchegger, R. (2008). *Bewegungsstruktur und Energetik im Radsport* (Dissertation, Universität Wien, Wien, Österreich). Zugriff unter <http://othes.univie.ac.at/2671/>
- Caggiano, V., Leiras, R., Goni-Erro, H., Masini, D., Bellardita, C., Bouvier, J., ... Kiehn, O. (2018). Midbrain circuits that set locomotor speed and gait selection. *Nature*, 553(7689), 455-460. doi: 10.1038/nature25448540 2018.
- Dharani, K. (2015). *The biology of thought: A neuronal mechanism in the generation of thought - A new molecular model*. doi: 10.1016/b978-0-12-800900-0.00003-8
- Dietz, V. (2002). Proprioception and locomotor disorders. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(10), 781-790. doi: 10.1038/nrn939
- Foerde, K. (2010). Implicit learning and memory: Psychological and neural aspects. In G. F. Koob, M. Le Moal & R. F. Thompson (Hrsg.), *Encyclopedia of behavioral neuroscience* (S. 84–93). doi: 10.1016/B978-0-08-045396-5.00139-1

- Geraedts, P. (2020). *Motorische Entwicklung und Steuerung. Eine Einführung für Physiotherapeuten, Ergotherapeuten und Trainer*. doi: 10.1007/978-3-662-58296-1
- Graf, C. & LaRosee, K. (2014). Ausgewählte Aspekte der sportärztlichen Untersuchung. *Der Kardiologe*, 8(3), 253-264. doi:10.1007/s12181-013-0552-x
- Hannover, B., Zander, L. & Wolter, I. (2014). Entwicklung, Sozialisation und Lernen. In T. Seidel & A. Krapp (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 139-164). Weinheim: Beltz.
- Hallett, M. (o.d.). The role of the motor cortex in motor learning. In M. L. Latash & F. Lestienne (Hrsg.) *Motor control and learning* (S. 89-95). doi: 10.1007/0-387-28287-4\_8
- Hegele, M. (2020). Motorisches Lernen. In J. Munzert, M. Raab & B. Strauss (Hrsg.), *Sportpsychologie - Ein Lehrbuch* (S. 80-108). Stuttgart: Kohlhammer.
- Helm, E. E. & Reisman, D. S. (2015). The Split-belt walking paradigm: Exploring motor learning and spatiotemporal asymmetry post-stroke. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 26(4), 703-713. doi: 10.1016/j.pmr.2015.06.010
- Jäncke, L. (2013). *Lehrbuch Kognitive Neurowissenschaften* (1. Auflage). Bern: Hans Huber.
- Kal, E., Prosée, R., Winters, M. & van der Kamp, J. (2018). Does implicit motor learning lead to greater automatization of motor skills compared to explicit motor learning? A systematic review. *PLoS One*, 13(9), e0203591. doi:10.1371/journal.pone.0203591
- Kantak, S. S., Mummidisetty, C. K. & Stinear, J. W. (2012). Primary motor and premotor cortex in implicit sequence learning – evidence for competition between implicit and explicit human motor memory systems. *The European journal of neuroscience*, 36(5), 2710-2715. doi: 10.1111/j.1460-9568.2012.08175.x
- Kleynen, M., Braun, S. M., Bleijlevens, M. H., Lexis, M. A., Rasquin, S. M., Halfens, J., ... Masters, R. S. W. (2014). Using a Delphi technique to seek consensus regarding definitions, descriptions and classification of terms related to implicit and explicit forms of motor learning. *PLoS One*, 26(9), e100227. doi: 10.1371/journal.pone.0100227

- Kleynen, M., Braun, S. M., Rasquin, S. M. C., Bleijlevens, M. H. C., Lexis, M. A. S., Halfens, J., ... Beurskens, A. J. (2015). Multidisciplinary views on applying explicit and implicit motor learning in practice: an international survey. *PLoS One*, 10(8), e0135522. doi: 10.1371/journal.pone.0135522
- Konczak, J. (2006). Motorisches Lernen. In H. P. Their & H. O. Karnath (Hrsg.), *Neuropsychologie* (2. Auflage, S. 625-631). doi: 10.1007/3-540-28449-4\_61
- Krakauer J. W. (2009). Motor learning and consolidation: the case of visuomotor rotation. *Advances in experimental medicine and biology*, 629, 405-421. doi: 10.1007/978-0-387-77064-2\_21
- Lapczynya, E., Engeln, L., Krzywinski, J. & Groh, R. (2018). Multimodale Unterstützungssysteme für Leistungssport im taktilen Internet. In R. Dachzelt & G. Weber (Hrsg.), *Mensch und Computer 2018 – Workshopband* (S.161-167). doi: 10.18420/muc2018-ws05-0493
- Lenzen D. (1989). *Pädagogische Grundbegriffe 2: Jugend-Zeugnis*. Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt.
- Lopes, M. C. (2011). *Wirksamkeit von impliziten und expliziten Lernprozessen* (Dissertation, Universität Heidelberg, Heidelberg, Deutschland). Zugriff unter [http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/12026/1/Doktorarbeit\\_VersionIII\\_endgueltige.pdf](http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/12026/1/Doktorarbeit_VersionIII_endgueltige.pdf)
- Masters, R. S., Poolton, J. M., & Maxwell, J. P. (2008). Stable implicit motor processes despite aerobic locomotor fatigue. *Consciousness and cognition*, 17(1), 335–338. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.03.009>
- Maxwell, J. P., Masters, R. S. W., Kerr, E., & Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *The quarterly journal of experimental psychology section A*, 54(4), 1049-1068. doi:10.1080/713756014

- Mazzocchio, R., Kitago, T., Liuzzi, G., Wolpaw, J. R. & Cohen, L. (2006). Plastic changes in the human H-reflex pathway at rest following skillful cycling training. *Clinical Neurophysiology*, 117(8), 1682-1691. doi: 10.1016/j.clinph.2006.04.019
- Mazur, J. E. (2006). *Lernen und Verhalten* (6. Auflage). München: Pearson Studium.
- Meunier, S., Kwon, J., Russmann, H., Ravindran, S., Mazzocchio, R. & Cohen, L. (2007). Spinal use dependant plasticity of synaptic transmission after a single cycling session. *The journal of physiology*, 579(2), 375-388. doi: 10.1113/jphysiol.2006.122911
- Meinel, K. & Schnabel G. (2007). *Bewegungslehre Sportmotorik: Abriss einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt* (11. Auflage). Aachen: Meyer & Meyer.
- Odendahl, S. L. (2016). *Frühe Transferleistungen im motorischen System - Eine Studie zur Untersuchung des Dialogs zwischen beiden Händen* (Dissertation, Christian-Albrecht-Universität, Kiel, Deutschland). Zugriff unter [https://macau.unikiel.de/receive/diss\\_mods\\_00021711](https://macau.unikiel.de/receive/diss_mods_00021711)
- Orrell, A. J., Eves, F. F. & Masters, R. S. W. (2006). Implicit motor learning of a balancing task. *Gait & Posture*, 23(1), 9-16. doi: 10.1016/j.gaitpost.2004.11.010
- Poolton, J. M., Masters, R. S. W. & Maxwell, J. P. (2005). The relationship between initial errorless learning conditions and subsequent performance. *Human movement sciences*, 24(3), 362-378. doi: 10.1016/j.humov.2005.06.006
- Poolton, J. M., Masters, R. S. W. & Maxwell, J. P. (2007). Passing thoughts on the evolutionary stability of implicit motor behaviour: Performance retention under physiological fatigue. *Consciousness and cognition*, 16(2), 456-468. doi: 10.1016/j.concog.2006.06.008
- Press, D. Z., Casement, M. D., Pascual-Leone, A. & Robertson, E. M. (2005). The time course of offline motor sequence learning. *Cognitive brain research*, 25(1), 375-378. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2005.05.010

- Quattrocchi, G. (2017). *Role of reward and punishment in motor learning in health and after stroke* (Dissertation, UCL Queen Square Institute of Neurology, Grossbritannien). Zugriff unter [https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10044239/1/PhD\\_Thesis\\_GQ\\_Feb\\_2018.pdf](https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10044239/1/PhD_Thesis_GQ_Feb_2018.pdf)
- Robertson, E. & Takács, Á. (2018). Motor sequence learning. *Scholarpedia*, 13(5), 12319. doi:10.4249/scholarpedia.12319
- Reisman, D.S., Wityk, R., Silver, K. & Bastian, A.J. (2007). Locomotor adaptation on a split-belt treadmill can improve walking symmetry post-stroke. *Brain*, 130(7), 1861-1872. doi:10.1093/brain/awm035
- Saijo, N., & Gomi, H. (2010). Multiple motor learning strategies in visuomotor rotation. *PloS One*, 5(2), e9399. doi: 10.1371/journal.pone.0009399
- Seitz, R. J. (2001). Motorisches Lernen: Untersuchungen mit der funktionellen Bildgebung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52(12), 343-349.
- Shanks, D. & Channon, S. (2002). Effects of a secondary task on “implicit” sequence learning: learning or performance? *Psychological research*, 66(2), 99-109. doi:10.1007/s00426-001-0081-2
- SRM GmbH. (2017). *Manual SRM – High Performance Ergometer*. Jülich: SRM GmbH.
- Sturm, P. (2019). *Die Modulation motorischer Lernprozesse beim Menschen durch transkranielle Gleichstromstimulation (tDCS) des primären motorischen Kortex* (Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Deutschland). Zugriff unter [https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-51979/Promotion\\_1.16\\_finalisiert.pdf](https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-51979/Promotion_1.16_finalisiert.pdf)
- Weineck, J. (2010). *Optimales Training* (16. Auflage). Balingen: Spitta.
- Witte, K. (2018). *Grundlagen der Sportmotorik im Bachelorstudium (Band 1)*. doi: 10.1007/978-3-662-57868-1\_6

- Wulf, G., Shea, C., & Lewthwaite, R. (2010). Motor skill learning and performance: a review of influential factors. *Medical education*, 44(1), 75-84. doi: 10.1111/j.1365-2923.2009.03421.x
- Zehr, P. E. (2005). Neural Control of Rhythmic Human Movement: The Common Core Hypothesis. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 33(1), 54-60.
- Zhu, F., Poolton, J., & Masters, R. (2014). Neuroscientific aspects of implicit motor learning in sport. In A. Gollhofer, W. Taube, & J. B. Nielsen (Hrsg.), *Routledge handbook of motor control and motor learning* (S. 155–174). Routledge: Taylor & Francis Group.
- Young, M. E. & Wasserman, E. A. (2005). Theories of learning. In K. Lamberts & R. Goldstone (Hrsg.), *The handbook of cognition* (S. 161-182). doi: 10.4135/9781848608177.n6

## **Dank**

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen, die mich in irgendeiner Weise während des Prozesses der Erarbeitung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Einen herzlichen Dank geht an meinen Betreuer, Dr. Benedikt Lauber, der mich vor allem bei den Vorbereitungen der Messungen unterstützt hat. Zudem geht ein grosser Dank an meinen Mitstudenten, Rolf Schlumpf, der bei allen Messungen anwesend war und mit mir den Rahmen der Arbeit erarbeitete. Das gegenseitige Motivieren, Ermuntern und Unterstützen schätzte ich während der ganzen Arbeit sehr. Mein besonderer Dank gilt ausserdem allen Probanden, die sich Zeit genommen haben, bei unseren Messungen mitzumachen. Obwohl die Aufgabe auf dem Radergometer nicht sehr interessant war, haben sie diese mit bester Disziplin durchgeführt.