

Ermüdung im Radsport: Der Kopf will, aber die Beine können nicht. – Oder umgekehrt?!?

L. Borkowsky¹, J.-P. Brückner^{1,*}, S. Kratzenstein^{1,2}

¹ Institut für Sportwissenschaft, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, ² CAU Motion Lab, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Für das Erreichen von Höchstleistungen im Ausdauersport ist es wichtig zu verstehen, welche Faktoren für den Abbruch einer Ausdauerbelastung verantwortlich sind. Bestehende Studien stellen hier Erklärungsansätze peripherer und zentraler Ermüdung gegenüber (Staiano et al., 2018, S. 23). Aus dieser Diskussion heraus wird in Anlehnung an die Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) in dieser Arbeit die Fragestellung untersucht, ob das Gehirn oder die ermüdete Muskulatur den leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt. Dafür wurde vor und direkt nach einem bis zur Erschöpfung andauernden Dauerbelastungstest (TTE Test) ein Sprinttest (MVCP Test) über fünf Sekunden von neun männlichen Radsportlern und Triathleten durchgeführt. Während der gesamten Untersuchung wurde das Anstrengungsempfinden mit der Borg-RPE-Skala erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass es eine signifikante Leistungsabnahme zwischen dem ersten und dem zweiten MVCP Test gibt ($t(8) = 9.64, p < .001$). Trotz der signifikanten Leistungsabnahme zwischen den beiden Sprinttests konnte eine signifikante Leistungszunahme zwischen dem TTE Test und dem direkt im Anschluss durchgeführten zweiten MVCP Test festgestellt werden ($t(8) = -6.72, p < .001$). Die Ergebnisse zeigen außerdem eine signifikante Korrelation zwischen dem Anstrengungsempfinden und der Dauer des TTE Tests ($r_{\text{Spearman}} = .97, p < .001$). Die signifikante Leistungssteigerung nach dem Erreichen des Zustands der Erschöpfung und das steigende Anstrengungsempfinden im Verlauf des TTE Tests widersprechen der These, dass die ermüdete Muskulatur den leistungsbegrenzenden Faktor darstellt. Es wird demnach angenommen, dass das Gehirn den leistungsbegrenzenden Faktor repräsentiert und für die Regulation der Leistung verantwortlich ist.

Schlagwörter: Ermüdung, Ausdauer, Radsport, leistungsbegrenzende Faktoren, Gehirn

Einleitung

Die Fähigkeit eine hoch intensive aerobe Belastung auszuhalten, ist ein leistungsbegrenzender Faktor im Ausdauersport (Staiano, Bosio, De Morree, Rampinini & Marcora, 2018, S. 1). Diese Belastungen münden in einen Zustand der Erschöpfung und führen zum Abbruch der Leistung. Ausdauersportler müssen dementsprechend Strategien entwickeln, diesem Gefühl der vollständigen Erschöpfung, der zum Abbruch einer Belastung auffordert, zu widerstehen (Weineck, 2010, S. 229). Für ein systematisches Training dieser Fähigkeit wird ein ausreichendes Verständnis der Herkunft und Wirkungsweise dieses Ermüdungszustandes benötigt.

Zahlreiche Studien dokumentieren bereits die weitreichende Diskussion dieser Problematik (z. B. Hepple, 2002; Noakes, 1997, 2007, 2011; Noakes, St. Clair Gibson & Lambert, 2004, 2005; Marcora & Bosio, 2007;

Amann & Dempsey, 2009; Marcora & Staiano, 2010; Pageaux, Lepers & Marcora, 2013; Staiano et al., 2018). Lange Zeit galt die Theorie der peripheren Ermüdung als zentraler Erklärungsansatz. Danach wird die Belastung abgebrochen, weil die ermüdete Muskulatur nicht mehr in der Lage ist, die geforderte Energie bereitzustellen (Hepple, 2002, S. 56). Diese Annahme wurde von dem „Central Governor Model“ abgelöst, das eine unbewusste Steuereinheit des Gehirns, den Central Governor, als leistungsbegrenzenden Faktor betrachtet (Noakes, 2007, 2011; Noakes et al., 2004, 2005). Auch dieser Theorie wurden wiederum alternative Erklärungen zur Seite gestellt. So gilt im psychobiologischen Modell die bewusste Selbstregulierung als leistungsbegrenzender Faktor einer Ausdauerbelastung (Marcora & Staiano, 2010; Pageaux, Lepers & Marcora, 2013, Staiano et al., 2018), insbesondere Aspekte der Motivation und der Volition. Die äußere und die innere Motivation werden bewusst wahrgenommen

und bei der Entscheidung eine Leistung abzubrechen, berücksichtigt. Daraus ergibt sich, dass von den AthletInnen¹ selbst eine willentliche Entscheidung getroffen wird. Gleichzeitig werden Ermüdungserscheinungen durch das vermehrte Anstrengungsempfinden bewusst wahrgenommen und in die Belastungsregulation einbezogen (Marcora, 2010, S. 455). Nach dem psychobiologischen Modell wäre dem mentalen Training (Gabler, Nitsch & Singer, 2000, S. 34f.) eine zentrale Rolle in der Vorbereitung auf jeden Wettkampf zuzuschreiben, um diese psychischen Regulationsprozesse zu optimieren.

Bisher haben allerdings erst wenige Untersuchungen das psychobiologische Modell empirisch geprüft (Marcora, 2010; Staiano, et al., 2018). Daher erscheint es notwendig, weitere Untersuchungen durchzuführen, welche die bisherigen Ergebnisse überprüfen und ergänzen können, so dass dadurch Ableitungen für die Trainingspraxis zukünftig auf einer breiter abgesicherten Basis erfolgen können. Im Sinne einer solchen weiteren Überprüfung des psychobiologischen Modells ist es das Ziel dieser Studie, die Frage erneut zu prüfen, ob das Gehirn bzw. die Psyche oder die periphere Ermüdung der Muskulatur den entscheidenden, leistungsbegrenzenden Faktor bei einer Ausdauerbelastung darstellt. Hierfür wird eine Untersuchung auf dem Fahrradergometer durchgeführt, bei der in Anlehnung an Staiano et al. (2018) das Anstrengungsempfinden während einer Dauerbelastung und die noch mögliche Leistung im Zustand der Erschöpfung ermittelt werden. Die theoretischen Grundlagen werden im folgenden Kapitel diskutiert.

Modelle zu limitierenden Faktoren der Ausdauer

Die Ausdauerleistungsfähigkeit im Sport beschreibt die Fähigkeit, eine gegebene Belastung über einen möglichst langen Zeitraum aushalten und einer eingetretenen Ermüdung widerstehen zu können (Beyer, 1987, S. 78). Die Ausdauer ist demnach die psychophysische Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung. Ermüdung führt dazu, dass sowohl die physi-

sche als auch die psychische Leistungsfähigkeit nachlassen kann. Wenn Belastungen im ermüdeten Zustand weiter ausgeführt werden sollen, erfordert dies einen Mehraufwand zur Mobilisation von Energien oder eine geringere Intensität der Belastung (Brockhaus, 2007, S. 143).

Modell der peripheren Ermüdung

Der Zustand beim ermüdungsbedingten Abbruch einer Ausdauerbelastung wird als Erschöpfung bezeichnet. Nach dem Modell der muskulären oder peripheren Ermüdung tritt die Erschöpfung ein, sobald die Muskulatur nicht mehr in der Lage ist, die für die Belastung vorausgesetzte Energie bereitzustellen (Hepple, 2002, S. 56). Dieses Modell betrachtet den Abbruch einer Belastung ausschließlich aus der physiologischen Perspektive. Es sagt voraus, dass die Homöostase, das Gleichgewicht der physiologischen Prozesse, in der beanspruchten Muskulatur während der Erschöpfung gestört ist und damit die Ausdauerbelastung begrenzt (Noakes, 2007, S. 374). Einerseits gilt das Modell der peripheren Ermüdung als etabliertes Modell, andererseits widersprechen Studien diesem Modell (Staiano et al., 2018, S. 2).

Marcora und Bosio (2007, S. 662) haben in ihrer Studie zur belastungsbedingten Muskelschädigung festgestellt, dass Muskelermüdung, die durch sportliche Belastung hervorgerufen wird, Auswirkungen auf eine Ausdauerbelastung hat. In der Studie wurden die Testpersonen in zwei Gruppen eingeteilt. Während die eine Gruppe vor dem 30-minütigen Lauf auf dem Laufband 100 Sprünge von einer 35 cm hohen Bank absolvierte, wurde die Kontrollgruppe keiner Vorbelastung ausgesetzt. Zum einen wurden signifikante Veränderungen bezüglich Muskelkater, Kreatinkinase und der Kniestreckkraft verzeichnet. Zum anderen war das Anstrengungsempfinden höher und die Leistung nahm im Vergleich zu der Kontrollgruppe ab. Auch wenn im Konkreten nicht der Zustand der Erschöpfung untersucht wurde, war bereits zu erkennen, dass es ein Zusammenspiel zwischen der muskulären Schwäche, dem erhöhtem Anstrengungsempfinden und einer Leis-

¹ In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit, dort wo alle Geschlechter (m/w/d) gemeint sind, das Binnen-I verwendet.

tungsregression gibt. Daraus konnte geschlussfolgert werden, dass das Gehirn das Belastungsempfinden beeinflusst und dass die Betrachtung der physiologischen Aspekte erweitert werden muss.

Central Governor Model (CGM)

Noakes (2007) stellt die Limitierungen des Modells zur peripheren Ermüdung heraus und weist auf Widersprüche zu bestehenden empirischen Erkenntnissen hin. Er kritisiert, dass vor allem die psychologischen Aspekte nicht berücksichtigt werden und die Muskulatur als alleiniger leistungslimitierender Faktor berücksichtigt wird. Der Marathonwettkampf hingegen liefert Hinweise, dass die LäuferInnen die Leistung aufgrund von Umweltbedingungen und Schwierigkeiten des Rennens teleoantizipatorisch festlegen und die Fähigkeit besitzen, die Leistung zum Ende zu erhöhen. Daraus schlussfolgert Noakes (2007, S. 374), dass die Leistung nicht ausschließlich von physiologischen Aspekten abhängig sein kann. Außerdem spricht dagegen, dass das Anstrengungsempfinden bei jeglicher Belastung zum Zeitpunkt der Erschöpfung maximal ist (Noakes, 2004, 2007, 2008). Dieser Aspekt lässt sich mit dem peripheren Ermüdungsmodell nicht erklären, so dass es nach Noakes (2007, S. 375) erweitert werden muss.

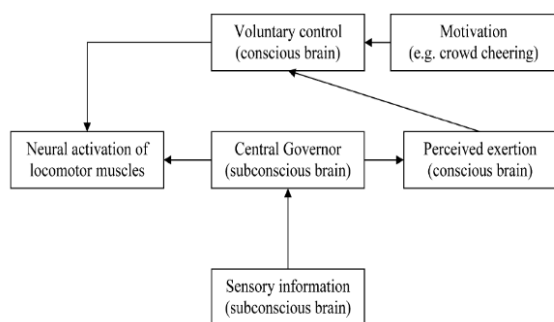


Abbildung 1. Central Governor Model nach Noakes (Marcora, 2008, S. 930).

Hill, Long und Lupton (1924) beschrieben, dass es eine Steuereinheit in unseren Körpern gibt, welche bei einer Sauerstoffunterversorgung reagiert. Diese Annahme und ähnliche Überlegungen von Ulmer (1996) wurden von Noakes aufgegriffen, in zahlreichen Arbeiten erweitert und schließlich das Central Governor Model (CGM) entwickelt (z.B. Noakes, 1997, 2007, 2011; Noakes et al. 2004, 2005). Dieses Modell besagt,

dass die menschliche Leistung durch eine zentrale, unbewusste Einheit im Gehirn gesteuert wird. Diese Einheit reagiert auf die arbeitende Muskulatur und schafft ein neuronales Kontrollsystem, um die Homöostase während der Belastung in allen physiologischen Systemen aufrechtzuerhalten (Noakes, 2007, S. 375). Die Kernannahme des CGM ist damit, dass das Gehirn den Abbruch einer Ausdauerbelastung steuert (Noakes et al., 2004, 2005; Noakes, 2007). Dazu erhält der Central Governor Informationen aus der Peripherie (s. Abb. 1) und steuert dadurch das Anstrengungsempfinden sowie die Aktivität der Muskulatur. Der bewusste Teil des Gehirns hat ebenfalls einen Einfluss auf die Aktivität der Muskulatur und wird wiederum durch das Anstrengungsempfinden, also den Central Governor und die Motivation beeinflusst.

Crewe, Tucker und Noakes (2008, S. 569) untersuchten, dass über die Zunahme des Anstrengungsempfindens die Dauer einer Belastung bis zur Erschöpfung vorhergesagt werden kann. Der lineare Zusammenhang zwischen der Testdauer und dem zunehmenden Anstrengungsempfinden bestätigt diese Hypothese. Die Autoren interpretieren die Befunde in der Form, dass das Anstrengungsempfinden durch den Central Governor gesteuert wird (s. Abb. 1). Durch die sensorischen Informationen entscheidet das unbewusste Steuerungssystem antizipatorisch, wie lange der Körper in der Lage ist, die Belastung durchzuhalten, ohne die Homöostase zu gefährden. Ein hohes Anstrengungsempfinden dient der Regulierung des bewussten Systems, damit es sich beispielsweise nicht durch jubelnde Menschenmassen zu stark motivieren lässt und die vom unbewussten System antizipierte Strategie überschreitet (St. Clair Gibson & Noakes, 2004, S. 801).

Psychobiologisches Modell

Der Aspekt einer zentralen Steuerung durch das Gehirn ist weder neu noch unbekannt. 1898 hat Triplett bereits eine Verbindung zwischen dem Gehirn und den physiologischen Abläufen in der Peripherie herstellen können. 1998 wurde das Phänomen der Erschöpfung auch aus psychischer Perspektive betrachtet (Borg, 1998, S. 2). 2003 entstand neben dem CGM eine weitere Theorie. Kayser beschrieb den Abbruch als eine willentlich forcierte, bewusste Entscheidung, die

Belastung zu beenden (Kayser, 2003, S. 411). Auch Marcora hatte bereits das CGM kritisiert und ein einfacheres Modell gefordert. Er unterstützte die Theorie von Kayser und erweiterte 2008 diesen Ansatz mit folgender Annahme:

„task disengagement [...] occurs when [...] the effort required by the constant-power test is equal to the maximum effort the subject is willing to exert to succeed in the exercise task or [...] when the subject believe to have exerted a true maximal effort and continuation of exercise is perceived as impossible” (Marcora, 2008, S. 930).

Er beschrieb die Ausdauerleistung als eine bewusste Selbstregulierung und entwickelte das psychobiologische Modell (Marcora, 2010, S. 454).

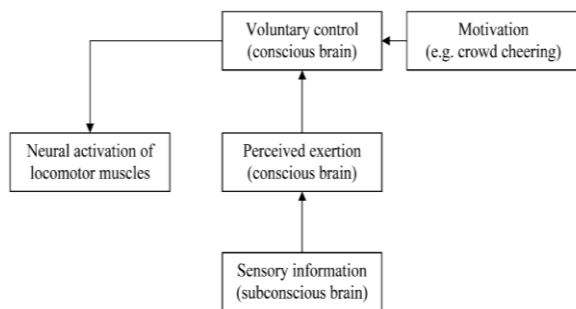


Abbildung 2. Vereinfachte Darstellung des psychobiologischen Modells (Marcora, 2008, S. 930).

In Abbildung 2 wird dieses Modell vereinfacht dargestellt. Der Central Governor wurde ersetzt und die Aktivität der Muskulatur wird vom bewussten Teil des Gehirns über eine Kontrolleinheit gesteuert, indem sie die Motivation und das Anstrengungsempfinden bewertet.

Das psychobiologische Modell ist ein aufwandsorientiertes Entscheidungsmodell (Pageaux, 2014, S. 1319), welches auf der motivationalen Intensitätstheorie nach Brehm und Self (1989) basiert. Die motivationale Intensitätstheorie beschreibt einen theoretischen Ansatz, der sich mit den psychophysiologischen Prozessen der Anstrengungsregulation befasst (Brandstätter, Schüler, Puca & Lozo, 2018, S. 139). Das psychobiologische Modell beschäftigt sich mit den psychologischen und den biologischen Faktoren, da von der Annahme ausgegangen wird, dass der Körper und der Geist eine untrennbare Einheit bilden (O’Conner, 1993, S. 147). Nach

dem psychobiologischen Modell wird die bewusste Selbstregulierung einer Ausdauerbelastung durch die fünf verschiedenen kognitiven und motivationalen Faktoren, (1) dem Anstrengungsempfinden (perception of effort), (2) der Motivation (potential motivation), (3) der Kenntnis über die zurückzulegende Strecke (knowledge of the distance to cover), (4) der Kenntnis über die zurückgelegte/verbleibende Strecke (knowledge of the distance covered/remaining) und (5) den Vorerfahrungen und Erinnerungen an wahrgenommene Anstrengungen während Belastungen unterschiedlicher Intensität und Dauer (previous experience/memory of perceived exertion during exercise of varying intensity and duration) bestimmt (Pageaux, 2014, S. 1319). Auch wenn das psychobiologische Modell auf allen fünf Faktoren aufbaut, werden das Anstrengungsempfinden und die Motivation als die Hauptakteure für die Regulation einer Ausdauerbelastung betrachtet (McCormick et al., 2018, S. 5). Daraus ergibt sich, dass jeder Faktor, welcher das Anstrengungsempfinden reduziert und die Motivation steigert, zu einer Zunahme der Ausdauerleistung führt und umgekehrt eine Abnahme der Ausdauerleistung hervorruft (McCormick et al., 2018, S. 8). Das Anstrengungsempfinden ist der Schlüsselaspekt des Modells (Pageaux, 2014, S. 1320). Es wird nach Marcora als „conscious sensation of how hard, heavy, and strenuous a physical task is” (Morree, Klein & Marcora, 2012, S. 1242) definiert, also eine bewusste, subjektive Wahrnehmung einer Anstrengung. Um diese objektiv messbar zu machen, wird die Borg-RPE-Skala angewandt. Sie wird verwendet, um während sportlicher Belastung die Mühe, die Anstrengung, die Atemlosigkeit und die Ermüdung abzuschätzen (Borg, 1998, S. V) und ermöglicht es, das Anstrengungsempfinden reliabel und valide aufzuzeigen (Borg, 1998, S. 13).

Der zweite Aspekt des psychobiologischen Modells, die Motivation, wird definiert als die Kraft, welche die Sporttreibenden bereit sind, aufzuwenden, um ihre Motive zufriedenstellend zu erreichen (McCormick et al., 2018, S. 5). Ihre Motivation ist abhängig von drei Faktoren: Von dem Bedürfnis, das die Person antreibt, dem instrumentellen Verhalten und der wahrgenommenen Wahrscheinlichkeit, dass ein erfolgreich ausgeführtes Verhalten ein Bedürfnis befriedigt oder zu einem gewünschten Ergebnis führt (McCormick

et al., 2018, S. 5). Daraus ergibt sich, dass die AthletInnen während eines Wettkampfes eine höhere Motivation aufweisen als während einer Laboruntersuchung (Pageaux, 2014, S. 1319). Auch wenn der Wille im psychobiologischen Modell nicht explizit genannt ist, lässt sich dieser Aspekt mit der Motivation vereinbaren. „Der Wille stellt die Fähigkeit dar, subjektiv erlebte Schwierigkeiten bewusst zu überwinden“ (Baumann, 2009, S. 194). Dabei beschreibt er die Funktion des arbeitenden Gehirns, sich selbst zu lenken und stellt eine bewusste Kraft dar, die angewendet wird, um einen Entschluss zu fassen. Dabei ist er bei einem leistungssportlichen Handeln als Fähigkeit zu erkennen, die zwischen subjektiver Antriebslage und Zielorientierung vermittelt (Baumann, 2009, S. 194). Bei einer Ausdauerbelastung werden die vorher festgelegten Ziele und die Motivation in Bezug zur wahrgenommenen Anstrengung gesetzt und gegeneinander abgewogen. Der Wille sorgt dafür, dass das Anstrengungsempfinden toleriert wird und Leistungen erreicht werden können, bis die wahrgenommene Anstrengung den Willen und die Motivation übersteigt.

Periphere Ermüdung

Amann und Dempsey betrachteten (2009, S. 13) einen weiteren möglichen leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung. Sie argumentierten, dass das Feedback der ermüdeten Muskulatur an das Gehirn über die afferenten Nervenfasern ebenfalls einen wichtigen Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt. Dieser Annahme widerspricht das psychobiologische Modell. Das afferente Feedback macht nur einen geringen Teil der Ausdauerleistung aus, da es keinen Einfluss auf einen der fünf Faktoren des psychobiologischen Modells hat (Marcora, 2010, S. 455). Dass das afferente Feedback die Faktoren (3) bis (5) nicht beeinflusst, ist selbsterklärend. Die Motivation ist ein komplexes Konstrukt, welches sich aus verschiedenen psychosozialen Faktoren ergibt. Sie richtet sich danach, was die Teilnehmenden im Wettkampf maximal bereit sind zu leisten und welche Ziele und Anreize sie verfolgen. Die Aussicht auf eine olympische Medaille motiviert beispielsweise mehr als die Teilnahme an einem kleineren Wettkampf (Marcora, 2010, S. 455). Es ist unwahrscheinlich, dass das affe-

rente Feedback der Muskulatur die Bedürfnisse und Vorstellungen beeinflusst. Starker Muskelschmerz, der durch das afferente Feedback empfunden wird, kann zwar auch bei hochmotivierten Sporttreibenden zum Abbruch einer Belastung führen, allerdings führt der normalerweise bei einer Belastung empfundene Muskelschmerz nicht zu einem Abbruch (Marcora, 2010, S. 455). Für das Anstrengungsempfinden gibt es verschiedene empirische Befunde, die zeigen, dass das afferente Feedback der Muskulatur keinen Einfluss auf das Anstrengungsempfinden hat (Marcora, 2010, S. 455). Mit dem Phänomen des Schlusssprints kann ebenfalls widerlegt werden, dass das afferente Feedback der peripheren Muskulatur einen leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt. Wäre das afferente Feedback ein leistungsbegrenzender Faktor, wäre ein Schlusssprint nicht möglich, weil eine hohe Konzentration an ermüdeten Muskulatur zum Ende des Wettkampfes vorhanden ist. Handelt es sich hingegen bei der Ausdauerleistung um eine bewusste Entscheidung, wie vom psychobiologischen Modell angenommen, werden die Kräfte über die Dauer der Belastung eingeteilt und reguliert, weil vor der Belastung das Wissen über die Entwicklung des Anstrengungsempfindens nicht vorhanden ist. Aus diesem Grund ist ein Schlusssprint trotz der vorherigen Belastung möglich (Marcora, 2010, S. 455).

Mentale Ermüdung

Ein weiterer Aspekt, der im Zuge dieses Forschungsbereiches untersucht wurde, ist der Aspekt der mentalen Ermüdung. Marcora, Staiano und Manning (2009, S. 857) untersuchten die Hypothese, ob mentale Ermüdung die sportliche Leistung bei Menschen verschlechtert. Die Studie zeigt, dass mentale Ermüdung mit einer Zunahme des Anstrengungsempfindens und somit gleichzeitig mit der Abnahme der aeroben Leistung assoziiert ist (Birch, 2016, S. 3). Pageaux, Lepers und Marcora (2013, S. 2255) überprüften die Hypothese, ob die mentale Ermüdung die maximale Muskelaktivierung reduziert und das Ausmaß an zentraler Ermüdung erhöht. Auch diese Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass das Anstrengungsempfinden durch die mentale Ermüdung gesteigert wird, ohne

dass kardiorespiratorische, metabolische oder neuromuskuläre Veränderungen durch die Belastung zu verzeichnen waren (Marcora et al., 2009, S. 862; Pageaux et al., 2013, S. 2263). Die beiden genannten Studien und die Erkenntnis, dass die mentale Ermüdung das Anstrengungsempfinden steigert, unterstützen das psychobiologische Modell und die Annahme, dass das Anstrengungsempfinden einen leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt (Pageaux, Lepers, Dietz & Marcora, 2014, S. 1095).

Zusammenfassend festzuhalten ist damit, dass mit dem psychobiologischen Modell ein Erklärungsansatz vorliegt, der, wie das CGM auch, psychische Prozesse und damit das Gehirn als entscheidenden leistungsbegrenzenden Faktor ansieht. Im Gegensatz zum CGM kommt das psychobiologische Modell ohne die Annahme von teleoantizipatorischen Prozessen aus und liefert einen einfachen Erklärungsmechanismus, nach dem die bewusst wahrgenommene Anstrengung in Verbindung mit motivationalen Prozessen darüber entscheidet, ob eine Belastung abgebrochen wird oder nicht. Die Annahmen des Modells decken sich außerdem wie dargestellt mit den vorliegenden Befunden zur Rolle von Feedbackprozessen und mentaler Ermüdung für das Anstrengungsempfinden, der zentralen Komponente des Modells. Im Folgenden werden weitere Studien zum psychobiologischen Modell dargestellt.

Untersuchungen zum psychobiologischen Modell

Dass das Gehirn bzw. das Anstrengungsempfinden den entscheidenden leistungsbegrenzenden Faktor darstellt, so wie das psychobiologische Modell beschreibt, und dass nicht muskuläre Ermüdungsprozesse die Ausdauerleistung begrenzen, zeigen zwei Studien der Arbeitsgruppe um Marcora und Staiano zum sog. „cardinal exercise stopper“ (Marcora & Staiano, 2010; Staiano et al., 2018). Beide Studien weisen einen ähnlichen Untersuchungsaufbau auf:

Es wurde jeweils ein Stufentest durchgeführt, der bis zur Erschöpfung andauerte. Dadurch konnte der Wert für 80 % der Spitzenleistung ermittelt werden. Dieser Wert entsprach der Leistung für eine später stattfindende Dauerbelastung. Vor und direkt nach

dieser Dauerbelastung wurde ein MVCP (maximal voluntary cycling power) Test, ein Sprinttest, durchgeführt, bei dem der Teilnehmende über fünf Sekunden mit maximalem Einsatz gegen den Widerstand des Ergometers anfährt. Bei der Dauerbelastung handelte es sich um einen TTE (time to exhaustion) Test. Bei diesem Test wird eine festgelegte Leistung bis zur Erschöpfung durchgehalten. Die Erschöpfung wurde darüber definiert, dass die Trittfrequenz, trotz verbalem Zuspruch, über eine Dauer von fünf Sekunden unter 40 (Marcora & Staiano, 2010) beziehungsweise unter 60 Umdrehungen pro Minute (Staiano et al., 2018) sank. Während der gesamten Messung wurde das Anstrengungsempfinden mit Hilfe der Borg-RPE-Skala (1998) erfragt. Die Studie von Marcora und Staiano (2010) konnte die Annahme, dass die periphere Ermüdung verantwortlich für die Erschöpfung ist, bereits weitgehend widerlegen. Trotz einer Abnahme der Leistung vom ersten zum zweiten Sprinttest konnte beim zweiten Sprinttest im Zustand der Erschöpfung eine dreimal höhere Leistung erreicht werden als während des Dauertests. Die Autoren schlussfolgern, dass die wahrgenommene Anstrengung den leistungslimitierenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt (Marcora & Staiano, 2010, S. 769). Da in dieser Studie zwischen TTE und dem zweiten MVCP Test aus technischen Gründen eine, wenn auch nur wenige Sekunden, dauernde Pause entstand, kann allerdings nicht ausgeschlossen, dass am Ende des TTE Tests eine vollständige muskuläre Ermüdung vorlag, von der sich die Versuchspersonen bis zum zweiten MVCP Test zumindest teilweise wieder erholen konnten.

In der Studie von 2018 wurde dieses methodische Defizit beseitigt und der Versuchsaufbau erweitert (Staiano et al., 2018). Dabei wurden neben dem Anstrengungsempfinden auch die Muskelermüdung mit einem Test zur isometrischen Muskelfunktion und der Muskelschmerz als weitere Abbruchfaktoren getestet und betrachtet. Der empfundene Muskelschmerz wurde durch die CR-10 Skala nach Cook ermittelt (Cook, Lange, Ciccone, Liu, Steffener & Natalson, 2004). Dieser Wert wurde mit dem Wert während eines CPT (cold pressor test), der die Toleranzgrenze von Schmerz ermittelt, verglichen (Staiano et al., 2018).

Auch die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigten die Annahme, dass das Anstrengungsempfinden den leistungslimitierenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt. Sowohl der Aspekt der Muskelermüdung als auch der Aspekt des Muskelschmerzes konnten sich nicht als cardinal exercise stopper beweisen. Durch die Abnahme der Leistung vom ersten zum zweiten MVCP Test war eine Muskelermüdung zwar zu erkennen und auch die durch elektrische Stimulation hervorgerufenen Muskelreaktionen beim isometrischen Muskelfunktionstest bestätigten die periphere Ermüdung nach dem TTE Test. Trotzdem war zu erkennen, dass der Körper in der Lage ist, nach der Erschöpfung höhere Leistungen zu erreichen. Außerdem wurde festgestellt, dass der empfundene Muskelschmerz während der Belastung viel geringer ist als das eigentliche Toleranzlimit in Bezug auf Schmerz. Auch wenn Staiano et al. (2018, S.22f.) das Anstrengungsempfinden als leistungslimitierenden Faktor betrachteten, machten sie deutlich, dass der Muskelschmerz und die Muskelermüdung einen Einfluss auf den Abbruch einer Ausdauerleistung haben. Sie nahmen an, dass jeder Faktor, der das Anstrengungsempfinden ändert, auch die Regulation von Ausdauerleistungen beeinflussen kann, unabhängig davon, ob dies über psychologische oder physiologische Mechanismen erfolgt.

Fragestellung

Die Arbeiten von Marcora und Staiano verdeutlichen, dass das Anstrengungsempfinden einen zentralen Aspekt beim Abbruch einer Ausdauerbelastung darstellt. Dennoch sind aufgrund der geringen Anzahl an Studien, die das psychobiologische Modell bisher geprüft haben, noch weitere Untersuchungen notwendig, um die vorliegenden Ergebnisse zu bestätigen bzw. die Erkenntnisse zu erweitern. Es soll daher in dieser Arbeit, aufbauend auf den Ergebnissen von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) zum psychobiologischen Modell, der leistungsbegrenzende Faktor einer Ausdauerbelastung untersucht werden.

Im Mittelpunkt steht dabei die Fragestellung, ob das Gehirn oder die ermüdete Muskulatur den leistungslimitierenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die bereits vorhandenen Erkenntnisse zu erweitern, zu bestätigen oder zu widerlegen. Aus diesem Grund wird der Versuchsaufbau von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) repliziert. Neu erhaltenes Datenmaterial kann somit mit vorhandenen Ergebnissen verglichen werden und die Erkenntnisse in diesem Forschungsbereich erweitern. Allerdings werden kleine Änderungen vorgenommen, die sich z.B. auf die Ermittlung der Leistung der Dauerbelastung beziehen. Durch solche Veränderungen ergibt sich die Möglichkeit, den Gültigkeitsbereich der vorliegenden Erkenntnisse auf andere Untersuchungsbedingungen auszuweiten. Übereinstimmende Ergebnisse zwischen dieser Untersuchung und den Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) könnten die zugrundeliegenden Modelle ggf. weiter unterstützen. Widersprechende Ergebnisse könnten andernfalls Anregungen für Modellanpassungen oder die Überarbeitung von Versuchsaufbauten für weitere Untersuchungen liefern.

Methode

Untersuchungsplan

Grundlage dieser Untersuchung sind die Studien von Marcora und Staiano und Staiano et al. aus den Jahren 2010 und 2018. In Anlehnung daran wurden drei verschiedene Tests auf dem Fahrradergometer durchgeführt. Im Einzelnen wurden in dieser Studie ein drei- bis vierstufiger Stufentest, ein Sprinttest (MVCP Test), welcher zweimal durchgeführt wurde und ein bis zur Erschöpfung andauernden Dauertest (TTE Test) durchgeführt. Die Daten der neun männlichen Radsportler und Triathleten wurden einmalig, innerhalb von vier verschiedenen Tagen, im Bewegungslabor der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel erhoben.

Die Teilnehmer wurden vor der Untersuchung darauf hingewiesen, ausgeruht bei der Untersuchung zu erscheinen. Es sollten am Tag vorher hohe Belastungen vermieden und ausreichend geschlafen und getrunken werden. Am Tag der Untersuchung und während der Untersuchung durfte ausschließlich Wasser getrunken werden, um eine Einheitlichkeit zwischen den Probanden zu gewährleisten. Die letzte Mahlzeit war zwei Stunden vor der

Untersuchung einzunehmen. Am Tag der Untersuchung wurden die persönlichen Daten (Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht) der Probanden ermittelt und eine Einwilligungserklärung unterschrieben, in welcher die Probanden bestätigten, ausreichend über das Vorgehen und die Ziele der Untersuchung informiert worden zu sein, sich gesundheitlich in der Lage zu sehen, eine sportliche Belastung zum Zeitpunkt der Untersuchung zu bewältigen und dass die erhobenen Daten für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden dürfen.

Testpersonen

Für die Untersuchung konnten neun männliche Radsportler und Triathleten angeworben werden. Das Alter der Testpersonen lag zwischen 24 und 35 Jahren ($M = 26.5$ Jahre, $SD = 4.4$ Jahre). Sie hatten eine Größe von $M = 181.3$ cm ($SD = 7.9$ cm) und ein Körpergewicht von $M = 73.7$ kg ($SD = 6.4$ kg). Ihre Erfahrung im Radsport betrug zwischen einem und neun Jahren ($M = 3.7$ Jahre, $SD = 2.5$ Jahre). Für den Test wurden die eigenen Rennräder auf einem Cyclus 2-Ergometer (RBM elektronik-automation GmbH, 2013) montiert, damit die Teilnehmer unter möglichst gewohnten Bedingungen untersucht werden konnten. Vor dem Test wurden die Versuchspersonen sowohl schriftlich als auch mündlich über den Ablauf der Untersuchung informiert und erhielten eine Einweisung in die Arbeitsweise mit der Borg-RPE-Skala (Borg, 2004, S. 1016), um ihr Anstrengungsempfinden bestimmen zu können.

Datenerhebungsmethoden

Während der gesamten Untersuchung wurden alle erhobenen Daten im Untersuchungsprotokoll festgehalten und die Herzfrequenz während der gesamten Untersuchung mit dem Herzfrequenzsensor T31 der Firma Polar Electro aufgezeichnet. In den letzten 15 Sekunden jeder Stufe des Stufentests wurde den Testpersonen ca. $0.3 \mu\text{l}$ Blut aus dem rechten Ohrläppchen abgenommen und mit dem tragbaren Laktatmessgerät Lactate Pro 2 Arcray (HaB International Ltd.) wurde die Laktatkonzentration im Blut gemessen.

Während des TTE Tests wurde die wahrgenommene Anstrengung der Athleten erfasst: Das Anstrengungsempfinden ist eine subjektive Empfindung, wie schwer oder wie

anstrengend eine Leistung ist. Es stellt die subjektive Antwort auf eine Reizintensität dar (Löllgen, 2004, S. 299). Um diese subjektiven Empfindungen objektiv messbar zu machen, wurde die Borg-RPE-Skala (rating of perceived exertion scale) (Borg, 2004, S. 1016) verwendet. Sie ist eine 15-stufige numerische Skala von sechs bis zwanzig und gilt als zuverlässiges Instrument zum Einschätzen des Anstrengungsempfindens (Löllgen, 2004, S. 299).

Ergometrie

Für diese Untersuchung wurde das Cyclus 2-Ergometer (RBM elektronik-automation GmbH, 2013) verwendet. Das Ergometer ermöglicht ein Einstellen von benutzerdefinierter Modi. In dieser Untersuchung wurden der isokinetische und der hyperbolische Modus verwendet. Beim isokinetischen Modus ist eine Trittfrequenz festgesetzt. Bei Abweichungen von dieser Trittfrequenz reguliert das Ergometer die Trittleistung. Beim hyperbolischen Modus hingegen gibt es eine konstant vorgegebene Leistung und die Trittfrequenz ist frei wählbar (Geyer, 2011, S. 24). Für den Stufentest wurde der hyperbolische Modus gewählt, damit die Leistung über den gesamten Zeitraum der Stufe unverändert bleibt. Alle anderen Tests wurden im isokinetischen Modus durchgeführt. Für den Dauertest wäre der hyperbolische Modus zwar zweckmäßiger, um die Trittleistung als Dauerbelastung festzulegen, jedoch wurde ein Wechsel zwischen den Modi während des Tests bereits in der Studie von Marcora und Staiano (2018) bemängelt. Durch den Wechsel entsteht eine unerwünschte Pause, die das Ergebnis verfälschen könnte (Staiano et al., 2018, S. 3). Um diese Pause zu vermeiden, wurden beide Sprinttests und der Dauertest im isokinetischen Modus gefahren und Ungenauigkeiten in der Trittleistung während des Dauertests toleriert. Die Testpersonen wurden allerdings angewiesen, die Trittleistung während der Dauerbelastung konstant zu halten und nicht zu unterschreiten.

Versuchsbeschreibung

Der genaue Ablauf der in der Untersuchung durchgeführten vier Tests wird im Folgenden detailliert erläutert (Abb. 3). Alle Tests wurden sitzend absolviert.

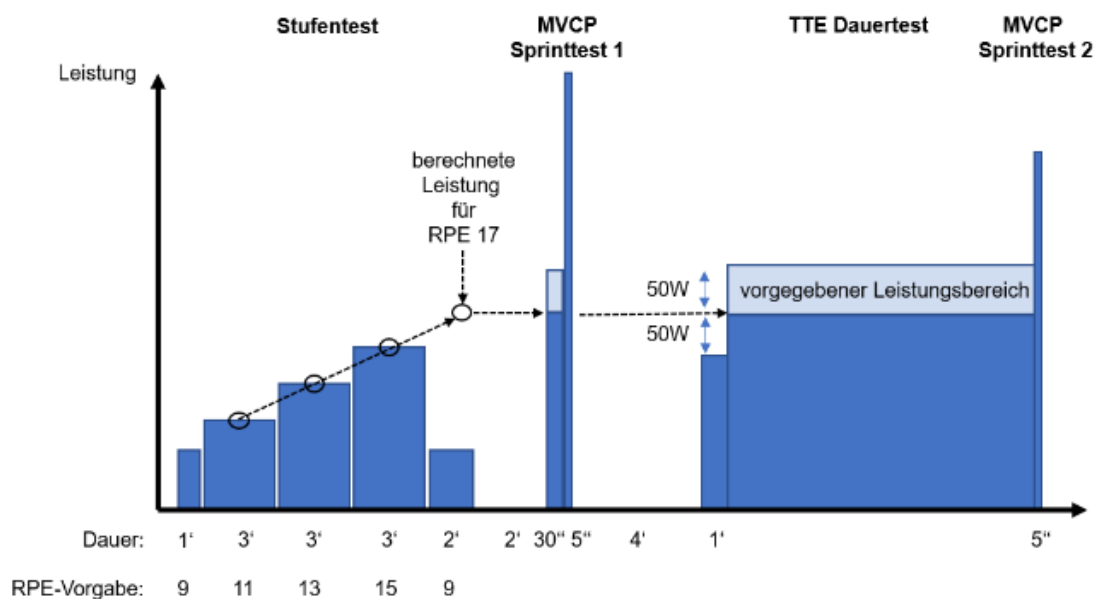


Abbildung 3. Darstellung des Versuchsaufbaus.

Stufentest

Die Dauer der 3-4 Stufen des Stufentests wurden auf drei Minuten festgelegt, um ein stabiles Verhältnis zwischen Laktatbildung und -abbau zu sichern. Damit die Laktatwerte nach der Untersuchung für Trainingszwecke genutzt werden können, wurde für jede Testperson individuell entschieden, ob der Stufentest aus drei oder vier Stufen besteht. Wenn die Laktatkonzentration am Ende der dritten Stufe bei 3,0 mmol/L oder darunter lag, wurde die Stufenzahl auf vier Stufen erhöht. Die Stufen des Tests wurden über das Anstrengungsempfinden der Athleten, in Abhängigkeit von der Borg-RPE-Skala (Borg, 2004, S. 1016), definiert. Die drei Stufen des Tests entsprachen einer „leichten“ (RPE 11), einer „etwas anstrengenden“ (RPE 13) und einer „anstrengenden“ (RPE 15) Trittleistung. Die Extrastufe bei einem vierstufigen Stufentest entsprach einer „sehr anstrengenden“ Leistung (RPE 17). Die Startleistung betrug 50 W. Das Ergometer befand sich im hyperbolischen Modus, sodass die eingestellte Trittleistung konstant blieb. Die Testpersonen wurden angehalten, den Test mit einer Trittfrequenz von 90 RPM (revolutions per minute) durchzuführen. Bevor der eigentliche Test begann, wurde eine Minute auf der Stufe 9, „sehr leicht“, der Borg-RPE-Skala gefahren, um sich an das Verfahren zu gewöhnen und moderat zu beginnen.

Die Trittleistung wurde von der Testperson selbst über den Monitor des Ergometers geregelt. Während des Tests sollte die Trittleistung in der ersten Minute jeder Stufe so eingestellt werden, dass sie entsprechend einer „leichten“, einer „etwas anstrengenden“, einer „anstrengenden“ oder einer „sehr anstrengenden“ Belastung entsprach. Diese eingestellte Trittleistung wurde anschließend weitere zwei Minuten beibehalten. In den letzten 15 Sekunden jeder Stufe wurden ca. 0,3µl Blut am rechten Ohrläppchen abgenommen, um mit dem tragbaren Laktatmessgerät Lactate Pro 2 Arkray die Laktatkonzentration zu messen. Die Herzfrequenz wurde ebenfalls in den letzten 15 Sekunden jeder Stufe notiert.

Erster MVCP Sprinttest

Der Sprinttest wurde zur Erfassung der maximal willkürlichen Trittleistung (MVCP) durchgeführt. Zwischen dem Stufentest und dem ersten MVCP Test gab es zunächst eine aktive Pause von zwei Minuten bei einer Trittleistung, welche im Stufentest RPE 9 („sehr leicht“) entsprach und anschließenden, weiteren zwei Minuten in Ruhe sitzend auf dem Fahrrad. Die Trittfrequenz des MVCP Tests war auf 90 RPM festgelegt. Nach Beendigung der Pause wurde vor dem eigentlichen MVCP Test die Trittleistung, die einer 17 auf der

Borg-RPE-Skala (Borg, 2004, S. 1016) entspricht, über eine Zeit von 30 Sekunden erreicht, damit die Sprintbelastung nicht aus der Ruhe erfolgt. Dadurch sollte die Vergleichbarkeit mit dem zweiten MVCP Test, der auch aus einer Belastung erfolgte, gewährleistet werden. Die Trittleistung von RPE 17 wurde mittels linearer Regression unter Verwendung von Microsoft Excel 2013 und der Formel bei $f(x) = \text{Schätzer}(x; y1: y3; z1: z3)$ aus den bereits erreichten Leistungen des Stufentests berechnet. Bei den Testpersonen, die nur drei Stufen gefahren sind, wurden für y die Werte 11, 13 und 15 verwendet und für z die Trittleistungen der jeweiligen Stufe. Bei denjenigen Probanden, die einen vierstufigen Stufentest gefahren sind, wurden für y die Werte 13, 15 und 17 und für z wiederum die zugehörigen Trittleistungen eingesetzt. Die Berechnung der Trittleistung für den Wert 17 auf der Borg-RPE-Skala (Borg, 2004, S. 1016) erfolgte damit jeweils über die drei intensivsten Stufen des Stufentests.

Nach den 30 Sekunden Vorbelastung wurde für fünf Sekunden eine maximale Sprintbelastung gefahren. Der Start erfolgt nach einem akustischen 5s Countdown.

TTE Dauertest und zweiter MVCP Sprinttest

Der TTE Test zielt auf die Erbringung einer festgelegten Trittleistung bis zur Erschöpfung. Marcora und Staiano haben in ihren Untersuchungen die TTE Testleistung mit 80 % der Spitzenleistung (W_{peak}) definiert. Diese Leistung wurde durch den Stufentest ermittelt (Marcora & Staiano, 2010, S. 3; Staiano et al., 2018, S. 8). Abweichend vom Vorgehen der beiden genannten Studien wurde hier die rechnerisch ermittelte Leistung verwendet, die im Stufentest RPE 17 entspricht und entsprach der Vorbelastung der des MVCP Tests. Die im TTE Test gefahrene Leistung richtete sich damit ebenfalls nach dem Anstrengungsempfinden während des Stufentests, das zur Selbstregulation eben dieses Tests genutzt wurde.

Dem Dauertest ging eine vierminütige Sitzpause auf dem Ergometer voraus. Anschließend erfolgte über eine Minute eine Vorbelastung, die 50 W unter der Leistungsvorgabe des TTE Tests lag.

Der TTE Test wurde im isokinetischen Modus gefahren. Die Trittfrequenz wurde auf 90

RPM festgelegt. Der Test startete, sobald die Testperson den Grenzwert 80 RPM überschritten hatte. Da die Leistung im isokinetischen Modus sehr stark schwankt und es schwierig ist, die Leistung zu halten, wurde ein Bereich von 50 W abgesteckt, in dem die Probanden ihre Leistung halten sollten. Die TTE Test-Trittleistung wurde dabei als unterer Grenzwert festgelegt und durfte nicht unterschritten werden. Während der Belastung wurde am Ende einer jeden Minute das subjektive Anstrengungsempfinden abgefragt und die Herzfrequenz notiert. Das Testende wurde erreicht, wenn (1) die vorgegebene Trittleistung für mehr als fünf Sekunden unterschritten wurde oder wenn (2) die Testperson angab, die Belastung nicht mehr fortsetzen zu können. Sobald eines dieser Kriterien eintrat, wurde der Proband aufgefordert, sofort im Anschluss an den Dauertest einen zweiten 5s Sprinttest zu fahren. Diese Information wurde dem Teilnehmenden vor der Untersuchung vorenthalten, um eine entsprechende Belastungsstrategie zu vermeiden.

Hypothesen

In Analogie zu den Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) werden bezugnehmend auf die zugrundeliegende Fragestellung dieser Arbeit und das gewählte Untersuchungsdesign folgende Alternativ- und Nullhypothesen formuliert:

H1-1: Die Leistung des ersten MVCP Tests ist höher als die des zweiten MVCP Tests.

H1-0: Die Leistung des ersten MVCP Tests ist gleich der Leistung des zweiten MVCP Tests.

H2-1: Die Leistung des Dauertests ist geringer als die des zweiten MVCP Tests.

H2-0: Die Leistung des Dauertests ist gleich der Leistung des zweiten MVCP Tests.

H3-1: Es gibt einen Unterschied zwischen dem Anstrengungsempfinden zu Beginn und zum Ende des TTE Tests.

H3-0: Es gibt keinen Unterschied zwischen dem Anstrengungsempfinden zu Beginn und am Ende des TTE Tests.

H4-1: Es gibt einen Zusammenhang zwischen dem Anstrengungsempfinden und der Dauer des TTE Tests.

H4-0: Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem Anstrengungsempfinden und der Dauer des TTE Tests.

Verfahren der Datenauswertung

Für die erhobenen Daten wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet und Häufigkeitsverteilungen erstellt, um die Daten auf ihre Normalverteilung hin zu prüfen. Die Auswertung erfolgte mithilfe der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics 25.

Um die Mittelwerte der Leistungen der einzelnen Tests und des Anstrengungsempfindens der Teilnehmer auf Unterschiede zu überprüfen, wurde ein t-Test für gepaarte Stichproben berechnet. Das α -Fehlerniveau wurde dafür, wie allgemein üblich, auf $\alpha = .05$ festgesetzt. Bei signifikanten Ergebnissen wurde die Effektstärke d berechnet und nach Cohen (1988) interpretiert. Demnach entspricht $d = 0.20$ einem kleinen Effekt, $d = 0.50$ einem mittleren Effekt und $d = 0.80$ einem großen Effekt (Cohen, 1988). Die Zusammenhangshypothese zwischen der Dauer des TTE-Tests und dem Anstrengungsempfinden wurde aufgrund der Ordinalskalierung der Borg-RPE Skala mittels Rangkorrelation nach Spearman (r_{Spearman}) untersucht. Signifikante Korrelationen wurden hinsichtlich der Klassifikation nach Cohen (1988) interpretiert. Danach handelt es sich bei $r = .10$ um einen kleinen Effekt, bei $r = .30$ um einen mittleren Effekt und bei $r = .50$ um einen großen Effekt.

Ergebnisse

Leistungsunterschied zwischen MVCP Tests

Im ersten MVCP Test erreichten die Testpersonen durchschnittliche Leistungen zwischen 727 und 1098 W. Im zweiten MVCP Test lagen die Werte zwischen 406 und 591 W. Abbildung 4 zeigt die Leistungen aller Testpersonen und macht deutlich, dass alle Testpersonen im zweiten MVCP eine geringere Leistung erzielten als im ersten Test (Tab. 1, Anhang). Der t-Test ergibt, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Leistungen beider MVCP Tests besteht ($N = 9$, $t(8) = 9.64$, $p = < .001$). So fiel die durchschnittliche Leistung des zweiten MVCP Tests mit $M = 502.7$ W ($SD = 62.9$ W) signifikant geringer aus als die Leistung von $M = 881$ W ($SD = 123.7$ W) im ersten MVCP Test. Die Leistung des zweiten Tests ist im Vergleich zum ersten Test damit durchschnittlich

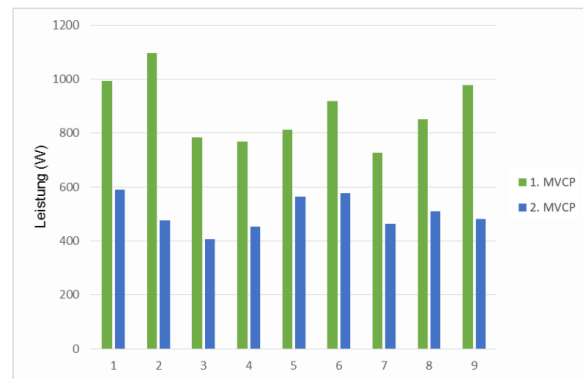


Abbildung 4. Darstellung der Leistungsabnahme zwischen dem ersten MVCP Test und dem zweiten MVCP Test der 9 Testpersonen.

um $M = 378.5$ W gesunken. Das entspricht einer Leistungsabnahme von 42 %. Die berechnete Effektstärke $d = 6.82$ ergibt nach Cohen (1988) einen großen Effekt.

Aufgrund des signifikanten Leistungsunterschiedes zwischen dem ersten und zweiten MVCP Test, der großen Effektstärke und der höheren Leistung des ersten MVCP Tests, wird die Nullhypothese H_{1-0} verworfen und die Alternativhypothese H_{1-1} „Die Leistung des ersten MVCP Tests ist höher, als die des zweiten MVCP Tests“ kann angenommen werden.

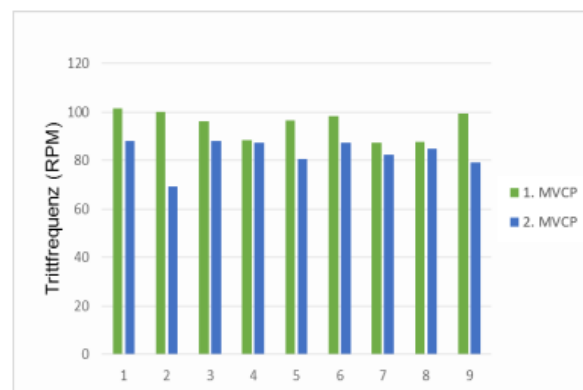


Abbildung 5. Darstellung der Trittfrequenzabnahme zwischen dem ersten und dem zweiten MVCP Test der 9 Testpersonen.

Weiterführende Analysen ergeben, dass sich die Trittfrequenzen beim ersten und zweiten MVCP Test unterscheiden ($t(8) = 3.85$, $p < .01$, $d = 2.72$). Beim ersten MVCP Test lag sie bei $M = 95$ RPM, beim zweiten Test dagegen nur $M = 83$ RPM, entsprechend einer Abnahme von 13 %. Abbildung 5 zeigt, dass bei allen Testpersonen eine Abnahme der Trittfrequenz zu beobachten war, auch wenn sie in einzelnen Fällen nur sehr gering ausgefallen ist (Testpersonen 4, 7 und 8).

Zwischen Trittfrequenz und Leistung besteht für den ersten MVCP ein signifikanter Zusammenhang ($r = .77$, $p < .05$), was jedoch nicht für den zweiten MVCP zutrifft ($r = .15$, $p = .74$, n.s.).

Leistungsunterschied zwischen TTE und zweiten MVCP

Der TTE Test wurde von den Testpersonen zwischen 3.08 und 15.15 min durchgehalten ($M = 7.2$ min, $SD = 4.4$ min). Die durchschnittliche Herzfrequenz am Ende des TTE Tests, zum Zeitpunkt der Erschöpfung, lag bei $M = 183.8$ bpm ($SD = 6.3$ bpm) und das Anstrengungsempfinden lag durchschnittlich bei $M = 19.3$ ($SD = 1.0$).

Direkt im Anschluss an den TTE Test wurde der zweite MVCP Test durchgeführt. Trotz der signifikanten Leistungsabnahme zwischen den beiden Sprintbelastungen konnte während des zweiten MVCP Tests ($M = 502.7$ W, $SD = 62.9$ W) im Durchschnitt ($M = 179$ W) mehr erreicht werden als während des TTE Tests ($M = 323.7$ W, $SD = 51.6$ W). Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen signifikanten Unterschied: Die Leistung des zweiten MVCP Tests ist signifikant höher als die Leistung des TTE Tests ($t(8) = -6.72$, $p < .001$). Nach Cohen (1988) weist der berechnete Effekt von $d = -4.75$ auf einen großen Effekt hin. Die Teilnehmer waren in der Lage, trotz ihres Erschöpfungszustandes die Leistung im Durchschnitt um 58 % zu steigern. Abbildung 6 zeigt darüber hinaus, dass auch in allen Einzelfällen die Leistung im zweiten MVCP Test höher ausfiel als die mittlere Leistung im TTE Test.

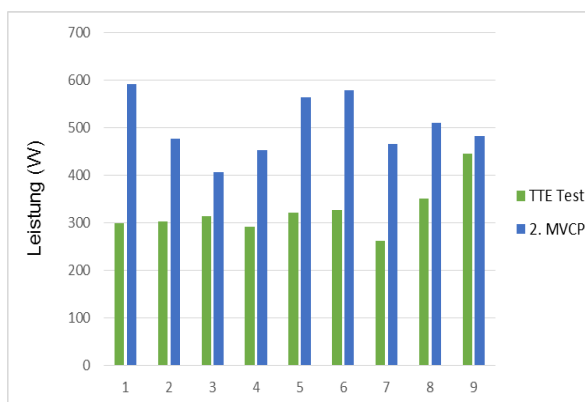


Abbildung 6. Darstellung der Leistungssteigerung zwischen den mittleren Leistungen des TTE Tests und des zweiten MVCP Tests der 9 Testpersonen.

Doch nicht nur zwischen der durchschnittlichen Leistung des TTE Tests und der Leistung des zweiten MVCP Tests konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden, sondern auch zwischen der Leistung am Ende des TTE Tests, in der letzten Sekunde der Dauerbelastung, zum Zeitpunkt der Erschöpfung und der Leistung des zweiten MVCP Tests ($t(8) = -7.27$, $p = .001$, siehe Abb. 7). Im zweiten MVCP Test ($M = 502.7$ W, $SD = 62.9$ W) konnte im Durchschnitt ($M = 264$ W) mehr erreicht werden als am Ende des TTE Tests ($M = 238.7$ W, $SD = 70.1$ W). Das entspricht einer Leistungssteigerung von 134 %. Die Testpersonen haben ihre Leistung trotz ihres Erschöpfungszustandes und ihrem eigentlichen Abbruch der Belastung mehr als verdoppelt. Diese Steigerung ist sogar noch größer als die zwischen der Durchschnittsleistung des TTE Tests und des zweiten MVCP Tests. Und auch die berechnete Effektstärke von $d = -5.14$ weist auf einen noch größeren Effekt des Unterschiedes hin als beim Vergleich zwischen dem zweiten MVCP Test und der Durchschnittsleistung des TTE Tests.

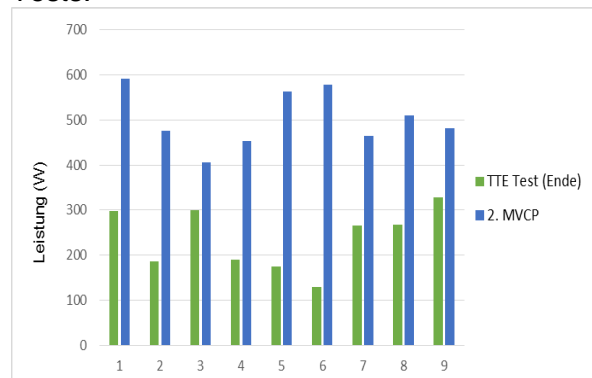


Abbildung 7. Darstellung der Leistungssteigerung zwischen der Leistung am Ende des TTE Tests und des zweiten MVCP Tests der 9 Testpersonen.

Aufgrund der signifikanten Leistungsunterschiede bei beiden Vergleichen zwischen dem TTE Test und dem zweiten MVCP Test wird die Nullhypothese H_{2-0} verworfen und die Alternativhypothese H_{2-1} „Die Leistung des Dauertests ist geringer als die des zweiten MVCP Tests“ kann angenommen werden. Diese Ergebnisse haben gezeigt, dass die Probanden trotz einer sichtbaren Ermüdung der Muskulatur, erkennbar an der signifikanten Leistungsabnahme zwischen dem ersten

und zweiten MVCP Test, nach der Erschöpfung in der Lage sind, höhere Leistungen zu erreichen (siehe Abb. 8).

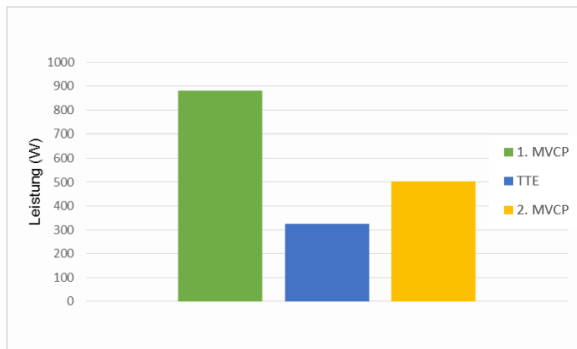


Abbildung 8. Darstellung des Mittelwertvergleichs zwischen dem ersten MVCP Test, dem TTE Test und dem zweiten MVCP Test.

Anstrengungsempfinden

Die Ergebnisse zeigen nicht nur Unterschiede zwischen den Leistungen der einzelnen Tests, sondern auch hinsichtlich des Anstrengungsempfindens konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. In Bezug auf das Anstrengungsempfinden gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen dem Anfang und dem Ende des TTE Tests ($t(8) = -8.55, p = <.001$). Das Anstrengungsempfinden wurde zu Beginn des TTE Tests mit einem RPE-Wert von $M = 15.4$ ($SD = 0.9$) bewertet. Zum Ende der TTE Belastung hingegen entsprach das Anstrengungsempfinden einem durchschnittlichen RPE-Wert von $M = 19.3$ ($SD = 1.0$). Dieser Wert befindet sich auf der Borg-RPE-Skala 3.9 Stufen weiter oben als der Anfangswert. Das bedeutet, dass es zu einer signifikanten Zunahme des Anstrengungsempfindens im Laufe der Dauerbelastung kam. Die Effektstärke entspricht mit $d = -6.05$ nach Cohen (1988) einem großen Effekt.

Dieser signifikante Unterschied widerlegt die Nullhypothese H3-0, dass es keinen Unterschied zwischen dem Anfang und dem Ende des TTE Tests bezüglich des Anstrengungsempfindens zu verzeichnen gibt, weswegen die Alternativhypothese H3-1 „Es gibt einen Unterschied des Anstrengungsempfindens zu Beginn und am Ende des TTE Tests“ angenommen wird.

Die weitere Auswertung zeigt, dass sich das Anstrengungsempfinden am Anfang und am Ende des TTE Tests signifikant unter-

scheiden und dass außerdem eine signifikante Korrelation zwischen dem Anstrengungsempfinden und der Dauer des TTE Tests ($r_{\text{Spearman}} = .97, p < .001$) besteht. Dieser Zusammenhang entspricht einem großen Effekt nach Cohen (1988) und zeigt, dass das Anstrengungsempfinden im Laufe des TTE Tests ansteigt und es zu einer signifikanten Zunahme des Anstrengungsempfindens im zeitlichen Verlauf des Tests kommt (s. Abb. 9). Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich auch hier die Nullhypothese H4-0 verwerfen und die Alternativhypothese H4-1 „Es gibt eine Korrelation zwischen dem Anstrengungsempfinden und der Dauer des TTE Tests“ kann angenommen werden.

Diskussion

Ergebnisdiskussion

Angelehnt an die Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) war der Ausgangspunkt dieser Arbeit die Annahme, dass das Gehirn den entscheidenden leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt. Ausgehend von dieser Annahme und dem psychobiologischen Modell als theoretischen Hintergrund sollte mit der Fragestellung, ob das Gehirn oder die ermüdete Muskulatur den leistungsbegrenzenden Faktor darstellt, untersucht werden, inwieweit diese beiden Faktoren jeweils an dem Abbruch einer Ausdauerbelastung beteiligt sind und den Zustand der Erschöpfung auslösen. Dafür wurden Leistungen während drei verschiedener Fahrradergometertests miteinander verglichen, das Anstrengungsempfinden während der Belastung gemessen und darüber der Zustand der Erschöpfung genauer untersucht.

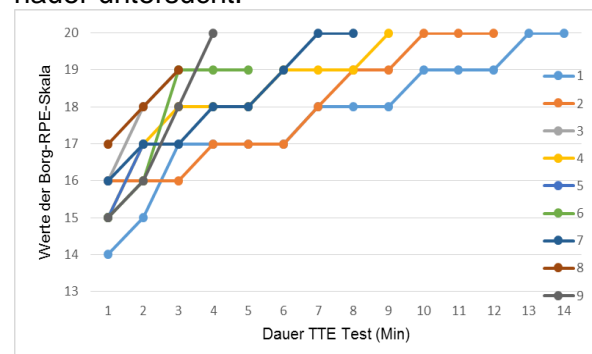


Abbildung 9. Darstellung der Entwicklung des Anstrengungsempfindens im zeitlichen Verlauf des TTE Tests der 9 Testpersonen.

Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Abnahme der Leistung vom ersten zum zweiten MVCP Test (s. Abb. 4). Durchschnittlich ist die Leistung beim zweiten MVCP Test um 42 % reduziert. Diese Ergebnisse bestätigen die Befunde der Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018), die ebenfalls signifikante Leistungsabnahmen von durchschnittlich 32 % (Marcora & Staiano, 2010, S. 766) und 35 % (Staiano et al., 2018, S. 16) feststellten. In Anbetracht der Annahme, dass sich die muskuläre Ermüdung in einer belastungsbedingten Abnahme der maximalen freiwilligen Muskelleistung zeigt (Gandevia, 2001, S. 1725), wird angenommen, dass die signifikante Leistungsabnahme auftritt, weil die Muskulatur ermüdet ist und deswegen weniger Leistung im zweiten MVCP Test erreicht werden kann.

Zwar war es nicht das Ziel der Untersuchung, ermüdungsbedingte Veränderungen in der Trittfrequenz zu überprüfen, jedoch wurde im Zuge der Datenauswertung festgestellt, dass auch zwischen den Trittfrequenzen ein signifikanter Unterschied vorhanden ist (Abbildung 5). Die Trittfrequenz des zweiten MVCP Tests unterschied sich mit 83 RPM um 13 % von 95 RPM ($d > 0.8$) im ersten MVCP Test. Für hohe Trittfrequenzen werden hohe Kontraktionsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Kontraktionskraft benötigt. Diese setzen einerseits motorische Aktivierungsprozesse voraus, die wiederum von einer entsprechend hohen Anstrengungsbereitschaft abhängig sind. Andererseits erfordern solche hohen Kontraktionsgeschwindigkeiten und Muskelkräfte entsprechende kontraktile Fähigkeiten der Arbeitsmuskulatur. Die signifikante Abnahme von Leistung und Trittfrequenz vom ersten zum zweiten MVCP Test könnte sowohl durch muskuläre Ermüdung als auch durch eine reduzierte motorische Aktivierungsfähigkeit bzw. Anstrengungsbereitschaft erklärt werden. Letztere kann in Bezug auf Baumann (2009, S. 194) als ermüdungsbedingte Abnahme der volitiven Fähigkeiten verstanden werden; oder sie ist in Bezug auf das CGM als ein höheres Anstrengungsempfinden und/oder geringere Motivation anzusehen. Damit kommen sowohl periphere Prozesse, welche die Muskulatur betreffen, als auch zentrale Prozesse, die im Gehirn verortet sind, als mögliche Erklärungen für diese Befunde in Betracht.

Weitere Ergebnisse haben gezeigt, dass zwischen der Leistung im TTE Tests und der Leistung im anschließenden, zweiten MVCP Tests ein signifikanter Unterschied besteht. Dabei fällt die Leistung im zweiten MVCP Test nicht nur signifikant höher aus als die durchschnittliche Leistung des TTE Tests (s. Abb. 6), sie ist auch signifikant höher als die Leistung am Ende des TTE Tests (s. Abb. 7). Damit ist Leistung im Sprint nach dem erschöpfungsbedingten Abbruch der Dauerbelastung höher als während dieser erschöpfenden Belastung insgesamt und während der Belastung bei Eintritt dieser Erschöpfung. Diese Leistungszunahme im zweiten MVCP Test trotz vorheriger Erschöpfung ist mit der Annahme, Muskelermüdung sei der leistungsbegrenzende Faktor, nicht zu vereinbaren. Wäre der erschöpfungsbedingte Belastungsabbruch im TTE Test durch muskuläre Ermüdung zu erklären, dann wäre keine anschließende Leistungssteigerung von 134 % möglich gewesen, was mehr als einer Verdopplung der vorherigen Belastung entspricht, obwohl die vorherige Belastung nicht fortgeführt werden konnte.

Diese Ergebnisse stehen dagegen im Einklang mit den Befunden von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018), deren MVCP Testleistung im Zustand nach einer Erschöpfung signifikant höher war als die Leistung während des Dauertests selbst. Kleinere Abweichungen in den Trittleistungen lassen sich durch methodische Unterschiede im Untersuchungsaufbau der Studien erklären (Trittfrequenz, Dauer der Sprinttests). Die auffällig höhere Leistung ($M = 731 \text{ W}$, $SD = 206 \text{ W}$) des zweiten Sprinttests in der Studie von Marcora und Staiano (2010) im Vergleich zu der Studie von Staiano et al. (2018) ($M = 469 \text{ W}$, $SD = 111 \text{ W}$) und dieser Studie ($M = 502.7 \text{ W}$, $SD = 62.9 \text{ W}$), ist möglicherweise auf die Verwendung des hyperbolischen Modus und auf die Pause, die durch die Umstellung zwischen den beiden Modi entsteht, zurückzuführen.

Insgesamt betrachtet ist mit Blick auf die Fragestellung zum leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung festzuhalten: Es kommt, wie es die Leistungsabnahme vom ersten zum zweiten Sprinttest deutlich erkennen lässt, zwar zur (wahrscheinlich muskulär bedingten) Ermüdung durch den TTE Test. Entscheidend ist aber, dass trotz

Erschöpfungszustand und Abbruch der Belastung, bei allen Probanden signifikante Leistungssteigerungen möglich waren. Der Annahme von Hepple (2002, S. 56), dass die Belastung abgebrochen wird, weil die ermüdete Muskulatur nicht mehr in der Lage ist, die geforderte Energie bereitzustellen, muss damit widersprochen werden. Wenn der Proband in der Lage ist, nach der Erschöpfung über fünf Sekunden freiwillig so hohe Leistungen zu erbringen, muss er physiologisch auch in der Lage sein, die geringere Trittleistung des TTE Tests über einen längeren Zeitpunkt durchzuhalten (Marcora, 2010, S. 767). Es zeigt sich, dass der Körper zum Zeitpunkt der Erschöpfung noch gar nicht vollkommen erschöpft ist. Aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchung wird die ermüdete Muskulatur nicht als leistungsbegrenzender Faktor betrachtet.

Dadurch, dass in dieser Untersuchung den Probanden die Durchführung des zweiten MVCP Tests direkt im Anschluss an die Dauerbelastung verschwiegen wurde, bestand keine Möglichkeit, sich die Kräfte für einen anschließenden Test aufzusparen. In den Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) hingegen war die Durchführung des zweiten MVCP Tests bereits im Voraus bekannt. Durch den Aufbau dieser Untersuchung konnte daher widerlegt werden, dass dieses Wissen verantwortlich für die Leistungszunahme des zweiten MVCP Tests ist. Trotzdem kann die Leistungssteigerung beim zweiten MVCP Test psychologisch erklärt werden. Sobald der Test anfing, wussten die Probanden, dass die Belastung nur weitere fünf Sekunden andauern wird. Dieses Wissen hat sie möglicherweise motiviert, bis zum Ende durchzuhalten. Diese Annahme wird auch von dem psychobiologischen Modell nach Marcora unterstützt, welches das Wissen über die verbleibende Strecke und die verbleibende Zeit als leistungsregulierenden Faktor betrachtet (Pageaux, 2014, S. 1319).

Nach dem psychobiologischen Modell ist auch das Anstrengungsempfinden ein leistungsregulierender Faktor. Es bildet mit der Motivation zusammen die beiden Hauptfaktoren, die für den Abbruch einer Ausdauerbelastung verantwortlich sind (McCormick et al., 2018, S. 5). Eine Belastung abzubrechen, ist eine bewusste Entscheidung. Sie wird getroffen,

wenn die Leistung, die vom Dauerbelastungstest vorausgesetzt wird, gleich der maximalen Leistung ist, welche die Person bereit ist aufzuwenden oder wenn die Person der Meinung ist, die maximale Leistung aufgebracht zu haben und ein Fortführen der Belastung unmöglich erscheint (Marcora, 2008, S. 930). Das lässt sich durch die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen. In Bezug auf das Anstrengungsempfinden zeigen die Ergebnisse, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen dem Anfang und dem Ende des TTE Tests gibt. Dieser Unterschied entspricht einer signifikanten Zunahme des Anstrengungsempfindens. Außerdem wurde die Anstrengung zum Zeitpunkt der Erschöpfung mit durchschnittlich RPE 19,3 als maximal wahrgenommen. Diese Ergebnisse unterstützen zum einen die Annahme des psychobiologischen Modells, dass die Personen der Meinung sind, ihre maximale Leistung erreicht zu haben und andererseits die Annahmen von Noakes (2004, 2007, 2008), dass das Anstrengungsempfinden zum Ende der Belastung immer maximal ist. Außerdem wurde eine signifikante Korrelation zwischen dem Anstrengungsempfinden und der Dauer des TTE Tests festgestellt. In Abbildung 8 ist der Anstieg des Anstrengungsempfindens der einzelnen Probanden im zeitlichen Verlauf der Dauerbelastung deutlich zu erkennen. Diese Ergebnisse bestätigen nicht nur die Befunde von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018), sondern auch von Crewe et al. (2008), die ebenfalls einen Anstieg im Anstrengungsempfinden feststellen konnten.

Die Relevanz der Motivation lässt sich aus den Ergebnissen dieser Untersuchung weniger beurteilen, da in der Untersuchung auf jegliche Maßnahmen verzichtet wurde, welche die Motivation in besonderem Maße hätten fördern können. So erhielten die Probanden weder verbalen Zuspruch noch hatten sie Aussichten auf Belohnungen. Allerdings lassen sich dadurch die längeren Dauerbelastungen der Testpersonen in den Studien von Marcora und Staiano (2010, S. 765) mit $M = 10.5$ min ($SD = 2.1$ min) und Staiano et al. (2018, S. 12) mit $M = 14.1$ min ($SD = 3.2$ min) im Vergleich zu dieser Untersuchung mit $M = 7.2$ min ($SD = 4.4$ min) erklären. Die Teilnehmenden erhielten verschiedene Geldbeträge, je nachdem wie lange die Belastung ausgehalten wurde (Marcora & Staiano, 2010, S.

765). Außerdem erhielten sie in beiden Studien verbalen Zuspruch, so lange wie möglich der Belastung standzuhalten. Nicht nur das Wissen über die verbleibende Zeit reguliert die Motivation und damit den Abbruch einer Ausdauerbelastung, auch das Wissen über die verstrichene Zeit und zurückgelegte Strecke haben einen Einfluss auf die Motivation. Während der Dauerbelastung wurde die Uhr am Ergometer maskiert, damit die Testpersonen nicht sehen konnten, wie lange die Testung bereits andauert und keine zeitlichen Ziele gesetzt werden konnten. Die geringere Motivation durch das fehlende Wissen über die verstrichene Zeit und Dauer erklärt ebenfalls die unterschiedliche Dauer der TTE Tests im Vergleich mit den Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen den aktuellen Forschungsstand. Sie deuten darauf hin, dass das Gehirn den leistungsbegrenzenden Faktor darstellt, so wie es bereits in vorherigen Untersuchungen (Marcora & Staiano, 2010; Morree et al., 2012; Pageaux, 2014; Pageaux et al., 2014; Staiano et al., 2018) angenommen wurde.

Methodendiskussion

Im Folgenden werden mögliche methodische Defizite im Untersuchungsplan diskutiert. Als erster Aspekt ist der isokinetische Modus während des TTE Tests zu nennen. Dadurch, dass die Leistung in diesem Modus nicht festgelegt ist, kommt es zu starken Schwankungen der Trittleistung. Diese Ungenauigkeiten wurden erwartet und bewusst toleriert, um ein optimales Absolvieren der MVCP Tests zu gewährleisten. Für die optimale Durchführung der MVCP Tests ist der isokinetische Modus notwendig. Ein Umstellen der Modi während der Untersuchung ist unter den gegebenen Bedingungen ausgeschlossen, da die damit verbundene minimale Unterbrechung der Belastung wie in der Studie von Marcora und Staiano (2010) ein entscheidendes Defizit dargestellt hätte. Eine solche Unterbrechung könnte bereits zu einer Erholung der Muskulatur während der Pause führen, was im Folgenden die Interpretation der Ergebnisse eingeschränkt hätte. Es war also wichtig, dass der zweite MVCP Test direkt im Anschluss an den TTE Test durchgeführt wurde, um zu zeigen, dass der Körper in

der Lage ist, unmittelbar im Anschluss an die Erschöpfung bzw. dem Abbruch der Belastung weitere und sogar höhere Leistungen zu erbringen. Es ist trotzdem kritisch festzuhalten, dass die Untersuchungsergebnisse bei einer konstanten TTE Testleistung möglicherweise anders ausgefallen wären und dass die Leistungen im TTE Test aufgrund der Schwankungen möglicherweise nicht vergleichbar sind mit den konstanten Leistungen anderer Studien. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass sich die Ergebnisse komplett widersprechen würden, da Staiano et al. (2018) bereits ein Umstellen der Modi ohne eine Pause gelungen ist und die Befunde der vorliegenden Untersuchung mit deren Befunden übereinstimmen. Trotzdem wäre es wichtig, diese Untersuchung nochmals mit einer konstanten Leistung im TTE Test durchzuführen.

Als weiterer Aspekt ist die Selbsteinschätzung der Testpersonen zu betrachten. Die Selbsteinschätzung hat eine große Bedeutung innerhalb dieser Untersuchung. Der Stufentest verlangt nicht nur das Einschätzen der eigenen Leistung, sondern auch das Einschätzen des dazugehörigen Anstrengungsempfindens. Aus diesem Grund ist zu überprüfen, ob Fehleinschätzungen der Leistungen oder der wahrgenommenen Anstrengungen Auswirkungen auf die Ergebnisse und dadurch resultierend auf die Erkenntnisse haben könnten. Aufgrund der Ergebnisse der Herzfrequenzmessungen und der Laktatkonzentrationen während des Stufentests ist deutlich zu erkennen, dass Fehleinschätzungen aufgetreten sind und die eigene Leistung häufig überschätzt wurde. Da aus den Leistungen des Stufentests die Leistung des anschließenden TTE Tests berechnet wurde, hatten die Fehleinschätzungen automatisch einen Einfluss auf die zu fahrende Leistung im TTE Test und damit auf den weiteren Testverlauf. Außerdem werden die Leistungssprünge zwischen den Stufen bei der Berechnung der TTE Testleistung berücksichtigt. Große Leistungssprünge von Stufe zu Stufe ergeben einen weiteren großen Sprung zum Leistungswert des Dauertests. Das Gleiche gilt in umgekehrter Weise für kleine Sprünge. Durch diese beiden Aspekte können große Unterschiede zwischen den Teilnehmenden auftreten und es ist zu erkennen, dass Fehleinschätzungen einen erheblichen Einfluss

auf die Leistung des anschließenden Dauertests haben. Daraus lassen sich zum Teil die sehr kurzen Dauerbelastungen einiger Athleten erklären. Allerdings haben die Fehleinschätzungen keine weiteren Auswirkungen auf die gewonnenen Erkenntnisse, da der Anstrengungsverlauf trotzdem korrekt gemessen werden konnte und die Befunde dieser Untersuchung mit den Befunden der Studien von Marcora und Staiano (2010) und Staiano et al. (2018) übereinstimmen.

In dieser Untersuchung sollte der leistungsbegrenzende Faktor, der zum Abbruch einer Ausdauerbelastung führt, untersucht werden. Es ist also wichtig, dass die Teilnehmer gefordert wurden, bis an ihre Leistungsgrenzen zu gehen, damit der Zustand der Erschöpfung eintrat und es zum Abbruch der Belastung kam. In dieser Untersuchung wurde die Erschöpfung über die Aussage, dass die Belastung nicht weiter durchgehalten werden kann und der Zustand der Erschöpfung eingetreten ist, definiert. Es musste auf diese Aussage vertraut werden, denn es gab keine weiteren Messverfahren, die sicherstellen konnten, dass der Zustand der Erschöpfung eingetreten war. Es wurde bereits gezeigt, dass die SportlerInnen im Wettkampf höhere Leistungen erbringen als während einer Labormessung (Pageaux, 2014, S. 1319). Deswegen stellt sich die Frage, ob in dem Moment, in dem der Erschöpfungszustand mitgeteilt wurde, die Belastung aufgrund der Erschöpfung nicht mehr durchgehalten werden konnte, oder ob lediglich die Motivation nicht mehr ausreichte, um die Belastung weiter durchzuhalten. Sollte dieser zweite Fall eingetreten sein, bestätigt das die bisherigen Erkenntnisse und die Annahme, das Gehirn als den leistungsbegrenzenden Faktor zu betrachten. Denn auch das psychobiologische Modell nimmt an, dass die Leistung über die Motivation gesteuert wird. Trotzdem soll in dieser Untersuchung der Erschöpfungszustand erreicht werden und es wäre interessant, wenn durch weitere Messungen festgestellt werden könnte, inwieweit der Körper zum Zeitpunkt des Abbruchs der Belastung wirklich erschöpft ist. Für den Erwerb solcher Ergebnisse müsste diese Untersuchung unter Wettkampfbedingungen oder mit einer GegnerIn durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die AthletInnen wirklich ihre maximale Leistung erreichen. Dadurch könnten mögliche auftretende Unterschiede

mit den bisherigen Ergebnissen verglichen und genauer untersucht werden.

Ausblick

Wie in den bisherigen Studien wird auch in dieser Untersuchung angenommen, dass das Gehirn den leistungsbegrenzenden Faktor einer Ausdauerbelastung darstellt. Verantwortlich für diese Annahme ist zum einen das Anstrengungsempfinden, welches im Laufe der Dauerbelastung maximal angestiegen ist und einen signifikanten Zusammenhang mit der Dauer des TTE Tests aufweist. Das Anstrengungsempfinden wurde in dieser Untersuchung mit der Borg-RPE-Skala (Borg, 2004, S. 1016) gemessen. Die Borg-RPE-Skala ermöglicht es, das Anstrengungsempfinden objektiv darzustellen. Trotzdem handelt es sich bei der wahrgenommenen Anstrengung um eine subjektive Empfindung und auch Staiano et al. (2018) haben bereits angemerkt, dass die Wahrnehmung bis jetzt wenig untersucht sei und weiteres Wissen notwendig wäre, um die Prozesse und Abläufe im Gehirn besser verstehen zu können. Aus diesem Grund wäre es interessant, in weiteren Untersuchungen die Gehirnaktivitäten während der Belastung zu messen. Möglicherweise lässt sich der Anstieg des Anstrengungsempfindens in diesen Gehirnaktivitäten wiederfinden und die Vorgänge und Prozesse während des Zustands der Erschöpfung könnten genauer betrachtet und untersucht werden. Dieses Wissen würde neue Erkenntnisse und Erklärungen für diesen Forschungsbereich schaffen.

Die Motivation stellt einen weiteren sehr wichtigen Faktor dar, der das Gehirn und damit den Abbruch einer Ausdauerbelastung reguliert. Aus diesem Grund wäre es wünschenswert, in weiteren Untersuchungen diesen Aspekt genauer zu betrachten. Wie erwähnt, wurde bereits gezeigt, dass aufgrund der Motivation im Wettkampf höhere Leistungen als während einer Labortestung erreicht werden (Pageaux, 2014, S. 1319). Es wäre sinnvoll, die Untersuchung unter realen Wettkampfbedingungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass genügend Anreize vorhanden sind, Höchstleistungen zu erreichen und auch äußere Faktoren, wie beispielsweise Zuschauer, zu einer maximalen Motivation beitragen. Da das Durchführen einer Untersuchung während eines Wettkampfes

kaum möglich erscheint, wäre zu überlegen, in weiteren Untersuchungen eine Wettkampfsituation durch eine weitere Testperson zu konstruieren oder unterschiedlich motivierende situative Bedingungen im Hinblick auf ihren Einfluss bei ähnlichen Studien zu untersuchen.

In der Untersuchung von Staiano et al. (2018) wurden bereits Messungen durchgeführt, welche die isometrische Muskelkraft vor und nach der Dauerbelastung untersucht haben. Nicht gemessen hingegen wurde die Muskelaktivität während der Dauerbelastung. In einer weiteren Untersuchung könnte die Muskelaktivität während der Belastung beobachtet werden. Es könnte überprüft werden, ob und zu welchem Zeitpunkt es hier zu Veränderungen kommt und inwiefern diese als frühzeitige Anzeichen für den Abbruch der Belastung zu bewerten sind.

In einigen Studien wurde bereits der Aspekt der mentalen Ermüdung und dessen Auswirkungen auf die Ausdauerbelastung behandelt und ein Zusammenhang zwischen der mentalen Ermüdung und der Abnahme der Leistungsfähigkeit festgestellt, der über die Zunahme des Anstrengungsempfindens vermittelt wird (Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2013; Pageaux et al., 2014). Ein möglicher Ansatz für weitere Untersuchungen wäre herauszufinden, inwieweit Mentaltraining zu einer Reduktion des Anstrengungsempfindens und damit zur Verbesserung der Leistung beitragen könnte und ob es möglich wäre, das Gehirn als leistungsbegrenzenden Faktor auszuschalten beziehungsweise zu überwinden, um dadurch höhere Leistungen zu erreichen. Wenn dem Gehirn jedoch eine Schutzfunktion für den übrigen Organismus im Sinne des Central Governors (Noakes, 2011; Noakes et al., 2004, 2005) zukommt, ist zu diskutieren, inwiefern mit dem Bestreben, diese Schutzfunktion zu überwinden, ethische Grenzen überschritten werden.

Literatur

Amann, M. & Dempsey, J. A. (2009). When fatiguing cycling muscles complain, the brain insightfully responds [Elektronische Version]. *Physiology News*, 75, 13–14.

Baumann, S. (2009). *Psychologie im Sport* (5. überarbeitete Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer Verlag.

Beyer, E. (Hrsg.) (1987). *Wörterbuch der Sportwissenschaft. Deutsch, Englisch, Französisch*. Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.

Birch, C. O. (2016). *How does mental and physical fatigue affect a rugby player's force production during scrummaging?* Sweden: Swedish School of Sport and Health Sciences, Department of Sport and Health Sciences.

Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Champaign: Human Kinetics.

Borg, G. (2004). Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt*, 101(15), 1016-1021.

Brandstätter, V., Schüler, J., Puca, R. M. & Lozo, L. (2018). *Motivation und Emotion: Allgemeine Psychologie für Bachelor* (2., überarbeitete Aufl.). Berlin: Springer.

Brehm, J. W., & Self, E. A. (1989). The intensity of motivation. *Annual Reviews of Psychology*, 40, 109-131.

Brockhaus (2007). *Sport: Sportarten und Regeln, Wettkämpfe und Athleten, Training und Fitness* (6., überarbeitete Aufl.). Mannheim: Brockhaus GmbH.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd. edition) New York: Lawrence Erlbaum Associates.

Cook, D. B., Lange, G., Ciccone, D. S., Liu, W.-C., Steffener, J. & Natelson, B. H. (2004). Functional imaging of pain in patients with primary fibromyalgia. *The Journal of Rheumatology*, 31(2), 364-378.

Crewe, H., Tucker, R. & Noakes, T. D. (2008). The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *European Journal of Applied Physiology*, 103(5), 569-577. doi: 10.1007/s00421-008-0741-7.

Gabler, H., Nitsch, J. R. & Singer, R. (2000). Sportpsychologie - Ein Überblick. In H. Gabler, J. R. Nitsch & R. Singer (Hrsg.), *Einführung in die Sportpsychologie – Teil 1: Grundthemen* (S. 11-43). (3. erweiterte und überarbeitete Aufl.). Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.

Gandevia, S.C. (2001). Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725-1789. doi: 10.1152/physrev.2001.81.4.1725.

Geyer, F. G. (2011). *Effekte der Pedalachsenpositionierung unter dem Fuß auf physiologische Parameter*. Wissenschaftliche Arbeit, Willstätt: Bund Deutscher Radfahrer a. Frankfurter Main. Zugriff am 11.09.2019 unter <https://www.wrsv.de/component/phocadownload/category/6-downloads-trainerforum?download=168:florian-geyer-effekte-der-pedalachsenpositionierung>

Hepple, R. T. (2002). The role of O₂ supply in muscle Fatigue. *Canadian Journal of Applied*

- Physiology*, 27(1), 56-69. doi: 10.1139/h02-004.
- Hill, A. V., Long, C. H. N. & Lupton, H. (1924). Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen: parts VII–VIII. *Proceedings of the Royal Society London B: Biological Science*, 97(682), 155–176. doi:10.1098/rspb.1924.0048.
- Kayser, B. (2003). Exercise starts and ends in the brain. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3-4), 411-419. doi: 10.1007/s00421-003-0902-7.
- Löllgen, H. (2004). Das Anstrengungsempfinden (RPE, Borg-Skala). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 55(11), 299-300. Zugriff am 13.10.2019 unter <https://www.germanjournal-sportsmedicine.com/fileadmin/content/archiv2004/heft11/299-300.pdf>.
- Marcora, S. M. (2008). Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? *European Journal of Applied Physiology*, 104, 929-931. doi: 10.1007/s00421-008-0818-3.
- Marcora, S. M. (2010). Counterpoint: Afferent Feedback From Fatigued Locomotor Muscles Is Not An Important Determinant Of Endurance Exercise Performance. *Journal of Applied Physiology*, 108(2), 454-456. doi: 10.1152/jap-physiol.00976.2009a
- Marcora, S. M. & Bosio, A. (2007). Effect of exercise-induced muscle damage on endurance running performance in humans. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 17(6), 662-671. doi: 10.1111/j.1600-0838.2006.00627.
- Marcora, S. M., Staiano, W. & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, 106, 857-864. doi: 10.1152/jap-physiol.91324.2008.
- Marcora, S. M. & Staiano, W. (2010). The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *European Journal of Applied Physiology*, 109, 763-770. doi: 10.1007/s00421-010-1418-6.
- McCormick, A., Meijen, C., Anstiss, P. A. & Jones, H. S. (2018). Self-regulation in endurance sports: theory, research, and practice. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 12(1), 235-264. doi: 10.1080/1750984X.2018.1469161.
- Morree, H. M., Klein, Ch. & Marcora, S. M. (2012). Perception of effort reflects central motor command during movement execution. *Society for Psychophysical Research*, 49, 1242-1253. doi: 10.1111/j.1469-8986.2012.01399.x.
- Noakes, T. D. (1997). 1996 J.B. Wolfe Memorial Lecture. Challenging beliefs: ex Africa semper aliquid novi. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(5), 571–590. PMID: 9140893.
- Noakes, T. D. (2004). Linear relationship between the perception of effort and the duration of constant load exercise that remains. *Journal of Applied Physiology*, 96(4), 1571–1573. doi: 10.1152/jap-physiol.01124.2003. PMID: 15016797.
- Noakes, T. D., St. Clair Gibson, A. & Lambert, E. V. (2004). From catastrophe to complexity: a novel model of integrative centralneural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. *British Journal of Sports Medicine*, 38(4), 511–514. doi: 10.1136/bjism.2003.009860. PMID: 15273198.
- Noakes, T. D., St. Clair Gibson, A. & Lambert, E. V. (2005). From catastrophe to complexity: a novel model of integrative centralneural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *British Journal of Sports Medicine*, 39(2), 120–124. doi:10.1136/bjism.2003.010330. PMID: 15665213.
- Noakes, T. D. (2007). The Central Governor Model of Exercise Regulation Applied to the Marathon. *Sports Medicine*, 37(4-5), 374-377. doi: 10.2165/00007256-200737040-00026.
- Noakes, T. D. (2008). Rating of perceived exertion as a predictor of the duration of exercise that remains until exhaustion. *British Journal of Sports Medicine*, 42(7), 623–624.
- Noakes, T. D. (2011). Time to move beyond a brainless exercise physiology: the evidence for complex regulation of human exercise performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 36, 23–35.
- O’Conner, P. J. (1993). Psychologische Faktoren der Ausdauerleistungsfähigkeit. In R. J. Shephard & P.-O. Astrand (Hrsg.), *Ausdauer im Sport* (147-152). Köln: Deutscher Ärzte Verlag.
- Pageaux, B. (2014). The Psychobiological Model of Endurance Performance: An Effort-Based Decision-Making Theory to Explain Self-Paced Endurance Performance. *Sports Medicine*, 44(9), 1319-1320. doi: 10.1007/s40279-014-0198-2.
- Pageaux, B., Lepers, R., Dietz, K. C. & Marcora, S. M. (2014). Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *European Journal for Applied Physiology*, 114(5), 1095-1105. doi: 10.1007/s00421-014-2838-5.
- Pageaux, B., Lepers, R. & Marcora, S. M. (2013). Prolonged Mental Exertion Does Not Alter Neuromuscular Function of the Knee Extensors. *Medicine and science in sports and exercise*, 45(12), 2254-2264. doi: 10.1249/MSS.0b013e31829b504a.
- Staiano, W., Bosio, A., de Morree, H.M., Rampinini, E. & Marcora, S. (2018). The cardinal exercise stopper: Muscle fatigue, muscle

- pain or perception of effort? *Chapter in Progress in brain research*, 1-26. doi: 10.1016/bs.pbr.2018.09.012
- St. Clair Gibson, A. & Noakes T. D. (2004). Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *British Journal of Sports Medicine*, 38, 797– 806. doi:10.1136/bjism.2003.009852.
- Triplett, N. (1898). The dynamic factors in pace-making and competition. *American Journal of Psychology*, 9, 507-533.
- Ulmer, H. V. (1996). Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia*, 52(5), 416–420. doi:10.1007/BF01919309. PMID:8641377.
- Weineck, J. (2010). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (16. durchgesehene Auflage). Balingen: Spitta Verlag.

Anhang

Tabelle 1
Personendaten und Messwerte der MVCP- und TTE-Tests

Vp	MVCP1					TTE					MVCP2				
	Alter	Größe [cm]	Gewicht [kg]	P [W]	TFQ [min ⁻¹]	P _{Vorgabe} [W]	P _{Mittel} [W]	P _{Abbruch} [W]	t [min]	RPE _{1min}	RPE _{Abbruch}	HF _{1min} [min ⁻¹]	HF _{Abbruch} [min ⁻¹]	P [W]	TFQ [RPM]
1	30	181	78	995	102	280	299	298	15,15	14	20	157	179	591	88
2	24	185	79	1098	100	290	303	187	12,30	16	20	165	182	477	69
3	30	180	75	784	96	315	314	300	3,30	16	19	170	180	406	88
4	35	168	68	768	89	285	293	190	9,47	15	20	166	185	452	87
5	35	183	70	811	97	330	321	175	3,08	15	17	170	175	564	81
6	24	186	79	918	98	290	327	129	5,50	15	19	176	191	578	87
7	24	173	65	727	88	250	262	265	8,46	16	20	164	196	465	82
8	29	180	67	851	88	330	351	268	3,41	17	19	174	183	510	85
9	26	196	83	979	100	440	445	336	4,26	15	20	168	184	482	79
<i>M</i>		181	74	881	95	312	324	239	7	15	19	168	184	503	83
<i>SD</i>		8	6	124	6	54	52	70	4	1	1	6	6	63	6