

Interfakultärer Fachbereich für Sport- und Bewegungswissenschaften/USI  
Paris Lodron Universität Salzburg



# **Einfluss von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen**

## **Diplomarbeit**

zur Erlangung des Magistergrades

eingereicht von

**Martin Breitsching**

am 27.01.2018

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Erich Müller

## Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich kurz bei jenen Personen bedanken, die mir mein Studium ermöglicht und/oder mich bei der Verwirklichung dieser Arbeit unterstützt haben.

An erster Stelle gebührt mein Dank meiner Familie. Sie hat mich bei all meinen Vorhaben immer unterstützt und ich konnte mich immer auf ihre Hilfe verlassen. Ich bin froh, so einen starken Rückhalt in meiner Familie zu haben. Herzlichen Dank dafür!

Ein weiteres großes Dankeschön gilt meiner früheren Mathematiklehrerin Frau Mag. Kathrin Sojer. Sie hat mich tatkräftig und mit einer unglaublichen Selbstverständlichkeit bei meiner Vorbereitung für die Aufnahmeprüfung zum Sportstudium unterstützt. Liebe Kathrin, danke, dass du mir mein Studium ermöglicht hast!

Bei meiner Freundin bedanke ich mich für ihre Geduld und ihr Verständnis, wenn ich einmal nicht so viel Zeit für sie hatte. Liebe Julia, danke für deine Gesellschaft und die schönen Momente, die wir miteinander verbringen konnten.

Weiters möchte ich mich noch bei Frau Mag. Monika Stadlmann bedanken. Sie hat mir maßgeblich bei den Messungen geholfen und in meiner Zeit als ihr Studienassistent im Ausdauerlabor konnte ich viele Erfahrungen sammeln, von denen ich mit Sicherheit in meinem weiteren Werdegang profitieren werde. Dankeschön!

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei Herrn Univ. Prof. Dr. Erich Müller für die Themenvergabe und die Betreuung während der Verfassung der vorliegenden Arbeit bedanken. Auch einen herzlichen Dank dafür!

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet und die benutzten Quellen beziehungsweise wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

(Ort und Datum)

---

(Unterschrift)

## Abstract (Deutsch)

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine einfach verblindete Studie im Cross-over Design unter Laborbedingungen durchgeführt. 20 Probanden wurden dazu nach einem Einstufungstest randomisiert in zwei Gruppen aufgeteilt. Gruppe 1 (Alter:  $28.7 \pm 8.9$  Jahre, Größe:  $179 \pm 9$  cm, Gewicht:  $75.5 \pm 8.4$  kg) durchlief zuerst einen 45-minütigen Dauertest bei einer Intensität von ca. 2 mmol/l Blutlaktatkonzentration mit einem anschließenden Rampenprotokoll bis zur Erschöpfung im geerdeten Zustand durch und wiederholte den Test im Abstand von einer Woche im nicht-geerdeten Zustand. Gruppe 2 (Alter:  $31.7 \pm 11.4$  Jahre, Größe:  $176 \pm 5$  cm, Gewicht:  $75.6 \pm 6.3$  kg) durchlief die Tests in umgekehrter Erdungsreihenfolge wie Gruppe 1. Während des Tests wurden Atemgase, Blutlaktatkonzentration, Herzfrequenz und subjektives Belastungsempfinden mitgemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Gruppen im geerdeten Zustand im Vergleich zum nichtgeerdeten Zustand nach 15 und 45 Minuten in der Dauerbelastung eine Reduktion in der Sauerstoffaufnahme aufwiesen ( $41.1 \pm 7.1$  ml/min/kg (g) vs.  $42.2 \pm 7.8$  ml/min/kg (ng),  $p=.020$ ,  $\rho\eta^2=.254$ ; bzw.  $41.0 \pm 7.4$  ml/min/kg (g) vs.  $42.4 \pm 8.0$  ml/min/kg (ng),  $p=.003$ ,  $\rho\eta^2=.406$ ). Darüber hinaus wurde eine signifikant geringere Ventilation nach 15 Minuten Dauerbelastung im geerdeten Zustand festgestellt ( $77.7 \pm 16.7$  l/min (g) vs.  $80.3 \pm 17.7$  l/min (ng);  $p=.030$ ,  $\rho\eta^2=.225$ ). Zu den restlichen Messzeitpunkten während des Dauertests und am Ende der Rampe zeigten sich Trends zu einer niedrigeren Sauerstoffaufnahme bzw. Ventilation im geerdeten Zustand. Aus den Ergebnissen wurde geschlossen, dass Erdung zu einem geringeren Energieverbrauch und somit zu einer ökonomischeren Arbeitsweise führt. Ursache dafür könnte eine Reduktion der Atemarbeit unter geerdeten Bedingungen sein.

**Stichwörter:** Erdung, Ausdauer, Ausdauerleistungsfähigkeit, Skibergsteigen

## Abstract (English)

The aim of the present study was to investigate the influence of grounding/earthing on the endurance performance in ski mountaineering. For this purpose, a single-blind crossover study under laboratory conditions was conducted. After an initial test, 20 subjects were randomly assigned to two groups. Group 1 (age:  $28.7 \pm 8.9$  years, height:  $179 \pm 9$  cm, weight:  $75.5 \pm 8.4$  kg) first performed a 45-minute submaximal exercise protocol at approximately 2 mmol/l bloodlactate with an ensuing incremental exercise protocol until exhaustion under grounded conditions and repeated the same test after one week under ungrounded conditions. Group 2 (age:  $31.7 \pm 11.4$  years, height:  $176 \pm 5$  cm, weight:  $75.6 \pm 6.3$  kg) performed the same tests in the reversed order. During the test, breathing gases, bloodlactate, heart rate and perceived exertion were measured. The results showed that the groups had a significantly lower oxygen consumption after 15 and 45 minutes in the submaximal exercise protocol under the grounded (g) condition compared to the ungrounded condition (ug) ( $41.1 \pm 7.1$  ml/min/kg (g) vs.  $42.2 \pm 7.8$  ml/min/kg (ug),  $p = .020$ ,  $\rho\eta^2 = .254$ ; and  $41.0 \pm 7.4$  ml/min/kg (g) vs.  $42.4 \pm 8.0$  ml/min/kg (ug),  $p = .003$ ,  $\rho\eta^2 = .406$  respectively). Additionally, a significant lower ventilation after 15 minutes in the submaximal exercise protocol was observed under the grounded condition compared to the ungrounded condition ( $77.7 \pm 16.7$  l/min (g) vs.  $80.3 \pm 17.7$  l/min (ug);  $p = .030$ ,  $\rho\eta^2 = .225$ ). At the other measuring points during the submaximal exercise protocol and at the end of the incremental exercise protocol, a trend towards a lower oxygen consumption and lower ventilation was observed under the grounded condition. It was concluded that grounding leads to a reduction in the energy-demand and therefore to a more economical way of moving. This may be due to reduced breathing work under grounded conditions.

**Keywords:** grounding, endurance, endurance capacity, ski mountaineering

# Inhalt

1	Einleitung .....	8
2	Theoretischer Hintergrund.....	9
2.1	Erdung.....	9
2.1.1	Begriffsdefinition.....	9
2.1.2	Erdung aus elektrischer Perspektive .....	10
2.1.3	Erdung und Stressregulation .....	11
2.1.4	Erdung und Regeneration und Wundheilung.....	14
2.1.5	Erdung und sportliche Aktivität .....	15
2.2	Ausdauer/Ausdauerleistungsfähigkeit.....	17
2.2.1	Begriffsdefinition .....	17
2.2.2	Prozesse der Energiebereitstellung.....	19
2.2.3	Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit.....	22
2.3	Anforderungsprofil Skibergsteigen.....	38
2.4	Einflussmöglichkeiten von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen.....	41
2.5	Forschungsdefizit.....	43
3	Fragestellung und Hypothesen .....	45
4	Methodik.....	47
4.1	Untersuchungsdesign und Stichprobe .....	47
4.1.1	Stichprobe .....	47
	Untersuchungsdesign .....	47
4.1.2	Testprotokolle .....	49
4.1.3	Herstellung der Erdungssituation im Labor.....	50
4.1.4	Standardisierung .....	51

4.2	Messverfahren.....	52
4.2.1	Anthropometrische Messungen.....	52
4.2.2	Gasstoffwechselformung.....	52
4.2.3	Laktatdiagnostik.....	53
4.2.4	Herzfrequenz.....	53
4.2.5	Subjektives Belastungsempfinden.....	53
4.3	Statistik.....	54
4.3.1	Deskriptive Statistik.....	54
4.3.2	Analytische Statistik.....	54
5	Ergebnisse.....	55
5.1	Spirometrie.....	55
5.1.1	Sauerstoffaufnahme.....	55
5.1.2	Respiratorisches Exchange Ratio (RER).....	56
5.1.3	Atemfrequenz (AF) und Ventilation.....	56
5.2	Laktat.....	57
5.3	Herzfrequenz.....	59
5.4	Subjektives Belastungsempfinden.....	59
5.5	Maximale erreichte Geschwindigkeit.....	60
6	Interpretation.....	61
7	Zusammenfassung.....	69
8	Literatur.....	71
9	Abbildungsverzeichnis.....	76
10	Tabellenverzeichnis.....	77

# 1 Einleitung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss von Erdung (= dem Herstellen einer leitfähigen Verbindung zwischen Mensch und Erdpotential) auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen zu untersuchen. Der Bereich der erdungsbedingten Einflüsse auf den menschlichen Organismus ist ein sehr junges Forschungsgebiet, und die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen zu der Thematik ist sehr begrenzt. Die bestehenden Studienergebnisse legen unter anderem die Vermutung nahe, dass Erdung Potential in den Bereichen Stressregulation und Regeneration hat. Ob sich Erdung auch auf die motorische Leistungsfähigkeit auswirkt, wurde kaum untersucht, ist aber basierend auf den Ergebnissen von anderen Arbeiten zum Thema Erdung durchaus denkbar. Die vorliegende Arbeit behandelt somit ein Thema mit einem erheblichen Forschungsdefizit und einem großen Potential an Anwendungsgebieten.

Die Aufbereitung der Thematik beginnt mit der Darstellung des theoretischen Hintergrundes. Zunächst wird der aktuelle Forschungsstand zum Thema Erdung aufgearbeitet. Danach werden der Bereich Ausdauer und bekannte Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit sowie die physiologischen Anforderungen der Sportart Skibergsteigen dargestellt. In weiterer Folge wird diskutiert, wie sich Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen auswirken könnte. Basierend auf diesen Überlegungen werden schlussendlich die zentrale Fragestellung und die Hypothesen, die der folgenden Untersuchung zu Grunde liegen, abgeleitet.

Im Weiteren wird die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung vorgestellt. Zunächst wird die verwendete Methodik beschrieben. Danach werden die Ergebnisse dargestellt. Diese Ergebnisse werden anschließend im Zuge der Interpretation diskutiert und auf deren Stimmigkeit mit dem theoretischen Hintergrund überprüft. Abschließend werden Schlussfolgerungen aus den Studienergebnissen gezogen und deren Relevanz abgewogen sowie Anregungen für zukünftige Untersuchungen getätigt.

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Erdung

#### 2.1.1 Begriffsdefinition

Für das Verständnis dieser Arbeit ist es wichtig, den Begriff *Erdung* vorab genau zu definieren. Relativ bekannt ist er aus der Elektrotechnik. Dort versteht man unter Erdung das Ableiten von elektrischen Spannungen in das Erdreich. Dabei werden elektrisch leitfähige Teile mithilfe eines sogenannten Erders mit dem Erdboden verbunden. Erder bestehen ebenfalls aus elektrisch leitenden Materialien und sind daher in der Lage, mögliche auftretende Spannungen an das Erdreich abzugeben. Das Erden verhindert, dass sich beispielsweise Haushaltsgeräte elektrostatisch aufladen können, und schützt dadurch Personen vor elektrischen Schlägen. Deshalb weisen elektrische Haushaltsgeräte in der Regel neben einer Phase und einem Nullleiter auch einen Schutzleiter (= Erdleiter) auf, welcher eventuell auftretende Körperströme zur Erde ableitet. Ein Körper gilt also als geerdet, wenn zwischen ihm und dem Erdreich eine elektrisch leitende Verbindung besteht (*Physik. Grundstock des Wissens*, 2000).

Das gleiche Prinzip liegt dem Erden des menschlichen Körpers zu Grunde. Es geht ebenso darum, eine leitfähige Verbindung zwischen Mensch und Erdboden herzustellen. Steht eine Person beispielsweise barfuß auf einem Wald- oder Wiesenboden, besteht aufgrund der Leiteigenschaften der menschlichen Haut und des Erdbodens eine solche Verbindung. Um einen geerdeten Zustand eines Menschen herzustellen, ist aber ein Barfußkontakt mit dem Erdboden nicht zwingend notwendig. Analog zum Erden von technischen Geräten kann auch ein Mensch über einen elektrischen Leiter mit dem Erdpotential verbunden werden. Solange ein Mensch also entweder im direkten Erdkontakt oder über eine elektrisch leitfähige Verbindung mit dem Erdboden verbunden ist, gilt er als geerdet.

Über den Großteil seiner Entwicklungsgeschichte stand der Mensch im direkten Kontakt mit dem Erdboden und befand sich über diesen Zeitraum im ständigen Ladungsaustausch mit diesem. Das heißt, dass sich der menschliche Organismus über weite Strecken seiner Entwicklung in einem natürlichen und relativ stabilen bioelektrischen Umwelt befand (Chevalier, Sinatra, Oschman, Sokal, & Sokal, 2012). In unserer modernen Lebenswelt finden jedoch zunehmend mehr isolierende Materialien Verwendung, die den

Ladungsaustausch zwischen Erde und Mensch unterbrechen. Verschiedene Kunststoffe, wie sie sich beispielsweise in modernem Schuhwerk befinden, aber auch trockenes Holz, Glas, Asphalt, etc. besitzen nur wenige oder keine freien Ladungsträger und wirken daher als Isolatoren (Hoche & Meyer, 2011). Durch diese Materialien wird der Ladungsaustausch zwischen Mensch und Erde unterbrochen, und der Mensch ist von seiner natürlichen bioelektrischen Umgebung abgeschirmt. Einige Wissenschaftler vermuten, dass sich dieser fehlende Ladungsaustausch negativ auf den menschlichen Organismus auswirken könnte. In diesem Zusammenhang wurden bereits einige Studien durchgeführt, die die prinzipielle Möglichkeit des Erdens des Menschen sowie die Auswirkungen des Erdens auf den menschlichen Organismus und dessen Physiologie untersuchten. Die Erkenntnisse aus diesen Studien bestärken den Verdacht auf erdungsbedingte Einflüsse auf den menschlichen Organismus und sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

### **2.1.2 Erdung aus elektrischer Perspektive**

Unsere Erde weist an der Erdoberfläche eine zeitlich gemittelte Ladung von  $-6 \cdot 10^5$  C auf (Demtröder, 2013). Man geht davon aus, dass diese Ladung in erster Linie durch Blitzeinschläge auf der Erdoberfläche, aber auch durch Solarwinde und ionosphärische Winde aufrechterhalten wird. Durch ihre negative Überschussladung ist die Erde in der Lage, freie Elektronen an ihre Umgebung abzugeben.

Um diese Ladungen aufnehmen zu können, muss der menschliche Körper elektrisch leitfähig sein. Die Tatsache, dass Menschen einen elektrischen Schlag bekommen können, weist bereits darauf hin, dass dies der Fall ist. Tatsächlich ist es jedoch so, dass vor allem die oberste Hautschicht, die sogenannte Epidermis, einen relativ hohen Widerstand von 1 – 100 k $\Omega$  aufweist und somit als eher schlechter Leiter gilt. Die Leitfähigkeit verbessert sich jedoch in Abhängigkeit von Feuchtigkeitsgehalt, Kontaktfläche mit der Stromquelle und Hautbeschaffenheit (ältere Haut, Verletzungen, Schürfungen). Zudem durchdringen Haare und Schweißdrüsen die Epidermis und schaffen somit Kanäle zu den elektrisch besser leitfähigen unteren Hautschichten, der Dermis und Subcutis (Vollmer & Möllmann, 2016). Der sogenannte innere Widerstand des menschlichen Körpers ist wesentlich geringer; er beläuft sich auf ca. 300 (Fish & Geddes, 2009) bzw. 500

$\Omega$  (Vollmer & Möllmann, 2016) und wird vor allem durch das Verhältnis von Fett- zu Muskelmasse und dem Flüssigkeitsgehalt bestimmt. Prinzipiell gilt der menschliche Körper also als leitfähig und erfüllt somit die Grundvoraussetzung um geerdet werden zu können.

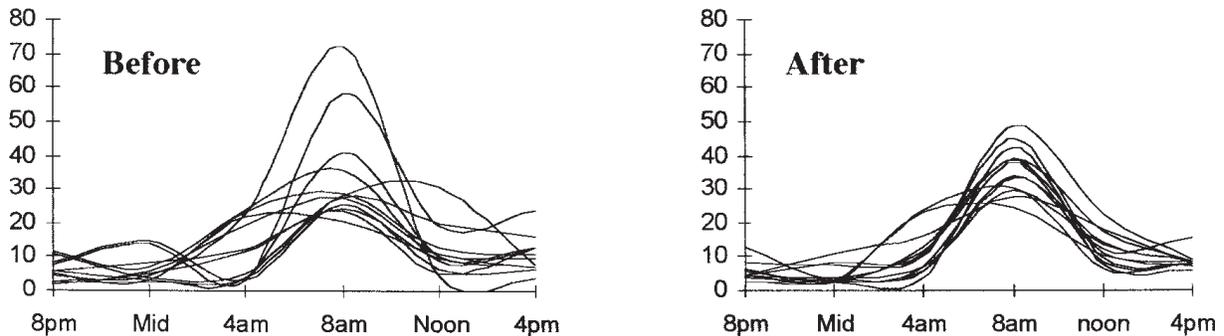
Als Nächstes stellt sich die Frage, ob ein elektrischer Austausch zwischen Mensch und Erde messbar ist. Die Studienlage hierzu ist allerdings eher spärlich. Eine Studie, die den elektrischen Austausch zu beweisen versuchte, ist jene von Applewhite (2005). In dieser Studie wurde einem Probanden elektrische Spannung künstlich zugeführt. Es konnte ein deutlicher Drop im 60 Hz Bereich (= die Netzfrequenz in der elektrischen Energieversorgung Nordamerikas) festgestellt werden, wenn der Proband über leitende Patches oder Betttücher geerdet wurde. Dies zeigt, dass dem menschlichen Körper künstlich hinzugefügte elektrische Spannungen abgeleitet werden können. Chamberlin, Smith, Chirgwin, Appasani und Rioux (2014) konnten ihrerseits nachweisen, dass ein Ladungsaustausch mit einer Stärke von geringer als 10 nA zwischen geerdeten Probanden und Erde stattfand, wenn diese auf einem geerdeten Leintuch lagen. Diese Ströme korrelierten mit Bewegung und die Autoren schlossen daraus, dass es sich dabei um einen Ausgleich von elektrostatischer Ladung handelt. Neben dem bewegungsbedingten Stromfluss konnte jedoch keine weitere Information aus den Daten abgelesen werden. Zusammenfassend kann soweit gesagt werden, dass ein Ladungsaustausch zwischen Mensch und Erde prinzipiell möglich ist und bis zu einem gewissen Grad auch messbar zu sein scheint.

Dies wirft nun die Frage auf, ob Erdung einen Einfluss auf den menschlichen Organismus hat. Tatsächlich gibt es eine Reihe von Studien, die einen möglichen Zusammenhang zwischen Erdung und menschlicher Physiologie aufzeigen.

### **2.1.3 Erdung und Stressregulation**

Erdung scheint eine Einflusskomponente auf die Stressregulation darzustellen. Häufig wird in diesem Kontext auf die Studie von Ghaly und Teplitz (2004) hingewiesen. In dieser Studie wurde der Einfluss von geerdetem Schlafen über einen Zeitraum von acht Wochen auf die 24-Stunden Cortisol-Profile von zwölf Probanden/innen, die über Schlafstörungen, chronische Schmerzen und Stress klagten, untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Probanden/innen unterschiedlich auf die Intervention reagierten. Ein Teil tendierte zu höheren Cortisol-Werten beim Eingangstest gegenüber dem Ausgangstest

während bei anderen eher das Gegenteil der Fall war. Ghaly und Teplitz argumentierten in diesem Fall im Sinne einer Normalisierung des circadianen Cortisol-Rhythmus. Dies soll heißen, dass sich die Cortisol-Profile der Probanden/innen an einen angenommenen Idealwert angenähert hatten. Nach Betrachtung von Abbildung 1 aus der Studie von Ghaly und Teplitz scheint diese Erklärung durchaus plausibel.



**Abb. 1:** Circadiane Cortisol-Profile der einzelnen Probanden/innen vor und nach achtwöchigem Erden während des Schlafs (Ghaly & Teplitz, 2004).

Darüber hinaus berichteten Probanden/innen von verbessertem Schlaf, niedrigeren chronischen Schmerzen und weniger Stressempfinden nach der Intervention. Allerdings muss an dieser Stelle auch angemerkt werden, dass es sich bei der Studie um keine Blindstudie handelte und auch keine Kontrollgruppe getestet wurde. Daher ist ein möglicher Placeboeffekt in der Studie von Ghaly und Teplitz nicht auszuschließen.

Die Ergebnisse von Ghaly und Teplitz zeigen sich jedoch schlüssig mit anderen Forschungsergebnissen, die ebenfalls auf eine stressregulierende Wirkung von Erdung hinweisen. Sinatra und Chevalier (2011) stellten beispielsweise fest, dass die Herzfrequenzvariabilität (englisch: heart rate variability, HRV) während vierzigminütigen Erdens stetig zunimmt. In der Kontrollgruppe war dies nicht der Fall. Unter HRV versteht man Schwankungen in den Zeitabständen aufeinanderfolgender Herzschläge. Die Herzfrequenz wird über das autonome Nervensystem gesteuert. Die HRV ist das Resultat eines ständigen Wechselspiels von Sympathikus und Parasympathikus. Beim gesunden Menschen weist eine hohe HRV auf einen dominanten Parasympathikus hin, was wiederum ein Zeichen für Regeneration und Entspannung ist. Negative Emotionen wie Stress, Schmerz, Ängstlichkeit, etc. führen hingegen zu einer nachweislich reduzierten HRV

(Sinatra & Chevalier, 2011). Demnach bestätigen auch diese Forschungsergebnisse die Möglichkeit einer stressregulierenden Wirkung von Erdung.

Erst kürzlich führten Passi, Doheny, Gordin, Hinssen und Palmer (2017) eine Studie zum Einfluss von Erdung auf die HRV bei Frühgeburten durch. Vor dem Zeitpunkt der Erdung stellten sie auf der Haut aller Neugeborenen eine Wechselspannung von 60 Hz und  $415.3 \pm 277.5$  mV fest. Diese Spannung nahm mit dem Zeitpunkt der Erdung um 95% auf  $19.1 \pm 16.8$  mV ab. Gleichzeitig wurde die Power im HF-Band (high frequency-Band) aus der HRV-Analyse um 67% gesteigert. Die Power des HF-Bandes ist eine Kenngröße für die Aktivität des Vagusnervs, welcher der größte Nerv des Parasympathikus ist. Passi et al. (2017) schlossen aus diesen Ergebnissen, dass Erden die Stressresistenz verbessern und die Säuglingssterblichkeit bei Frühgeburten verringern könnte.

Ein weiterer Indikator für die Aktivierung einer Person ist der sogenannte Hautleitwert. Er beschreibt die elektrische Leitfähigkeit der Haut und ist in erster Linie abhängig von der Schweißabsonderung, da eine hohe Schweißabsonderung einen hohen Hautleitwert zur Folge hat. Eine hohe Aktivierung über den Sympathikus führt in der Regel zu einer gesteigerten Schweißsekretion und dadurch zu einem höheren Hautleitwert. Chevalier (2010) konnte nachweisen, dass Erdung zu einem Absinken des Hautleitwertes führt. Er schließt daraus, dass Erdung die Aktivität des Parasympathikus steigert und/oder den Sympathikus hemmt. Auch diese Studie zeigt sich demnach schlüssig mit den bereits erwähnten Studienergebnissen und bekräftigt den Verdacht auf eine stressregulierende Wirkung von Erdung.

Weiters führten Chevalier, Mori und Oschman (2006) eine Studie durch, in der sie die Auswirkung von Erdung auf EEG, Oberflächen-EMG des rechten und linken Trapezius, Blutvolumenpuls und Herzfrequenz untersuchten. Vor allem SEMG, Herzfrequenz und Blutvolumenpuls können auch als Marker für die Aktivierung und das Gleichgewicht zwischen Sympathikus und Parasympathikus verwendet werden (Chevalier et al., 2006). Erdung führte ausschließlich im EEG der linken Hemisphäre zu abrupten Veränderungen in den Alpha-, Beta-, Theta- und Delta-rms-Werten des EEG. Ähnlich wie bei Ghaly und Teplitz (2004) waren die Veränderungen nicht einheitlich: Bei einigen Probanden kam es zu einem Anstieg der rms-Werte, bei anderen sanken sie. Chevalier et al. argumentierten ebenfalls, dass dies Anzeichen für einen Trend zu einer Normalisierung sein könnten.

Ähnlich fielen auch die Ergebnisse des Oberflächen-EMGs des linken und rechten Trapezius aus. Es kam zu abrupten Veränderungen, jedoch nicht in eine einheitliche Richtung. Es kam zu keinen signifikanten erdungsbedingten Veränderungen im Blutvolumenpuls und in der Herzfrequenz. Trotzdem wiesen 19 von 22 geerdeten Probanden einen niedrigeren Blutvolumenpuls nach dem Erden auf im Vergleich zu 8 von 25 in der Kontrollgruppe. Chevalier et al. (2006) gehen daher davon aus, dass Erdung den Blutvolumenpuls senkt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in einer Reihe von Studien erdungsbedingte Einflüsse auf das autonome Nervensystem und die Stressregulation zumindest teilweise aufgezeigt werden können. Auch wenn einige Studien Mängel aufweisen und einige Ergebnisse nicht eindeutig sind, weist ein Großteil der Studien doch auf eine stressregulierende Wirkung von Erdung hin.

#### **2.1.4 Erdung und Regeneration und Wundheilung**

Die Fähigkeit zu schneller Regeneration und Wundheilung ist sowohl im Sport als auch im Alltag von großer Bedeutung. Einige Studien belegen erdungsbedingte Einflüsse auf diese Vorgänge.

Brown, Chevalier und Hill (2010; 2015) untersuchten die Auswirkung von Erdung auf die Regeneration nach exzentrischen Muskelbelastungen, die zu einem Muskelkater führten. In beiden Studien wurden die Probanden nach den exzentrischen Belastungen über einen gewissen Zeitraum pro Tag (2010: während des Schlafens; 2015: 4 Stunden/Tag) geerdet. Die geerdeten Probanden wiesen während der Regenerationsphase in den Tagen nach der exzentrischen Belastung in beiden Studien signifikant niedrigere Creatin-Kinase (CK) Werte im Vergleich zur nichtgeerdeten Gruppe auf. CK befindet sich im Zytosol verschiedener energieverbrauchender Zellen und somit auch in Muskelzellen. Dort erfüllt es eine wichtige Aufgabe bei der Resynthesierung von ATP. Bei starken körperlichen Belastungen kann es in den Muskelzellen zu Beschädigungen der Zellmembran und der Sarkomere kommen. Diese Schäden führen zu einer höheren Durchlässigkeit der Zellmembran, und somit kann mehr CK aus der Zelle austreten. Der erhöhte CK-Wert kann anschließend im Blut festgestellt werden und ist ein guter Indikator für die Schädigung an Muskelzellen (Koch, Pereira, & Machado, 2014). Die Ergebnisse von Brown et

al. (2010; 2015) scheinen also auf geringere Muskelschädigung im geerdeten Zustand hinzuweisen. Zu beachten ist diesbezüglich, dass in beiden Studien die Probanden während der Belastung nicht geerdet waren. Jedweder Schaden der Muskelzellen, der durch Erdung verhindert wurde, muss demnach nach der exzentrischen Belastung aufgetreten sein. Eine mögliche Erklärung dafür könnten Entzündungsprozesse liefern, die bei Verletzungen auftreten und weitere Zellen in Mitleidenschaft ziehen können. Erdung könnte also dazu führen, dass die Folgeschäden, die durch Entzündungsvorgänge nach Verletzungen auftreten können, verringert werden.

Es existieren weitere Studien, die versuchen, einen Zusammenhang zwischen Erdung und Wundheilung bzw. Regeneration herzustellen (Chevalier, Melvin, & Barsotti, 2015; Oschman, Chevalier, & Brown, 2015). Meistens handelt es sich diesbezüglich jedoch um Berichte über Einzelfälle und nicht um größere Stichproben, die in einem sauberen Studiendesign miteinander verglichen wurden.

### **2.1.5 Erdung und sportliche Aktivität**

Die Studienlage zur Auswirkung von Erdung auf sportliche Aktivität ist sehr beschränkt. Die wenigen existierenden Forschungsergebnisse sollen im Folgenden zusammengetragen werden.

Brown und Chevalier (2015) stellten fest, dass Probanden nach einer Stunde Yoga im geerdeten Zustand signifikant niedrigere systolische und diastolische Blutviskositäten aufwiesen. Die nichtgeerdete Gruppe wies keine signifikanten Veränderungen auf. Die Blutviskosität beschreibt die Zähflüssigkeit des Blutes und beeinflusst somit die Fähigkeit des Blutes, durch die Arterien, Venen und Kapillaren des Blutkreislaufes zu fließen. Einflussfaktoren auf Blutviskosität sind der Hämatokrit, Aggregation von roten Blutkörperchen, Dehydration, LDL-Cholesterin, Verformbarkeit von roten Blutkörperchen, Temperatur und Fließgeschwindigkeit (R. Brown & Chevalier, 2015; Connes et al., 2004). Eine mögliche Erklärung für die abnehmende Blutviskosität im geerdeten Zustand könnte eine verringerte Aggregation von roten Blutkörperchen sein. Diese ist unter anderem von den Oberflächenladungen an den Membranen der Erythrozyten abhängig, welche im Normalfall eine negative Ladung aufweisen. Dadurch stoßen sich die Erythrozyten gegenseitig ab und die Aggregation von roten Blutkörperchen wird unwahrscheinlicher (Fernandes,

Cesar, & Barjas-Castro, 2011). Möglicherweise hilft Erdung diese negative Ladung aufrecht zu erhalten und wirkt somit der Clusterbildung zwischen roten Blutkörperchen entgegen. Die Forschungsergebnisse von Chevalier, Sinatra, Oschman und Delany (2013) bestätigen diesen Verdacht. Sie stellten fest, dass nach zweistündigem Erden in Ruhe das Zeta-Potential der Erythrozyten zugenommen und die Anzahl an Clusterbildungen abgenommen hatte. Zu kritisieren ist an dieser Studie allerdings, dass es keine Kontrollgruppe gab.

Eine weitere Studie, die sich mit der Auswirkung von Erdung während sportlichen Aktivitäten beschäftigt, ist jene von Sokal et al. (2013). In dieser Doppelblindstudie mit Cross-over-Design untersuchten Sokal et al. die Effekte von Erdung auf die Harnstoff- und Kreatininkonzentration im Blut von 42 Probanden. Dazu wurden vor, während und nach einer 30-minütigen Belastung am Fahrradergometer bei 50% der  $VO_{2max}$  Blutproben entnommen. Die Ergebnisse zeigten, dass die geerdeten Probanden sowohl vor und während der Belastung, als auch nach 40minütiger Erholung niedrigere Harnstoffkonzentrationen im Blut gegenüber dem nichtgeerdeten Tests aufwiesen. Bezüglich der Kreatininkonzentration im Blut konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Harnstoff entsteht als Abfallprodukt bei Abbau von Aminosäuren, wird in der Leber gebildet und über die Nieren zum größten Teil den Harn ausgeschieden. Sokal et al. (2013) schlossen aus ihren Ergebnissen, dass Erdung einen Einfluss auf den Eiweißstoffwechsel hat.

In einer weiteren Studie untersuchten Sokal et al. (2016) in einem ähnlichen Studiendesign wie bereits 2013 den Einfluss von Erdung auf den Glukose- und Laktatstoffwechsel, die Sauerstoffaufnahme sowie auf die Bilirubinkonzentration während 30-minütigen Radfahrens bei 50% der  $VO_{2max}$  und nach 40-minüterer Erholung. Ihre Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse auf: Bezüglich der Glukosekonzentration stellten Sokal et al. (2016) bei der geerdeten Gruppe in den ersten 15 Minuten einen Anstieg fest, während es in der nichtgeerdeten Gruppe zu einem Abfall der Glukosekonzentration kam. Im weiteren Verlauf kam es in der geerdeten Gruppe zum Ende der Belastung zu einem Abfall der Glukosekonzentration im Blut, während sie in der nichtgeerdeten Gruppe leicht anstieg. In der Erholungsphase kam es in der geerdeten Gruppe noch einmal zu einem Anstieg in der Blutglukosekonzentration. Allerdings ist hier zu betonen, dass keine dieser Unterschiede signifikant waren. Trotzdem schlossen Sokal et al. daraus, dass Erdung die

Glykogenolyse in der Leber beschleunigt und somit geerdete Probanden Glukose schneller für den Stoffwechsel mobilisieren können. Bei den Laktatkonzentrationen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen geerdetem und nichtgeerdetem Zustand festgestellt werden. Bezüglich der Sauerstoffaufnahme und der Bilirubinkonzentration lieferte die Studie widersprüchliche Ergebnisse. Für die Gesamtgruppe konnte bei keiner der Variablen ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Bei getrennter Betrachtung der Gruppen (Gruppe A wurde beim ersten Termin geerdet, Gruppe B beim zweiten Termin) wies Gruppe B eine signifikant niedrigere Sauerstoffaufnahme im geerdeten Zustand nach 30-minütiger Belastung auf. Gruppe A zeigte keine Unterschiede. Die Bilirubinkonzentration war bei Gruppe A im geerdeten Zustand zu allen Messzeitpunkten höher als im nichtgeerdeten Zustand. Bei Gruppe B war genau das Gegenteil der Fall. Sie zeigte signifikant niedrigere Bilirubinwerte im geerdeten Zustand. Sokal et al. versuchten diese Unterschiede darauf zurückzuführen, dass die Probanden in Gruppe A mit  $77,1 \pm 10,05$  kg ein durchschnittlich höheres Körpergewicht als jene in Gruppe B mit  $72,8 \pm 6,22$  kg aufwiesen. Bezüglich der relativen Sauerstoffaufnahme waren die Gruppen homogen ( $50,8 \pm 4,7$  und  $50,7 \pm 4,95$  ml O<sub>2</sub>/kg). Sie argumentierten, dass bei Probanden mit niedrigerem Körpergewicht anabole Prozesse und bei Probanden mit höherem Körpergewicht katabole Prozesse dominant sind und dass sich die beobachteten Unterschiede daraus erklären lassen. Dabei handelt es sich aber lediglich um eine Vermutung und deren Stimmigkeit kann angezweifelt werden.

## **2.2 Ausdauer/Ausdauerleistungsfähigkeit**

### **2.2.1 Begriffsdefinition**

Die Ausdauer ist neben Kraft und Schnelligkeit eine der drei konditionellen Fähigkeiten, welche die vorwiegend energetische Komponente der motorischen Leistungsfähigkeit darstellen (Schnabel, Harre, & Krug, 2014). Die genaue Definition des Begriffs ist insofern schwierig, als er ein weites Spektrum umfasst. So werden sowohl die Ultralangzeitausdauer wie bei Ultratriatlons, bei denen Wettkämpfe über die mehrfache Ironman-Distanz ausgetragen werden, als auch die Kurzzeitausdauer, wie beispielsweise beim 400-m-Lauf, dem Begriff Ausdauer untergeordnet, was eine einheitliche Definition in der Tat erschwert (Zintl & Eisenhut, 2009). Je nach Schwerpunkt kann es daher zu

unterschiedlichen Definitionen kommen. Tomasits und Haber (2003) definieren Ausdauer aus einer rein physiologischen Sicht als „die Fähigkeit der Muskelzelle bei Belastung verbrauchtes ATP zu resynthetisieren.“ Versteht man unter Ausdauer jedoch die Ermüdungswiderstandsfähigkeit, wie dies in vielen Definitionen der Fall ist, muss auch die psychologische Komponente mitberücksichtigt werden. Etwas breiter ist daher die Definition von Hottenrott, Hoos, Stoll und Blazek (2013). Sie definieren Ausdauer als die Fähigkeit „eine belastungsadäquate Energieversorgung des Organismus [sicherzustellen und] ermüdungsbedingte Leistungs- oder Geschwindigkeitsabnahmen bei sportlichen Belastungen [zu verzögern]“ (Hottenrott et al., 2013). Der erste Teil dieser Definition deckt sich mit der von Tomasits und Haber (2003). Im zweiten Teil wird die Fähigkeit zur Verzögerung der Leistungs- oder Geschwindigkeitsabnahme bei sportlicher Belastung beschrieben, welche einerseits auf die ATP-Resynthese zurückgeführt, andererseits aber auch durch eine psychologische Faktoren beeinflusst werden kann. In dieser Arbeit wird unter Ausdauer die Ermüdungswiderstandsfähigkeit verstanden. Diese Ermüdungswiderstandsfähigkeit wird auf der einen Seite durch physiologische Prozesse der Energieresynthesierung, aber auch durch eine psychologische Komponente im Sinn der Ermüdungstoleranz beeinflusst. Viele Definitionen zählen neben den bereits genannten Aspekten auch noch die Fähigkeit zur schnellen Regeneration in Phasen der verminderten Beanspruchung oder nach Beendigung der Belastung zur Ausdauer dazu (Zintl & Eisenhut, 2009). Dieser Aspekt ist jedoch für die vorliegende Arbeit wenig relevant.

Aufgrund des breiten Spektrums, das dem Begriff Ausdauer untergeordnet werden kann, wird der Begriff oft noch feiner differenziert. Je nach Autor/in finden sich in der Literatur unterschiedliche Empfehlungen für eine weitere Unterteilung. Hollmann und Hettinger (2000, zitiert nach Zintl & Eisenhut, 2009) schlagen eine Unterteilung nach drei Kriterien vor. Erstens, nach dem Größenumfang der beteiligten Muskulatur in lokale und allgemeine Ausdauer. Als Grenze wird eine Beteiligung von ca. 15 % der Skelettmuskulatur festgelegt. Diese beruht darauf, dass unterhalb dieser Grenze bei dynamischer Arbeitsweise das gesunde kardiopulmonale System als Sauerstofftransporteur keine limitierende Rolle mehr für die Leistungsfähigkeit spielt. Vielmehr treten hier lokale Faktoren wie die Kapillarisation, der Enzymbesatz oder die Größe der lokalen Glykogen- und Phosphat-speicher als Leistungsdeterminanten in den Vordergrund. Als zweites Kriterium wird die

vorrangige Art der Energiebereitstellung genannt. Hier wird in eine aerobe und eine anaerobe Ausdauer unterteilt, wobei zu berücksichtigen ist, dass rein aerobe bzw. anaerobe Prozesse der Energiebereitstellung in der Wettkampfpraxis praktisch nicht existieren. Als drittes Unterscheidungsmerkmal wird die Arbeitsweise der Skelettmuskulatur genannt. Dabei wird zwischen einer dynamischen und einer statischen Ausdauer differenziert. Bei statischer Muskelkontraktion wird die Blutversorgung der Muskulatur eingeschränkt. In Abhängigkeit von der Intensität wird die Energiebereitstellung daher bei statischer Muskelarbeit immer anaerob. Für die vorliegende Arbeit ist nach dieser Unterteilung die allgemeine, aerobe und anaerobe, dynamische Ausdauer von Interesse.

Eine andere Unterteilung orientiert sich an der konkreten Wettkampfdauer und den dadurch entstehenden Anforderungen an den/die Athleten/in. Daraus ergibt sich eine Unterteilung in die Kurzzeitausdauer (Wettkampfdauer von 45 Sekunden bis 2 Minuten), die Mittelzeitausdauer (Wettkampfdauer von 2-10 Minuten) und die Langzeitausdauer (Wettkampfdauer von 10 Minuten bis mehrere Stunden). Wegen der erheblichen Bandbreite wird letztere oft noch weiter in Langzeitausdauer I-IV unterteilt. Die Unterteilung orientiert sich an der Belastungsdauer, wobei LZA I-IV jeweils durch eine Belastungszeit von 10-35 Minuten, 35-90 Minuten, 90-360 Minuten und über 360 Minuten gekennzeichnet sind (Zintl & Eisenhut, 2009).

## **2.2.2 Prozesse der Energiebereitstellung**

Im vorangehenden Kapitel wurde bereits angedeutet, dass die Energiebereitstellung für die Ausdauerleistungsfähigkeit von entscheidender Bedeutung ist. Um existieren zu können, muss der menschliche Organismus sogar in Ruhe kontinuierlich Energie bereitstellen (=Ruheumsatz). Bei Verrichtung von körperlicher Arbeit steigt der Bedarf an Energie erheblich an. Diese Energie gewinnt der menschliche Körper aus dem energiereichen Adenosintriphosphat (ATP). Mithilfe des Enzyms ATPase können von diesem Molekül Phosphatgruppen abgespalten werden und es wird Energie frei, die im Körper genutzt werden kann. In der Muskulatur ist nur eine begrenzte Menge an ATP gespeichert, die theoretisch für gerade einmal 2-3 Sekunden bei maximaler Beanspruchung ausreichen würde. Daher muss der menschliche Körper ATP laufend resynthetisieren. Im

Wesentlichen stehen dem menschlichen Organismus dafür drei Prozesse zur Verfügung: Hydrolyse von Kreatinphosphat, anaerobe Glykolyse und oxidative Phosphorylierung.

Den zeitlich gesehen ersten Mechanismus der sekundären Energiebereitstellung stellt die Hydrolyse von Kreatinphosphat (auch Phosphokreatin, PCr) dar. Da er ohne Sauerstoffverbrauch und ohne Laktatbildung abläuft, wird dieser Vorgang der Energiebereitstellung anaerob-alaktazid genannt. So wie ATP ist auch PCr ein energiereiches Phosphatmolekül, welches sich in der Muskelzelle befindet. Dort ist ca. vier bis fünfmal so viel PCr wie ATP gespeichert. Aus einem Mol PCr wird ein Mol ATP gewonnen. Diese Art der Energiebereitstellung weist mit 3-6 mmol/kg\*s eine hohe ATP-Bildungsrate auf und ist somit der schnellste Weg der ATP-Resynthesierung im menschlichen Organismus (Hottenrott & Neumann, 2010). Allerdings ist der PCr-Vorrat sehr begrenzt und bei maximalen Anstrengungen nach ca. 10 (bei hochtrainierten bis zu 20) Sekunden aufgebraucht (Hohmann, Lames, & Letzelter, 2010).

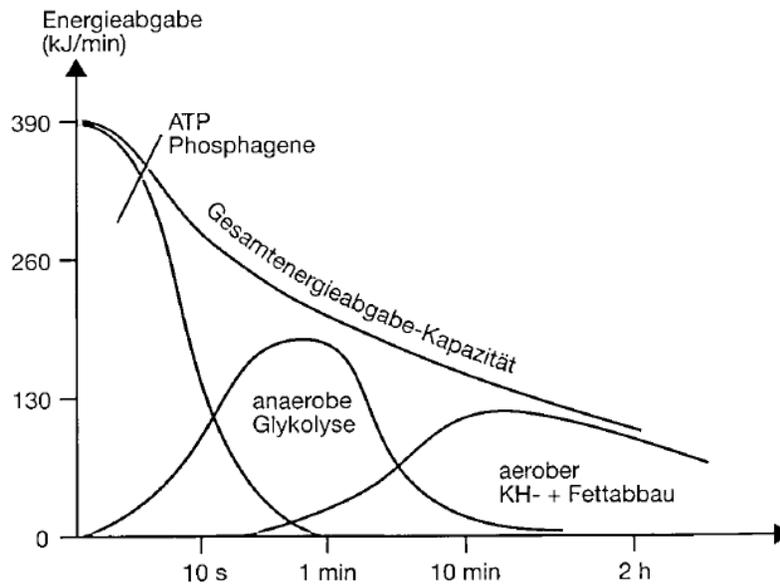
Ein weiterer anaerober Mechanismus der Energiebereitstellung ist die Glykolyse. Dabei wird entweder Glukose aus dem Blut oder Glykogen aus dem Muskelspeicher zuerst zu Glukose-6-Phosphat umgewandelt und anschließend über mehrere Schritte zu Pyruvat abgebaut. Bei niedrigen Belastungen wird das Pyruvat im Mitochondrium im Zuge des Citratzyklus über Acetyl-CoA weiter zu Kohlendioxyd und Wasser umgewandelt. Bei beeinträchtigter Sauerstoffversorgung, wie dies zum Beispiel bei isometrischer Muskelarbeit der Fall sein kann, oder wenn die Bildungsrate von Pyruvat aufgrund von intensiven Belastungen sehr hoch ist, wird das Pyruvat vorwiegend zu Laktat und  $H^+$  abgebaut; man spricht in diesem Kontext daher von anaerob-laktazider Energiebereitstellung. Die Verstoffwechslung von einem Mol Glukose-6-Phosphat bringt 4 Mol ATP, verbraucht aber ebenfalls ein Mol ATP. Dient die Blutglukose als Ausgangsprodukt, muss für dessen Aufbereitung zu Glucose-6-Phosphat ein weiteres ATP verwendet werden. So ergibt sich aus der Verstoffwechslung von Glukose ein Netto-ATP-Gewinn von 2 Mol ATP pro Mol Blutglukose. Muskelglykogen kann ohne Energieverbrauch zu Glukose-6-Phosphat umgewandelt werden, und somit werden 3 Mol ATP pro Mol Muskelglykogen gewonnen (aus der Fünten et al., 2013). Die ATP-Bildungsrate aus der anaeroben Glykolyse beläuft sich auf 1.5-3.0 mmol/kg\*s und stellt somit immer noch eine vergleichsweise schnelle Form der ATP-Synthese dar (Hottenrott & Neumann, 2010). Der Nachteil dieser Art der

Energiebereitstellung liegt in der Akkumulation von  $H^+$  Ionen. Bei deren unzureichender Pufferung fällt der pH-Wert ab. Dies kann bei sehr intensiven Belastungen die Glykolyse- rate und die kontraktilen Eingeschärften der Muskulatur hemmen (aus der Fünten et al., 2013).

Der oxidative Stoffwechsel stellt das komplexeste System der Energiegewinnung im menschlichen Organismus dar. Er findet in den Mitochondrien statt. In ihm können sowohl Kohlenhydrate als auch Fette und Eiweiße zum Zwecke der Energiegewinnung oxidiert werden, wobei die Verstoffwechslung von Eiweißen unter Normalbedingungen eine weniger bedeutende Rolle spielt. Bevor diese Nährstoffe in den Citratzyklus eingespeist werden können, müssen sie zuerst in Acetyl-CoA umgebaut werden. Im Citratzyklus finden insgesamt zehn enzymatische Reaktionen statt, die in Summe folgende Bilanz ergeben:  $Acetyl-CoA + 3 NAD^+ + FAD + GDP + P + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 2NADH/H^+ + FADH_2 + GTP + CoA-SH$ . Aus diesem Vorgang werden pro Mol Acetyl-CoA lediglich zwei Mol ATP gewonnen. Wesentlich ist jedoch die Reduzierung der Koenzyme  $NAD^+$  und  $FAD$  im Zuge dieser Reaktionen. In der reduzierten Form ( $NADH/H^+$ , und  $FADH_2$ ) können diese Wasserstoffionen zur Elektronentransportkette, die ebenfalls im Mitochondrium abläuft, transportieren. Dort werden die reduzierten Koenzyme oxidiert wobei  $H^+$  und  $e^-$  entstehen.  $H^+$  reagiert dort mit  $O_2$  und wird zu  $H_2O$ . Die Elektronen durchlaufen im Zuge der Elektronentransportkette eine Reihe von Reaktionen, in denen schlussendlich die Energie zur ATP-Resynthese gewonnen wird. Diese Art der Verstoffwechslung zeichnet sich vor allem durch die große Menge an produzierter Gesamtenergie gegenüber der anaeroben Energiebereitstellung aus. So können auf diese Weise aus einem Mol Glykogen bzw. Glukose 39 bzw. 38 Mol ATP gewonnen werden (3 bzw. 2 Mol aus Glykolyse, 2 Mol aus Citratzyklus und 34 Mol aus Elektronentransportkette). Bei Fettsäuren beläuft sich die Energiebilanz in Abhängigkeit der speziellen Fettsäuren auf ca. 130 Mol ATP pro Mol Fettsäure (aus der Fünten et al., 2013). Allerdings braucht die oxidative Energiebereitstellung wesentlich länger und weist daher niedrigere ATP-Bildungsraten als die anaeroben Stoffwechselwege auf. Beispielsweise ergibt die aerobe Verstoffwechslung von Triglyceriden nur eine Bildungsrate von 0.24-0.40 mmol/kg\*s (Hottenrott & Neumann, 2010).

Die beschriebenen Prozesse der Energiebereitstellung arbeiten nicht unabhängig voneinander, und keine Aktivität führt zu einer 100%igen Energiebereitstellung aus einem

einzelnen Energiesystem. Jedoch variiert der prozentuelle Anteil, den jedes Energiesystem zur Energiebereitstellung beiträgt. Welche Stoffwechselprozesse dominant sind, hängt im Wesentlichen von der Intensität und der Dauer der verrichteten Arbeit bzw. den damit verbundenen energetischen Anforderungen ab.



**Abb. 2:** Vorgänge der Energiebereitstellung bei maximaler Beanspruchung in Abhängigkeit von der Zeit (Zintl & Eisenhut, 2009)

Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, werden bei maximalen Belastungen (hoher Energiebedarf) über wenige Sekunden vor allem die Phosphatspeicher beansprucht. Ab einer Belastungsdauer von 25 Sekunden bis ca. 2 Minuten wird die benötigte Energie dominant aus der anaeroben Glykolyse gewonnen. Zwischen 2 und 10 Minuten beginnt die aerobe Glykogenverwertung die Oberhand zu übernehmen, wobei auch der anaerob-laktazide Stoffwechselweg noch von großer Bedeutung ist. Ab einer Dauer von 10 bis 45 Minuten dominiert vorerst vor allem die aerobe Verstoffwechslung von Glykogen und ab 45 Minuten wird ein Großteil der bereitgestellten Energie aus der Fettverbrennung gewonnen (Zintl & Eisenhut, 2009).

### 2.2.3 Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

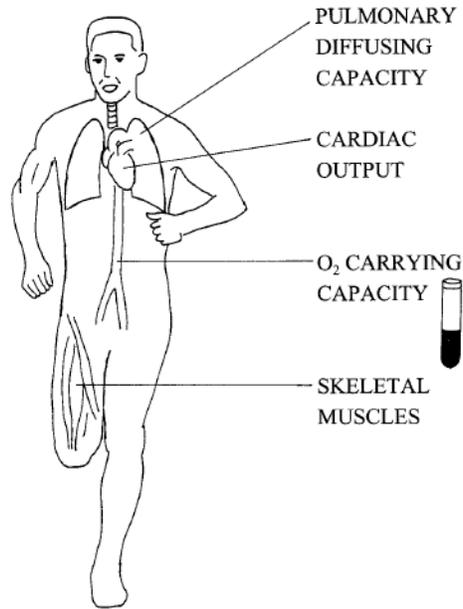
Bevor mögliche Einflussmöglichkeiten von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit diskutiert werden, wird in dem folgenden Kapitel der gegenwärtige Stand der Wissenschaft zu den bekannten Einflussfaktoren der Ausdauerleistungsfähigkeit dargestellt. In

der Regel werden in diesem Kontext die maximale Sauerstoffaufnahme, die aerobe und anaerobe Schwelle bzw. die prozentuelle Ausnutzung der maximalen Sauerstoffaufnahme bei der Wettkampftintensität und die Bewegungsökonomie als Hauptdeterminanten genannt. Ebenfalls entscheidend sind die biochemischen Vorgänge im menschlichen Organismus, die während der Belastung stattfinden.

### **2.2.3.1 Maximale Sauerstoffaufnahme-fähigkeit**

Die maximale Sauerstoffaufnahme-fähigkeit ( $VO_{2max}$ ) wird in der Literatur häufig an erster Stelle genannt, wenn es um Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit geht. Sie ist definiert als die höchstmögliche Rate, mit der Sauerstoff während hochintensiven Belastungen im Körper aufgenommen und verstoffwechselt werden kann. Physiologisch gesehen stellt sie das Limit dar, welches die Aufnahme-fähigkeit von Sauerstoff im menschlichen Körper und somit auch die Fähigkeit, Energie auf aeroben Weg bereitzustellen, nach oben hin begrenzt (Bassett & Howley, 2000). Diese Fähigkeit der aeroben Energiebereitstellung spielt eine entscheidende Rolle in allen Ausdauersportarten. Daher ist es nicht verwunderlich, dass ein Zusammenhang zwischen der maximalen Sauerstoffaufnahme-fähigkeit und der Ausdauerleistungsfähigkeit besteht und dass Ausdauerathleten/innen eine 50-100% höhere  $VO_{2max}$  als die Durchschnittsbevölkerung aufweisen (Bassett & Howley, 2000; Joyner & Coyle, 2008).

Im Folgenden werden die Einflussgrößen auf die maximale Sauerstoffaufnahme-fähigkeit kurz diskutiert. Der Transportweg des  $O_2$  aus der Atmosphäre zum Mitochondrium in der Muskelzelle besteht aus einer Reihe von Schritten (Abb. 3), von denen jeder für sich zu einer Limitierung der  $VO_{2max}$  führen könnte. Grob zusammengefasst sind diese: 1) Der Gasaustausch in der Lunge, 2) die Auswurfleistung des Herzens, 3) die Sauerstofftransportfähigkeit des Blutes und 4) die Aufnahme- und Verwertungsmöglichkeiten im Muskel (Bassett & Howley, 2000).



**Abb. 3:** Potentielle Einflussfaktoren auf die  $VO_{2max}$ . (Bassett & Howley, 2000)

Bezüglich des Gasaustausches in der Lunge gilt generell, dass Atemwege, Lunge und Atemmuskulatur des gesunden Menschen sogar für die Ansprüche von hochintensiven Belastungen ausreichend ausgebildet sind (Dempsey, Amann, Romer, & Miller, 2008). Auf Meereshöhe beläuft sich die arterielle Sauerstoffsättigung (%S<sub>a</sub>O<sub>2</sub>) selbst bei hochintensiven Belastungen auf ca. 95%, was beweist, dass in der Lunge auch unter diesen Bedingungen das Blut ausreichend mit Sauerstoff gesättigt werden kann (Bassett & Howley, 2000). Ausnahmen können hochtrainierte Athleten/innen bilden. Bei ihnen kann es bei hochintensiven Belastungen auch auf Meereshöhe zu einem deutlichen Abfall der arteriellen Sauerstoffsättigung kommen (Dempsey & Wagner, 1999). Eine mögliche Erklärung kann die höhere maximale Auswurfleistung des Herzens von hochtrainierten Personen sein. Dadurch erhöht sich die Fließgeschwindigkeit des Blutes und die roten Blutkörperchen haben eine kürzere Durchflusszeit in den Lungenkapillaren, was die Sauerstoffsättigung einschränken könnte. Zudem kann es bei zunehmender Höhe zu einer abnehmenden Sauerstoffsättigung kommen. Dies ist durch einen abnehmenden Sauerstoffpartialdruck in der Umgebungsluft zu erklären (Fulco, Rock, & Cymerman, 1998). Generell wird jedoch davon ausgegangen, dass die Diffusionsfähigkeit des Sauerstoffs ins

Blut über die Lunge beim gesunden Menschen und unter normalen Umgebungsbedingungen einen eher geringen Einfluss auf die  $VO_{2max}$  hat.

Gravierender ist der Einfluss der Auswurfleistung des Herzens auf die  $VO_{2max}$  einzuschätzen. Sie kann über zwei Faktoren beeinflusst werden: die Herzfrequenz und das Schlagvolumen. Ausdauertrainierte Personen weisen in der Regel ein größeres Schlagvolumen auf als nichtausdauertrainierte Personen, was einer der Hauptgründe für eine höhere  $VO_{2max}$  bei Ausdauerathleten/innen zu sein scheint. Dies wird vor allem daraus geschlossen, dass es bedeutend weniger Variationen in der maximalen Herzfrequenz und der arteriovenösen Sauerstoffdifferenz zwischen ausdauertrainierten und ausdaueruntrainierten Personen gibt, um die teils gravierenden Unterschiede in der  $VO_{2max}$  zu erklären (Bassett & Howley, 2000; Jones & Carter, 2000). Es wird geschätzt, dass die  $VO_{2max}$  zu 70-85% von der maximalen Auswurfleistung des Herzens beschränkt wird.

Um den Sauerstoff von den Lungenalveolen zu den Muskelzellen zu bringen, wird im menschlichen Organismus das Transportmedium Blut genutzt. Besonders wichtig für den Sauerstofftransport ist das Hämoglobin, der rote Blutfarbstoff, welcher sich in den roten Blutkörperchen befindet. Über eine reversible Kopplung an das Eisen im Hämoglobin kann Sauerstoff in den Lungenalveolen rasch in das Blut aufgenommen und im Gewebe wieder abgegeben werden. Die Wichtigkeit des Hämoglobins für den Sauerstofftransport wird bei Personen, die unter Blutarmut (Anämie) leiden, offensichtlich. Diese zeigen trotz kompensatorischer höherer Herzauswurfleistung eine geminderte Ausdauerleistungsfähigkeit (Mairbörl, 2013). Daraus kann geschlossen werden, dass eine höhere Hämoglobinmasse im Blut eine höhere Sauerstofftransportfähigkeit zur Folge hat. Diese Eigenschaft wird oft auch beim Doping genutzt, um die Sauerstofftransportkapazität des Blutes künstlich zu erhöhen. Da sich die Auswurfleistung des Herzens über Doping quasi nicht verbessern lässt und sich die Sauerstoffextraktion aus dem Blut bei maximalen Belastungen, selbst bei ausdauertrainierten Personen, in der Regel auf über 90% beläuft, bietet die Beeinflussung der Sauerstofftransportkapazität des Blutes die besten Möglichkeiten, die  $VO_{2max}$  durch Doping zu verbessern (Jelkmann & Lundby, 2011). Der Anteil der roten Blutkörperchen bzw. die Hämoglobinmasse im Blut ist also ein wichtiger Faktor für die Sauerstofftransportfähigkeit des Blutes und somit mitentscheidend für die  $VO_{2max}$ . Vor allem die Hämoglobinmasse aber auch der Anteil an roten Blutkörperchen können

aber auch durch Training erhöht werden. Vor allem in Verbindung mit Höhengaufenthalten können bezüglich dieser Parameter deutliche Steigerungen erzielt werden (Wehrlin, Zuest, Hallén, & Marti, 2006). In der Regel kommt es beim Ausdauertraining zwar zu einer Zunahme der Hämoglobinmasse aber auch zu einer Zunahme des Blutplasmas und somit zu einer Steigerung des Blutvolumens. Auf diese Weise steigt zwar das Gesamthämoglobin, der prozentuelle Anteil am Gesamtblut bleibt jedoch annähernd gleich wie beim Untrainierten bzw. fällt sogar leicht ab (Neumann, Pfützner, & Berbalk, 2013).

Schlussendlich muss der Sauerstoff aus dem Blut noch in die Muskelzelle aufgenommen und dort verwertet werden. Der Sauerstofftransport in das Zielgewebe erfolgt aufgrund von Diffusion, das heißt aufgrund eines Konzentrationsunterschiedes. Um den Transport von Sauerstoff in die Zelle gewährleisten zu können, ist also ein niedriger  $PO_2$  in der Zelle im Vergleich zum  $PO_2$  im Blut wichtig. Deshalb muss der Sauerstoff in den Mitochondrien verwertet werden, um das Druckgefälle zwischen Zelle und Blut aufrecht zu erhalten. Aufgrund dieser Tatsache wäre ein Einfluss der Mitochondriendichte auf die  $VO_{2max}$  durchaus denkbar. Studien bestätigen diesen Einfluss zwar, zeigen aber auch, dass dieser eher gering sein dürfte. So wurde beispielsweise gezeigt, dass die  $VO_{2max}$  bei einer 2.2-fachen Steigerung der Mitochondriendichte nur um 30-40% steigt (Saltin, Henriksson, Nygaard, Andersen, & Jansson, 1977). Der Einfluss auf die  $VO_{2max}$  ist also eher gering, auf die Ausdauerleistungsfähigkeit ist er jedoch wesentlich größer. Dies wird zu einem späteren Zeitpunkt beschrieben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die  $VO_{2max}$  vor allem durch die Fähigkeit des kardiovaskulären Systems den Körper mit Sauerstoff zu versorgen limitiert ist und nicht durch die Fähigkeit der Mitochondrien in den Muskelzellen Sauerstoff aufzunehmen. Dies bestätigt sich auch in den Untersuchungen von González-Alonso und Cablet (2003). Sie konnten zeigen, dass Personen bei hochintensiven Belastungen bis zur Erschöpfung am Fahrradergometer kurz vor der Ausbelastung einen Abfall der Auswurfleistung des Herzens und einen damit einhergehenden reduzierten Blutfluss zu den Beinen aufweisen. Da in ihren Untersuchungen die Herzfrequenz bis zum Zeitpunkt der Ausbelastung anstieg, schlossen sie daraus, dass die Reduktion der Auswurfleistung auf eine Reduktion des Schlagvolumens zurückzuführen ist. Der Sauerstoffanteil im arteriellen Blut blieb jedoch unverändert. Dies weist darauf hin, dass das Blut trotz der hohen Belastung

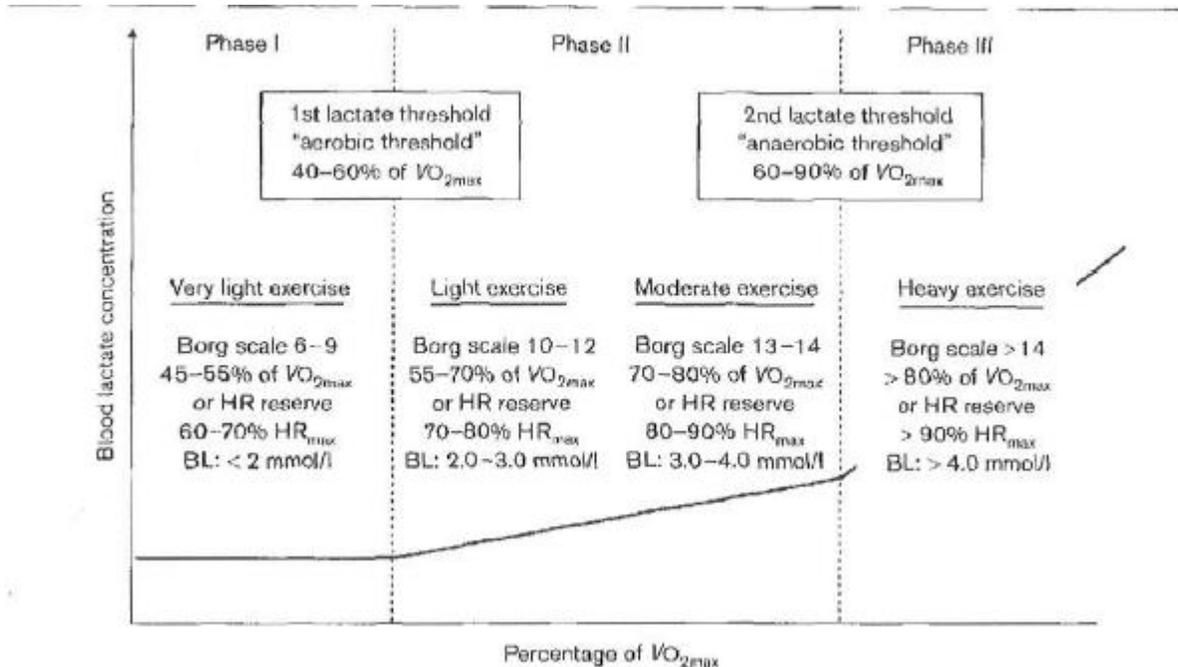
in den Lungenalveolen mit Sauerstoff gesättigt werden konnte. Darüber hinaus stiegen die arteriovenöse Differenz und die Sauerstoffextraktion aus dem arteriellen Blut bis zum Ende der Belastung an. Im Schnitt wurden 91% (Spitzenwerte von bis zu 95%) des transportierten Sauerstoffs aus dem arteriellen Blut verwertet. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Hauptursache für das Erreichen einer maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit kardiovaskulär bedingt ist.

Die  $VO_{2max}$  stellt jedoch nur das obere Limit der Ausdauerleistungsfähigkeit dar. Die meisten Ausdauerereignisse werden nicht bei einer Beanspruchung von 100% der maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit ausgetragen. Je nach Disziplin ist deswegen auch die prozentuelle Ausnützung der  $VO_{2max}$ , welche über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden kann, von entscheidender Bedeutung und wird teilweise als besserer Prädiktor für die Ausdauerleistungsfähigkeit als die  $VO_{2max}$  gesehen. Trotzdem ist die Bedeutung der  $VO_{2max}$  für die Ausdauerleistungsfähigkeit nicht zu unterschätzen, wie in folgendem Beispiel von Bassett und Howley (2000) gut veranschaulicht wird. Um einen Marathon in 2 Stunden und 15 Minuten rennen zu können, muss über die Gesamtdauer des Marathons eine Sauerstoffaufnahme von 60 ml/kg/min aufrechterhalten werden. Selbst, wenn ein Marathon bei 100% der  $VO_{2max}$  gelaufen würde, müsste also der/die Athlet/in eine  $VO_{2max}$  von 60 ml/kg/min aufweisen. Da ein Marathon von gut ausdauertrainierten Personen bei ca. 80-85% der  $VO_{2max}$  gelaufen wird, müsste eine  $VO_{2max}$  von mindestens 70,5-75 ml/kg/min vorhanden sein, um die genannte Leistung vollbringen zu können. Deshalb stellt die  $VO_{2max}$  die obere Grenze der Ausdauerleistungsfähigkeit dar, lässt aber keine eindeutige Vorhersage auf die Wettkampfleistung zu, da sich Athleten/innen in anderen Faktoren, wie der Ausnützung der  $VO_{2max}$  und der Laufökonomie unterscheiden. Diese beiden Faktoren werden nun in den nächsten Kapiteln genauer beleuchtet.

### **2.2.3.2 Ausnützung der $VO_{2max}$ bei submaximalen Belastungen**

Wie bereits erwähnt, werden die wenigsten Ausdauerereignisse bei 100% der  $VO_{2max}$  ausgetragen. Daher leistet auch die Ausnützung der  $VO_{2max}$  im submaximalen Bereich einen entscheidenden Beitrag zur Ausdauerleistungsfähigkeit. Sie spiegelt die Fähigkeit wider, einen großen Anteil der benötigten Energie bei einer submaximalen Belastung auf aerobem Wege bereitzustellen. Zur Beurteilung dieser Fähigkeit wird in der Literatur und

auch in der Praxis häufig die prozentuelle Ausnutzung der  $VO_{2max}$  an bestimmten Schwellen herangezogen (Binder et al., 2008; Jones & Carter, 2000; Joyner & Coyle, 2008). In der Literatur gibt es eine Vielzahl an Schwellenkonzepten, die sich an unterschiedlichen Parametern (Laktatschwellen, ventilatorische Schwellen) orientieren und eine unterschiedliche Nomenklatur aufweisen. Gegenwärtig wird in den meisten Fällen ein Dreiphasenmodell der Energiebereitstellung mit zwei Schwellen (siehe Abb. 4) verwendet (Binder et al., 2008).



**Abb. 4:** Phasen der Energiebereitstellung nach Binder et al. (2008)

Grob zusammengefasst sind Veränderungen in der Blutlaktatkonzentration und in den ventilatorischen Kennwerten das Resultat einer veränderten Stoffwechselsituation. Mit ansteigenden Belastungen steigt in der Regel der Energiebedarf, um die entsprechende Arbeit vollrichten zu können. Aufgrund der unterschiedlichen Bildungsraten der verschiedenen Stoffwechselforgänge wird der Energiebedarf bei ansteigenden Belastungen immer mehr über die anaerobe Glykolyse gedeckt. Dies führt zu Veränderungen in der Blutlaktatkonzentration und den Atemgasen. Die auftretenden Schwellen sind das Resultat dieser Veränderungen in der Energiebereitstellung. Orientiert man sich beispielsweise an den Laktatwerten, so wird bis zum Auftreten der ersten Schwelle der

Energiebedarf vorwiegend über aerobe Prozesse gedeckt und Laktat, das durchaus entstehen kann, wird in der Muskelzelle selbst beseitigt. Die erste Laktatschwelle (aerobe Schwelle), welche in der Regel bei ca. 2 mmol/l auftritt, zeigt jenen Punkt an, zu dem Laktat nicht mehr vollständig in den Muskelzellen beseitigt werden kann und ins Blut übertritt, was zu einem Anstieg in der Blutlaktatkonzentration führt. Es folgt der aerob/anaerobe Übergang, in dem sich Laktatproduktion und Elimination die Waage halten und somit der Laktatwert konstant bleibt, solange die Intensität nicht gesteigert wird. Die zweite Laktatschwelle (Maximal Laktat-Steady-state, 4 mmol/l-Schwelle, anaerobe Schwelle) zeigt die oberste Grenze an, an der sich Laktatproduktion und Elimination noch die Waage halten. Intensitäten über dieser Schwelle führen zu einer erhöhten glykolytischen Energiebereitstellung mit steigender Laktatproduktion, da die Laktatelimination mit der Laktatproduktion nicht mehr Schritt halten kann (Zintl & Eisenhut, 2009).

In der Regel zeigen ausdauertrainierte Personen zwei charakteristische Eigenschaften bezüglich der Schwellen: erstens, ein späteres Auftreten dieser als bei Untrainierten und eine höhere Ausnutzung der  $VO_{2max}$  an den Schwellen. Ausdauertrainierte weisen beispielsweise an der aeroben Schwelle eine Ausnutzung von 60-65 % der  $VO_{2max}$  gegenüber 45-50 % bei Untrainierten auf. An der anaeroben Schwelle können Hochtrainierte eine Ausnutzung der  $VO_{2max}$  von bis zu 85-95 % gegenüber 50-70 % bei Untrainierten erreichen (Zintl & Eisenhut, 2009). Dies bedeutet, dass ausdauertrainierte Personen auch bei hohen Intensitäten in der Lage sind, einen Großteil ihrer benötigten Energie über den aeroben Glykogen- und Fettstoffwechsel zu decken. Somit vermeiden sie auch die Anhäufung von Stoffwechselprodukten, die im Zuge der anaeroben Glykolyse (z.B.:  $H^+$ ) entstehen und einen negativen Einfluss auf die Ausdauerleistungsfähigkeit haben. Deshalb ist nicht nur die  $VO_{2max}$ , sondern auch deren Ausnutzung bei submaximalen Belastungen für die Ausdauerleistungsfähigkeit entscheidend. Je nach Sportart und damit verbundenen Anforderungen hat hier das Auftreten der aeroben oder der anaeroben Schwelle und die jeweilige prozentuelle Ausnutzung der  $VO_{2max}$  an jenen Schwellen größere Aussagekraft.

Während, wie im vorherigen Kapitel bereits beschrieben, die Mitochondriendichte in den Zellen für die  $VO_{2max}$  eher weniger ausschlaggebend ist, ist sie für die prozentuelle Ausnutzung der  $VO_{2max}$  bei submaximalen Belastungen von entscheidender Bedeutung.

Je mehr Mitochondrien an der Energiebereitstellung beteiligt sind, desto höher ist der Anteil des Energiebedarfs, der über aerobe Mechanismen gedeckt werden kann. Die Anzahl der an der oxidativen Energiebereitstellung beteiligten Mitochondrien kann durch eine höhere Mitochondrienanzahl im Muskel selbst, aber auch über den Anteil der beteiligten Muskelmasse gesteigert werden. Dadurch können mehr freie Fettsäuren und Glukose auf aerobem Weg verstoffwechselt werden und der Anteil der anaeroben Glykolyse kann auch bei höheren Belastungen niedriger gehalten werden, was sich wiederum positiv auf die Ausdauerleistungsfähigkeit auswirkt (Bassett & Howley, 2000). In der Tat wurde gezeigt, dass sehr gut Ausdauertrainierte einen höheren Mitochondrienanteil in den Zellen zeigen und für die Erzeugung der benötigten Leistung einen größeren Anteil an Muskelmasse einsetzen als Ausdaueruntrainierte (Joyner & Coyle, 2008). Weitere Adaptionen durch Ausdauertraining, die ein späteres Auftreten der Schwellen begünstigen, sind Hypertrophie der Typ I Muskelfasern, Umwandlung von Typ IIb Muskelfasern zu Typ IIa Muskelfasern (in manchen Fällen ist auch eine Umwandlung von Typ II Muskelfasern zu Typ I Muskelfasern möglich), eine gesteigerte Kapillarisation, eine erhöhte Laktattransportkapazität und eine höhere Enzymverfügbarkeit für die oxidative Energiegewinnung.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Ausdauerleistungsfähigkeit vor allem auch dadurch beeinflusst wird, wie viel Energie bei einer gegebenen Belastung durch aerobe Prozesse gewonnen werden kann. Ausdauertrainierte Personen weisen physiologische Veränderungen auf, die eine ATP-Resynthese aus der Oxidation von Fetten und Kohlenhydraten auch noch bei höheren Belastungen erlauben. Als Resultat zeigen sie bei ansteigenden Belastungsprotokollen ein späteres Auftreten von Schwellen (Laktatschwellen aber auch ventilatorischen Schwellen) und eine höhere Ausnützung der  $VO_{2max}$  bei diesen Schwellen. Somit können sie bei Wettkämpfen höhere Geschwindigkeiten über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten.

### **2.2.3.3 Bewegungsökonomie**

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf die Ausdauerleistungsfähigkeit ist die Bewegungsökonomie/-effizienz. Diese wird in der Literatur, die sich mit Ausdauersport beschäftigt, in der Regel über die für die Durchführung einer gegebenen Bewegung bei gegebener Intensität benötigte Sauerstoffmenge definiert. (Jones & Carter, 2000). Anders

formuliert kann unter Bewegungsökonomie die Energie verstanden werden, die pro Einheit Körpergewicht benötigt wird, um eine gewisse Belastung zu bewältigen (Bassett & Howley, 2000). Je größer die Bewegungsökonomie ist, umso geringer ist die Menge an benötigter Energie, um beispielsweise eine gewisse Laufgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten. Logischerweise wirkt sich demnach eine hohe Bewegungsökonomie positiv auf die Ausdauerleistungsfähigkeit aus, da weniger Energieressourcen für eine bestimmte Bewegungsausführung benötigt werden als dies bei niedrigerer Bewegungsökonomie der Fall wäre. Personen mit hoher Bewegungsökonomie können demnach höhere Geschwindigkeiten bei gleichem Energieverbrauch aufrechterhalten als Personen mit geringerer Bewegungsökonomie bei niedrigeren Geschwindigkeiten.

Um die Bewegungsökonomie messbar zu machen, wird in der Regel die Sauerstoffaufnahme bei gegebener Bewegungsintensität gemessen. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die Energie über aerobe aber auch über anaerobe Stoffwechselprozesse bereitgestellt wird und somit der aerobe Anteil (gemessen über die  $\text{VO}_2$ ) immer nur einen Teil der Gesamtenergiekosten darstellen kann. (Saunders, Pyne, Telford, & Hawley, 2004). Es macht daher in manchen Fällen durchaus Sinn, auch andere Indikatoren wie beispielsweise Laktatwerte oder den respiratorischen Quotienten in die Bewertung der Bewegungsökonomie miteinzubeziehen. Es wurde auch gezeigt, dass die Messung des Energieverbrauchs über den Kalorienverbrauch eine sensiblere Messmethode zur Feststellung der Bewegungsökonomie darstellt (Fletcher, Esau, & MacIntosh, 2009) Die gängigste Methode ist jedoch die Bewertung der Sauerstoffaufnahme bei einer gegebenen Geschwindigkeit unterhalb der zweiten ventilatorischen Schwelle. Eine Bestimmung unterhalb der ventilatorischen Schwelle ist insofern wichtig, da es darüber aufgrund der sogenannten „langsamen Komponente“ der Sauerstoffaufnahme zu keinem Steady State mehr kommt und eine Bewertung anhand der Bewegungsökonomie auf der Basis der Sauerstoffaufnahme dadurch ungenau wird (Foster & Lucia, 2007).

Personen unterscheiden sich oft erheblich in ihrer Bewegungsökonomie. Der Sauerstoffverbrauch beim Laufen im Ausdauerbereich bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit kann sich zwischen einzelnen Personen um 30-40 % unterscheiden. Beim Radfahren bei vorgegebener Wattanzahl kann sich dieser Unterschied immerhin auch noch auf bis zu 20-30 % belaufen (Joyner & Coyle, 2008). In der Regel weisen ausdauertrainierte

Personen ein größeres Maß an Bewegungsökonomie auf als untrainierte, jedoch kommt es auch innerhalb von ausdauertrainierten Gruppen zu teilweise deutlichen Unterschieden bezüglich der Effizienz (Joyner & Coyle, 2008). Die Bewegungsökonomie gilt als besserer Prädiktor für die Ausdauerleistungsfähigkeit als die  $VO_{2max}$  bei Eliteläufern mit ähnlicher  $VO_{2max}$  (Saunders et al., 2004).

Die Ursachen für die Unterschiede in der Bewegungsökonomie sind bis heute nicht völlig geklärt. Es besteht die Vermutung, dass bei Ausdauerleistungen der Anteil an Typ I Muskelfasern entscheidend für die Effizienz sein könnte. Laut Joyner und Coyle (2008) zeigen Typ I Muskelfasern eine größere mechanische Effizienz beim Radfahren mit 60-120 Umdrehungen pro Minute im Vergleich zu Typ II Muskelfasern, da sowohl Typ I als auch Typ II Muskelfasern die höchste mechanische Effizienz bei einer Verkürzungsgeschwindigkeit, die ungefähr einem Drittel der maximalen Verkürzungsgeschwindigkeit entspricht, aufweisen. Laut Coyle (1999) weisen typische Trittfrequenzen beim Radfahren eine größere Übereinstimmung mit der effizientesten Verkürzungsgeschwindigkeit von Typ I Muskelfasern als mit der von Typ II Muskelfasern auf, wodurch sich die ökonomischere Arbeitsweise erklären lässt. Die Tatsache, dass hochausdauertrainierte Personen in der Regel einen hohen Anteil an Typ I Muskelfasern besitzen und gleichzeitig eine größere Effizienz im Vergleich zu untrainierten Personen aufweisen, könnte diese Annahme zusätzlich bekräftigen. Allerdings ist anzumerken, dass der Versuch, den prozentuellen Anteil der Typ I Muskelfasern mit der Bewegungsökonomie signifikant zu korrelieren, bis jetzt nur selten geglückt ist (Joyner & Coyle, 2008).

Dies legt die Vermutung nahe, dass die Bewegungsökonomie von der Interaktion mehrerer Faktoren abhängt. Beispielsweise könnten auch die Reduktion der Atemarbeit sowie eine niedrigere Herzfrequenz bei derselben Intensität und eine verbesserte Technik die Ursache für eine effizientere Nutzung der Energie sein. Thomas et al. (1999) konnten beispielsweise feststellen, dass Läufer bei einem simulierten 5 km-Rennen bei einer konstanten Geschwindigkeit, die 80-85 % der  $VO_{2max}$  der Probanden beansprucht, über die Dauer der Belastung eine steigende Ventilation, Herzfrequenz, Körpertemperatur und Laktatkonzentration aufwiesen. Gleichzeitig kam es zu einer Reduktion der Bewegungsökonomie. Diese und andere Studienergebnisse legen die Vermutung nahe, dass der

Energieverbrauch für die Atemarbeit und die Pumparbeit des Herzens die Bewegungsökonomie beeinflussen (Saunders et al., 2004).

Speziell beim Laufen konnte auch gezeigt werden, dass der Energieverbrauch für eine bestimmte Laufgeschwindigkeit negativ mit der Elastizität von Muskeln, Sehnen und Bändern korreliert. Während der exzentrischen Phase des Bodenkontaktes speichern diese Energie. Wenn diese gespeicherte elastische Energie während der konzentrischen Phase wieder freigesetzt wird, reduziert sich der Energieanteil, den das Individuum selbst produzieren muss. Möglicherweise spielt also die Fähigkeit mechanische Energie in Muskeln, Sehnen und Bändern während den Dehnungs-Verkürzungs-Zyklen zu speichern und wieder abgeben zu können, eine entscheidende Rolle für die Bewegungsökonomie beim Laufen (Saunders et al., 2004).

Auch die Körpergröße an sich könnte Einfluss auf die Bewegungsökonomie haben. Foster und Lucia (2007) gehen davon aus, dass eine geringe Körpergröße, wie sie beispielsweise bei Läufern aus Ostafrika häufig vorgefunden wird, vorteilhaft für die Bewegungsökonomie ist. Speziell eine geringe Masse in den unteren Extremitäten soll hier förderlich sein, da bereits gezeigt wurde, dass Gewichte an langen Hebeln einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. In ihrem Review nennen Foster und Lucia (2007) jedoch keine Studie, die untersucht hat, ob eine geringere Masse der unteren Extremitäten tatsächlich eine höhere Bewegungsökonomie bewirkt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bewegungsökonomie von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Diese umfassen sowohl physiologische als auch biomechanische Faktoren.

Bezüglich der Trainierbarkeit der Bewegungsökonomie gibt es bis jetzt wenig aufschlussreiche Studien. Dies liegt vor allem an der eingeschränkten Verfügbarkeit von Studien mit geeignetem Studiendesign, um diese Forschungsfrage zu überprüfen (Joyner & Coyle, 2008; Saunders et al., 2004). Wahrscheinlich scheint jedenfalls ein positiver Einfluss von Krafttraining auf die Laufökonomie zu sein. Vor allem explosives Krafttraining, wie zum Beispiel plyometrisches Training, provoziert neuronale Veränderungen wie eine gesteigerte Aktivierung von motorischen Einheiten und führt somit zu einem Kraftzuwachs bei geringeren Hypertrophieeffekten wie bei manchen anderen Krafttrainingsmethoden, was für Ausdauersportarten vorteilhaft sein kann. Außerdem erhöhen plyometrische

Trainingsformen die Steifigkeit des Muskel-Sehnen-Apparats und steigern somit die Fähigkeit, elastische Energie im Körper zu speichern und wieder abzugeben (Saunders et al., 2004). Neben Krafttraining gibt es auch Hinweise darauf, dass Höhentraining zu einer Verbesserung der Bewegungsökonomie führen kann. Beispielsweise konnten Gore et al. (2001) zeigen, dass bei einer männlichen Stichprobe von Ausdauerathleten nach einer 23-tägigen live high – train low Intervention die submaximale Sauerstoffaufnahme im Vergleich zu einer Kontrollgruppe abnahm während die Effizienz anstieg. Ähnliche Resultate brachte auch eine Studie von Saunders, Telford, Pyne, Hahn und Gore (2009). Auch in ihrer Studie wiesen Probanden nach einer live high – train low Intervention eine niedrigere  $VO_2$  bei submaximalen Belastungen im Vergleich zur Kontrollgruppe auf. Mögliche Erklärungsansätze für durch Höhengaufenthalt bedingte Verbesserungen der Bewegungsökonomie umfassen einen geringeren Energieverbrauch für die Ventilation und einen Shift zu einem größeren glykolytischen Anteil bei der aeroben ATP-Resynthese, da über die Oxidation von Glukose mehr ATP pro Mol Sauerstoff erzeugt werden kann als bei der Verbrennung von Fetten.

#### **2.2.3.4 Ermüdung und Ermüdungsursachen**

Bisher wurde erläutert, dass eine hohe  $VO_{2max}$  und deren Ausnützung bei submaximalen Belastungen sowie eine hohe Bewegungsökonomie die Ausdauerleistungsfähigkeit positiv beeinflussen. Schlussendlich für einen Belastungsabbruch verantwortlich sind jedoch physiologische Vorgänge im menschlichen Körper und die Stoffwechselprodukte, die dabei entstehen.

Werden die Grenzen der Ausdauerleistungsfähigkeit erreicht, kommt es zur Ermüdung. Sie wird als reversible Minderung der Leistungsfähigkeit verstanden. Es wird traditionellerweise zwischen zentraler (Zentralnervensystem) und peripherer (Muskulatur) Ermüdung unterschieden. (Hohmann et al., 2010). Zudem wird in der Literatur häufig darauf hingewiesen, dass Ermüdung prinzipiell in zwei Dimensionen auftritt. Auf der einen Seite manifestiert sich die Ermüdung in einem messbaren Leistungsabfall, wie beispielsweise in der Abnahme der Muskelkraft. Andererseits spielt auch die subjektive Wahrnehmung eine entscheidende Rolle, die dem Phänomen Ermüdung eine psychologische Komponente hinzufügt (Phillips, 2015).

Die im Vordergrund stehenden Ursachen der Ermüdung sind vielfältig und können je nach Art der Belastung unterschiedlich sein. Zu den meist genannten Ursachen zählen unter anderem die Verarmung der Substrate für die ATP-Resynthese (PCr, Glykogen), die Anhäufung von Stoffwechselsubstanzen (z. B.: Laktat, Harnstoff, H<sup>+</sup>-Ionen), Wärme-  
produktion, Elektrolytverschiebungen an der Zellmembran und eine zunehmende Abschwächung von Hormonen und Enzymen. Zudem kann es zur Beeinträchtigung der peripheren Informationsübertragung und zu Hemmungserscheinungen im Zentralnervensystem kommen (Schnabel et al., 2014).

Besonders bei kurzen und hochintensiven Belastungen scheinen der Verbrauch von Kreatinphosphat und die damit einhergehende Akkumulation von P<sub>i</sub> wesentliche Ermüdungsursachen zu sein. Ein weiteres Substrat, dessen Ausschöpfung häufig mit Ermüdung in Verbindung gebracht wird, ist Glykogen. Der Verbrauch an Glykogen steigt mit der Intensität überproportional an und kann beispielsweise während eines Sprints 35 bis 40 Mal so hoch wie beim Gehen sein (Kenney, Wilmore, & Costill, 2012). Auch bei länger anhaltenden Belastungen kann das Ausleeren der Glykogenspeicher (Muskel, Blut, Leber) zur Ermüdung führen, wobei das Leeren der Glykogenspeicher wahrscheinlich nicht die unmittelbare Ursache der Ermüdung, sondern lediglich der erste Schritt in einer Reihe von Vorgängen ist, die schlussendlich zur Ermüdung führen. So ist ein gewisser Anteil an Glykogenstoffwechsel Voraussetzung für die aerobe Energiebereitstellung. Darüber hinaus greift die Muskulatur bei geleerten Glykogenspeichern vermehrt auf die Oxidation von freien Fettsäuren zur Energiegewinnung zurück. Aufgrund der geringeren ATP-Bildungsrate bzw. einem unzureichenden Transport von freien Fettsäuren in die Mitochondrien kann es sein, dass die zur Deckung des Energiebedarfs notwendige Oxidationsrate nicht aufrecht erhalten werden kann und die Intensität somit vermindert oder die Belastung abgebrochen werden muss (Kenney et al., 2012).

Überhitzung ist ein weiterer wesentlicher Faktor, der die Leistungsfähigkeit einschränken kann. Bei körperlicher Belastung kann nur ein Bruchteil der erzeugten Energie für die physikalische Arbeit bzw. Leistung verwendet werden (ca. 25%). Ein weiterer Teil wird für zelluläre Prozesse wie die ATP-Resynthese selbst gebraucht. Der Großteil (ca. 60%) wird jedoch in Wärme umgewandelt (aus der Fünten et al., 2013). Um nicht zu überhitzen, muss diese Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Dies erfolgt in erster

Linie über den Blutfluss zur Haut, welche durch verdunstenden Schweiß gekühlt wird. Bei hochintensiven Belastungen bzw. bei hohen Umgebungstemperaturen oder Dehydration kann die gebildete Wärme nicht mehr ausreichend an die Umgebung abgegeben werden und die Temperatur in der Muskulatur steigt. Es wird angenommen, dass es dadurch zu Einschränkungen der Funktion und des Stoffwechsels der Muskulatur kommt (Coyle, 1999; Kenney et al., 2012).

Eine weitere Ursache für die Ermüdung stellen Nebenprodukte aus den Stoffwechselprozessen wie  $P_i$ , Laktat und  $H^+$  dar. Wie bereits erwähnt, kommt es bei der Spaltung von Kreatinphosphat, aber auch von ATP, zur Anhäufung von  $P_i$ , was negative Auswirkungen auf die Kraftproduktion in den Myofibrillen, eine Abnahme der  $Ca^{2+}$ -Sensitivität und der  $Ca^{2+}$ -Ausschüttung im sarkoplasmatischen Retikulum haben kann. Über lange Zeit wurde auch die Anhäufung von Laktat, das während der anaeroben Glykolyse entsteht, für das Eintreten der Ermüdung verantwortlich gemacht. Moderne Betrachtungsweisen sehen Laktat jedoch als einen wichtigen Stoffwechselmetaboliten, der mithilfe von Transportproteinen zwischen Zellen, Geweben und Organen hin und her transportiert werden kann (Laktat-Shuttle-Theorie) und zur Energiegewinnung beiträgt. Darüber hinaus ist Laktat ein Signalmolekül und hat somit steuernde und regulierende Funktionen (Wahl, Bloch, & Mester, 2009). Einen größeren Einfluss auf die Ermüdung hat die Akkumulation von  $H^+$ , welches ebenfalls ein Nebenprodukt der anaeroben Glykolyse ist. Bei Ansammlung von  $H^+$  kommt es im Muskel zu einer Übersäuerung. Jedoch besitzt der menschliche Organismus die Fähigkeit  $H^+$  zu puffern, wodurch extreme Übersäuerung verhindert wird. Trotzdem kann der pH-Wert im Muskel bei intensiven Belastungen von 7,1 (Normalwert) auf bis zu 6,4 abfallen. Bereits bei einem pH-Wert von 6,9 kommt es zur Hemmung des Enzyms Phosphofruktokinase, welches eine wichtige Rolle im Glukosestoffwechsel spielt. Dies führt zu einer Verringerung der ATP-Produktionsrate durch die Glykolyse. Fällt der pH-Wert weiter auf einen Wert von 6,4 ab, so wird der Abbau von Glykogen aufgrund der hohen  $H^+$ -Konzentration komplett unterbrochen, was einen starken Abfall des ATP zur Folge hat und schlussendlich zur Ermüdung führt. Vor allem bei kurzen, maximalen Belastungen von über 20 bis 30 Sekunden wird dieser Vorgang als Hauptursache der Ermüdung gesehen (Kenney et al., 2012). Es konnte allerdings auch gezeigt werden, dass Probanden zum Zeitpunkt der Ausbelastung nur einen pH-Wert von

ca. 6,9 aufwiesen, was darauf hinweist, dass eine Übersäuerung nicht zwingend die Ursache für einen Belastungsabbruch sein muss (Allen, Lamb, & Westerblad, 2008).

Weiters existieren Studien, die zeigen, dass auch Elektrolyte eine entscheidende Rolle bei der Ermüdung spielen. Ein wesentlicher Faktor scheint hier die Ansammlung von extrazellulärem Kalium zu sein. Während der Muskelaktivität kommt es mit jedem ausgelösten Aktionspotential zum Austreten von  $K^+$ -Ionen aus der Zelle. Dadurch erhöht sich die extrazelluläre  $K^+$ -Konzentration. Im Normalfall wird diese Konzentration über die Natrium-Kalium-Pumpen wieder reduziert und dem Ausgangsniveau angeglichen. Bei wiederholter Auslösung von Aktionspotentialen innerhalb eines kurzen Zeitraums kann es jedoch zu einem zu hohen Austritt von  $K^+$ -Ionen kommen, welcher über die Natrium-Kalium-Pumpen nicht mehr kompensiert werden kann. Somit steigt die Konzentration des extrazellulären  $K^+$ . In experimentellen Settings wurde gezeigt, dass dies bei längere Belastungsdauer zu einer Depolarisation an der Zellmembran, zu einer abnehmenden Erregbarkeit der Muskelzelle und zu einer reduzierten Kraftentwicklung führen kann (Allen et al., 2008). Allerdings besitzt der menschliche Organismus eine Reihe von Mechanismen, die der Akkumulation von extrazellulärem Kalium bzw. depolarisierenden Effekten entgegenwirken. Dazu zählen unter anderem die bereits genannte Natrium-Kalium-Pumpe, die Variation zwischen aktivierten motorischen Einheiten und der kompensatorische Fluss von  $Cl^-$ , welcher der Depolarisation entgegenwirkt und somit die Fähigkeit der  $Na^+$ -Kanäle, Aktionspotentiale zu erzeugen, unterstützt. Diese und viele andere Mechanismen scheinen der Grund zu sein, dass leistungsmindernde Einflüsse von einer erhöhten  $K^+$ -Konzentration zwar in experimentellen Studien nachgewiesen werden können, jedoch in realen Trainingsbedingungen bzw. Belastungssituationen fraglich sind (Allen et al., 2008; Place, Yamada, Bruton, & Westerblad, 2010).

Weiters wird in der Literatur der Einfluss von reaktiven Sauerstoffspezies (=Sauerstoffradikale), welche beispielsweise als Nebenprodukte der Zellatmung in den Mitochondrien gebildet werden, auf die Ermüdung diskutiert. Diese Sauerstoffradikale sind in der Lage, an Proteinen oxidativen Schaden zu verrichten. Es gibt Hinweise, dass kontraktile Proteine und die Natrium-Kalium-Pumpe von Sauerstoffradikalen angegriffen und dadurch in ihren Funktionen eingeschränkt werden können. Dies könnte Ermüdungserscheinungen zur Folge haben (Allen et al., 2008).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Ermüdung ein äußerst komplexes Phänomen darstellt. Die in diesem Kapitel angeführten Mechanismen der Ermüdung haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellen lediglich einen Teil der am meisten diskutierten Ursachen für Ermüdung dar. Die Hintergründe von Ermüdung sind äußerst vielseitig und das tatsächliche Ausmaß der Einflüsse der einzelnen Faktoren auf die Ermüdung ist nach wie vor nicht vollständig geklärt (Allen et al., 2008; Place et al., 2010).

### **2.3 Anforderungsprofil Skibergsteigen**

Skibergsteigen ist eine Sportart, die sich vor allem im Alpenraum sowohl im Freizeit- als auch im Wettkampfsport immer größerer Beliebtheit erfreut. Charakteristisch für die Sportart sind der Aufstieg und die Abfahrt im winterlichen Gebirge mit Skiern. Die dabei zurückgelegte Distanz und die zurückgelegten Höhenmeter können im Freizeitsport stark variieren. Auch bei Wettkämpfen im Skibergsteigen werden sowohl Einzel- als auch Teambewerbe über unterschiedliche Distanzen und Höhenprofile ausgetragen. Einen Spezialfall stellt das sogenannte Vertical Race dar, welches ein reines Aufstiegsrennen darstellt. Ansonsten umfassen die meisten Disziplinen sowohl Aufstiegs- als auch Abfahrtsstrecken. Auch Tragepassagen, in denen die Skier über unwegsames Gelände getragen werden müssen, sind oft Teil von Skibergsteigrennen. Bei Einzelrennen wird in der Regel eine Höhendifferenz von ca. 1600 (+/- 10 %) Höhenmetern mit zwei bis drei Aufstiegsstrecken überwunden. In der Regel werden von der Gesamtdistanz ca. 85 % auf Skiern zurückgelegt und die ersten Läufer/innen kommen normalerweise nach 1.5 bis 2 Stunden ins Ziel (Duc, Cassirame, & Durand, 2011).

Aufgrund der Vielfalt an Disziplinen und unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden können die körperlichen Anforderungen beim Skibergsteigen sehr stark variieren. Vor allem im Wettkampfsport sind diese sowohl im konditionellen als auch im technischen Bereich sehr hoch. Es gibt allerdings nur äußerst wenige Studien, die die physiologischen Anforderungen der Sportart untersuchten. Eine der wenigen Studien zum Thema ist jene von Duc et al. (2011). In dieser Studie wurde versucht, die physiologische Beanspruchung während eines Skibergsteigrennens an 10 Probanden/innen (6 männlich, 4 weiblich) zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurden während des Rennens die Herzfrequenz und die Geschwindigkeit der Probanden/innen gemessen und mit den Werten aus einem

vorangegangenen Feldtest, der bis zur maximalen Ausbelastung durchgeführt wurde, verglichen. Dabei wurden die gemessenen Werte während des Rennens zu Intensitätszonen aus dem Feldtest zugeordnet. Insgesamt wurden drei Intensitätszonen unterschieden. Diese waren: Zone 1 unterhalb der ersten ventilatorischen Schwelle, Zone 2 zwischen erster und zweiter ventilatorischer Schwelle (auch Respiratory Compensation Point) und Zone 3 oberhalb der zweiten ventilatorischen Schwelle. Im Mittel befanden sich die Probanden während des Rennens zu  $7.0 \pm 4.8$  % in Zone 1, zu  $51.3 \pm 4.7$  % in Zone 2 und zu  $42.0 \pm 6.5$  % in Zone 3. Aufgrund dieser Daten schlossen die Autoren, dass bei Skibergsteigen ähnliche Belastungen auftreten wie bei Lauf- oder Skilanglaufdisziplinen mit ähnlicher Dauer.

Eine weitere Studie, die sich mit den physiologischen Anforderungen beim Skibergsteigen beschäftigte, war jene von Tosi, Leonardi und Schena (2009). Sie führten eine Feldstudie auf ca. 1600 Metern Meereshöhe auf einem Gelände mit einer mittleren Steigung von 21 % durch, in der sie den Energieverbrauch beim Skibergsteigen ermittelten. Aus ihren Messergebnissen schlossen sie unter anderem, dass beim Skibergsteigen ein ca. 25 % höherer Energieverbrauch als beim Gehen oder Wandern mit ähnlicher Steigung besteht. Auch im Vergleich zum Schneeschuhwandern wies das Skibergsteigen einen höheren Energieverbrauch bei vergleichbarer Geschwindigkeit, Steigung und Schneebeschaffenheit auf.

Weiters wurde von Diaz et al. (2010) eine Studie zum Ernährungsverhalten und dessen Auswirkung auf verschiedene Enzymaktivitäten bei einer Gruppe von 21 Skibergsteigern während eines zweitägigen Skibergsteigrennens durchgeführt. Unter anderem stellten sie einen gemittelten Anstieg der CK-Werte von  $173 \pm 20$  auf  $664 \pm 74$  Einheiten/Liter fest. Creatin-Kinase tritt bei Zellschädigungen aus den beschädigten Zellen aus und ins Blut über. Vor allem bei ungewohnten Bewegungen, hochintensiven oder extrem langen Belastungen und exzentrischen Muskelbelastungen können solche Zellschädigungen vermehrt auftreten (Diaz et al., 2010). Da es sich bei der Stichprobe um erfahrene Skibergsteiger handelte, ist ein ungewohnter Bewegungsablauf als Ursache für die erhöhten CK-Werte eher auszuschließen. Daher weisen diese Ergebnisse auf eine hohe Belastung während des Skibergsteigens hin. Auch exzentrische Belastungen können beispielsweise

beim Bergabgehen, bei Tragepassagen oder bei Abwärtsfahrten im freien Gelände auftreten und ebenfalls für die Erhöhung der CK-Werte verantwortlich sein.

Über die erwähnten Studien hinaus konnten im Zuge der Literaturrecherche für diese Arbeit keine weiteren Untersuchungen gefunden werden, die Aufschluss über die spezifischen physiologischen Anforderungen des Skibergsteigens geben. Aus den erwähnten Studien lässt sich schließen, dass vor allem Skibergsteigen als Wettkampfdisziplin sowohl technisch als auch konditionell hohe Ansprüche an Athleten/innen stellt. Beispielsweise kann man von den Studienergebnissen von Duc et al. (2011) ableiten, dass beim Skibergsteigen sowohl aerobe als auch anaerobe Stoffwechselprozesse von entscheidender Bedeutung sind. Anzumerken ist, dass es sich bei der Studie um ein eher kurzes Rennen handelte (15 km Gesamtlänge, 1342 m positive Höhendifferenz, 1187 negative Höhendifferenz, Zeit des besten Probanden: 01:26:03). Bei längeren Distanzen ist davon auszugehen, dass aerobe Prozesse der Energiebereitstellung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Der Umkehrschluss gilt natürlich auch für kürzere Distanzen.

Ein Faktor, der bezüglich der Anforderungen des Skibergsteigens nicht unbeachtet bleiben sollte, ist die Höhe. Skitouren und auch Skibergsteigrennen können häufig auch über 2000 m Meereshöhe hinausführen. Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck kontinuierlich ab. Gleichzeitig nimmt auch der partielle Sauerstoffdruck ( $PO_2$ ) in der eingeatmeten Luft und im arteriellen Blut ab, da dieser Druck in unmittelbarem Zusammenhang mit dem gesamten Luftdruck steht. In unserer Atmosphäre weist trockene Luft eine fraktionelle Sauerstoffkonzentration von 0.209 auf. Beim Einatmen wird diese Luft mit Wasserdampf angereichert, welcher bei Körpertemperatur einen partiellen Druck von 47 mmHg aufweist. Dementsprechend verringert sich dadurch der Partialdruck des Sauerstoffs ( $pO_2$ ). Der partielle Sauerstoffdruck wird aus der fraktionellen Konzentration des Sauerstoffs in der Atemluft multipliziert mit dem Luftdruck minus dem Druck des Wasserdampfs berechnet. Auf Meereshöhe ergibt sich daher ein  $pO_2$  in der eingeatmeten Luft von ca.  $0.21 \cdot (760 - 47) = 149$  mmHg. In 2000 Metern über dem Meeresniveau beträgt dieser Druck nur noch  $0.21 \cdot (550 - 47) = 106$  mmHg. Da der Gasaustausch in den Lungenalveolen auf dem Prinzip der Diffusion entlang eines Konzentrationsgefälles basiert, hat dies einen entscheidenden Einfluss auf die Sauerstoffsättigung des Blutes. Der Sauerstoffbedarf des Organismus bleibt jedoch gleich wie auf Meereshöhe. Um den geringeren  $pO_2$  zu

kompensieren, werden die Atemfrequenz und die Herzfrequenz gesteigert. Ersteres kann durch die verstärkte Aufnahme von  $O_2$  bei verstärkter Abgabe von  $CO_2$  zu einer pH-Wertverschiebung in den basischen Bereich zur Folge haben. Zweites verringert die Durchflusszeit des Blutes in den Alveolen aber auch in die Kapillaren und somit das Zeitfenster, um Sauerstoff aus der Lunge ins Blut aufzunehmen bzw. in die Zellen abzugeben. Zudem haben die erhöhte Atemfrequenz und Auswurfleistung des Herzens auch einen erhöhten Energieverbrauch zur Folge (Faller & Schünke, 2008; Nussbaumer-Ochsner & Bloch, 2007).

## **2.4 Einflussmöglichkeiten von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen**

In Kapitel 2.1 wurden der Begriff Erdung genau erklärt und der aktuelle Stand der Wissenschaft über den Einfluss von Erdung auf die menschliche Physiologie aufgearbeitet. Ebenfalls wurden der Begriff Ausdauer im Kapitel 2.2 eingegrenzt und Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit diskutiert. Zuletzt wurde das physiologische Anforderungsprofil beim Skibergsteigen in Kapitel 2.3 betrachtet. Aufgabe dieses Kapitels ist es nun, die vorherigen Kapitel zu vereinen und den möglichen Einfluss von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen zu diskutieren.

Dieser Einfluss könnte auf mehreren Ebenen bestehen. Wie bereits erwähnt, wurde beispielsweise während geerdetem Yoga eine Reduktion der Blutviskosität nachgewiesen (R. Brown & Chevalier, 2015). Ein Erklärungsansatz liegt darin, dass Erdung möglicherweise das Zeta-Potential der roten Blutkörperchen erhöht und somit zu einer größeren Abstoßung zwischen den Blutkörperchen führt (Chevalier et al., 2013). Dies könnte für sportliche Aktivitäten insofern von Bedeutung sein, da gezeigt wurde, dass Blutviskosität im negativen Zusammenhang mit  $VO_{2max}$  und der 4 mmol/l Laktatschwelle steht (Brun et al., 1995). Wie bereits diskutiert, sind beide Kenngrößen für die Ausdauerleistungsfähigkeit. Brun et al. argumentieren, dass eine erhöhte Aggregation von roten Blutkörperchen die Mikrozirkulation in den Kapillaren im Muskel verschlechtert und somit den aeroben Stoffwechsel einschränkt. Demnach könnte eine geringere Blutviskosität, wie sie bereits in Verbindung mit Erdung nachgewiesen wurde, sich positiv auf die Ausdauerleistungsfähigkeit auswirken.

Weiters wurde in einer Vielzahl von Studien eine stressregulierende Wirkung von Erdung nachgewiesen. Diese könnte sich ebenfalls auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Beispielsweise konnten Woodman und Hardy (2003) im Rahmen einer Meta-Analyse feststellen, dass sowohl Ängstlichkeit als auch Selbstvertrauen im signifikanten Zusammenhang mit der Wettkampfleistung stehen. Die Beziehung zwischen Ängstlichkeit und Wettkampfleistung war negativ, zwischen Selbstvertrauen und Wettkampfleistung positiv. Vor allem bei der mentalen Überwindung bei sehr intensiven Beanspruchungen oder bei Wettkampfsituationen spielt also auch die psychologische Komponente eine entscheidende Rolle, welche unter Umständen auch durch Erdung beeinflusst werden könnte. In einer Studie von Chevalier et al. (2006) konnte weiters eine „normalisierende“ Wirkung auf das EMG des rechten und linken Trapezius festgestellt werden. Weinberg (1978) stellte fest, dass ängstliche Personen im Gegensatz zu nicht ängstlichen Personen bei Wurfaufgaben bereits vor, aber auch während und nach dem Wurf über einen längeren Zeitraum eine höhere EMG-Aktivität aufweisen und somit mehr Energie für dieselbe Aufgabe benötigen. Laut Weinberg war dies in seiner Studie auf ineffiziente Aktivierung von Agonisten und Antagonisten zurückzuführen. Personen mit hoher Ängstlichkeit tendierten eher zur gleichzeitigen Kontraktion, während Personen mit niedriger Ängstlichkeit eine sequentielle Kontraktion zeigten. Eine zu hohe EMG-Aktivität und eine ineffiziente Aktivierungsabfolge von Agonisten und Antagonisten schränkt demnach die Bewegungsökonomie ein. Erdung könnte unter Umständen auch hier Einfluss nehmen.

Die freien Elektronen der Erde könnten die Prozesse der Energiebereitstellung aber auch direkt beeinflussen. Oschman (2009) stellte die Hypothese auf, dass freie Elektronen der Elektronentransportkette zugeführt und dort zur Gewinnung von ATP verwendet werden können. Wäre dies der Fall, so würde dem menschlichen Organismus neben den energiereichen Phosphaten, Fetten, Kohlehydraten und Eiweißen eine weitere Energiequelle zur Verfügung stehen. Dies würde dem Menschen helfen, seine Energiereserven zu schonen. Unter anderem könnte sich dies durch eine niedrigere Laktatproduktion bei geringerer benötigter anaerober, laktazider Energiebereitstellung bemerkbar machen. Der Beweis für die Hypothese Oschman's ist jedoch noch ausständig.

Aufgrund der angeführten Überlegungen kann zusammengefasst werden, dass es theoretisch eine Reihe von Vorgängen gibt, durch die Erdung Einfluss auf die

Ausdauerleistungsfähigkeit nehmen könnte. Nun stellt sich die Frage, wie geeignet Skibergsteigen als Sportart ist, um diese möglichen Effekte zu überprüfen. Diese Frage kann mit zwei Argumenten beantwortet werden. Erstens handelt es sich beim Skibergsteigen um eine Ausdauersportart, die, je nach Wettkampfdisziplin, aber auch im Freizeitsport, eine lange Belastungsdauer aufweisen kann. Da die Effekte von Erdung auf die motorische Leistungsfähigkeit wahrscheinlich gering sind, werden sie, wenn sie bestehen sollten, erst bei längeren Belastungen aufgrund der Kumulation über die Dauer zu entscheidenden Unterschieden in der Leistungsfähigkeit führen. Daher ist es sinnvoll, vor allem Ausdauersportarten, bei denen lange Belastungszeiträume auftreten können, im Kontext von Erdung zu untersuchen. Skibergsteigen erfüllt dieses Kriterium. Zweitens macht es Sinn, Sportarten zu untersuchen, bei denen das Herstellen einer Erdungssituation auch in der Praxis möglich ist. Die meisten Radrennen sowie klassische Langstreckenläufe finden auf Asphalt statt. Auf diesem Untergrund eine leitende Verbindung zum Erdboden herzustellen, stellt sich in der Praxis als schwierig heraus. Skibergsteigen wird jedoch auf Schnee ausgeführt, welcher eine gute Leitfähigkeit besitzt. Personen können über entsprechende Ausrüstung beim Skibergsteigen demnach relativ einfach geerdet werden. Skibergsteigen stellt also eine gut geeignete Sportart dar, um mögliche erdungsbedingte Auswirkungen auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu untersuchen.

## **2.5 Forschungsdefizit**

Erdung und deren Einfluss auf den menschlichen Organismus ist ein sehr junges Forschungsgebiet. Demnach wurden bis jetzt nur wenige Studien in diesem Kontext durchgeführt. Diese weisen teilweise methodische Mängel (z.B.: fehlende Kontrollgruppen) auf. Zudem konnten häufig nur Tendenzen, aber keine statistisch abgesicherten Unterschiede nachgewiesen werden. Weiters wurden die meisten Studien von Personen (Chevalier, Oschman, Sinatra) mit persönlichem Interesse an der Erdungstechnologie durchgeführt, was eine unvoreingenommene Interpretation der Ergebnisse erschweren kann.

Erdung und deren Auswirkung auf sportliche Aktivität im speziellen wurde bisher kaum untersucht. Im Zuge der Literaturrecherche für diese Arbeit konnten drei Studien gefunden werden, die sich schwerpunktmäßig mit dem Einfluss von Erdung auf die

Leistungsfähigkeit während körperlicher Aktivität beschäftigten. Zwei davon wurden am Fahrradergometer durchgeführt. Dies kann aufgrund der großen Möglichkeit zur Standardisierung sehr aufschlussreich über die Zusammenhänge von Erdung und motorischer Leistungsfähigkeit sein. Andererseits ist Radfahren eine Sportart, die, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, nur eine eingeschränkte Möglichkeit zur Anwendung der Erdungstechnologie in der Praxis bietet.

Die Untersuchung, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurde, behandelt demnach ein Gebiet mit großem Forschungsdefizit. Zudem wird sie an einer Sportart durchgeführt, die auch in der Praxis die Möglichkeit bietet, Erdungstechnologien relativ einfach zur Verfügung zu stellen. Sollten sich in dieser Studie erdungsbedingte Einflüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit herauskristallisieren und sollten diese auch in weiteren Studien zur Thematik bestätigt werden, so würde das Gebiet Erdung ein neues Feld mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten im Breiten- und Spitzensport darstellen.

### 3 Fragestellung und Hypothesen

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit ist jene nach dem Einfluss von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen.

Aufgrund der Überlegungen, die im Kapitel 2.4 getätigt wurden, könnte die Ausdauerleistungsfähigkeit auf unterschiedlichen Ebenen von Erdung beeinflusst werden. So könnte es zu metabolischen Veränderungen kommen. Auch der Gesamtenergieumsatz könnte betroffen sein. Diese könnten sich unter anderem im Blutlaktat, den Atemgasen und der Herzfrequenz bemerkbar machen. Sowohl erdungsbedingte metabolische Veränderungen als auch psychologische Veränderungen könnten sich zudem auf das subjektive Belastungsempfinden auswirken. Auch die maximale erreichte Geschwindigkeit im Rampenprotokoll könnte sich aufgrund der Erdungssituation unterscheiden. Daher ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende Hypothesen:

- H1: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Sauerstoffaufnahme bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H2: Es gibt einen Unterschied bezüglich der maximalen Sauerstoffaufnahme bei einem Rampenprotokoll mit ansteigender Belastung beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H3: Es gibt einen Unterschied bezüglich des RER bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H4: Es gibt einen Unterschied bezüglich des maximalen RER bei einem Rampenprotokoll mit ansteigender Belastung beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H5: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Atemfrequenz bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H6: Es gibt einen Unterschied bezüglich der maximalen Atemfrequenz bei einem Rampenprotokoll mit ansteigender Belastung beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.

- H7: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Ventilation bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H8: Es gibt einen Unterschied bezüglich der maximalen Ventilation bei einem Rampenprotokoll mit ansteigender Belastung beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H9: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Laktatproduktion bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H10: Es gibt einen Unterschied zwischen der maximalen Laktatproduktion bei einem Rampenprotokoll mit ansteigender Belastung beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H11: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Herzfrequenz bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H12: Es gibt einen Unterschied bezüglich der maximalen Herzfrequenz bei einem Rampenprotokoll mit ansteigender Belastung beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H13: Es gibt einen Unterschied bezüglich des subjektiven Belastungsempfindens bei submaximalen Dauerbelastungen beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.
- H14: Es gibt einen Unterschied bezüglich der maximalen erreichten Geschwindigkeit bei einem Rampenprotokoll beim Skibergsteigen zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation.

## **4 Methodik**

### **4.1 Untersuchungsdesign und Stichprobe**

#### **4.1.1 Stichprobe**

Die Stichprobe setzte sich aus 20 männlichen Probanden zusammen. Das mittlere Alter betrug  $30.2 \pm 10.0$  Jahre, das Durchschnittsgewicht lag bei  $75.5 \pm 7.2$  kg und die durchschnittliche Größe war  $177 \pm 7$  cm. Alle Probanden hatten bereits Vorerfahrung im Skibergsteigen. Die Probanden wurden durch persönliche Ansprache rekrutiert. Als Ausschlusskriterium für die Studie zählten Erkrankungen des Herzkreislaufsystems und des Bewegungsapparates, die bei der Ausführung der Belastungstests zu Komplikationen führen könnten. Zudem konnten durch die begrenzte Verfügbarkeit von Material nur Personen mit einer Skischuhgröße (EU) von 38 – 44 an der Studie teilnehmen.

#### **Untersuchungsdesign**

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine Blindstudie unter standardisierten Bedingungen mit einem cross-over Design. Zu Beginn der Untersuchung wurden die Probanden über den Studienablauf informiert und über die möglichen Risiken eines Ausbelastungstests am Laufbandergometer aufgeklärt. Den Probanden wurde mitgeteilt, dass es sich bei der Studie um Materialtestungen handelt, sie wussten aber nicht, dass das Thema Erdung untersucht wurde. Sie wurden außerdem darüber aufgeklärt, dass sie an der Untersuchung freiwillig teilnehmen und diese jederzeit und ohne notwendige Angabe von Gründen abbrechen können. Anschließend unterzeichneten die Probanden eine Einverständniserklärung.

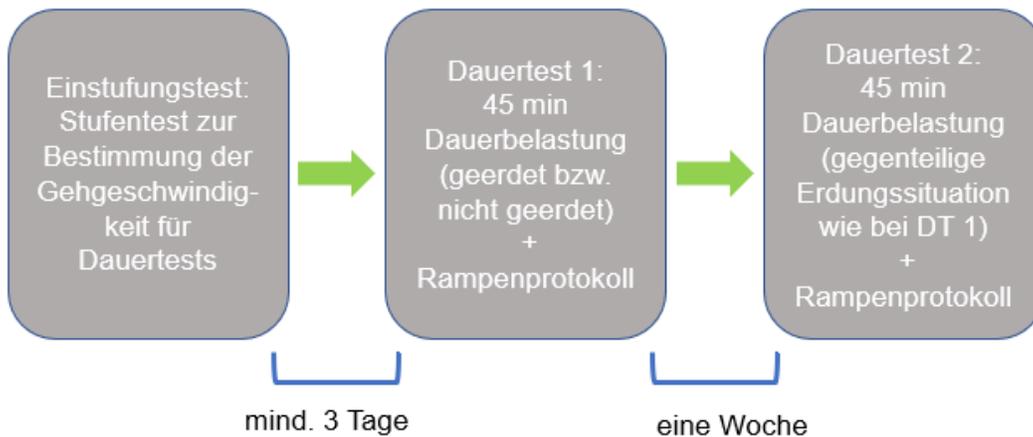
Für die Durchführung der Studie wurden aus der Stichprobe zwei gleich große Gruppen zu je 10 Personen (siehe Tabelle 1) gebildet. Die Zuteilung zu den Gruppen fand randomisiert statt. Lediglich die Testleitung wusste, in welcher Gruppe sich die Probanden befanden, die Probanden selbst wurden darüber nicht informiert.

**Tab. 1:** Daten zu den zwei Gruppen

	Gruppe 1		Gruppe 2	
	M	± SD	M	± SD
Alter [Jahre]	28.7	8.9	31.7	11.4
Körpergröße [cm]	179	9	176	5
Gewicht [kg]	75.5	8.4	75.6	6.3

Jeder Proband musste insgesamt drei Belastungstests (einen Stufentest und zwei Dauertests) auf dem Laufbandergometer durchführen. Alle Tests wurden mit vollständiger Tourenskiausrüstung (Ski, Skischuhe, Stöcke) durchgeführt. Beide Gruppen absolvierten als erstes einen Stufentest mit ansteigendem Belastungsprotokoll bis zur Ausbelastung. Dieser Test wurde im nichtgeerdeten Zustand durchgeführt und diente der Festlegung der Gehgeschwindigkeit für die folgenden zwei Dauertests. Für die Dauertests wurde jene Gehgeschwindigkeit gewählt, bei der die Probanden beim Stufentest eine Blutlaktatkonzentration von 1.5 – 2.0 mmol/l aufwiesen. Die Länge der Dauertests betrug jeweils 45 Minuten pro Test. Nach Ende der 45 Minuten Dauerbelastung führten die Probanden noch ein anschließendes Rampenprotokoll bis zur Ausbelastung durch.

Gruppe 1 führte den ersten Dauertest im geerdeten Zustand und den zweiten im nichtgeerdeten Zustand durch. Im Sinne des cross-over Designs führte die Gruppe 2 demnach den ersten Test im nichtgeerdeten Zustand und den zweiten im geerdeten Zustand durch. Die Probanden wurden bei keinem der Tests über ihren Erdungszustand informiert. Zwischen dem Stufentest und dem ersten Dauertest lagen mindestens drei Tage, um eine vollständige Regeneration zu gewährleisten. Zwischen dem ersten und zweiten Dauertest lag eine Woche (Abb. 5).



**Abb. 5:** Schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns

#### 4.1.2 Testprotokolle

Die Startgeschwindigkeit beim Stufentest betrug 2.6 km/h. Die Stufendauer betrug 4 Minuten und das Inkrement 0.4 km/h. Der gesamte Test wurde bei einer Laufbandsteigung von 24 % durchgeführt. Am Ende jeder Stufe stoppte das Laufband für 30 Sekunden. Diese 30 Sekunden dienten der Blutabnahme für die Laktatdiagnostik. Die Probanden trugen während des gesamten Testverlaufs eine Atemmaske für die Spirometrie. Zudem wurden sie dazu angehalten, den Test bis zur Ausbelastung durchzuführen. Sie konnten den Test bei Erreichung der Ausbelastung selbst durch das Drücken eines Knopfes beenden. Zusätzlich waren sie zur Absicherung in einen Gurt eingehängt, der im Falle eines Sturzes den Probanden aufzufangen und das Laufband sofort gestoppt hätte. Dieser Fall trat jedoch bei keiner der Messungen ein.

Das Testprotokoll der beiden Dauertests (Abb. 6) war für jeden Probanden beim ersten und zweiten Dauertest jeweils ident. Ein Dauertest setzte sich aus einer 45-minütigen Dauerbelastung und einem anschließenden Rampenprotokoll zusammen. Die Gehgeschwindigkeit für die Dauerbelastung wurde aus dem Stufentest abgeleitet (Geschwindigkeit bei 1.5 – 2.0 mmol/l Laktat aus Stufentest) und blieb über die gesamten 45 Minuten gleich. Die 45 Minuten der Dauerbelastung wurden nach jeweils 15 Minuten für 30 Sekunden unterbrochen. Diese Unterbrechung diente wieder der Blutabnahme für die Laktatdiagnostik. Nach Absolvierung der 45-minütigen Dauerbelastung schloss nach 30 Sekunden Pause für die Blutabnahme das Rampenprotokoll an. Das Rampenprotokoll

startete bei 3.4 km/h. Die Geschwindigkeit wurde alle 30 Sekunden um 0.4 km/h gesteigert. Die Probanden waren wieder angehalten, das Rampenprotokoll bis zur Ausbelastung durchzuführen und bei Erreichen der Ausbelastung den Test selbst durch das Drücken eines Knopfes zu beenden. Die Laufbandsteigung betrug auch bei den Dauertests über den gesamten Testverlauf 24 %.



**Abb. 6:** Beispielhafte Darstellung eines Dauertests mit den 15-Minutenblöcken und dem anschließenden Rampenprotokoll.

#### 4.1.3 Herstellung der Erdungssituation im Labor

Um die Erdung der Probanden während den Untersuchungen gewährleisten zu können, wurden speziell für diesen Zweck angepasste Materialien verwendet. Während der Testung mussten die Probanden Socken mit feinen Kupferfasern, die der elektrischen Leitfähigkeit dienen, anziehen. Die Tourenskistiefel stammten von der Firma Atomic (AUT) und waren vom Modell Backland Carbon. Die Sohle der Schuhe war mit einer speziell für die Studie entwickelten Einlage versehen, die ebenfalls leitende Kupfereinlagen enthielt. Diese Einlagen waren über leitende Verbindungen mit ebenfalls leitenden Skibindungen der Firmen Atomic und Dynafit (ITA) verbunden. Diese Bindungen standen



dem zweiten Dauertest möglichst an dem Verhalten vor dem ersten Dauertest zu orientieren. Das Verhaltens- und Ernährungsprotokoll sollte als Orientierungshilfe dienen.

Zudem wurde bei jedem Testtermin versucht, möglichst idente Umgebungsbedingungen zu erzeugen. Die Raumtemperatur wurde mithilfe einer Klimaanlage auf 21° C gehalten und mit einer mobilen Wetterstation überprüft. Bei jedem Testtermin wurde auf derselben Stelle ein Ventilator aufgestellt und auf mittlerer Stufe betrieben.

Jeder Proband erhielt bei jedem Testtermin jeweils dieselben Skischuhe und dieselben Tourenskier. Auch die Stöcke wurden bei jedem Testtermin auf dieselbe Länge eingestellt. Zudem wurde den Probanden bei jedem Testtermin die gleiche Spirometriemaske angelegt. Um gewährleisten zu können, dass die Probanden bei jedem Testtermin die gleiche Ausrüstung bekamen, wurden die verwendeten Materialien für jeden Probanden auf seinem jeweiligen Untersuchungsprotokoll schriftlich festgehalten.

## **4.2 Messverfahren**

### **4.2.1 Anthropometrische Messungen**

Für die Bestimmung des Körpergewichts wurde eine mechanische Waage verwendet. Das Körpergewicht wurde ohne Schuhe und mit leichter Sportbekleidung gemessen. Die Körpergröße wurde mithilfe eines an der Wand befestigten Maßbandes bestimmt. Die Probanden standen während der Messung der Körpergröße möglichst aufrecht mit dem Rücken an der Wand und die Größe wurde vom Scheitel bis zur Fußsohle gemessen.

### **4.2.2 Gasstoffwechselformung**

Sowohl während des Stufentests als auch während der beiden Dauertests mit den anschließenden Rampenprotokollen wurden die Atemgase der Probanden gemessen. Dazu trugen die Probanden über den gesamten Testverlauf eine Atemmaske, die Mund und Nase luftdicht umschloss. Für die Messung der Atemgase wurde die ZAN 600 der Firma ZAN Messgeräte GmbH (AUT) verwendet. Die Messung erfolgte mit der Atemzug-zu-Atemzug-Methode (breath-by-breath). Die Auswertung der Messdaten erfolgte in der Computersoftware ZAN Programm WinGPI. Zu Beginn jedes Messtages wurden eine Gaskalibration und eine Flowmeterprüfung durchgeführt.

### **4.2.3 Laktatdiagnostik**

Das Blut für die Laktatdiagnostik wurde aus dem Kapillarblut des rechten Ohrläppchens entnommen. Bei jeder Messung wurden 20 µl Blut in einer End-to-End-Kapillare aufgefangen, wobei darauf geachtet wurde, dass die Kapillaren vollständig gefüllt wurden. Die volle Kapillare wurde anschließend in ein Eppendorfer Gefäß, in dem sich Hämolyse-lösung befand, gegeben, und das Blut wurde durch leichtes Schütteln vollständig mit der Hämolyse-lösung vermischt. Nach Beendigung der Testung wurden die entnommenen Laktatproben mithilfe des Geräts BIOSEN S\_Line der Firma EFK Diagnostik (DE) ausgewertet.

Sowohl vor dem Stufentest als auch vor den Dauertests wurde jeweils vor Testbeginn das Ruhelaktat der Probanden bestimmt. Beim Stufentest wurde während des Tests in den 30 Sekunden Pause nach jeder Stufe, unmittelbar nach Testabbruch sowie drei Minuten nach Testabbruch eine Laktatprobe entnommen. Während des Dauertests erfolgte die Laktatmessung in den 30 Sekunden Pause nach jedem 15-Minutenblock, unmittelbar nach Testabbruch sowie drei und fünf Minuten nach Testabbruch.

### **4.2.4 Herzfrequenz**

Die Messung der Herzfrequenz erfolgte über die Pulsuhr Suunto Ambit 3 der Firma Suunto (FIN). Der dafür benötigte Brustgurt wurde unterhalb der Brustmuskulatur angelegt und die Elektroden wurden vor dem Anlegen leicht mit Wasser benetzt, um eine bessere Leitfähigkeit gewährleisten zu können. Die Auswertung der Herzfrequenzdaten erfolgte über die Software Movescount von Suunto.

### **4.2.5 Subjektives Belastungsempfinden**

Für die Bestimmung des subjektiven Belastungsempfindens wurde die Borg-Skala mit der Skalierung 6-20 verwendet. Die Probanden wurden bei den Dauertests in der 15., 30., und 45. Belastungsminute sowie unmittelbar nach Abbruch des auf die Dauerbelastung folgenden Rampentests nach ihrem Belastungsempfinden befragt. Als Orientierungshilfe wurde ihnen dazu die Borg-Skala vorgelegt.

## 4.3 Statistik

### 4.3.1 Deskriptive Statistik

Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Kenngrößen wurden teilweise im SPSS und teilweise im MS Excel berechnet. Die für die Darstellung der Ergebnisse verwendeten Grafiken wurden ausschließlich im MS Excel erstellt.

Für die Dauerbelastungen wurde für die Kenngrößen  $VO_{2\text{mean}}$ ,  $RER_{\text{mean}}$ ,  $VE_{\text{mean}}$ , und  $AF_{\text{mean}}$  jeweils der Mittelwert über die letzten zwei Minuten der 15-Minutenbelastungsblöcke berechnet.

Ebenso wurden für die Dauerbelastung  $VO_{2\text{peak}}$ ,  $RER_{\text{peak}}$ ,  $VE_{\text{peak}}$  und  $AF_{\text{peak}}$  für jeden 15-Minutenblock und für die Rampe berechnet. Dabei wurde jeweils der Maximalwert aus den gleitenden Mittelwerten der 10 Atemzüge im MS Excel erhoben.

### 4.3.2 Analytische Statistik

Für die Unterschiedsprüfungen wurde ein T-Test für verbundene Stichproben im SPSS durchgeführt. Bei der Interpretation der Ergebnisse der T-Tests wurden Signifikanzwerte von  $p < .05$  als signifikant, von  $p < .01$  als hochsignifikant und von  $p < .001$  als höchstsignifikant interpretiert. Signifikanzen wurden zweiseitig geprüft.

Um Effektstärken zu ermitteln, wurde im SPSS das partielle  $\eta^2$  ( $\rho\eta^2$ ) berechnet. Ein  $\rho\eta^2 > .01$  wurde als kleiner,  $> .06$  als mittlerer und  $> .14$  als großer Effekt interpretiert.

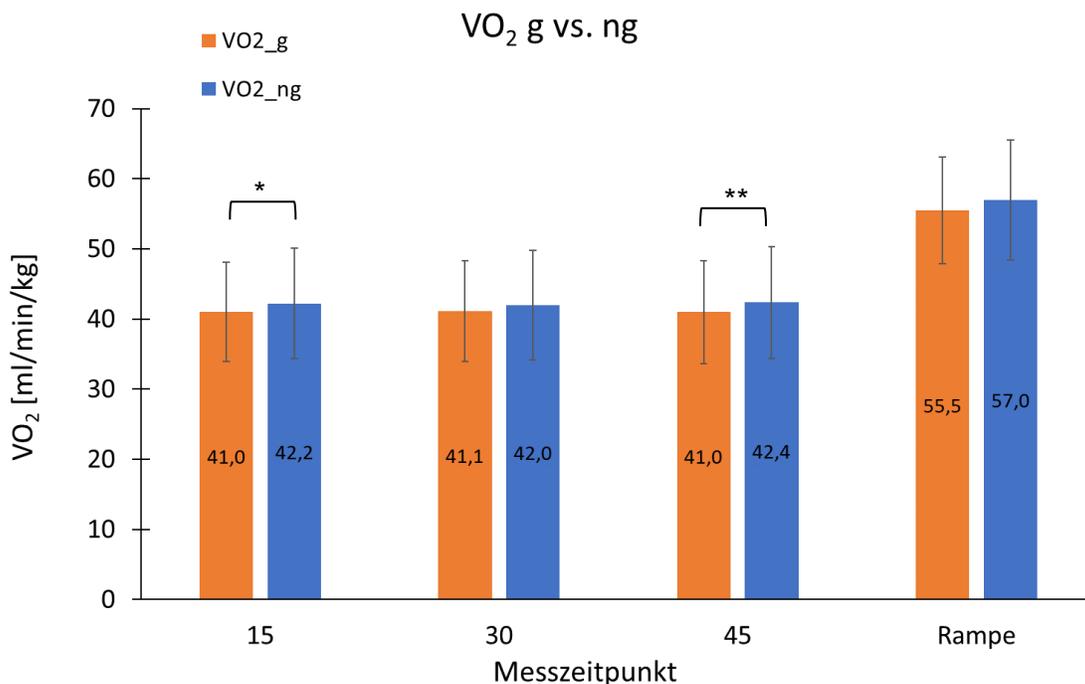
## 5 Ergebnisse

Alle 20 Probanden konnten sowohl den Einstufungstest als auch die beiden Dauertests im vorgesehenen Zeitraum absolvieren. Ein Proband brach beim nichtgeerdeten Testtermin das Rampenprotokoll vor Erreichen der Ausbelastung aufgrund von Schmerzen ab. Bei den Berechnungen von Werten aus dem Rampenprotokoll wurden seine Daten nicht verwendet.

### 5.1 Spirometrie

#### 5.1.1 Sauerstoffaufnahme

Abbildung 8 zeigt die Sauerstoffaufnahme gemittelt über die letzten 2 Minuten der jeweiligen 15-Minutenblöcke bzw. den Peakwert ermittelt aus den gleitenden Mittelwerten über 10 Atemzüge während des Rampenprotokolls. Es ergaben sich sowohl für den ersten 15-Minutenblock als auch für den dritten 15-Minutenblock signifikante Unterschiede.



**Abb. 8:** Gemittelte Sauerstoffaufnahme über die letzten 2 Minuten der jeweiligen Stufe bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll bei geerdeter (g) und nichtgeerdeter (ng) Situation.  $p$ -Werte und  $\eta^2$ : Minute 15:  $p=.020$ ,  $\rho\eta^2=.254$ ; Minute 30:  $p=.102$ ,  $\rho\eta^2=.134$ ; Minute 45:  $p=.003$ ,  $\rho\eta^2=.406$ ; Rampe:  $p=.083$ ,  $\rho\eta^2=.187$ .  $*=p<.05$ ,  $**p<.01$

## 5.1.2 Respiratorisches Exchange Ratio (RER)

Bezüglich des RER wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt (Tab. 2)

**Tab. 2:** Gemittelter RER über die letzten zwei Minuten der jeweiligen Stufen bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll

	<b>g</b>		<b>ng</b>		<b>p</b>
	M	± SD	M	± SD	
RER 15	0.98	0.03	0.98	0.04	.806
RER 30	0.98	0.05	0.98	0.04	.553
RER 45	0.97	0.04	0.97	0.04	.870
RER <sub>peak</sub>	1.26	0.1	1.3	0.17	.338

Anmerkung: RER=Respiratorisches Exchange Ratio. g=geerdet, ng=nichtgeerdet, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung.

## 5.1.3 Atemfrequenz und Ventilation

Bei den Atemfrequenzen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation festgestellt werden. Bei der Ventilation wurde jedoch in der ersten Stufe ein signifikant niedrigerer Wert in der geerdeten Testsituation gemessen. Die genauen Werte können Tabelle 3 bzw. 4 entnommen werden.

**Tab. 3:** Gemittelte Atemfrequenz über die letzten zwei Minuten der jeweiligen Stufen bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll

	<b>g</b>		<b>ng</b>		<b>p</b>
	M	± SD	M	± SD	
AF 15	33	6	34	6	.094
AF 30	36	7	36	7	.487
AF 45	37	7	36	7	.626
AF <sub>peak</sub>	54	14	53	12	.238

Anmerkung: AF=Atemfrequenz [1/Min]. g=geerdet, ng=nichtgeerdet, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung.

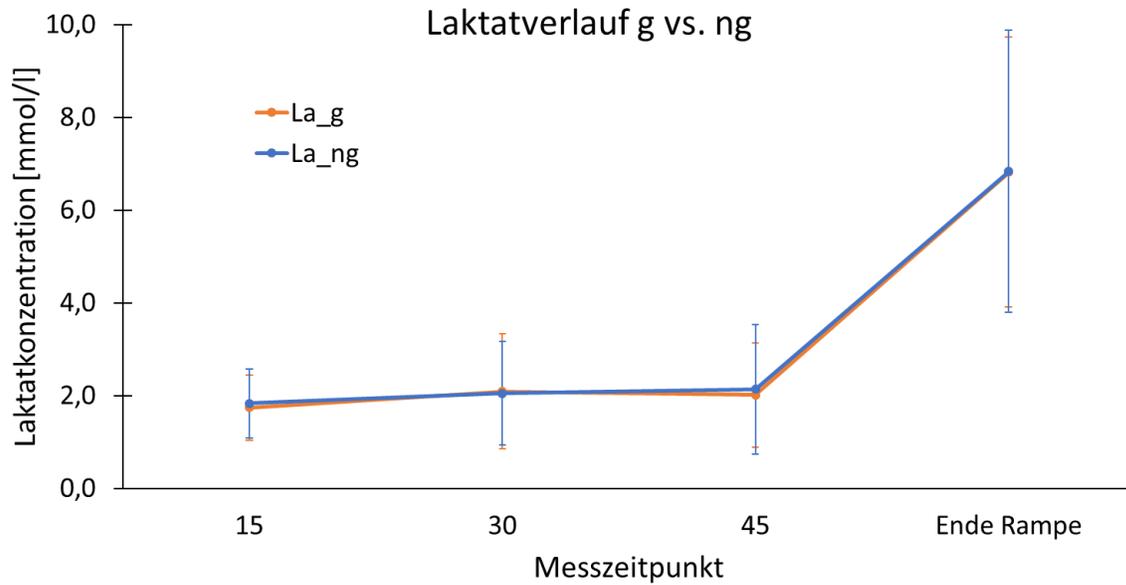
**Tab. 4:** Gemittelte Ventilation über die letzten zwei Minuten der jeweiligen Stufen bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll.

	<b>g</b>		<b>ng</b>		<b>p</b>
	M	± SD	M	± SD	
VE 15	77.7	16.7	80.3	17.7	.030*
VE 30	83.7	21.5	84.7	21.9	.395
VE 45	82.8	22.5	85.0	21.9	.169
VE <sub>peak</sub>	147.7	26.2	148.1	26.8	.839

Anmerkung: VE=Ventilation [l/min]. g=geerdet, ng=nichtgeerdet, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung. \*=p<.05.

## 5.2 Laktat

Die Stichprobe wies in Ruhe vor Testbeginn einen Laktatwert von  $1.1 \pm 0.3$  im geerdeten und  $1.0 \pm 0.3$  im nicht geerdeten Zustand auf ( $p=.427$ ). Im Mittel wies die geerdete Gruppe am Ende der 15., 30. und 45. Testminute sowie am Ende der Rampe einen Laktatwert von jeweils  $1.7 \pm 0.7$  mmol/l,  $2.1 \pm 1.3$  mmol/l,  $2.0 \pm 1.1$  mmol/l und  $6.8 \pm 2.9$  mmol/l auf. Für die nicht geerdete Gruppe beliefen sich diese Werte auf  $1.8 \pm 0.7$  mmol/l,  $2.1 \pm 1.1$  mmol/l,  $2.1 \pm 1.4$  mmol/l und  $6.8 \pm 3.0$  mmol/l. Abbildung 9 veranschaulicht diese Ergebnisse.



**Abb. 9** Laktatkonzentration der Stichprobe bei geerdeter (g) und nicht geerdeter (ng) Situation nach 15, 30 und 45 Minuten, sowie am Ende des Rampenprotokolls. *p*-Werte: Minute 15: *p*=.518, Minute 30: *p*=.792, Minute 45: *p*=.555, Ende Rampe: *p*=.943.

### 5.3 Herzfrequenz

Bezüglich der Herzfrequenz konnten weder bei der Dauerbelastung, noch bei dem Rampenprotokoll signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die genauen Werte sind in Tabelle 5 angeführt.

**Tab. 5:** Herzfrequenz über den Testverlauf

	<b>g</b>		<b>ng</b>		<b>p</b>
	M	± SD	M	± SD	
HF 15	156	14	157	14	.310
HF 30	164	15	164	15	.971
HF 45	166	17	167	16	.405
HF_peak	186	12	186	12	.572

Anmerkung: HF=Atemfrequenz [1/Min]. g=geerdet, ng=nichtgeerdet, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung.

### 5.4 Subjektives Belastungsempfinden

Die Angaben zum subjektiven Belastungsempfinden wiesen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied in Abhängigkeit von der Erdungssituation auf. Die genauen Werte werden in Tabelle 6 angeführt.

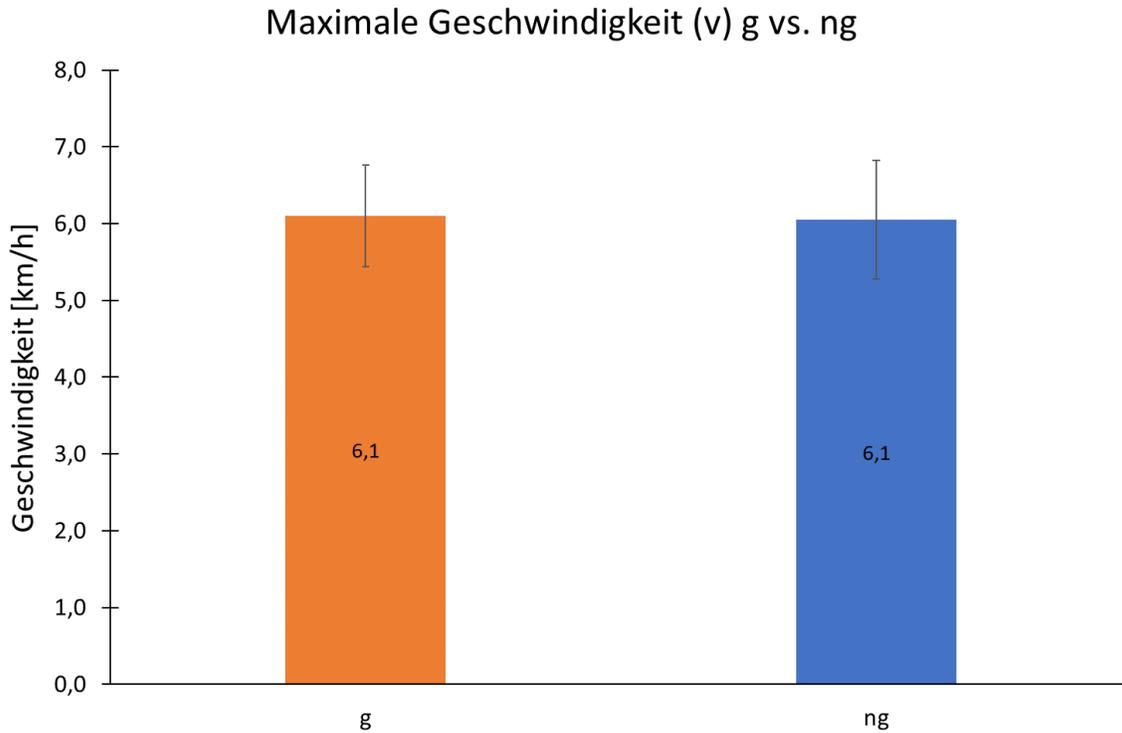
**Tab. 6:** Subjektives Belastungsempfinden über den Testverlauf

	<b>g</b>		<b>ng</b>		<b>p</b>
	M	± SD	M	± SD	
BORG 15	12.1	2.0	12.0	1.9	.585
BORG 30	13.6	2.4	13.8	2.5	.425
BORG 45	14.2	2.4	14.1	1.2	.895
BORG Ende Rampe	18.8	1.2	18.3	1.6	.004**

Anmerkung: BORG=Borgskala (6-20). g=geerdet, ng=nichtgeerdet, M=Mittelwert, SD=Standardabweichung. \*\*= $p < .01$

## 5.5 Maximale erreichte Geschwindigkeit

Die maximale erreichte Geschwindigkeit im Rampenprotokoll unterschied sich nicht zwischen der geerdeten und nichtgeerdeten Gruppe (siehe Abb. 10).



**Abb. 10:** Maximale erreichte Geschwindigkeit im Rampenprotokoll in der geerdeten (g) und nichtgeerdeten (ng) Testsituation.  $p=.497$ .

## 6 Interpretation

Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass bezüglich der untersuchten Parameter zum größten Teil keine statistisch abgesicherten Unterschiede in Abhängigkeit von der Erdungssituation festgestellt werden konnten. Interessant ist jedoch die signifikante Reduktion der Sauerstoffaufnahme bei geerdeter Testsituation, die bei den Mitteln der Messwerte der 13. bis 15. und der 43. bis 45. Belastungsminute gemessen wurde. Aufgrund des  $\rho\eta^2$  (.254 bzw. .406) ist bei den gezeigten Effekten von einem großen Effekt zu sprechen. Auch am Ende des zweiten 15-Minutenblocks der Dauerbelastung kann von einer Tendenz ( $p=.102$ ) zur niedrigeren Sauerstoffaufnahme bei der geerdeten Testsituation im Vergleich zur nichtgeerdeten Testsituation gesprochen werden. Gleiches gilt auch für den Peakwert aus dem Rampenprotokoll ( $p=.083$ ).

In Kapitel 2.2.3 wurde bereits erklärt, dass eine niedrigere Sauerstoffaufnahme bei gleicher Belastung ein Zeichen für eine ökonomischere Arbeitsweise ist. Sauerstoff wird für die oxidative Energiebereitstellung benötigt. Die in dieser Studie gezeigte Reduktion in der Sauerstoffaufnahme bei gleicher Belastung deutet darauf hin, dass die Probanden im geerdeten Zustand weniger Energie über aerobe Stoffwechselprozesse herstellen mussten. Wie Saunders et al. (2004) richtig bemerken, stellt der aerobe Metabolismus nur einen Teil der möglichen Prozesse der Energiebereitstellung dar. Energie kann jedoch ebenso auf anaeroben Wegen bereitgestellt werden. Von einer Reduktion im Energieverbrauch im geerdeten Zustand kann demnach nur dann die Rede sein, wenn der reduzierte aerobe Anteil der Energiebereitstellung nicht über anaerobe Mechanismen ausgeglichen wird und somit in Wahrheit gar keine Reduktion im Energieverbrauch, sondern lediglich eine Verschiebung in den ATP-Resynthesvorgängen stattgefunden hat. Wie bereits in dieser Arbeit erklärt, sind die anaeroben Mechanismen der Energiebereitstellung Hydrolyse von Kreatinphosphat und die anaerobe Glykolyse. Da es sich vor allem bei den Dauerbelastungen um eher nieder- bis mittelintensive Belastungen über längere Dauer handelt, ist es beinahe auszuschließen, dass eine erhöhte Hydrolyse von Kreatinphosphat für die Reduktion in der Sauerstoffaufnahme verantwortlich ist. Durchaus denkbar wäre jedoch eine gesteigerte anaerobe Glykolyse als Ursache für die geringere Sauerstoffaufnahme im geerdeten Zustand. In der vorliegenden Studie ergaben sich beinahe

idente Werte für die Respiratory Exchange Ratios und die Blutlaktatkonzentration in den einzelnen Stufen, was darauf hinweist, dass der niedrigere Sauerstoffverbrauch im geerdeten Zustand tatsächlich auf einen reduzierten Energieverbrauch und nicht auf eine Kompensation durch anaerobe Metabolismen zurückzuführen ist.

In einem vorangegangenen Kapitel wurden bereits Faktoren diskutiert, die die Bewegungsökonomie beeinflussen können. Im Weiteren soll nun der mögliche Einfluss von Erdung auf diese Faktoren diskutiert werden. Vorweg ist sicherlich auszuschließen, dass die kurze Erdungszeit während des Tests irgendeinen Einfluss auf die Muskelfasertypen hat, welche von Joyner und Coyle (2008) als möglicher Einflussfaktor auf die Bewegungsökonomie genannt wurden. Ebenso sind Einflüsse auf die Elastizität von Sehnen, Bändern und Muskeln höchstwahrscheinlich auszuschließen.

Saunders et al. (2004) argumentieren, dass auch die Atemarbeit und die Pumparbeit des Herzens Einfluss auf die Bewegungsökonomie haben können. Sollte Erdung zu einer Reduktion in diesen Parametern führen, könnte sich dies durchaus in einer niedrigeren Sauerstoffaufnahme und somit in einer ökonomischeren Arbeitsweise äußern. Die Messungen, die im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden, konnten jedoch keinen Unterschied bezüglich der Herzfrequenz zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation feststellen. Unterschiede in der Ejektionsfraktion (Anteil des ausgeworfenen Blutes im Verhältnis zum Gesamtblutvolumen in der Herzkammer) können anhand dieser Ergebnisse allerdings nicht ausgeschlossen werden. Entsprechende Parameter wurden jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht gemessen.

Auch bezüglich der Atemfrequenz wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Lediglich am Ende des ersten 15-Minutenblocks der Dauerbelastung kann bei einem  $p=.094$  und einer Atemfrequenz von 33 Atemzügen pro Minute bei geerdeter und 34 Atemzügen pro Minute bei nichtgeerdeter Testsituation zumindest von einer vorhandenen Tendenz zu einer gering niedrigeren Atemfrequenz durch Erdung gesprochen werden. Dies reicht aber als Erklärung für die gemessenen Unterschiede in der Sauerstoffaufnahme nicht aus.

Möglichen Aufschluss über die Ursache der Reduktion in der Sauerstoffaufnahme könnte die Ventilation bieten. Bei ihr wurde am Ende des ersten 15-Minutenblockes ein geringerer Wert beim geerdeten ( $77.7 \pm 16.7$  l/min) gegenüber dem nichtgeerdeten

(80.3±17.7 l/min) Versuch festgestellt ( $p=.030$ ,  $r^2=.225$ ). Am Ende des zweiten und dritten Minutenblockes beliefen sich die Werte auf 83.7±21.5 (g) und 84.7±21.9 (ng) bzw. 82.8±22.5 (g) und 85.0±29.0 (ng). Die Unterschiedsprüfung ergab für den zweiten Block  $p=.395$  und für den dritten Block  $p=.169$ . Zumindest am Ende des dritten Blockes kann man also durchaus von einer Tendenz zu einer niedrigeren Ventilation im geerdeten Zustand sprechen. Die Ventilation ist ein Maß für die eingeatmete Menge an Luft pro Zeiteinheit und wird in der Regel in l/min angegeben. Um die Lungen mit Luft zu füllen, muss Arbeit verrichtet werden. Diese erfolgt gegen elastische und nichtelastische Gewebswiderstände im Bereich des Brustkorbs, der Atemwege und der Lunge sowie gegen Strömungs- und Reibungswiderstände. Diese Widerstände werden über aktive Muskelarbeit und über gespeicherte elastische Energie überwunden. An der Atmung ist eine Vielzahl an Muskeln beteiligt. Dazu zählen allen voran das Zwerchfell und die Interkostalmuskulatur. Je nach Atemtechnik (Brustatmung vs. Bauchatmung) bzw. Atemintensität werden mehrere andere Muskeln hinzugeschaltet (z.B.: Musculi scaleni, Musculus sternocleidomastoideus, Musculus serratus anterior/posterior inf.+sup., Musculus obliquus externus/internus abdominis,...). Um ihre Arbeit verrichten zu können, benötigen auch diese Muskeln Energie. Bei maximalen Belastungen kann der Anteil der  $VO_{2max}$ , der für die Atemmuskulatur benötigt wird, bei Ausdauertrainierten bis zu 15-16 % betragen (Guenette & Sheel, 2007). Es wäre daher durchaus möglich, dass der reduzierte Sauerstoffverbrauch bei geerdeter Testsituation durch den Rückgang in der Ventilation zu erklären ist. Dadurch, dass weniger Liter Luft pro Minute eingeatmet werden müssen, muss auch weniger Atemarbeit geleistet werden, wodurch Energie gespart werden kann. Es ist durchaus denkbar, dass sich dies in einer niedrigeren Sauerstoffaufnahme bei gleicher Belastung manifestiert.

In Folge stellen sich nun zwei Fragen: Warum könnte es zur Reduktion der benötigten Ventilation durch Erdung kommen? Ist die niedrigere Ventilation im geerdeten Zustand der einzige Grund für den reduzierten Sauerstoffverbrauch? Eine mögliche Antwort auf die erste Frage könnte die Blutviskosität liefern. Wie bereits erwähnt, konnte eine reduzierte Blutviskosität durch Erdung in Studien nachgewiesen werden (R. Brown & Chevalier, 2015; Chevalier et al., 2013). Dies ist insofern von Bedeutung, da in einer Studie von Connes et al. (2004) gezeigt wurde, dass Personen, die während eines

ansteigenden Belastungsprotokolls eine niedrige Sauerstoffsättigung des Hämoglobins aufweisen, gleichzeitig eine hohe Blutviskosität zeigen, was wiederum die Vermutung nahelegt, dass eine hohe Blutviskosität den Gasaustausch in den Lungenalveolen und möglicherweise auch in den Kapillaren im Muskelgewebe beeinträchtigt. Darüber hinaus konnten Brun et al. (1995) zeigen, dass eine höhere Aggregation von roten Blutkörperchen die Leistung an der 4 mmol/l Laktatschwelle negativ beeinflusst. Sie schlossen daraus, dass die Aggregation von roten Blutkörperchen möglicherweise aerobe Stoffwechselprozesse beeinträchtigt. Die Aggregation von roten Blutkörperchen beeinflusst ebenfalls die Blutviskosität und es gibt Studien, welche darauf hinweisen, dass Erdung einer Aggregation von roten Blutkörperchen entgegenwirken könnte (Chevalier et al., 2013). Es wäre daher möglich, dass Erdung den Gasaustausch auf Lungenebene, aber auch im Muskelgewebe begünstigt. Die logische Konsequenz einer höheren Sauerstoffsättigung des Hämoglobins und eines verbesserten Gasaustausches auf Muskelzellebenen, bedingt durch die Erdung eines Individuums während körperlicher Belastung, wäre eine Reduktion der Ventilation, da weniger Luft eingeatmet werden muss, um den Sauerstoffbedarf für die ATP-Resynthesierung gewährleisten zu können. Eine Reduktion der Ventilation führt gleichzeitig zu einer geringeren Beanspruchung der Atemmuskulatur und somit zu einem geringeren Sauerstoffverbrauch, was wiederum die beobachtete Reduktion der Sauerstoffaufnahme im geerdeten Zustand erklären könnte.

Im Weiteren soll nun die zweite Frage nach zusätzlichen Faktoren, die zu einer reduzierten Sauerstoffaufnahme im geerdeten Zustand beitragen könnten, beantwortet werden. Einen möglichen Einflussfaktor stellt in diesem Kontext der Muskeltonus dar. In einer Reihe von Studien wurde eine stressregulierende Wirkung von Erdung aufgezeigt (Chevalier et al., 2006; Ghaly & Teplitz, 2004; Passi et al., 2017; Sinatra & Chevalier, 2011). In der Regel führt psychologischer Stress zu einem erhöhten Muskeltonus (Pluess, Conrad, & Wilhelm, 2009). Chevalier, Mori und Oschmann (2006) stellten in einer Studie fest, dass Erdung Einfluss auf das Oberflächen-EMG des Trapezius Muskels hat. Anhand dieser Ergebnisse wäre es denkbar, dass es bei sportlichen Betätigungen durch Erdung zu Veränderungen im Muskeltonus kommt. Möglicherweise kann dadurch die Bewegungsökonomie sowie die Sauerstoffversorgung des Gewebes verbessert werden. Anzumerken ist jedoch, dass keine der Studien, die sich mit der stressregulierenden Wirkung

von Erdung beschäftigt haben, während sportlichen Aktivitäten stattgefunden hat; ein möglicher Transfer auf sportliche Aktivitäten ist daher nicht wissenschaftlich erwiesen.

Zuletzt soll noch Oschmans (2009) Hypothese, nach der freie, aus dem Erdreich aufgenommene Elektronen direkt in die Elektronentransportkette eingespeist werden können, als möglicher Faktor zur Reduktion der Sauerstoffaufnahme, diskutiert werden. Wenn Elektronen aus dem Erdreich direkt in die Elektronentransportkette eingespeist werden könnten, hätte dies den Vorteil, dass für die Produktion der für die Energiegewinnung so wichtigen Elektronen weder eine Glykolyse, noch eine  $\beta$ -Oxidation oder ein Krebszyklus notwendig wären. Allerdings wird bei keinem dieser Vorgänge Sauerstoff verbraucht. Es ist daher unwahrscheinlich, dass die Verwendung von Elektronen aus dem Erdreich für die Energiegewinnung eine Auswirkung auf den Sauerstoffverbrauch haben würde. Der Vorteil würde wahrscheinlich eher darin liegen, dass vor allem die Kohlehydratspeicher geschont werden könnten, wenn der menschliche Organismus tatsächlich in der Lage sein sollte, Elektronen über Erdung aufzunehmen und in der Elektronentransportkette zur Energiegewinnung zu nützen. Diese Theorie kann allerdings durch keines der Messergebnisse aus dieser Studie bestätigt oder widerlegt werden.

Nun sollen noch kurz die restlichen Ergebnisse der Studie interpretiert werden. Sowohl die gezeigten Unterschiede in der Sauerstoffaufnahme als auch in der Ventilation deuten auf eine durch Erdung verursachte Energieersparnis hin. Wenn weniger Energie pro Zeiteinheit benötigt wird, liegt die Überlegung nahe, dass auch weniger Bedarf für die anaerobe Verstoffwechslung von Kohlehydraten besteht, was sich wiederum in niedrigeren Laktatwerten im geerdeten Zustand manifestieren könnte. In der vorliegenden Studie wurden jedoch keine Unterschiede bezüglich der Blutlaktatkonzentration in Abhängigkeit von der Erdungssituation festgestellt. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von Sokal et al. (2016), die während 30-minütigen Radfahrens bei 50 % der  $VO_{2max}$  ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Blutlaktatkonzentration aufzeigen konnten. Dies muss aber nicht zwingend im Widerspruch zu einer ökonomischeren Arbeitsweise im geerdeten Zustand stehen. Die festgestellten Unterschiede in der Sauerstoffaufnahme sind eher gering und belaufen sich im Schnitt auf 1.2 ml/min/kg während der Dauerbelastung. Es ist durchaus denkbar, dass die Blutlaktatkonzentration eine zu wenig sensible Messgröße darstellt, um einen solch geringen Unterschied feststellen zu können.

Aufgrund der zahlreichen Studien, die von einem Einfluss von Erdung auf psychische Indikatoren wie beispielsweise Stressempfindung berichten, wäre eine erdungsbedingte Verbesserung bezüglich des subjektiven Belastungsempfindens denkbar gewesen. Dieser konnte allerdings in der vorliegenden Studie nicht nachgewiesen werden. Während der Dauerbelastung kam es zu keinen signifikanten Unterschieden im Belastungsempfinden. Am Ende des Rampenprotokolls war das subjektive Belastungsempfinden im Durchschnitt beim geerdeten Versuch bei einem  $p=.004$  sogar um 0,5 höher als beim nichtgeerdeten Versuch. Dieses Ergebnis scheint vorerst widersprüchlich im Vergleich zu den restlichen Testergebnissen zu sein. Da die maximale erreichte Geschwindigkeit im Rampenprotokoll beim geerdeten sowie beim nichtgeerdeten Versuch im Durchschnitt gleich war, kann der Unterschied nicht auf einer erhöhten möglichen Belastung durch Erdung zurückzuführen sein. Aufgrund dieser Ergebnisse besteht also Grund zur Annahme, dass Erdung bei maximalen Beanspruchungen zu einem erhöhten subjektiven Belastungsempfinden führt. Hier ist jedoch anzumerken, dass es im Mittel nur zu einer Erhöhung von 0.5 bei einer Skala von 6 bis 20 bekommen ist, was sehr gering ist. Darüber hinaus handelt es sich bei der Borg-Skala um ein subjektives Maß, dessen Aussagekraft nicht überbewertet werden sollte. Pfeiffer, Pivarnik, Womack, Reeves und Malina (2002) überprüften beispielsweise in einer Studie die Reliabilität und Validität und kamen zu dem Ergebnis, dass die Borg-Skala einen ICC von 0.78 (mittlerer Zusammenhang nach Bös) und einen Validitätskoeffizienten von 0.66 im Vergleich zur Herzfrequenz und 0.70 im Vergleich zur  $\%VO_{2max}$  aufweist. Das Maß besitzt also eine gewisse Ungenauigkeit und muss auch nicht zwingend die tatsächliche Belastung widerspiegeln. Betrachtet man die Ergebnisse der Einschätzung des subjektiven Belastungsempfindens zu den drei Messzeitpunkten bei den Dauertests, so werden keine Unterschiede aufgezeigt ( $p=.585$ ,  $p=.425$ ,  $p=.895$ ). Daher könnte es sich bei diesem einen Messwert auch um ein Zufallsprodukt handeln.

Wie bereits erwähnt, ergaben sich auch bei der maximalen erreichten Geschwindigkeit im Rampenprotokoll keine signifikanten Unterschiede zwischen geerdeter und nichtgeerdeter Testsituation. Diese wären durchaus denkbar gewesen, da bereits gezeigt wurde, dass die Ventilation entscheidend zur Ermüdung beitragen kann. Bei hohen Belastungen und damit verbundener hoher Ventilation kann es zu einem Metaboreflex

kommen, der den Blutfluss zu den Extremitäten über Vasokonstriktion verringert, um die Blutversorgung der Atemmuskulatur weiterhin gewährleisten zu können. Dies kann zur Ermüdung der Extremitäten und somit zum Leistungsabbruch beitragen (Dempsey et al., 2008). Sollte es erdungsbedingte Verbesserungen in der motorischen Leistungsfähigkeit geben, so wären diese in der vorliegenden Studie allerdings zu gering, um zu Unterschieden in der maximalen erreichten Geschwindigkeit zu führen. Dies könnte unter anderem dadurch zu begründen sein, dass ein Inkrement von 0.4 km/h bei einer Laufbandsteigung von 24 % einen zu großen Sprung darstellt, um durch Erdung bedingte Unterschiede in der maximalen Leistung festzustellen.

Zusammenfassend weisen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung darauf hin, dass Erdung zu einer ökonomischeren Arbeitsweise und somit zu einer reduzierten Sauerstoffaufnahme führt. Die Reduktion in der Sauerstoffaufnahme ist wahrscheinlich auf eine geringere Ventilation zurückzuführen. Der Rückgang in der Ventilation könnte durch eine verringerte Blutviskosität durch Erdung begründet sein. Diese könnte zu einem verbesserten Gasaustausch in den Lungenalveolen und im Muskelgewebe führen und somit den Bedarf an Atemluft reduzieren. Dadurch muss weniger Arbeit für die Atmung verrichtet werden und der Energieverbrauch sinkt. Eine Reduktion der Atemarbeit beim Skibergsteigen ist besonders in Anbetracht der Tatsache, dass die Sportart oft in größeren Höhen durchgeführt wird, von besonderer Relevanz, da die Atemarbeit sich in großer Höhe noch stärker auf die Ermüdung auswirkt als auf Meereshöhe (Dempsey et al., 2008). Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, ist die typische physiologische Antwort auf den geringeren Sauerstoffpartialdruck in der Höhe eine gesteigerte Atem- und Herzfrequenz (Nussbaumer-Ochsner & Bloch, 2007). Dadurch verringert sich die Durchlaufzeit des Blutes in den Lungenalveolen aber auch im Muskelgewebe, was den Gasaustausch wiederum negativ beeinflussen kann. Ein möglicher diskutierter Faktor für die Reduktion der Sauerstoffaufnahme in der vorliegenden Studie ist eine erdungsbedingte reduzierte Aggregation von roten Blutkörperchen und eine somit reduzierte Blutviskosität. Dies kann den Gasaustausch wieder begünstigen. Erdung könnte demnach helfen, die Atemarbeit und die Herzfrequenz auch in der Höhe zu reduzieren, und somit zu besseren Leistungen im Skibergsteigen führen.

Selbstverständlich haben die Erkenntnisse dieser Studie auch Relevanz für andere Ausdauersportarten. Die Fähigkeit, eine bestimmte Belastung bei niedrigerem Energieverbrauch absolvieren zu können, ist in beinahe jeder Sportart von Vorteil. Da es sich bei den festgestellten Unterschieden in der Sauerstoffaufnahme um eher geringe handelt, ist allerdings davon auszugehen, dass Erdung vor allem bei Sportarten mit langer Belastungsdauer aufgrund der Akkumulation der Effekte zur Verbesserung in der Leistungsfähigkeit beitragen könnte.

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen zu untersuchen. In der Literaturanalyse wurde gezeigt, dass der menschliche Körper geerdet werden kann und dazu in der Lage ist, einen Ladungsaustausch mit dem Erdboden einzugehen. Weiters wurden einige Studien angeführt, die darauf hinweisen, dass Erdung die Stressregulation und die Regeneration beeinflussen kann. Die Frage, ob sich Erdung in irgendeiner Weise auf die sportliche Leistungsfähigkeit auswirkt, blieb im Zuge der Literaturrecherche weitgehend unbeantwortet. Betrachtet man jedoch die bekannten Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit und vergleicht diese mit den Merkmalen, von denen in Studien gezeigt wurde, dass sie durch Erdung beeinflusst werden können, stellt man Bereiche fest, in denen Erdung die Ausdauerleistungsfähigkeit beeinflussen könnte.

In Folge wurde eine Studie durchgeführt, die erdungsbedingte Einflüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beim Skibergsteigen untersuchte. Im Zuge dieser Studie konnten signifikant niedrigere Werte in der Sauerstoffaufnahme im geerdeten Zustand gegenüber dem nichtgeerdeten Zustand festgestellt werden. Weiters wurden eine Abnahme bzw. eine Tendenz zur Abnahme in der Ventilation bei bestehender Erdung gezeigt. Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass eine geringere Atemarbeit für die Verringerung in der Sauerstoffaufnahme verantwortlich sein könnte. Möglicherweise begünstigt Erdung aufgrund einer verbesserten Blutviskosität den Gasaustausch in den Lungenalveolen und im Muskelgewebe und verringert dadurch die zur Deckung des Sauerstoffbedarfs benötigte Menge an Atemluft.

Die Ergebnisse dieser Studie könnten im Falle des Skibergsteigens von besonderer Relevanz sein, da der Gasaustausch in der Höhe durch den geringeren Sauerstoffpartialdruck erschwert ist. Da die Untersuchung auf ca. 440 m über dem Meeresspiegel durchgeführt wurde, sind die Ergebnisse dieser Studie auch für andere Sportarten, die nicht in der Höhe durchgeführt werden, von Bedeutung. Aufgrund der relativ geringen Unterschiede könnte sich Erdung vor allem in Sportarten mit langer Belastungsdauer positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Wegen der häufig großen Leistungsdichte im Spitzensport können dort kleine Unterschiede große Einflüsse auf die Endplatzierung

haben. Für die Anwendung von Erdung empfehlen sich im Speziellen Disziplinen, in denen die Herstellung einer leitenden Verbindung in der Praxis leicht umsetzbar ist. Dazu zählen unter anderem Trailrunning, Berglauf, Skilanglauf aber auch Rasensport wie beispielsweise Fußball.

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung wurde auch gezeigt, dass es sehr schwer ist, systematische Effekte von Erdung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit nachzuweisen. Um ein klareres Bild über die Wirkung von Erdung bei körperlicher Belastung zu bekommen, ist sicherlich eine Vielzahl an weiteren Untersuchungen notwendig. Diese müssten auf der einen Seite die Ergebnisse der vorliegenden Studie bestätigen und andererseits auch zusätzliche Messgrößen wie beispielsweise die Blutviskosität mitbestimmen, um Aufschluss über die tatsächliche Wirkung von Erdung auf den menschlichen Organismus während körperlicher Belastung zu geben. Sollten sich tatsächlich erdungsbedingte Einflüsse auf die motorische Leistungsfähigkeit bestätigen, so würde sich dadurch ein neues Feld mit vielfältigen Anwendungsbereichen im Spitzen- und Breitensport aber auch in der Materialindustrie auf tun.

## 8 Literatur

- Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiological reviews*, 88(1), 287-332.
- Applewhite, R. (2005). Effectiveness of a conductive patch and a conductive bed pad in reducing induced human body voltage via the application of earth ground. *European Biology and Bioelectromagnetics*, 1(1), 23-40.
- aus der Fünften, K., Faude, O., Hecksteden, A., Such, U., Hornberger, W., & Meyer, T. (2013). Anatomie und Physiologie von Körper und Bewegung *Sport* (pp. 67-122): Springer.
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(1), 70-84.
- Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H., & Schmid, J.-P. (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European journal of cardiovascular prevention & rehabilitation*, 15(6), 726-734.
- Brown, D., Chevalier, G., & Hill, M. (2010). Pilot study on the effect of grounding on delayed-onset muscle soreness. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 16(3), 265-273.
- Brown, R., & Chevalier, G. (2015). Grounding the Human Body during Yoga Exercise with a Grounded Yoga Mat Reduces Blood Viscosity. *Open Journal of Preventive Medicine*, 5(04), 159.
- Brown, R., Chevalier, G., & Hill, M. (2015). Grounding after moderate eccentric contractions reduces muscle damage. *Open access journal of sports medicine*, 6, 305.
- Brun, J., Micallef, J., Supparo, I., Rama, D., Benezis, C., & Orsetti, A. (1995). Maximal oxygen uptake and lactate thresholds during exercise are related to blood viscosity and erythrocyte aggregation in professional football players. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, 15(2), 201-212.
- Chamberlin, K., Smith, W., Chirgwin, C., Appasani, S., & Rioux, P. (2014). Analysis of the Charge Exchange Between the Human Body and Ground: Evaluation of “Earthing” From an Electrical Perspective. *Journal of chiropractic medicine*, 13(4), 239-246.
- Chevalier, G. (2010). Changes in pulse rate, respiratory rate, blood oxygenation, perfusion index, skin conductance, and their variability induced during and after grounding human subjects for 40 minutes. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 16(1), 81-87.
- Chevalier, G., Melvin, G., & Barsotti, T. (2015). One-Hour Contact with the Earth’s Surface (Grounding) Improves Inflammation and Blood Flow—A Randomized, Double-Blind, Pilot Study. *Health*, 7(08), 1022.

- Chevalier, G., Mori, K., & Oschman, J. L. (2006). The effect of earthing (grounding) on human physiology. *European Biology and Bioelectromagnetics*, 31(01), 600-621.
- Chevalier, G., Sinatra, S. T., Oschman, J. L., & Delany, R. M. (2013). Earthing (grounding) the human body reduces blood viscosity—a major factor in cardiovascular disease. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 19(2), 102-110.
- Chevalier, G., Sinatra, S. T., Oschman, J. L., Sokal, K., & Sokal, P. (2012). Earthing: health implications of reconnecting the human body to the earth's surface electrons. *Journal of environmental and public health*, 2012.
- Connes, P., Bouix, D., Durand, F., Kippelen, P., Mercier, J., Prefaut, C., . . . Caillaud, C. (2004). Is hemoglobin desaturation related to blood viscosity in athletes during exercise? *International journal of sports medicine*, 25(08), 569-574.
- Coyle, E. F. (1999). Physiological determinants of endurance exercise performance. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(3), 181-189.
- Dempsey, J. A., Amann, M., Romer, L. M., & Miller, J. D. (2008). Respiratory system determinants of peripheral fatigue and endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(3), 457-461.
- Dempsey, J. A., & Wagner, P. D. (1999). Exercise-induced arterial hypoxemia. *Journal of applied physiology*, 87(6), 1997-2006.
- Demtröder, W. (2013). *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik* (6., überarb. u. akt. Aufl. 2013 ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Diaz, E., Ruiz, F., Hoyos, I., Zubero, J., Gravina, L., Gil, J., . . . Gil, S. M. (2010). Cell damage, antioxidant status, and cortisol levels related to nutrition in ski mountaineering during a two-day race. *Journal of sports science & medicine*, 9(2), 338.
- Duc, S., Cassirame, J., & Durand, F. (2011). Physiology of ski mountaineering racing. *International journal of sports medicine*, 32(11), 856-863.
- Faller, A., & Schünke, M. (2008). *Der Körper des Menschen*. 15. Auflage. Stuttgart, New York.
- Fernandes, H. P., Cesar, C. L., & Barjas-Castro, M. d. L. (2011). Electrical properties of the red blood cell membrane and immunohematological investigation. *Revista brasileira de hematologia e hemoterapia*, 33(4), 297-301.
- Fish, R. M., & Geddes, L. A. (2009). Conduction of electrical current to and through the human body: A review. *Eplasty*, 9.
- Fletcher, J. R., Esau, S. P., & MacIntosh, B. R. (2009). Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *Journal of applied physiology*, 107(6), 1918-1922.
- Foster, C., & Lucia, A. (2007). Running economy. *Sports Medicine*, 37(4-5), 316-319.
- Fulco, C., Rock, P., & Cymerman, A. (1998). Maximal and submaximal exercise performance at altitude. *Activation, Space and Environmental Medicine*, 69(8).

- Ghaly, M., & Teplitz, D. (2004). The biologic effects of grounding the human body during sleep as measured by cortisol levels and subjective reporting of sleep, pain, and stress. *Journal of Alternative & Complementary Medicine*, 10(5), 767-776.
- González-Alonso, J., & Calbet, J. A. (2003). Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation*, 107(6), 824-830.
- Gore, C. J., Hahn, A. G., Aughey, R. J., Martin, D. T., Ashenden, M., Clark, S. A., . . . McKenna, M. J. (2001). Live high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiologica*, 173(3), 275-286.
- Guenette, J. A., & Sheel, A. (2007). Physiological consequences of a high work of breathing during heavy exercise in humans. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10(6), 341-350.
- Hoche, D., & Meyer, L. (2011). *Duden Basiswissen Schule, Physik Abitur*. Duden Schulbuchverl.
- Hohmann, A., Lames, M., & Letzelter, M. (2010). *Einführung in die Trainingswissenschaft*. Wiebelsheim: Limpert Verlag.
- Hollmann, W., & Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin. Grundlagen für Arbeit, Trainings- und Präventivmedizin*. Stuttgart: Schattauer.
- Hottenrott, K., Hoos, O., Stoll, O., & Blazek, I. (2013). Sportmotorische Fähigkeiten und sportliche Leistungen—Trainingswissenschaft *Sport* (pp. 439-501): Springer.
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2010). *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen* (Vol. 7): Meyer & Meyer Verlag.
- Jelkmann, W., & Lundby, C. (2011). Blood doping and its detection. *Blood*, 118(9), 2395-2404.
- Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Medicine*, 29(6), 373-386.
- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of physiology*, 586(1), 35-44.
- Kenney, W. L., Wilmore, J., & Costill, D. (2012). *Physiology of Sport and Exercise 6th Edition*: Human kinetics.
- Koch, A., Pereira, R., & Machado, M. (2014). The creatine kinase response to resistance exercise. *J Musculoskelet Neuronal Interact*, 14(1), 68-77.
- Mairböurl, H. (2013). Red blood cells in sports: effects of exercise and training on oxygen supply by red blood cells. *Frontiers in physiology*, 4.
- Neumann, G., Pfützner, A., & Berbalk, A. (2013). *Optimiertes Ausdauertraining*: Meyer & Meyer Verlag.
- Nussbaumer-Ochsner, Y., & Bloch, K. (2007). Lessons from high-altitude physiology. *Breathe*, 4(2), 122-132.

- Oschman, J. L. (2009). Charge transfer in the living matrix. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 13(3), 215-228.
- Oschman, J. L., Chevalier, G., & Brown, R. (2015). The effects of grounding (earthing) on inflammation, the immune response, wound healing, and prevention and treatment of chronic inflammatory and autoimmune diseases. *Journal of inflammation research*, 8, 83.
- Passi, R., Doheny, K. K., Gordin, Y., Hinssen, H., & Palmer, C. (2017). Electrical Grounding Improves Vagal Tone in Preterm Infants. *Neonatology*, 112(2), 187-192.
- Pfeiffer, K. A., Pivarnik, J. M., Womack, C. J., Reeves, M. J., & Malina, R. M. (2002). Reliability and validity of the Borg and OMNI rating of perceived exertion scales in adolescent girls. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(12), 2057-2061.
- Phillips, S. (2015). *Fatigue in sport and exercise*. New York: Routledge.
- Physik. Grundstock des Wissens*. (2000). Eltville/Rhein: Eco.
- Place, N., Yamada, T., Bruton, J. D., & Westerblad, H. (2010). Muscle fatigue: from observations in humans to underlying mechanisms studied in intact single muscle fibres. *European journal of applied physiology*, 110(1), 1-15.
- Pluess, M., Conrad, A., & Wilhelm, F. H. (2009). Muscle tension in generalized anxiety disorder: a critical review of the literature. *Journal of anxiety disorders*, 23(1), 1-11.
- Saltin, B., Henriksson, J., Nygaard, E., Andersen, P., & Jansson, E. (1977). Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 301(1), 3-29.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, 34(7), 465-485.
- Saunders, P. U., Telford, R., Pyne, D., Hahn, A. G., & Gore, C. (2009). Improved running economy and increased hemoglobin mass in elite runners after extended moderate altitude exposure. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 67-72.
- Schnabel, G., Harre, H.-D., & Krug, J. (2014). *Trainingslehre-Trainingswissenschaft: Leistung-Training-Wettkampf*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Sinatra, S. T., & Chevalier, G. (2011). Emotional stress, heart rate variability, grounding, and improved autonomic tone: clinical applications. *Integrative Medicine*, 10(3), 16.
- Sokal, P., Jastrzębski, Z., Jaskulska, E., Sokal, K., Jastrzębska, M., Radzimiński, Ł., . . . Zieliński, P. (2013). Differences in blood urea and creatinine concentrations in earthed and unearthed subjects during cycling exercise and recovery. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013.
- Sokal, P., Jastrzębski, Z., Sokal, K., Dargiewicz, R., Jastrzębska, M., & Radzimiński, Ł. (2016). Earthing modulates glucose and erythrocytes metabolism in exercise. *Age [years]*, 21(1.00), 21.21-20.89.
- Thomas, D. Q., Fernhall, B., & Granat, H. (1999). Changes in Running Economy During a 5-km Run in Trained Men and Women Runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 13(2), 162-167.

- Tomasits, J., & Haber, P. (2003). *Leistungsphysiologie. Grundlagen für Trainer, Physiotherapeuten und Masseur.* Wien: Springer-Verlag.
- Tosi, P., Leonardi, A., & Schena, F. (2009). The energy cost of ski mountaineering: effects of speed and ankle loading. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 49(1), 25.
- Vollmer, M., & Möllmann, K. (2016). Music through the skin—simple demonstration of human electrical conductivity. *Physics Education*, 51(3), 034002.
- Wahl, P., Bloch, W., & Mester, J. (2009). Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 57(3), 100-107.
- Wehrlin, J. P., Zuest, P., Hallén, J., & Marti, B. (2006). Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *Journal of applied physiology*, 100(6), 1938-1945.
- Weinberg, R. S. (1978). The effects of success and failure on the patterning of neuromuscular energy. *Journal of Motor Behavior*, 10(1), 53-61.
- Woodman, T., & Hardy, L. (2003). The relative impact of cognitive anxiety and self-confidence upon sport performance: A meta-analysis. *Journal of sports sciences*, 21(6), 443-457.
- Zintl, F., & Eisenhut, A. (2009). *Ausdauertraining: Grundlagen Methoden Trainingssteuerung.* München: BLV Buchverlag.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Circadiane Cortisol-Profile der einzelnen Probanden/innen vor und nach achtwöchigem Erden während des Schlafs (Ghaly & Teplitz, 2004). .....	12
Abb. 2: Mechanismen der Energiebereitstellung bei maximaler Beanspruchung (Zintl & Eisenhut, 2009) .....	22
Abb. 3: Potentielle Einflussfaktoren auf die $VO_{2max}$ . .....	24
Abb. 4: Phasen der Energiebereitstellung nach Binder et al. (2008) .....	28
Abb. 5: Schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns.....	49
Abb. 6: Beispielhafte Darstellung eines Dauertests mit den 15-Minutenblöcken und dem anschließenden Rampenprotokoll. ....	50
Abb. 7: Herstellung der Erdungssituation im Labor .....	51
Abb. 8: Gemittelte Sauerstoffaufnahme über die letzten 2 Minuten der jeweiligen Stufe bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll bei geerdeter (g) und nichtgeerdeter (ng) Situation.....	55
Abb. 9 Laktatkonzentration der Stichprobe bei geerdeter (g) und nicht geerdeten (ng) Situation nach 15, 30 und 45 Minuten, sowie am Ende des Rampenprotokolls .....	58
Abb. 10: Maximale erreichte Geschwindigkeit im Rampenprotokoll in der geerdeten (n) und nichtgeerdeten (ng) Testsituation. ....	60

## 10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Daten zu den zwei Gruppen. ....	48
Tab. 2: Gemittelter RER über die letzten zwei Minuten der jeweiligen Stufen bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll. ....	56
Tab. 3: Gemittelte Atemfrequenz über die letzten zwei Minuten der jeweiligen Stufen bzw. der Peakwert aus dem Rampenprotokoll. ....	56
Tab. 4: Gemittelte Ventilation über die letzten zwei Minuten der jeweiligen Stufen. ....	57
Tab. 5: Herzfrequenz über den Testverlauf. ....	59
Tab. 6: Subjektives Belastungsempfinden über den Testverlauf .....	59