



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Die Anwendung von Hypoxie im Leistungs- und Gesundheitssport –
ein State of the Art“

verfasst von

Iris Khanna, BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt: Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von: o. Univ.- Prof. Dr. Norbert Bachl

Danksagung

Ein herzliches Dankeschön möchte ich meinem Betreuer der Masterarbeit Herrn o. Univ.-Prof. Dr. Norbert Bachl aussprechen. Er hat mir dieses Thema vermittelt und stand mir stets mit Ratschlägen zur Seite. Danke!

Ich möchte mich bei allen Menschen bedanken, die mich im Laufe meines Studiums unterstützt haben. Mein größter Dank gilt meiner Mutter, die mir in jedem Abschnitt meines Lebens zur Seite steht und mir die Möglichkeit gegeben hat, dieses Studium zu absolvieren. Zudem möchte ich meinem Verlobten für seine Unterstützung während meines Studiums danken. Vielen Dank!

Zusammenfassung

Das Höhenttraining ist seit mehreren Jahrzehnten eine vielversprechende Methode, um die Ausdauerleistungsfähigkeit zu steigern. Abgesehen vom Ausdauersport rückt die Anwendung von Hypoxie auch im Krafttraining weiter in den Vordergrund. Neben dem Leistungssport bestehen aber auch im Gesundheitssport bzw. zu therapeutischen Zwecken zahlreiche Anwendungsfelder von vermindertem Sauerstoffgehalt.

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, die aktuellen Erkenntnisse zur Anwendung von Hypoxie im Leistungs- und Gesundheitssport aufzuzeigen. Zum einen sollte herausgefunden werden, welche Form des Höhenttrainings sich im Ausdauersport am besten eignet. Zum anderen sollten die Effekte von lokaler und systemischer Hypoxie im Krafttraining dargestellt werden. Ein weiteres Vorhaben ist es, die Anwendung von Hypoxieaufenthalten in Sportarten zu thematisieren. Im Bereich des Gesundheitssports sollte der Einsatz von reduziertem Sauerstoffgehalt bei Menschen mit verschiedenen Erkrankungen beleuchtet werden. Zu diesen Erkrankungen zählen Diabetes Mellitus, das metabolische Syndrom, Adipositas sowie Herz-Kreislauf- und Lungenerkrankungen.

Die Literaturliteraturarbeit konnte zeigen, dass ein Live High-Train Low (LHTL) Training, das quasi ein intermittierendes Höhenttraining über eine längere Dauer darstellt, im Ausdauersport insgesamt den größten Anklang zu finden scheint. Darüberhinaus rückt auch die Kombination aus Live High-Train Low and High (LHTLH) in den Vordergrund. Im Bereich des Krafttrainings wurde ersichtlich, dass sowohl lokale als auch systemische Hypoxie positive Effekte hinsichtlich einer gesteigerten Hypertrophie bewirken können. Zwar können bei Sportarten positive Auswirkungen in Bezug auf eine gesteigerte Leistungsfähigkeit nach einem Hypoxieaufenthalt beobachtet werden, über die Notwendigkeit eines Höhenttrainings in Sportarten scheint derzeit aber noch keine Einigung zu bestehen. Im Gesundheitssport können durch die Anwendung von Hypoxie bei den oben genannten Erkrankungen teilweise vielversprechende Ergebnisse ermittelt werden, jedoch werden weitere Studien benötigt, um Hypoxie als therapeutische Maßnahme zu integrieren.

Schlüsselwörter: Hypoxie, Höhenttraining, blood flow restriction, Kaatsu Training, intermittierende Hypoxie, Hypoxie Teamsport, Hypoxie bei Erkrankungen

Abstract

Altitude training has been an effective method to improve endurance capacity for several years. Next to its application in endurance sports, the use of hypoxia in resistance training becomes more and more important. Apart from professional sports, reduced oxygen content further seems to be an effective tool in health sports and for therapeutic purposes.

The underlying aim of this Master thesis is to present actual fields of application in the use of hypoxia in health and professional sports. More precise, it should be clarified which method in endurance sports is the most effective. Further, the thesis wants to address the effects of local and systemic hypoxia in resistance exercise training. Moreover, the effectiveness of sojourns to altitude in team sports were part of interest. Finally, the aim of this thesis is to discover the effects of reduced oxygen content for people with different kind of diseases, such as diabetes mellitus, metabolic syndrome, obesity, and cardiorespiratory diseases.

The literature research shows that the Live High-Train Low (LHTL) protocol, which is comparable with an intermittent hypoxic training over a long duration, appears to be the most potent method in endurance sports. Furthermore, the combination of LHTL and High (LHTLH) seems to be an efficient method to improve endurance capacity. Concerning resistance training, local as well as systemic hypoxia has positive effects to enhance muscle hypertrophy. In team sports, gainful effects can be observed. However, discussion remains whether altitude training in team sports is essential to improve performance. For people with different kind of diseases, promising results have been shown when using hypoxia, however, further studies are required to integrate hypoxia as a therapeutic tool.

Key words: hypoxia, altitude training, blood flow restriction, kaatsu training, intermittent hypoxia, hypoxia team sport, hypoxia and diseases

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Methodik	5
2.1 Datenerhebung.....	5
2.2 Ein- und Ausschlusskriterien.....	8
3. Die Anwendung von Hypoxie im Leistungssport	9
3.1 Forschungsproblematik	9
3.2 Das Höhenttraining im Ausdauersport	10
3.2.1 Von „Live High-Train High“ zu „Live High-Train Low“	10
3.2.2 Physiologische Mechanismen	11
3.2.3 Die Hämoglobinspeicherkapazität – ein Diskussionspunkt	12
3.2.4 Die optimale Höhe während LHTL und der optimale Zeitpunkt ins Tal zurückzukehren	13
3.2.5 Intermittierende Hypoxie	18
3.3 Die Anwendung des Höhenttrainings in Team- und intermittierenden Sportarten.....	25
3.4 Der Einsatz von Hypoxie im Krafttraining	32
3.4.1 Krafttraining und lokale Hypoxie (BFR)	32
3.4.2 Krafttraining und systemische Hypoxie	36
4. Die Anwendung von Hypoxie im Gesundheitssport.....	45
4.1 Sportliches Training und Hypoxie bei Diabetes.....	45
4.2 Intermittierende Hypoxie bei COPD.....	49
4.3 Intermittierende Hypoxie bei Koronarer Herzkrankheit (KHK).....	54
4.5 Die Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit metabolischem Syndrom (MS).....	59
4.6 Der Einfluss von Hypoxie kombiniert mit körperlicher Aktivität bei Adipositas	66
4.7 Gesundheitliche Folgen von Höhenaufenthalten	71
5. Diskussion	80
6. Limitationen und Ausblick.....	90
Literaturverzeichnis.....	92
Tabellenverzeichnis.....	113
Abbildungsverzeichnis	115
Abkürzungsverzeichnis	116
Anhang	118

1. Einleitung

Das Interesse an der Leistungssteigerung durch ein Höhenttraining ist bereits seit mehreren Jahrzehnten vorhanden. Auch die Anwendung von Hypoxie in der Medizin bzw. im Gesundheitssport und Reha-Bereich schreitet ständig voran. Besonders in den vergangenen zehn Jahren konnte ein starkes Interesse an der Hypoxie-Thematik festgestellt werden. So verdoppelten sich beispielsweise in der wissenschaftlichen Datenbank PubMed die „Hypoxie“ Zitationen seit Anfang des 21. Jahrhunderts. Mittlerweile umfasst die Datenbank mehr als 50.000 publizierte Artikel, die das Thema rund um die Anwendung von Hypoxie behandeln (Roach, Wagner und Hackett, 2014).

Bereits bei einer kurzen Recherche in wissenschaftlichen Datenbanken wie beispielsweise PubMed ist auffallend, wie vielfältig Hypoxie mittlerweile eingesetzt wird. Die verschiedensten Fragestellungen zur Anwendung von Hypoxie im Leistungssport und auch im Gesundheits- und Rehabilitationssport werden behandelt.

Zum einen versuchen Forscher/innen herauszuarbeiten, welche Form bzw. welches Protokoll sich am besten zur Leistungssteigerung eignet. Dabei steht das wohl bekannteste Höhenttrainingsprotokoll „Live High Train Low“ (LHTL) im Mittelpunkt des Interesses (Millet, Roels, Schmitt & Richalet, 2010). Das Live High Train Low Protokoll rückte vor allem von der skandinavischen Forschergruppe rund um Benjamin Levine und James Stray-Gundersen in den frühen 90er Jahren immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit. Mit den von ihnen durchgeführten Untersuchungen konnten sie zeigen, dass das Live High Train Low Protokoll, das quasi ein intermittierendes Höhenttraining darstellt, die größten Effekte im Hinblick auf eine Leistungssteigerung in Tallage hervorruft (Levine und Stray-Gundersen, 1992; Levine und Stray-Gundersen, 1997; Stray-Gundersen und Levine, 2008). Derzeit versuchen Forscher/innen in mehreren Untersuchungen herauszufinden, ob mögliche Adaptionen dieses Protokolls in Form von kürzeren hypoxischen Zyklen beispielsweise ähnliche oder bessere Effekte bringen können (Humberstone-Gough et al., 2013; Faulhaber, Gatterer, Haider, Patterson & Burtscher, 2010). Damit bildet auch das intermittierende hypoxische Training (IHT) einen Forschungsschwerpunkt. Welche Art der intermittierenden Hypoxie, also die Stärke und Dauer, eignet sich am besten? Ist es von Vorteil, sich während der hypoxischen Zyklen zu bewegen, oder soll die Luft mit verminderten Sauerstoffgehalt nur passiv eingeatmet werden?

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellen die physiologischen Mechanismen, die durch eine Hypoxieexposition ausgelöst werden, dar. Was sind die dominanten Faktoren, die eine

gesteigerte Leistungsfähigkeit bewirken? Sind eine gesteigerte Anzahl an roten Blutkörperchen bzw. eine Zunahme der Hämoglobinmasse der entscheidende Grund? Oder kann möglicherweise eine gesteigerte Laufökonomie der primäre Faktor sein? Auch diese Fragen werden in mehreren Artikeln diskutiert (Levine & Stray-Gundersen, 2005; Stray-Gundersen & Levine, 2008; Gore & Hopkins, 2005; Robach & Lundby, 2012).

Obwohl das Höhenttraining hauptsächlich in Ausdauersportarten Anwendung findet, werden in den vergangenen Jahren auch zunehmend Studien publiziert, die den Teamsport bzw. intermittierende Sportarten in Bezug auf einen möglichen Einsatz eines Höhentrainings betrachten. Der Einsatz von Hypoxie scheint ein relativ neues Forschungsfeld zu sein. Aus einzelnen Studien ist jedoch zu entnehmen, dass die Bedeutung eines Höhentrainings in Spielsportarten immer größer wird (Girard et al., 2013). Im Weiteren ist der Einsatz von Hypoxie im Krafttraining ein derzeit großes und sehr aktuelles Forschungsthema. Ein Schwerpunkt dieses Forschungsfeldes stellt die Anwendung von lokaler und systemischer Hypoxie dar (Scott, Slattery, Sculley & Dascombe, 2014).

Abgesehen vom Leistungssport wird Hypoxie auch im Gesundheitssport und als therapeutisches Mittel angewendet. Dabei kommt verminderter Sauerstoffgehalt sowohl in natürlicher als auch in künstlicher Form zum Einsatz. Zum einen werden die Auswirkungen von natürlicher Höhe auf die Gesundheit untersucht, dabei werden physische aber auch psychische Parameter erhoben. Zum anderen bestehen zahlreiche Artikel, die als Probanden bzw. Probandinnen eine bestimmte Gruppe an erkrankten Personen inkludieren. So werden beispielsweise die Auswirkungen von Hypoxie in Kombination mit sportlicher Aktivität bei Personen mit metabolischem Syndrom beleuchtet. Es soll herausgefunden werden, ob sich Hypoxie auf Risikofaktoren des metabolischen Syndroms positiv auswirkt (Schobesberger, Leichtfried, Meuck-Weimann & Humpeler, 2010; Shi et al., 2014). Eine weitere Personengruppe, bei der Hypoxie Anwendung findet, stellen Menschen mit Herzkreislauf- oder Lungenerkrankungen dar. So wird beispielsweise untersucht, ob der Gebrauch von Hypoxie bei Koronarer Herzkrankheit bzw. bei COPD gewisse Vorteile bringt (Burtscher et al. 2004; Burtscher et al., 2009; Haider et al., 2009). Auch bei Personen, die übergewichtig bzw. adipös sind, könnte die Anwendung von Hypoxie in Kombination mit sportlicher Aktivität positive Auswirkungen haben (Kong, Zang & Hu, 2013; Wiesner et al., 2009).

Insgesamt kann also festgestellt werden, dass sowohl im Leistungssport als auch im Gesundheitssport bzw. bei Menschen mit bestimmten Erkrankungen zahlreiche Anwendungsfelder bestehen. Die Studien verfolgen dabei dasselbe Ziel. Es soll bestimmt

werden, inwieweit eine Anwendung von Hypoxie in Kombination mit sportlicher Aktivität einen positiven Nutzen nach sich zieht.

Ziel der geplanten Masterarbeit ist es, den aktuellen Forschungsstand zur Anwendung von natürlicher und künstlicher Höhe aufzuzeigen. Die Literatuarbeit soll zum einen den Einsatz von Höhentraining mit Leistungssportlern betrachten. Zum anderen wird aber auch die Anwendung von Hypoxie im Gesundheitssport bzw. bei Patienten/innen mit verschiedenen Erkrankungen beleuchtet. Dabei wird vor allem auf die oben genannten Forschungsschwerpunkte bzw. Anwendungsfelder von Hypoxie eingegangen. Anhand der Analyse von wissenschaftlichen Studien soll herausgearbeitet werden, in welchen Anwendungsfeldern sich der Gebrauch von Hypoxie lohnt. Zudem soll in weiterer Folge versucht werden, Empfehlungen zum Einsatz von Hypoxie für bestimmte Sportarten bzw. für Gesundheitssportler/innen sowie für Patienten/innen mit bestimmten Erkrankungen zu geben. Daher können folgende Forschungsfragen formuliert werden:

Welche Form des Höhentrainings zeigt die besten Effekte im Ausdauersport?

In welcher Form kommt ein Höhentraining bei Spilsportarten und intermittierenden Sportarten zum Einsatz, und welche Effekte können beobachtet werden?

Welche Effekte bringt ein Krafttraining unter lokaler Hypoxie im Vergleich zu systemischer Hypoxie?

In wie fern hat der Einsatz von Hypoxie positive Auswirkungen zur Steigerung der Gesundheit, sowohl bei gesunden Menschen als auch bei erkrankten Personen?

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei große Bereiche. Zu Beginn der Arbeit wird der Bereich des Leistungssports betrachtet. Dabei wird auf die grundlegenden Formen des Höhentrainings, die derzeit im Ausdauersport Anwendung finden, eingegangen. Im Anschluss folgen die aktuellsten Erkenntnisse zum Gebrauch von Hypoxie in Teamsportarten und intermittierenden Sportarten. Danach wird der derzeitige wissenschaftliche Standpunkt zum Einsatz von Krafttraining in Verbindung mit lokaler und systemischer Hypoxie aufgegriffen. Das zweite große Kapitel widmet sich dem Einsatz von vermindertem Sauerstoffgehalt im Gesundheitssport bzw. bei Menschen mit unterschiedlichen Erkrankungen. Zum einen wird die Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit Diabetes betrachtet. Zum anderen sollen die Auswirkungen von Hypoxie bei Personen mit metabolischem Syndrom aufgezeigt werden. Im Weiteren wird auf den Effekt von Hypoxie bei Patienten mit Herz-Kreislauf- und

Lungenerkrankungen eingegangen. Auch der Einsatz von reduziertem Sauerstoffgehalt in Kombination mit sportlicher Aktivität bei übergewichtigen bzw. adipösen Personen wird anhand von aktuellen Studien analysiert. In der Diskussion sollen die herausgefundenen Erkenntnisse erörtert und in Bezug auf die formulierten Forschungsfragen diskutiert werden. Zum Abschluss werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst, es werden Limitationen der Arbeit angeführt und ein Ausblick auf weitere wissenschaftliche Untersuchungen soll gegeben werden.

2. Methodik

Die vorliegende Literaturlarbeit soll einen Einblick in aktuelle Erkenntnisse zum Einsatz von Hypoxie in den beiden Bereichen Leistungssport und Gesundheits- bzw. Rehabilitationssport liefern. Es soll herausgefunden werden, welche neuen Methoden Anwendung finden, welche neuen Forschungsfelder sich entwickelten und welche Gebiete in den beiden Bereichen noch nicht ausreichend erforscht sind. Jeder dieser beiden großen Forschungsschwerpunkte umfasst, wie bereits in Kapitel eins erwähnt, wiederum mehrere Themenblöcke, die betrachtet werden. Einzelne Themenblöcke, wie beispielsweise der Einsatz von Hypoxie im Ausdauersport oder die Anwendung von Hypoxie im Krafttraining, sind sehr weitläufige Forschungsfelder, wodurch eine große Bandbreite an vorhandenen publizierten Studien besteht. Der Prozess der Literaturlauswahl gestaltete sich daher nicht leicht. Im folgenden Abschnitt wird der Vorgang, der zur Wahl der verwendeten Literatur führte, genauer erläutert.

2.1 Datenerhebung

Der untersuchte Zeitraum wurde auf die vergangenen 15 Jahre festgesetzt (2000-2015), wobei der Fokus auf den aktuellsten Studien lag. Eine Ausnahme stellten die Untersuchungen von Levine und Stray-Gundersen (1992 und 1997) dar, die einen grundlegenden Einblick in das Höhenttraining bei Leistungssportlern liefern und deshalb nicht exkludiert wurden. Mit Hilfe der wissenschaftlichen Datenbank „PubMed“ wurden die notwendigen Studien gefunden und in weitere Folge analysiert. Zusätzlich wurde auch der Online Bibliothekskatalog der Universitäten Wien und Innsbruck verwendet. Die Suche orientierte sich dabei an den vorhin formulierten Themenblöcken. So wurde zu jedem Themenblock mit Hilfe von Schlagwörtern geforscht. Insgesamt waren neun Themenblöcke vorhanden. Die folgende Tabelle liefert einen Überblick über die verwendeten Schlagwörter und deren Kombination zu den jeweiligen Themenblöcken.

Tab. 1: Themenblöcke und verwendete Suchwörter

Themenblock	Suchwörter
Hypoxie im Ausdauersport	hypoxia training hypoxia training AND endurance altitude training

	<p>altitude training AND endurance</p> <p>hypoxia training AND athletes</p> <p>intermittent hypoxia</p> <p>intermittent hypoxia AND training</p>
Hypoxie im Teamsport	<p>hypoxia teamsport</p> <p>hypoxia training AND teamsport</p> <p>altitude training AND teamsport</p> <p>altitude training AND intermittent sports</p>
Hypoxie im Krafttraining	<p>hypoxia resistance training</p> <p>kaatsu training</p> <p>blood flow restriction</p> <p>blood flow restriction AND training</p> <p>vascular occlusion AND training</p>
Hypoxie und Herz-Kreislauf-Erkrankungen	<p>hypoxia cardiovascular disease</p> <p>hypoxia training AND cardiovascular disease</p> <p>hypoxia interval training AND cardiovascular disease</p> <p>hypoxia training AND heart</p> <p>hypoxia training AND patients</p>
Hypoxie und Lungenerkrankungen	<p>hypoxia respiratory disease</p> <p>hypoxia training AND respiratory disease</p> <p>hypoxia physical fitness AND respiratory disease</p> <p>hypoxia training AND patients</p>
Hypoxie und metabolisches Syndrom	<p>hypoxia metabolic syndrome</p> <p>hypoxia training AND metabolic syndrome</p>

	hypoxia metabolic risk high altitude AND metabolic syndrom
Hypoxie und Übergewicht/Adipositas	hypoxia obesety hypoxia training AND high altitude hypoxia AND overweight people physical fitness AND hypoxia AND obesity
Hypoxie und Diabetes	hypoxia diabetes hypoxia training AND diabetes hypoxia training AND glycemic control
Gesundheitliche Folgen von Höhengaufenthalten	hypoxia health hypoxia training AND health hypoxia training AND immune system hypoxia AND mortality high altitude AND health high altitude AND risks

Quelle: Eigene Darstellung

Sowohl Originalartikel als auch Review Beiträge wurden für die vorliegende Arbeit verwendet. Review Artikel erwiesen sich als hilfreich, da sie einen guten Überblick über einen bestimmten Themenblock lieferten. Beim Themenblock „Hypoxie im Krafttraining“ beispielsweise diente der aktuelle Review von Scott et al. (2014) als primäre Quelle. Aufbauend auf diesem Beitrag konnten weitere Studien ein- bzw. ausgeschlossen werden. Auch beim Themenblock „Hypoxie im Teamsport“ lieferte der Artikel von Girard et al. (2013) bereits viele relevante Informationen. Im Endeffekt wurde versucht, zu jedem Themenblock drei bis vier relevante Studien auszuwählen.

Zusätzlich sollte erwähnt werden, dass im November und Dezember 2014 im Rahmen eines Forschungspraktikums bei o. Univ.-Prof. Dr. Norbert Bachl eine erste Literatursuche in wissenschaftlichen Datenbanken zur vorliegenden Thematik durchgeführt wurde. Dabei wurden rund 15 Studien ausgearbeitet. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen wurden für die Verfassung der Masterarbeit weiter verwendet. Eine weitere Literaturrecherche erfolgte

über den Zeitraum von Jänner bis Feber 2015. In diesem Zeitraum wurden weitere 20 Studien ausgewählt, die für die vorliegende Literaturarbeit verwendet wurden. Da insgesamt zu jedem Themenblock ca. drei bis vier Studien ausgewählt wurden, standen schlussendlich 35 Beiträge zur Verfügung, die genau analysiert wurden.

2.2 Ein- und Ausschlusskriterien

Wies ein Artikel aus Sicht der Verfasserin hohe Relevanz in Bezug auf den jeweiligen Themenblock auf und lag er im vorgegebenen Zeitraum, konnte er verwendet werden. Dabei ging es vor allem um die Relevanz des Titels bzw. des Abstracts. Artikel, die nicht frei verfügbar waren, wurden grundsätzlich ausgeschlossen. Konnte jedoch ein nicht frei verfügbarer Artikel durch Kontaktaufnahme mit dem Autor per Email erfolgreich beschafft werden, so wurde auch dieser verwendet. Im Rahmen der Recherche kamen zahlreiche wissenschaftliche Beiträge zum Vorschein, die vermehrt dem Bereich der Medizin bzw. Molekularbiologie zugeordnet werden konnten. Diese Studien waren jedoch für die vorliegende Masterarbeit nicht von Bedeutung. Sämtliche Studien, die keinen Bezug zu sportlicher Aktivität aufwiesen, wurden nicht inkludiert. Im Weiteren wurden Untersuchungen, die ihre Erkenntnisse anhand von Tierexperimenten gewannen, nicht ausgewählt. Es wurden nur Studien verwendet, die direkt mit Menschen durchgeführt wurden.

3. Die Anwendung von Hypoxie im Leistungssport

3.1 Forschungsproblematik

Betrachtet man die derzeitige Menge an Daten, die das Thema Hypoxie im Leistungssport behandeln, so ist es schwierig, einen roten Faden zu finden. Bereits bei näherer Betrachtung einiger ausgewählter Studien wird klar, dass die produzierten Ergebnisse teilweise sehr widersprüchlich sind. Der Review von Millet, Roels, Woorens und Richalet (2010) verdeutlicht diese Tatsache. Dies kommt auch durch die teils schwierige Vergleichbarkeit der Studien zustande. Zum einen werden Studien durchgeführt, die Athleten und Athletinnen von verschiedenen Sportarten rekrutierten. Selbst innerhalb des Ausdauersports ist es wohl schwierig, die Ergebnisse einer Untersuchung mit Triathleten und Triathletinnen mit den gewonnen Erkenntnissen aus einer Studie mit Marathonläufern und –Marathonläuferinnen zu vergleichen. Darüberhinaus ist es noch bedeutend schwieriger bzw. riskanter, Empfehlungen für Spielsportarten anhand von Höhentrainingsstudien abzuleiten, die mit Ausdauerathleten und Athletinnen durchgeführt wurden. Neben den unterschiedlichen Sportarten ist auch das Leistungsniveau der Probanden und Probandinnen von Studie zu Studie verschieden („gut-trainierte Personen“ vs. Spitzenathleten). Zudem variieren auch die Dauer und das Ausmaß der Hypoxie in den einzelnen Studien. Auch die Messmethoden, z.B. zur Bestimmung des Blutvolumens, sind von Untersuchung zu Untersuchung verschieden. Für den/die Betrachter/in ist es daher oft nicht leicht, Rückschlüsse zu ziehen (Millet et al., 2010).

Abgesehen vom Ausdauersport kann dieselbe Problematik auch bei der Anwendung von Hypoxie im Krafttraining festgestellt werden. Dabei wird deutlich, dass ähnliche Studien teils widersprüchliche Ergebnisse produzieren. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass die methodische Vorgehensweise innerhalb der Studien stets variiert. So wird beispielsweise die Stärke der Hypoxie unterschiedlich gewählt, die Trainingsintensität variiert, die Pausen zwischen Trainingssätzen sind nicht ident und auch die untersuchten Muskelgruppen wechseln von Studie zu Studie. Zudem kommen auch uneinheitliche Messmethoden zum Einsatz. Diese Problematik wird in dem Beitrag von Ho, Kuo, Liu, Dong und Tung (2014) aufgegriffen. Auch Scott, Slattery und Dascombe (2014) gehen in ihrem Artikel auf die Schwierigkeit ein, Untersuchungen, zu vergleichen, die ein Krafttraining mit gleichzeitigem Einsatz von Hypoxie anwenden. Im Kapitel 2.4.2 werden in Bezug zu dieser Forschungsproblematik einzelne Studien genauer vorgestellt.

3.2 Das Höhenttraining im Ausdauersport

3.2.1 Von „Live High-Train High“ zu „Live High-Train Low“

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Live High-Train High (LHTH) durch das Modell Live High-Train Low (LHTL) ersetzt wurde. Das LHTL Training stellt womöglich das effektivste Höhenttrainingsprotokoll dar (Robach und Lundby, 2012). Eine bedeutende Studie, die zu diesem Wechsel der Form des Höhenttrainings führte, war die Untersuchung von Levine und Stray-Gundersen (1997). Nachdem die Forschergruppe bereits 1992 eine Studie zur Bestimmung der Effekte eines Höhenttrainings durchführte, die aber damals nur undifferenzierte Ergebnisse lieferte, wurde 1997 das Protokoll adaptiert. Die Untersuchung umfasste eine zweiwöchige Testphase und eine vierwöchige Trainingsphase in Tallage. Nach dieser Trainingsphase verbesserten insgesamt 39 College Läufer/innen ihre 5000m Zeit signifikant. Im Anschluss wurden drei Gruppen gebildet: LHTH, LHTL und LLTL. Nach einem weiteren vierwöchigen Trainingscamp kam es nur in der LHTL Gruppe zu einer weiteren signifikanten Verbesserung der 5000 Meter Zeit. Diese gesteigerte Leistung hielt während des dreiwöchigen Trainingscamps in Tallage, das im Anschluss an das Höhenttrainingslager stattfand, an. Alle anderen Gruppen konnten keine Leistungssteigerung nachweisen. Die Autoren kamen also zum Schluss, dass ein Training zwischen 1200 und 1400 Meter und Wohnen/Leben auf 2500 Metern zu einer Verbesserung der Leistung in Tallage um 1,4% führt (Levine und Stray-Gundersen, 1997). Auch Millet et al. (2010) geben in ihrem Review an, dass ein Höhenttraining mit einem LHTL Schema die aerobe Leistungsfähigkeit um 1.0-1.5% verbessert.

Aufbauend auf den Ergebnissen von 1997 wurde im Anschluss eine weitere Studie durchgeführt, deren Daten laut Stray-Gundersen und Levine (2008) nur als Abstract publiziert wurden. Dabei wurde das gleiche 13-wöchige Protokoll verwendet wie in der oben genannten Untersuchung. Der Unterschied lag aber daran, dass nur die intensiven Einheiten auf 1250m durchgeführt wurden, die moderaten Trainingseinheiten wurden auf einer Höhe zwischen 2000-3000m absolviert. Durch dieses veränderte Schema wurde die ständige Fahrt auf den Berg hinauf bzw. wieder hinunter deutlich reduziert. Es konnte festgestellt werden, dass das Protokoll Live High-Train Low and High (LHTLH) dieselben Ergebnisse wie das LHTL Protokoll lieferte. Anscheinend reichte es also aus, nur die intensiven Einheiten in niederen Höhen mit einem fast normalen Gehalt an Sauerstoff (ca. 21%) durchzuführen.

2001 führte die Forschergruppe um Stray-Gundersen eine weitere Untersuchung durch. Es wurde festgestellt, dass sich das Live High-Train Low and High Protokoll nicht nur für

College Läufer/innen eignet, sondern dass auch Spitzenathlet(innen)en eine weitere Verbesserung ihrer Leistung erreichen können. Für die Studie wurden 27 Spitzenathlet(innen)en rekrutiert. Sie zeigten eine Verbesserung der 3000m Zeit ähnlich der LHTL Gruppe (College-Läufer/innen) von den vorherigen Untersuchungen.

3.2.2 Physiologische Mechanismen

In dem Artikel von Stray-Gundersen und Levine (2008) erklären die Autoren die Gründe, die ihrer Meinung nach zu einer gesteigerten Leistung führen. Nachdem die Forscher die Daten vergangener Studien der Gruppen analysierten, die einer Höhenlage ausgesetzt waren, bemerkten sie, dass diejenigen Athleten, die eine gesteigerte Leistung erreichten, auch eine Zunahme der roten Blutkörperchen und eine verbesserte maximale Sauerstoffaufnahme erzielten (Responders). Bei Athleten, die durch die Höhenexposition die Leistung nicht verbesserten, konnten diese Effekte nicht nachgewiesen werden (Non-Responders) (Chapman et al., 1998). Der Hauptgrund, der zu einer gesteigerten Leistung nach einem Höhentraining führt, ist laut den vorhin erwähnten Autoren einer gesteigerten Masse an roten Blutkörperchen, die zu einer Erhöhung der VO_{2max} führt, sowie der Aufrechterhaltung der Intensität, zuzuschreiben. Stray-Gundersen und Levine (2008) weisen aber auch darauf hin, dass einige Forscher/innen nicht derselben Meinung sind. Auch in dem Review von Millet et al. (2010) wird auf diese Unstimmigkeit hingewiesen. So wurde beispielsweise in Untersuchungen von Schmitt et al. (2006), Gore, Clark und Saunders (2007), Saunders et al. (2004) oder Neya et al. (2007) festgestellt, dass eine verbesserte Leistung durch ein Höhentraining auf eine Verbesserung der Laufökonomie bzw. auf eine gesteigerte Pufferkapazität in der Muskulatur zurückzuführen scheint. Millet et al. (2010) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass einige Studien (Phiel-Aulin, Svedenhag und Wide, 1999; Ashenden et al., 1999; Ashenden et al., 2000) über keine hämatologischen Anpassungen berichteten, wodurch sich die Masse an Hämoglobin bzw. an roten Blutzellen nicht vergrößerte. Obwohl diese Studien bereits einige Jahre zurückliegen, wird über die Hauptmechanismen, die zu einer gesteigerten Performance führen, fortlaufend diskutiert (Gore und Hopkins, 2005; Levine und Stray-Gunderson, 2005).

Für Stray-Gundersen und Levine (2008) sind eine verbesserte Laufökonomie und Pufferkapazität nicht eindeutig als Mitgrund für eine verbesserte Performance in Tallage anzusehen. Sie geben an, dass ein LHTL bzw. LHTLH Training sowohl für Spitzenathlet(inn)en als auch für nicht Spitzenathlet(innen)en geeignet ist, und dass der

Mechanismus, der zur Leistungsverbesserung führt, bei beiden Gruppen derselbe ist. Nämlich eine Zunahme der roten Blutkörperchen und ein Aufrechterhalten des Sauerstoffflusses durch die Ermöglichung von hohen Intensitäten.

3.2.3 Die Hämoglobinspeicherkapazität – ein Diskussionspunkt

In Bezug auf eine Steigerung der roten Blutkörperchen, die aufgrund einer Hämoglobinzunahme hervorgerufen wird, haben Robach und Lundby (2012) eine kritische Anmerkung veröffentlicht. Sie werfen in einem „Editorial“, das im *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* erschienen ist, die Frage auf, ob ein LHTL Training für Topathlet(inn)en denn überhaupt relevant ist, da diese Spitzsportler/innen bereits über hohe Hämoglobinspeicher verfügen. In den Studien von Siebenmann et al. (2012) und Robach et al. (2012) konnte nämlich festgestellt werden, dass ein LHTL Training (16 Stunden/Tag über vier Wochen auf 3000 Meter, normobare Hypoxie) mit Topradfahrern zu keiner Steigerung der Hämoglobinmasse oder der VO_{2max} bzw. der Leistung im Zeitfahren führte. Robach und Lundby (2012) führen weiter an, dass dieses Ergebnis zu großer Wahrscheinlichkeit aufgrund der hohen Hämoglobinspeicher, die die Radfahrer schon zu Beginn der Studie aufwiesen, zustande kam. Die Athleten hatten Hämoglobinspeicher von ca. 13,5g/kg, die bereits nahe der physiologischen Grenze von 14g/kg liegen (Jelkmann und Lundby, 2011). Daher weisen Robach und Lundby (2012) darauf hin, dass ein LHTL Training möglicherweise nur für Athleten interessant ist, deren Hämoglobinspeicherkapazität noch nicht ausgeschöpft ist. Ein Screening im Vorfeld eines möglichen Höhentrainings könnte Aufschluss darüber geben.

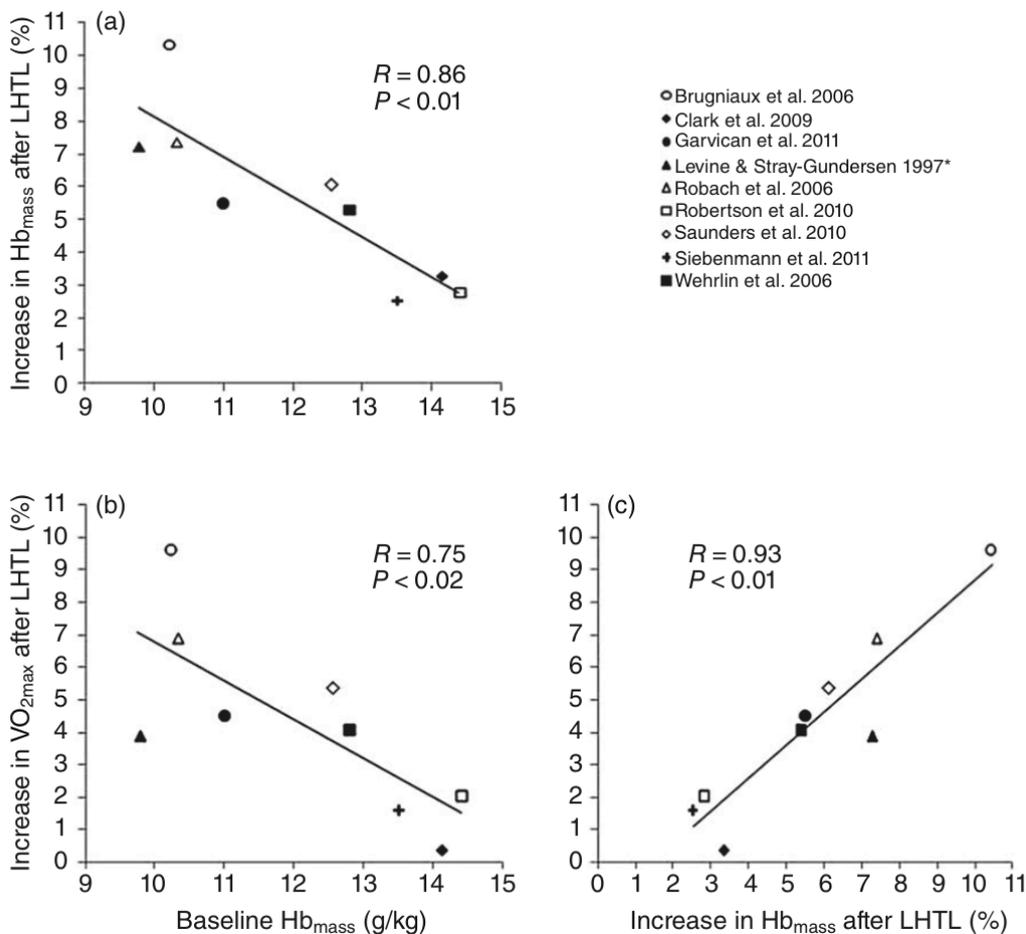


Abb. 1: Veränderungen der Hämoglobinmasse (mod. n. Robach und Lundby, 2012, S. 304).

Aus der Abbildung (a) ist ersichtlich, dass diejenigen Athleten, die zu Beginn des Höhentrainings eine niedrigere Hb-Masse hatten, stärker auf das LHTL Training reagierten als jene Athleten, die bereits bei der Ausgangsmessung eine hohe Hb-Masse zeigten. Die Abbildung (b) zeigt den Zusammenhang zwischen Baseline Hb-Masse und der Steigerung der VO_{2max} nach einem LHTL Training. Anhand der dritten Abbildung (c) ist ersichtlich, dass eine Verbesserung der VO_{2max} durch ein LHTL von dem Zuwachs der Hb-Masse nach einem LHTL Training abhängig ist (Robach & Lundby, 2012).

3.2.4 Die optimale Höhe während LHTL und der optimale Zeitpunkt ins Tal zurückzukehren

Ein weiteres Thema, das Forscher derzeit beschäftigt, stellt die optimale Höhe eines Höhentrainings dar. Mit dieser Forschungsfrage hatte sich die Studie von Chapmann et al. (2014a) intensiv beschäftigt. Basis der Untersuchung war die Studie von Ge et al. (2002). 48 Athleten verbrachten jeweils 24 Stunden in einer hypobaren Kammer in einer simulierten

Höhe von 1780m, 2085m, 2454m und 2800m. Es zeigte sich, dass die EPO-Zuwachsrates bei den höchsten zwei Stufen (2454m und 2800m) signifikant größer war als bei den niederen beiden Höhen (1780m, 2085m). Demnach ist eine Steigerung des EPO-Wertes von der „hypoxischen Dosis“ abhängig. Chapman et al. (2014a) hatten daher die Hypothese, dass Athlet(inn)en, die auf größerer Höhe während eines LHTL Trainings leben, eine stärkere Leistungsverbesserung in Tallage zeigen, als Athlet(inn)en, die in geringerer Höhe wohnen. Begründet wird diese Hypothese mit der Annahme, dass die Sportler/innen in größerer Höhe stärkere hämatologische Anpassungen zeigen mögen.

Es nahmen insgesamt 48 Cross-Country-Läufer/innen an der Studie teil. Nach einer vierwöchigen Trainingsphase in Tallage, in der auch sämtliche Tests zur Ermittlung der hämatologischen und metabolischen Parameter durchgeführt wurden, folgte ein 28-tägiges Höhentrainingslager. Die Läufer/innen wurden in vier Gruppen eingeteilt, wobei eine Gruppe auf 1780m wohnte, eine auf 2085m, eine auf 2454m und eine Gruppe wohnte auf einer Höhe von 2800m. Die Trainingseinheiten wurden von jeder Gruppe zwischen 1250 und 3000m absolviert. Das Trainingsmodell war also ein LHTLH Schema des LHTL Modells. Es wurde in moderater Höhe gewohnt, die wenig intensiven Einheiten wurden ebenfalls in moderater Höhe durchgeführt, und die intensiven Einheiten fanden in der geringen Höhe von 1250m statt. Um ausreichende Eisenspeicher zu garantieren, wurden schon vor und während des Höhentrainings Eisenpräparate verabreicht. Folgende Ergebnisse konnten erzielt werden: Die Gruppen, die auf 2085m und 2454m lebten, zeigten eine signifikant verbesserte 3000m Zeit um 2-3% in Tallage, sowohl unmittelbar nach dem Höhentrainingslager als auch zwei Wochen nach Rückkehr in Tallage. Die VO_{2max} wurde in den Gruppen, die auf 2085m, 2454m und 2800m lebten, signifikant verbessert. Das Volumen der roten Blutkörperchen wurde in allen vier Gruppen signifikant gesteigert. Wobei zwei Wochen nach Rückkehr in Tallage keine signifikanten Veränderungen mehr vorzufinden waren. Interessant ist also, dass sich die Leistung nur in zwei Gruppen (2085m und 2454m) steigerte, obwohl alle vier Gruppen vermehrt rote Blutzellen aufwiesen. Die Erythropoese, die durch die Höhe hervorgerufen wird, scheint zwar notwendig, aber nicht hauptausschlaggebend für eine gesteigerte Leistung zu sein. Die Autoren kommen daher zum Schluss, dass in Bezug auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit eine Höhe zwischen 2000m und 2500m während des passiven Aufenthalts in der Höhe angestrebt werden sollte. Die Höhe von 1760m scheint zu gering gewesen zu sein. Anhand der Analyse der EPO Konzentrationen konnte dies weiter verdeutlicht werden, da die EPO Konzentration der Gruppe, die auf 1760m wohnte, bereits nach 72 Stunden zum Ausgangswert abfiel. Die Gruppen, die höher wohnten, zeigten

hingegen noch erhöhte Werte nach 72 Stunden. Die fehlende Leistungssteigerung der Gruppe, die auf 2800m wohnte, erklären Chapman et al. (2014a) durch die negativen Begleiterscheinungen, die diese Höhe mit sich bringt (Schlafapnoe, verminderter Schlaf, milde Höhenkrankheit). Dadurch sprach die Gruppe schlechter auf das Training an. Eine zusätzliche Erklärung könnte in der gesteigerten Ventilation (VE), die durch die Höhe provoziert wird, liegen. Durch diese Steigerung der Atmung, die in Tallage noch einige Zeit bestehen bleibt, kann es bei submaximalen und maximalen Belastungen zur Lungenüberblähung bzw. Kurzatmigkeit kommen, was in einer reduzierten Leistungsfähigkeit resultiert. Zusammenfassend konnten die Autoren anhand ihrer Studie feststellen, dass die optimale Höhe, auf der bei einem LHTL Trainingslager gewohnt werden soll, zwischen 2000m und 2500m liegt (Chapman et al., 2014a).

Neben der optimalen Höhe, die während eines LHTL Trainings aufgesucht werden sollte, versuchen Forscher/innen zu klären, wann der optimale Zeitpunkt für einen Wettkampf nach der Absolvierung eines Höhentrainings ist. Ein kürzlich erschienener Review von Chapman, Stickford, Lundby und Levine (2014) thematisiert diese Forschungsfrage.

Laut der Empfehlung von zahlreichen international erfolgreichen Trainern, sollten Athlet(inn)en zwischen zehn bis 25 Tage nach dem Höhentaining an einem Wettkampf teilnehmen. Diese Daten basieren jedoch auf Erfahrungswerten und sind nicht wissenschaftlich belegt (Chapman et al., 2014b).

Im Review wird versucht, anhand von physiologischen und biomechanischen Adaptionen, die bei der Rückkehr in Tallage auftreten, den optimalen Zeitpunkt für die Rückkehr vom Höhentaining für Ausdauersportler/innen zu bestimmen. Die Autoren geben an, dass der optimale Zeitpunkt für die Rückkehr von der Höhe wahrscheinlich durch die Interaktion von drei Faktoren beeinflusst wird, nämlich i) vom Zeitpunkt des Rückgangs der roten Blutkörperchen, ii) vom Mechanismus der Atmungsanpassung („off-response“ der Akklimatisierung der Atmung) und iii) von biomechanischen und neuromuskulären Faktoren. Die Verringerung der roten Blutzellen wird von Chapman et al. (2014b) folgendermaßen erklärt: Bereits in den 50er Jahren wurde herausgefunden, dass es beim Eintritt in die Tallage zu einem Rückgang der Erythrozyten nach zehn Tagen kommt (Huff et al., 1951; Merino, 1950; Mayer, Pace & Vaughan, 1956). Huff et al. (1951) berichteten aber auch, dass sich das Retikulozytenvolumen innerhalb der ersten acht bis zehn Tage nicht vermindert. Demnach müsste der Rückgang der roten Blutkörperchen nicht von der unmittelbaren Verringerung der Erythropoese hervorgerufen werden, sondern es muss einen zusätzlichen physiologischen

Mechanismus geben, der eine Hämolyse bewirkt. Zudem haben Erythrozyten eine Überlebensdauer von 90 bis 120 Tage (Rice & Alfrey, 2005). In den 90er Jahren konnte im Zuge von Forschungsarbeiten mit Astronauten festgestellt werden, dass es beim Abfall von EPO unter ein bestimmtes Level zu einer selektiven Hämolyse (neocytolysis) kommt. Dabei werden junge, aber reife Erythrozyten zerstört. Dies würde den Rückgang der Masse an roten Blutkörperchen innerhalb der ersten Tage nach Rückkehr in Tallage erklären (Chapman et al., 2014b). EPO scheint dabei als entscheidender regulativer Faktor zu agieren (Trials und Rice, 2004).

Demnach könnte die Empfehlung von Trainern und Trainerinnen, eine Trainingsperiode in Tallage zu absolvieren, unpassend sein. Dieser Widerspruch könnte aber trotzdem bestehen, da auch die Atmung (ii) eine besondere „Deakklimatisierung“ erfährt. Die gesteigerte Atmung, die durch die Höhenexposition erreicht wurde, bleibt in Tallage noch einige Zeit bestehen (Buskirk et al., 1967; Gore et al., 2001; Levine & Stray-Gundersen, 1997), was sich positiv auf die VO_{2max} und daher auf die Leistungsfähigkeit auswirken kann, da ein signifikanter Zusammenhang zwischen gesteigerter Ventilation und VO_{2max} besteht (Stray-Gundersen, Chapman & Levine, 2001). Laut Wilson, Oldfield und Jones (1993) kommt es bei der Rückkehr von der Höhe in Tallage während der Bewegung zu einer Verringerung der Atemnot und zu einer verringerten Wahrnehmung der Atmungsanstrengung. Dennoch bringt eine gesteigerte maximale Ventilation eine vermehrte Atemarbeit mit sich, wodurch die Atemmuskulatur mehr Sauerstoff verbraucht. Daher könnte die Möglichkeit einer Leistungsverbesserung vom Ausmaß der metabolischen Verluste sowie anderer möglicher Konsequenzen der gesteigerten Atemarbeit abhängen (Chapman et al., 2014b).

Im Weiteren führt Levine (2008) an, dass es durch eine gesteigerte VE zu einer Limitation im Herzzeitvolumen während maximaler Intensität kommen kann, wodurch die Arbeitsmuskulatur vermindert mit Sauerstoff versorgt werden kann. Durch eine Normalisierung der Atmung könnte es also zur „Befreiung“ von zusätzlichem Herzminutenvolumen kommen, wodurch die Muskulatur besser mit Sauerstoff versorgt werden könnte (Harms et al., 2000). Anzumerken gilt jedoch, dass dieser Prozess wiederum nur bei maximalen Belastungen eine Rolle spielt, bei submaximalen Intensitäten (50-75% des VO_{2max}) wirkt sich eine gesteigerte Atmung nicht negativ auf die Versorgung der Muskulatur aus (Wetter et al., 1999). Demnach müssten Langstreckenläufer/innen beispielsweise, die eine untere Fraktion des VO_{2max} nützen, von den negativen Auswirkungen der Atmungsanpassung an die Höhe nicht so stark betroffen sein. Für sie sollte der optimale Zeitpunkt des Wettkampfs unmittelbar nach dem Höhentrainingslager sein, da dort die Masse an roten

Blutkörperchen am höchsten ist. Sportler/innen hingegen, die sich im Wettkampf nahe der VO_{2max} belasten, scheinen eher von den negativen Folgen der gesteigerten Ventilation betroffen zu sein und könnten daher eine „Deakklimatisierungsphase“ in Tallage benötigen (Chapman et al., 2014b).

In Bezug auf biomechanische und neuromuskuläre Faktoren, die mitentscheidend für die Bestimmung des Wettkampfzeitpunktes nach der Höhenexposition sein können, merken Chapman und Kollegen in ihrem Review an (2014b), dass einige Athlet(inn)en über koordinative Schwierigkeiten bei hohen Laufgeschwindigkeiten nach einem Höhenttraining berichten (Martin, 1994; Wilber, 2007b; Wilber, Stray-Gundersen & Levine, 2007). Es ist jedoch unklar, ob dieses Gefühl der verringerten Koordination neuromuskulär bedingt ist, oder ob das Fehlen von hohen Intensitäten ausschlaggebend ist. Demnach würden solche Athleten wieder eher eine Trainingsphase in Tallage vor dem Wettkampf benötigen. Studien, die aber das LHTL Schema befolgten, wiesen auf keine neuromuskulären Veränderungen hin, zumal es aufgrund der Aufrechterhaltung intensiver Einheiten in geringer Höhe zu keinem Einbußen der Laufmechanik kam (Kayser et al., 1994; Laymon-Stickford et al., 2007).

Zusammenfassend merken Chapman et al. (2014b) an, dass in Bezug auf Akklimatisierungsvorgänge (in der Höhe und nach Rückkehr von der Höhe) große individuelle Unterschiede zwischen den Athleten bestehen. Dennoch geben die Autoren folgende Empfehlungen ab:

1. Athleten, die eine hohe Anpassung der VE aufweisen, sollten einige Tage vor dem Wettkampf in Tallage verbringen, damit sich die Atmung normalisiert.
2. Athleten, die einen schnellen Rückgang der Masse an roten BK aufweisen, sollten unmittelbar nach dem Höhenttraining am Wettkampf teilnehmen.
3. Eine Phase zur Deakklimatisierung scheint nur dann positiv zu sein, wenn der Athlet eine zusätzliche Trainingsanpassung durch die gesteigerte Masse an roten Blutkörperchen und Hämoglobin aufgrund des Höhenaufenthalts gewinnen kann. Obwohl die Masse an Hämoglobin/Erythrozyten wieder nach dem Höhenttraining absinkt, kann der Athlet nun in Tallage auf höherem Niveau trainieren, da es laut Chapman et al. (2014b) während des Höhenttrainings zu anderen physiologischen Mechanismen kommt, die dem Sportler diese gesteigerten Intensitäten erlauben.
4. Für das LHTL Modell scheint keine Phase in Tallage nach einem Höhenttraining notwendig zu sein.

5. Für Athlet(inn)en beispielsweise, die vier Wochen in der Höhe verbringen und dann eine sieben- bis 14-tägige Wettkampfphase in Tallage absolvieren, wäre es womöglich gut, kurzzeitig nochmals in die Höhe zu gehen, um den EPO-Spiegel aufrechtzuerhalten, damit es zu einer Verzögerung der Hämolyse (neocytolysis) kommt (Daniels & Oldridge, 1970).
6. Kurze Expositionen in schwerer Hypoxie (drei Stunden) scheinen ausreichend zu sein, um die EPO Konzentration zu steigern, obwohl dabei die Erythropoese nicht beeinflusst wird (Levine & Stray-Gundersen, 2006). Daher könnte intermittierende Hypoxie (IH) hilfreich sein, um die hämatologischen Anpassungen über längere Zeit aufrecht zu halten (Chapman et al., 2014b).

Schlussendlich kann aber aufgrund der vorliegenden Daten aus physiologischer Sicht kein optimaler Zeitpunkt des Wettkampfs nach einem Höhenttraining definiert werden.

3.2.5 Intermittierende Hypoxie

Neben dem klassischen LHTL Modell gibt es auch intermittierende Formen der Hypoxie. Darunter wird eine wiederholte Sauerstoffmanglexposition verstanden, die von normoxischen Phasen unterbrochen wird. Der Zustand des Sauerstoffmangels kann durch mehrere Formen erzeugt werden. Entweder durch natürliche Höhe oder durch den Aufenthalt in einer hypobaren oder hypoxischen normobaren Kammer. Zudem besteht auch die Möglichkeit, ein Sauerstoffmangelgemisch über eine Maske einzusatmen (Neubauer, 2001). Laut Millet et al. (2012) wird zwischen dem „intermittent hypoxic training“ (IHT) und dem „intermittent hypoxic exposure“ (IHE) unterschieden. IHE ist eine rein passive Form, bei der keine körperlichen Tätigkeiten verrichtet werden. Sobald jedoch Trainingstätigkeiten ausgeführt werden, spricht man vom IHT. Burtcher (2005) stellt basierend auf den spezifischen Hypoxiereaktionen fünf verschiedene IH-Protokolle vor:

1. *Sinusoidale Zyklen mit 30-90 Sekunden andauernden hypoxischen Phasen über 7-8 Stunden pro Tag über mehrere Wochen, Monate, Jahre.* Die Form kommt bei Patienten mit obstruktiver Schlafapnoe zur Anwendung.
2. *IH in Ruhe mit einer Zyklusdauer von 2-10 Minuten für 1-2 Stunden pro Tag über 2-4 Wochen.* Diese Form der Hypoxie zeigt gute Effekte im Reha-Bereich.
3. *1- bis 2-stündige Hypoxie in Ruhe pro Tag über 5 Tage.* Dieses Protokoll eignet sich als Vorbereitung auf einen Höhenaufenthalt.

4. *IH in Ruhe für mehr als 90min (bis Stunden) pro Tag oder jeden 2. Tag über 2-6 Wochen.*

Um eine gesteigerte Hämoglobinmasse zu bezwecken, sind prolongierte Höhengaufenthalte notwendig. Burtcher (2005) gibt an, dass besonders die progressive Gestaltung der passiven, intermittierenden Höhenexposition, bei der die Intensität und die Dauer kontinuierlich erhöht werden, deutliche hämatologische Reaktionen sowie aerobe Leistungsverbesserungen bezwecken kann. Werden hingegen gleichbleibende Hypoxiereize eingesetzt, kommt es eher zur Verbesserung der Bewegungsökonomie. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass ein LHTL Training dieser Form der intermittierenden Hypoxie entsprechen kann (Millet et al., 2012).

5. *IH mit Belastung für 30min bis 2 Stunden pro Tag oder jeden 2. Tag über 2-6 Wochen*

Je nach Zielsetzung kann IH in Ruhe oder in Belastung sinnvoll sein. Katayama et al. (2005) zeigt jedoch, dass Hypoxie und gleichzeitige Belastung die „hypoxic ventilatory response“ (Atmungsantwort) hindert. Zudem verweist Burtcher (2005) auch auf Levine, der das LHTL Modell favorisiert. Beim LHTL kann die Stimulation der Erythropoese optimal genutzt werden. Im Weiteren müsste beim Training mit höherer Intensität während einer Hypoxiexposition die Trainingsintensität bei Belastungen großer Muskelgruppen reduziert werden, da die aerobe Leistungsfähigkeit mit zunehmender Höhe abnimmt (1% pro 100m ab 1500m) (Buskirk et al. 1967b). Vogt et al. (2001) und Hoppeler und Vogt (2001) konnten aber auch positive Effekte von körperlicher Belastung mit hoher Intensität in der Höhe zeigen. Sie stellten eine erhöhte Myoglobinkonzentration und Kapillardichte in der Arbeitsmuskulatur fest.

Zusammenfassend merkt Burtcher (2005) also an, dass eine progressive Gestaltung des Höhengaufenthalts (4000m-5500m) in Ruhe über 90 Minuten bis mehrere Stunden pro Tag günstige hämatologische Adaptionen mit gesteigerter aerober Leistungsfähigkeit bewirken kann. Bei gleichbleibender intermittierender Hypoxie kann es zur Verbesserung der Bewegungsökonomie bei hoch trainierten Athleten kommen. Wird der Höhengaufenthalt mit körperlicher Belastung kombiniert, scheinen eher muskuläre Mechanismen angeregt zu werden, die zu einer verbesserten aeroben und anaeroben Leistung führen, sofern nur moderate Höhen gewählt werden.

Tab. 2: Effekte und Einsatzbereiche unterschiedlicher IH Protokolle

IH-Protokoll	Vermutete Haupteffekte	Haupteinsatzbereiche	Geeignete Personen
2-10 min für 1-2 Stunden pro Tag über 2-4 Wochen Ruhe, 3000 – 5500 m gleichbleibend/progressiv	Steigerung der allgemeinen Stress- und Belastungstoleranz Steigerung der Bewegungsökonomie Steigerung der Atemantwort auf Hypoxie	Therapie Prävention Training	Patienten, untrainierte und gut trainierte Personen
1-2 Stunden pro Tag über 5 Tage Ruhe, 3000 – 5500 m gleichbleibend/progressiv	Steigerung der Atemantwort auf Hypoxie	Höhenvorbereitung	untrainierte, gut und sehr gut trainierte Personen
90 min bis Stunden pro Tag über 2-6 Wochen Ruhe, 3000 – 5500 m gleichbleibend	Steigerung der Bewegungsökonomie Steigerung der Atemantwort auf Hypoxie	Training Höhenvorbereitung	gut und sehr gut trainierte Personen
90 min bis Stunden pro Tag über 2-6 Wochen Ruhe, 4000 – 5500 m progressiv	Aerobe Leistungssteigerung Anstieg von Hämoglobinkonzentration und Hämatokrit Steigerung der Atemantwort auf Hypoxie	Training Höhenvorbereitung	gut trainierte Personen
30 min bis 2 Stunden pro Tag über 2-6 Wochen Belastung, 2000 – 2500 m gleichbleibend	Aerobe und anaerobe Leistungssteigerung muskuläre Adaptation	Training	gut und sehr gut trainierte Personen

Quelle: mod. n. Burtcher (2005, S. 65.)

Im Review von Millet et al. (2012) findet man etwas andere Schlussfolgerungen im Vergleich zu Burtcher (2005). Laut Millet et al. (2012) führt ein IHE, also ein passiver Aufenthalt in Hypoxie, zu keinen hämatologischen Anpassungen. Auch auf die Leistungsfähigkeit scheint ein IHE alleine keinen Einfluss zu haben. Ein IHT sollte die Ausdauerleistungsfähigkeit jedoch positiv beeinflussen, abhängig von der Kombination aus Dauer, Intensität sowie dem Grad der Steigerung der Hypoxie während des Trainings (Millet et al., 2012).

Im Review wird neben dem „normalen“ intermittierenden Hypoxietraining auch eine originelle Methode erwähnt, die bisher aber kaum Anwendung fand. Beim sogenannten „Training with Voluntary Hypoventilation“ wird bewusst während des Trainings die Atemfrequenz reduziert bzw. für kurze Zeit die Luft angehalten. Somit wird eine Form des IHT induziert, bei dem jedoch zusätzlich auch Hyperkapnie auftritt. Von dieser Methode haben Woorons et al. (2007) und (2008) positive Effekte berichtet. In der Untersuchung von 2008 konnte ermittelt werden, dass durch diese Form des Trainings zwar keine hämatologischen Anpassungen provoziert wurden, und dass auch keine verbesserte Leistung erreicht wurde, aber es kam zu einer Erhöhung des pH und HCO₃ bei hoher submaximaler Intensität. Dadurch könnte es womöglich zu einer verzögerten Azidose und einer erhöhten Pufferkapazität kommen. Zudem wurde bei maximaler Intensität bei 85% der Probanden eine Verbesserung der Geschwindigkeit um 0,5 km/h erreicht. Demnach könnte diese Methode

eventuell zu einer gesteigerten anaeroben Performance führen. Jedoch sind weitere Studien notwendig, um vermehrtes Wissen in Bezug auf diese außergewöhnliche Methode zu liefern.

Eine kürzlich erschienene Studie von Humberstone-Gough et al. (2013) hat ein LHTL Training mit einem intermittierendem hypoxischem Aufenthalt (IHE) verglichen. Die randomisierte und Placebo kontrollierte Untersuchung fand in Australien statt, bei der 24 Triathlet(inn)en (National Team Niveau) teilnahmen. Im Rahmen eines 21-tägigen gemeinsamen Trainingscamps in Canberra (600m) wurden nach dem zweiten Tag drei Gruppen gebildet (LHTL, IHE und Placebo). Die LHTL Gruppe verbrachte 14 Stunden pro Tag in der Höhe von 3000m (normobare Hypoxie in einer Kammer) für insgesamt 17 Tage. Die IHE Gruppe atmete mittels eines „Beatmungsgeräts“ Luft ein, die einer Höhe von 3500m-6000m entsprach. Jeden Tag atmeten die Proband(inn)en für 60 Minuten sauerstoffreduzierte Luft ein, wobei jeweils sechs Minuten veränderte Luft und vier Minuten Luft mit normalem Sauerstoffgehalt inhaliert wurde. Der Sauerstoffanteil der Luft wurde progressiv reduziert. Der Ablauf der Placebo Gruppe war jenem der IHE Gruppe ident, während der sechs Minuten wurde aber nur eine milde Hypoxie erzeugt. Das Training fand in jeder Gruppe in normaler Umgebung in Canberra statt.

Die Auswertung erfolgte mittels der Verwendung von „magnitude-based-inferences“, um kleine Effekte darstellen zu können.

Tab. 3: Blut- und Belastungsparameter der LHTL-, IHE- oder Placebo Gruppe jeweils vor und nach der Hypoxieexposition

	LHTL		IHE		Placebo	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
Blood measures						
Haemoglobin mass (g)	869 (182)	900 (193)	847 (189)	850 (184)	775 (191)	789 (195)
Serum ferritin (ng·mL ⁻¹)	62.8 (33.4)	68.0 (27.3)	54.2 (27.5)	51.0 (23.4)	71.6 (46.4)	56.4 (36.2)
Soluble transferrin receptor (mg·L ⁻¹)	2.5 (.3)	2.9 (.6)	2.7 (.6)	3.2 (.7)	2.4 (.4)	2.8 (.6)
Submaximal running						
Running economy (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	3.72 (.58)	3.55 (.62)	3.39 (.63)	3.35 (.63)	3.29 (.66)	3.35 (.59)
3mM [La] running speed (km·h ⁻¹)	16.8 (.4)	17.1 (.7)	17.0 (1.0)	17.4 (.8)	16.5 (.7)	16.8 (.8)
Maximal running						
VO _{2max} (L·min ⁻¹)	4.82 (1.1)	4.84 (.89)	4.56 (.87)	4.63 (.79)	4.47 (.65)	4.60 (.72)
vVO _{2max} (km·h ⁻¹)	19.3 (.6)	19.6 (.4)	18.9 (1.4)	19.1 (1.3)	19.6 (.9)	19.6 (1.1)
TTE (s)	528 (46)	540 (37)	518 (73)	521 (36)	540 (47)	570 (43)
Maximal heart rate (beats·min ⁻¹)	192 (12)	185 (16)	200 (6)	196 (5)	195 (9)	195 (9)
Maximal [La] (mM·L ⁻¹)	9.7 (2.0)	8.3 (1.7)	8.8 (1.6)	7.4 (.9)	10.0 (2.4)	10.4 (2.0)

Data presented are the raw values, expressed as group means (± standard deviation). Blood lactate concentration: [La]. Maximal oxygen consumption: VO_{2max}. Running velocity at VO_{2max}: vVO_{2max}. Running time to exhaustion: TTE

Quelle: mod. n. Humberstone-Gough et al. (2013, S. 397).

Tab. 4: Prozentueller Unterschied der veränderten Blut- und Laufparameter nach entweder LHTL oder IHE im Vergleich mit der Placebo Gruppe

	LHTL			IHE		Placebo	
	SWC (%)	Diff. from Placebo (± 90% CL)	Qualitative Inference	Diff. from Placebo (± 90% CL)	Qualitative Inference	Diff. from Placebo (± 90% CL)	Qualitative Inference
Blood measures							
Haemoglobin mass (g)	1.6	3.2 (4.8)	Possibly higher	-1.4 (4.5)	Unclear	4.7 (3.5)	Likely higher
Serum ferritin (ng·mL ⁻¹)	8.2	17.5 (46.6)	Unclear	31.0 (40.9)	Likely higher	-10.3 (43.3)	Unclear
Soluble transferrin receptor (mg·L ⁻¹)	3.0	14.3 (16.9)	Likely higher	3.4 (14.1)	Unclear	10.5 (12.8)	Likely higher
Submaximal running							
Running economy (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	1.9	-1.1 (4.2)	Unclear	1.7 (3.4)	Possibly trivial	-2.8 (4.4)	Possibly lower
3mM [La] running speed (km·h ⁻¹)	.8	4.4 (4.5)	Likely higher	2.7 (3.7)	Unclear	1.7 (4.6)	Unclear
Maximal running							
VO _{2max} (L·min ⁻¹)	1.5	1.7 (9.0)	Unclear	3.9 (7.1)	Unclear	-2.1 (8.5)	Unclear
vVO _{2max} (km·h ⁻¹)	.9	1.7 (9.7)	Unclear	1.3 (8.3)	Unclear	.4 (9.5)	Unclear
TTE (s)	3.0	-1 (20.0)	Unclear	-4.7 (12.2)	Unclear	4.8 (20.0)	Unclear
Maximal heart rate (beats·min ⁻¹)	.8	-5.7 (3.4)	Very likely lower	-3.0 (2.8)	Likely lower	-2.8 (3.5)	Likely lower
Maximal [La] (mM·L ⁻¹)	3.5	-32.4 (27.2)	Very likely lower	-20.7 (26.8)	Likely lower	-14.7 (32.4)	Unclear

Values are the net difference between groups of the percent change in variables from pre-camp to post-camp with 90% confidence limits (± 90% CL). Smallest Worthwhile Change in the variable, expressed as a percentage: SWC. Differences: Diff. Blood lactate concentration: [La]. Maximal oxygen consumption: VO_{2max}. Running velocity at VO_{2max}: vVO_{2max}. Running time to exhaustion: TTE.

Quelle: mod. n. Humberstone-Gough et al. (2013, S. 397).

In der LHTL Gruppe kam es zu einer klaren Steigerung der Hämoglobinmasse um 3,2%. Auch der sTfR (soluble transferrin receptor) stieg in dieser Gruppe an. Im Vergleich dazu konnte dies bei der IHE Gruppe nicht festgestellt werden. Eine zu geringe hypoxische Dosis, die zu keiner Stimulation der Erythropoese führte (Humberstone-Gough et al., 2013), könnte eine Erklärung für dieses Ergebnis sein.

Die LHTL Gruppe erreichte eine hämatologische Verbesserung durch ein 17-tägiges Höhenttraining. Diese Dauer ist im Vergleich zu der von vielen anderen Autoren empfohlenen Dauer von mindestens drei Wochen etwas kürzer. Trotzdem konnte durch eine ausreichend starke und ausreichend lange Form der hypoxischen Dosis eine Zunahme der Hämoglobinmasse erzielt werden (Humberstone-Gough et al., 2013). Die Athlet(inn)en wiesen jedoch keine gesteigerte VO_{2max} auf. Dies erklären die Autoren durch die gesunkene maximale Herzfrequenz. Im Weiteren zeigte die LHTL Gruppe eine leicht gesteigerte Laufökonomie. Das LHTL Training dieser Untersuchung war daher für submaximale Belastungen geeignet (Humberstone-Gough et al., 2013). Insgesamt stellen die Autoren abschließend aber fest, dass aufgrund der vorliegenden Daten ein IHE für Top-Triathlet(inn)en nicht geeignet scheint.

Eine andere Studie von Hamlin, Marshall, Hellemans, Ainslie und Anglem (2010) hat die Auswirkungen eines intermittierenden hypoxischen Trainings (IHT) auf die anaerobe Leistungsfähigkeit sowie auf die 20 km Fahrzeit am Rad ermittelt. Dabei absolvierte jeweils eine IHT Gruppe und eine Placebo Gruppe ein 90-minütiges Training für zehn

aufeinanderfolgende Tage am Ergometer. Im Anschluss an die 90 Minuten wurden noch zwei Wingate Tests durchgeführt. Die IHT Gruppe trainierte in simulierter Höhe (normobar hypoxisch) und die Placebo Gruppe in Tallage. Die Hypoxie entsprach einer Höhe von 3200-4400 Metern. Es erfolgte eine schrittweise Reduzierung des Sauerstoffgehalts.

Tab. 5: Durchschnittliche Veränderungen der Leistung und physiologischer Parameter nach der Intervention, und die Wahrscheinlichkeit, dass die Unterschiede in den Veränderungen "echt" sind

	Days Post-training	% Change			Chances that true differences are substantial*	
		IHT	Placebo	Difference; ± 95% CL	%	Qualitative inference
30 s mean power	2	2.8	-0.2	3.0; ± 3.5	91	Likely Positive
	9	2.2	0.5	1.7; ± 3.8	67	Unclear
30 s peak power	2	1.6	-1.1	2.7; ± 11.6	62	Unclear
	9	7.3	-1.3	8.6; ± 12.5	89	Unclear
20 km mean power	2	2.7	0.7	2.0; ± 5.5	65	Unclear
	9	4.7	2.0	2.7; ± 9.2	65	Unclear
20 km Oxygen cost	2	-4.0	5.5	-10.1; ± 15.9	88	Unclear
	9	-3.6	2.6	-6.2; ± 17.3	73	Unclear

*Based on a smallest substantial change of 1.0% for all measures. ± 95% CL: add and subtract this number to the mean effect to obtain confidence limits for the true difference.

IHT, intermittent hypoxic training.

Quelle: mod. n. Hamlin et al. (2009, S. 655).

Wie in der Tab. 5 ersichtlich, hat die IHT Gruppe die anaerobe Leistung um ca. 3% verbessert (mean power), gemessen am zweiten Tag nach der Intervention.

Zudem wies die IHT Gruppe eine gesteigerte Hämoglobinmasse, einen erhöhten Hämatokritwert sowie eine Zunahme der Retikulozyten zwei Tage nach der Intervention auf. Der RER war im Anschluss an die Intervention in der IHT Gruppe deutlich höher als in der Vergleichsgruppe. Somit wurden also in der IHT Gruppe vermehrt Kohlenhydrate verbrannt, was auf eine effizientere ATP Bereitstellung pro Mol verbrauchtem Sauerstoff hinweist (Hamlin et al., 2010). Die Effekte vieler anderer Parameter waren unklar (Tab. 6). Die Autoren begründen dies durch mögliche Messfehler. Trotzdem kommen sie zum Schluss, dass sich ein IHT positiv bei gut trainierten Athleten auswirken kann. Ob diese Effekte auch bei Spitzenathlet(inn)en gemessen werden können, gilt es noch zu erforschen.

Tab. 6: Durchschnittliche Veränderungen der hämatologischen Parameter nach der Intervention sowie die Wahrscheinlichkeit, dass die Unterschiede in den Veränderungen "echt" sind

	Days Post-training	% Change			Chances that true differences are substantial*	
		IHT	Placebo	Difference; ± 95% CL	%	Qualitative
Hemoglobin	2	1.5	-1.5	3.0; ± 4.0	75	Likely
	9	0.3	0.1	0.2; ± 3.6	20	Unclear
Hematocrit	2	2.4	-1.3	3.7; ± 3.5	98	Very likely
	9	0.4	-0.1	0.5; ± 3.6	61	Unclear
Reticulocytes	2	2.1	-7.9	10.0; ± 16.4	85	Likely
	9	-18.0	-2.2	-15.8; ± 16.1	96	Very likely
Serum iron	2	-17.7	10.1	-27.8; ± 40.4	90	Likely
	9	-21.6	28.5	-50.1; ± 37.1	99	Almost certainly
% Ferritin saturation	2	-17.1	10.0	-27.1; ± 38.6	90	Likely
	9	-18.3	27.3	-45.7; ± 37.9	99	Almost certainly
Serum ferritin	2	-12.2	-11.9	-0.3; ± 24.4	48	Unclear
	9	-16.3	-6.3	-10.0; ± 21.2	81	Unclear

*Based on a smallest substantial change of 0.2 of the between-subject standard deviation for all blood measures. ± 95% CL: add and subtract this number to the mean effect to obtain confidence limits for the true difference.

IHT, intermittent hypoxic training.

Quelle: mod. n. Hamlin et al. (2010, S. 656).

Insgesamt kann im Hinblick auf das intermittierende Höhenttraining gesagt werden, dass es Studien gibt, die Hinweise für eine gesteigerte Leistungsfähigkeit liefern, aber es bestehen auch Untersuchungen, die wiederum keine Effekte zeigten. Welches Höhenttrainingsprotokoll sich am besten für den jeweiligen Athleten eignet, ist schwer zu definieren.

Zusammenfassend zum Einsatz des Höhenttrainings im Ausdauersport kann festgestellt werden, dass ein LHTL Training, das quasi ein intermittierendes Hypoxietraining über eine längere Dauer darstellt (Burtscher, 2005), insgesamt großen wenn nicht den größten Anklang zu finden scheint. Darüberhinaus rückt aber auch die Kombination aus Live High-Train Low and High (LHTLH) in den Vordergrund. Für Millet et al. (2010) jedenfalls hat diese Kombination, wenn auch noch nicht ausreichend erforscht, großes Potential. Im Weiteren geben sie in ihrem Review Trainingsempfehlungen. Dabei ist ersichtlich, dass eine optimale Performance durch die Kombination von mehreren Methoden zu Stande kommen sollte. Die Abb. 2 veranschaulicht ihre Empfehlungen:

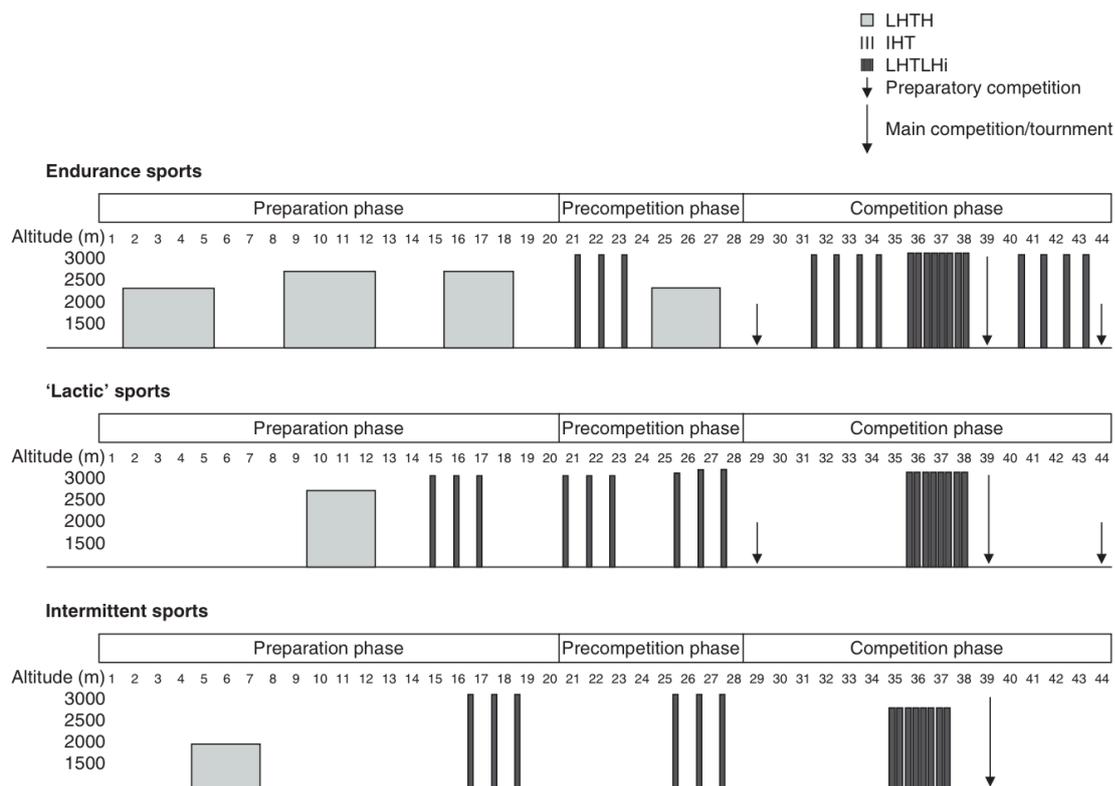


Abb. 2: Einsatz hypoxischer Methoden in Ausdauersportarten, glykolytischen und intermittierenden Sportarten; LHTH=live high-train high; LHTLHi=live high-train low and high interspersed; IHT=intermittent hypoxic training (mod. n. Millet et al. 2010, S. 19).

Neben Empfehlungen für den Ausdauersport liefern Millet et al. (2010) Trainingsempfehlungen für „glykolytische“ und intermittierende Sportarten. Auf intermittierende Sportarten, denen auch Spielsportarten zugeordnet werden können, wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

3.3 Die Anwendung des Höhentrainings in Team- und intermittierenden Sportarten

Obwohl ein Höhentaining eher mit Ausdauersportarten in Verbindung gebracht wird, findet es mittlerweile immer größeren Anklang in intermittierenden oder Team-Sportarten. Im März 2013 fand in Doha, Qatar, eine „Altitude Training and Team Sports“ Konferenz statt, bei der zahlreiche Expert(inn)en aus verschiedenen Ländern teilnahmen (Girard et al., 2013). Zu den Expert(inn)en zählten (Sport)-Mediziner/innen, Sportwissenschaftler/innen und Trainer/innen. Aufbauend auf den Vorträgen bzw. „Experten Diskussionen“, die im Rahmen der zweitägigen Konferenz abgehalten wurden, verfassten Girard und Kolleg(inn)en (2013) ein sogenanntes „position statement“, das aktuelle Erkenntnisse zum Einsatz von Hypoxie in Team-Sportarten thematisiert. Der Artikel basiert auf wissenschaftlich erhobenen Daten sowie auf

Erfahrungswerten der Teilnehmer/innen. Im folgenden Abschnitt sollen die wichtigsten Punkte, die in dem Artikel erwähnt werden, dargestellt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass Sportspiele in den vergangenen Jahren immer schneller und intensiver geworden sind, und somit die Beanspruchung der Athlet(inn)en immer größer wird, versuchen Trainer/innen neue, innovative Methoden zu finden, die zu einer Verbesserung der Leistung führen. Daher wurde das Höhenttraining von Coaches vermehrt in Betracht gezogen. In Team-Sportarten wird ein Höhenttraining hauptsächlich aus zwei Gründen angewendet: Zum einen zur Akklimatisierung an den Wettkampfort, wenn ein Wettkampf in Höhenlage stattfindet. Zum anderen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit in Tallage (Girard et al., 2013).

Team-Sportarten sind durch hohe Intensitäten, ständigen Richtungswechsel sowie durch intervallförmige Belastung charakterisiert. Innerhalb eines Teams unterliegen die Mitglieder jedoch unterschiedlichen metabolischen Beanspruchungen. Diese Unterschiede in der Belastung ergeben sich beispielsweise aus der Position, die ein/e Spieler/in einnimmt (Mittelfeldspieler/in vs. Verteidiger/in im Fußball). Zudem sind unterschiedliche Spielertypen vorzufinden, die auch zu verschiedenen Beanspruchungsprofilen führen (Aughey, 2011). Dennoch kann insgesamt festgestellt werden, dass zwar in den meisten Teamsportarten die aerobe Energiebereitstellung dominiert, aber da während eines Sportspiels ständig Sprünge oder kurze Sprints auftreten, ist auch der anaeroben Energiegewinnung eine große Rolle zuzuschreiben (Stolen et al., 2005; Faude, Koch & Meyer, 2012). Demnach sollte ein Höhenttraining in Teamsportarten aerobe als auch anaerobe Verbesserungen bringen.

Nun stellt sich die Frage, welche Athlet(inn)en bzw. welche Teamsportarten am meisten von einem Höhenttraining profitieren. Grundsätzlich sollten Teamsportler/innen gute Voraussetzungen mitbringen, um starke Effekte durch ein Höhenttraining hervorzurufen. Die anfängliche Hämoglobinmasse von Teamsportler/innen sollte im Vergleich zu Ausdauerathlet(inn)en nicht derart hoch sein (Bieri et al., 2013; Wachsmuth et al., 2013), daher kann die Masse an Hämoglobin durch ein Höhenttraining noch deutlich gesteigert werden. Die Experten waren im Weiteren der Meinung, dass sich Sportler/innen, die sich über eine längere Dauer auf hoher Intensität belasten müssen, vermehrt von einem Höhenttraining profitieren. Daher ist eine Höhenexposition für Spieler/innen, die mehr als 100 Meter pro Minute mit hohen Intensitäten zurücklegen (z.B. Football) besser geeignet als für Spieler/innen, die weniger als 50 Meter pro Minute (z.B. Volleyball) zurücklegen (Aughey, 2011).

Ein nächster Diskussionspunkt stellt die Frage nach der optimalen Art des Höhentrainings dar, die am besten für Teamsportler/innen geeignet ist. Dazu konnte keine eindeutige Antwort gefunden werden. Girard et al. (2013) erwähnen jedoch, dass das LHTL Modell eine situationsbedingte Anpassung erfahren sollte, da es zum einen logistisch nicht so leicht möglich ist, eine ganze Mannschaft in der Höhe unterzubringen, und zum anderen gilt zu bedenken, dass das ständige Pendeln auf den Berg und wieder retour zu vermehrter Müdigkeit der Athlet(inn)en führt. So müssten beispielsweise längere Regenerationszeiten während eines Höhentrainings eingeplant werden. Auch die Intensität bzw. die Dauer von einzelnen Einheiten muss stärker kalkuliert werden, je nach Abhängigkeit von der Höhe, auf der trainiert wird. Dadurch kann eine Verringerung der Trainingsqualität vermieden werden (Saunders, Pyne & Gore, 2009). Eine andere Lösung, um die negativen Begleiterscheinungen eines LHTL Trainings zu umgehen, wäre der Einsatz von zusätzlichem Sauerstoff während der Trainingseinheiten in der Höhe. D.h. die Spieler/innen leben in natürlicher Höhe und auch die Trainingseinheiten finden in natürlicher Höhe statt, jedoch mit zusätzlichem Gebrauch von Sauerstoffflaschen (Wilber, 2007a). Dieser Vorschlag ist nicht wissenschaftlich überprüft, aber der Einsatz von Sauerstoffflaschen scheint zumindest nicht praktikabel zu sein. Daher bietet sich die Anwendung von künstlicher Höhe in Teamsportarten an. Aber auch hier gilt es einige Dinge zu beachten, auf die später noch genauer eingegangen wird.

Zudem erwähnen die Autoren des „position statement“ zum Einsatz von Höhentrainung in Teamsportarten, dass das Modell des Live High-Train Low and High grundsätzlich gut in Teamsportarten eingesetzt werden kann (Millet et al., 2010). Auch der Einsatz des LHTL interspersed, bei denen die Nächte nicht nur in Hypoxie sondern auch fallweise in Normoxie verbracht werden, soll eine geeignete Methode für den Teamsport darstellen. Dadurch könnten die negativen Auswirkungen, die chronische Hypoxie hervorrufen kann, vermieden werden (z.B. Verringerung der Na/K ATPase) (Aughley et al., 2005). Im Weiteren erwähnen Girard et al. (2013), dass das LLTH Modell zu guten Effekten in Teamsportarten geführt hat. Hoch intensives Training während Hypoxie (Sprinttraining) konnte stärkere periphere Anpassungen und in weiterer Folge eine verbesserte Leistung erzielen, verglichen mit einem Training in Tallage (Faiss et al., 2013). Auch Galvin, Cooke, Sumners, Mileva und Bowtell, (2013) führten eine Studie durch, bei der hoch intensives Training zum Einsatz kam. Ziel dieser Untersuchung war es herauszufinden, wie sich ein „repeated sprint training“ in normobarer Hypoxie auf die spezifische Ausdauerleistungsfähigkeit auswirkt. Die Autoren bezeichnen diese spezielle Ausdauerleistungsfähigkeit als „repeated sprint ability“. Gemeint ist die Fähigkeit, bei kurzen Sprints eine maximale Geschwindigkeit zu erreichen, sowie bei

wiederholten Sprints einen geringen Rückgang der Leistungsfähigkeit zu erzielen. Die Studie wurde mit guttrainierten Rugby Spielern durchgeführt. In vier Wochen führten die Athleten insgesamt zwölf Einheiten durch, bei denen sie wiederholte, kurze Sprints auf einem nicht-motorisierten Laufband absolvierten. Eine Gruppe der Spieler inhalierte dabei normoxisches Gas, die andere Gruppe bekam ein Gasgemisch mit einem Sauerstoffanteil von 13%. Folgende Ergebnisse konnten anhand spezifischer Feldtests erzielt werden:

Tab. 7: Ergebnisse der Feldtests in Normoxie vor und nach der vierwöchigen Trainingsintervention der Hypoxiegruppe (HYP) und der Normoxiegruppe (NRM)

	HYP		NRM		p Value	
	PRE	POST	PRE	POST	Time	Time×condition
5 m (s)	1.06±0.06	1.04±0.05	1.08±0.04	1.05±0.06	0.01	0.785
10 m (s)	1.79±0.10	1.75±0.06	1.82±0.05	1.80±0.08	0.064	0.765
20 m (s)	3.05±0.10	3.05±0.11	3.12±0.13	3.09±0.12	0.12	0.413
20 m RSA (s)	32.2±1.1	31.9±1.2	32.7±1.2	32.3±1.3	0.039	0.391
YoYo IR1 (m)	1237±265	1621±364	1374±361	1594±379	<0.001	0.002

Values are expressed as averages±SD.
RSA, repeated sprint ability, Yo-Yo IR1, Yo-Yo Intermittent Recovery Level 1 test.

Quelle: mod. n. Galvin et al. (2013, S. 3).

Das vierwöchige Training in Hypoxie resultierte in einer signifikant stärkeren Verbesserung beim Yo-Yo IR1 test (Pendellauf über 20 Meter) verglichen mit einem Training in Normoxie. Keine Verbesserung konnte beim fünf, zehn und 20 Meter Sprint festgestellt werden. Somit hatte das Training kaum Einfluss auf das anaerobe Stoffwechselsystem. Die Autoren erklären dieses Ergebnis mit einem nicht passenden Trainingsprotokoll. Das Verhältnis von Belastung zu Pause bzw. die Dauer von Belastung und Pause waren nicht korrekt gewählt.

Tab. 8: Physiologische Parameter des RSA Tests am nicht motorisierten Laufband ermittelt in Normoxie vor (PRE) und nach (POST) dem vierwöchigen Training; HYP= Hypoxiegruppe; NRM= Normoxiegruppe

	HYP		NRM		p Value	
	PRE	POST	PRE	POST	Time	Time×condition
VO ₂ (litres)	31.7±3.9	33.6±2.6	32.3±3.4	32.2±3.1	0.144	0.104
VCO ₂ (litres)	30.5±3.2	32.9±2.6	30.3±2.9	31.9±1.8	0.002	0.289
VE (litres)	1046±213	1124±131	1009±137	1022±93	0.179	0.347
S _a O ₂ AVERAGE (%)	94.1±1.7	95.5±1.6	95.0±2.8	96.2±1.6	0.114	0.868
HR _{PEAK} (bpm)	179±5	178±6	182±7	179±8	0.426	0.14
La _{post} (mmol/L)	10.1±2.0	11.0±2.5	10.1±2.4	10.0±2.0	0.597	0.47
La _{5post} (mmol/L)	11.3±1.8	12.0±1.6	12.5±1.9	11.6±2.1	0.988	0.409
Distance covered (m)	433.7±19.9	448.6±22.0	431±25.8	437.5±21.2	0.024	0.263
Speed decrement (%)	6.1±2.2	4.4±1.2	5.2±2.1	5.2±1.94	0.059	0.122

Values are expressed as averages±SD.
Yo-Yo IR1, Yo-Yo Intermittent Recovery Level 1 test.

Quelle: mod. n. Galvin et al. (2013, S. 3).

Tendenziell konnte eine stärkere Verbesserung der Hypoxiegruppe beim 6s RS test verglichen mit der Normoxie Gruppe festgestellt werden. Dabei mussten zehn Sprints über die Dauer von sechs Sekunden durchgeführt werden. In der Hypoxiegruppe wurde eine größere Distanz mit einem geringeren Verlust der Geschwindigkeit zurückgelegt. Zusätzlich führte das Training in Hypoxie zu einer tendenziell erhöhten Sauerstoffaufnahme (Tab. 8). Die Autoren weisen daher darauf hin, dass durch das Training in Hypoxie mehr Arbeit geleistet werden kann. Dies erklären sich die Autoren anhand einer geringeren zerebralen Deoxygenierung, die ebenfalls während der Untersuchung erhoben wurde. Eine verminderte zerebrale Müdigkeit könnte dadurch in der Hypoxiegruppe verursacht worden sein.

Insgesamt wird aber das positive Ergebnis beim Yo-Yo IR1 test hervorgehoben. Die Hypoxiegruppe erreichte eine doppelt so große Verbesserung im Vergleich zur Normoxiegruppe (33% vs. 14%). Galvin et al. (2013) führen an, dass dieser Test eine hohe Aussagekraft in Spielsportarten hat, da eine hohe Korrelation zwischen dem Test und der physischen Leistungsfähigkeit in Sportarten wie Handball, Fußball, Basketball und Rugby besteht. Daraus kann geschlossen werden, dass ein wiederholtes Sprinttraining in Hypoxie zu einer verbesserten Leistung in intermittierenden Sportarten führt. Die Forscher dieser Untersuchung geben zudem an, dass sich diese Trainingsmethode zur Verbesserung der hoch intensiven spezifischen aeroben Ausdauer in der Vorsaison eignen kann.

Abgesehen vom Ausdauertraining merken Girard und Kollegen (2013) in ihrem position statement an, dass der Einsatz von Krafttraining kombiniert mit Hypoxie zu zusätzlicher Muskelkraft führen kann (Nishimura et al., 2010; Manimmanakorn et al., 2013), die in intermittierenden Sportarten eine große Rolle spielt. Die Studie von Nishimura et al. (2010) wird im Kapitel 3.4.2 genauer erläutert. Auch auf eine interessante Untersuchung von Alvarez-Herms, Julia-Sanchez, Corbi, Pages und Viscor (2013), die die anaerobe Leistung nach einem Krafttraining in Hypoxie beleuchtet, wird im Rahmen dieses Kapitels näher vorgestellt. Dennoch, welche Form des LLTH für die Kraftzuwachsrate und die Sprintleistung am besten geeignet ist, kann derzeit nicht festgestellt werden. Dazu sind weitere Untersuchungen notwendig (Girard et al., 2013).

Im Weiteren wurden während der Konferenz Leistungstests besprochen, mit denen der Nutzen eines Höhentrainings überprüft werden kann. Wichtig ist dabei, dass bei der Anwendung von Tests bedacht werden sollte, dass die Belastung, die ein Spieler während eines Matches hat, bei Leistungstests simuliert werden sollte. „Spielnahe“ Testungen könnten

den Ertrag eines Höhentrainings daher evaluieren. So wurde beispielsweise der „Yo Yo Intermittent Recovery Test“ (Level 2) (Bangsbo, Iaia und Krstrup, 2008) oder der „30-15 Intermittent Fitness Test“ (Buchheit, 2008) als geeignet empfunden. Auch Drills in Form von kleinen Spielen, die dem Muster der Sportart entsprechen, könnten geeignet sein. Dabei könnte die zurückgelegte Laufdistanz oder die Distanz, die mit hoher Geschwindigkeit zurückgelegt wurde, erhoben werden (Buchheit et al., 2013; Hill-Haas, 2011). Darüber hinaus wurde während der Konferenz erwähnt, dass die Erhebung der maximalen Sprintgeschwindigkeit, oder auch die Sprung-, wiederholte Sprint- und Laufökonomie erhoben werden könnten. Ein „single performance test“ ist jedoch in Teamsportarten nicht angebracht.

Abgesehen vom Einsatz möglicher Leistungstests zur Erhebung der körperlichen Verbesserung durch ein Höhentaining, wurde auch die Frage diskutiert, auf welcher Höhe ein Höhentrainingslager für Teamsportler/innen stattfinden sollte. Die Dauer eines Höhentrainings wurde ebenfalls besprochen. Grundsätzlich wurde dabei auf die Empfehlungen für die Anwendung eines Höhentrainings im Ausdauersport verwiesen (z.B. Wilber, Stray-Gundersen & Levine, 2007), die eine Länge des Höhentrainings von zumindest drei bis vier Wochen vorschlagen. Girard et al (2013) verweisen aber auch auf Untersuchungen, bei denen eine gesteigerte Hämoglobinmasse durch ein lediglich zweiwöchiges Höhentrainingscamp in verschiedenen Spielsportarten erreicht wurde (Wachsmuth et al., 2013; Garvican-Lewis et al., 2013; Buchheit et al., 2013). Girard und Kolleg(inn)en (2013) geben in Hinblick auf die optimale Höhe an, dass sie nicht genau bestimmt werden kann. Dennoch sollten Höhen über 3000 Meter grundsätzlich vermieden werden. Zu beachten gilt außerdem, dass sich bei Trainingseinheiten in der Höhe die physikalischen Eigenschaften des Balles ändern, da die Luft einen geringeren Widerstand aufweist (Levine, Stray-Gundersen & Mehta, 2008). Auch unter diesem Gesichtspunkt soll die Wahl der entsprechenden Höhe betrachtet werden. Zudem müssen Orte ausgewählt werden, an denen entsprechende Kapazitäten gegeben sind um eine Mannschaft unterzubringen. Genügend Spielfelder sollten außerdem vorhanden sein.

Neben der optimalen Höhe stellt auch die zeitliche Komponente einen zu bedenkenden Faktor dar. Aufgrund des straffen Zeitplans, die manche Teamsportarten aufweisen, ist der Einsatz eines Höhentrainings oft nur in der Vorsaison möglich. Dort sollten zwei bis vier Wochen zur Verfügung stehen. Daneben gibt es aber Teamsportarten, die ein oder zwei große Wettkämpfe/Höhepunkte im Jahr haben. Dann könnte ein LHTL Training während der

Wettkampfvorbereitung eingeplant werden. Zusätzlich könnten LLTH Blöcke, die die supra-maximale Intensität aufrechterhalten sollen, während des Jahres gemacht werden.

Wie vorhin bereits erwähnt, beeinflusst der verringerte Luftwiderstand die Flugeigenschaften des Balles, wodurch die Spieler/innen möglicherweise ihre Technik in verschiedenen Situationen anpassen müssen. Im Fußball beispielsweise müssen sich die Spieler/innen darauf einstellen, dass die Bälle schneller und weiter fliegen und beim Passen sowie bei der Annahme schwieriger zu kontrollieren sind. Auch der Tormann wird sich auf schnellere Schüsse einstellen müssen. Außerdem fliegt der Ball möglicherweise mit einer veränderten Flugkurve. Vor allem wenn ein Wettkampf unter Höhenbedingungen stattfindet, ist es umso wichtiger, eine entsprechende Akklimatisierungsphase in der Höhe zu absolvieren. Die Dauer der Akklimatisierung hängt dabei von der Höhe des Wettkampfortes ab. Je höher der Wettkampfort umso länger soll die Akklimatisierungsphase dauern. Im Artikel wird eine Dauer von drei Tagen bis zu zwei Wochen empfohlen (Garvican et al., 2013; Wachsmuth et al., 2013). Da in normobarer Hypoxie kein geringerer Luftwiderstand erreicht werden kann, eignet sich diese Form der Hypoxie zur Wettkampfvorbereitung in der Höhe nicht.

Im Weiteren erwähnen Girard et al. (2013), dass vor bzw. während eines Höhentrainings einige Parameter für die Spieler beachtet werden müssen, damit es zu einer guten Höhenverträglichkeit kommt. Grundsätzlich sollen die Spieler gesund sein, bevor sie sich in die Höhe begeben. Zudem müssen ausreichende Eisenspeicher vorhanden sein. Der Vitamin- und Elektrolytstatus sollte zusätzlich überprüft werden. Darüber hinaus haben die Athlet(inn)en während des Höhentrainings möglicherweise einen erhöhten Kohlehydratbedarf (Charlot et al., 2013). Girard und Kolleg(inn)en (2013) erwähnen zudem, dass die Adaptionen bzw. Effekte, die man sich von einem Höhentaining erwartet, nicht nur von physiologischen Faktoren abhängen, sondern auch von der allgemeinen Fitness, dem Trainingszustand sowie der Müdigkeit der Sportler/innen. Die Schlafqualität spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Wenn diese verschlechtert ist, kann der/die Sportler/in womöglich schlechter mit dem durch die Hypoxie hervorgerufenen Stress umgehen (Sargent et al., 2013). Die Höhenverträglichkeit ist von Spieler/in zu Spieler/in unterschiedlich, darauf sollte ein Coach eingehen und entsprechend das Training individuell adaptieren, damit es zu keinen Überforderungen (Übertraining) kommt.

Zum Schluss des Artikels wird noch auf Probleme in Untersuchungen, die den Einsatz eines Höhentrainings in Teamsportarten thematisieren, eingegangen. Viele Studien weisen ein unkontrolliertes Design auf und sind nicht randomisiert, weder „single-blinded“ noch

„double-blinded“. Außerdem treten methodische Fehler auf, die vermieden werden sollten. Zudem sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die die Veränderung der Leistungsfähigkeit nach einem Höhentaining nicht nur kurzfristig erheben, sondern auch mittel- und langfristig (Girard et al. 2013).

Zusammenfassend geben Girard und Kolleg(inn)en (2013) an, dass derzeit hauptsächlich Hinweise für ein Höhentaining für Ausdauersportler/innen existieren. Aufgrund der vorhandenen Untersuchungen konnte nicht überzeugend bewiesen werden, ob ein Höhentaining für Teamsportler/innen relevant ist. Wichtig ist jedoch, dass Empfehlungen nicht für einzelne Mannschaften oder Sportarten ausgearbeitet werden, sondern für jeden Spieler und jede Spielerin individuell. Daher sollte auch nicht die gesamte Mannschaft eines Teams unter denselben hypoxischen Bedingungen leben bzw. trainieren, da jeder Spieler und jede Spielerin eine unterschiedliche Form des Höhentrainings benötigt.

3.4 Der Einsatz von Hypoxie im Krafttraining

Vor einigen Jahren stand hauptsächlich die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit mittels Höhentaining im Mittelpunkt des Interesses. Seit Anfang des 21. Jahrhunderts rückt aber der Einsatz von Hypoxie im Krafttraining zunehmend in den Vordergrund.

Beim Krafttraining kommt es zur Auslösung vieler verschiedener physiologischer Mechanismen, wie beispielsweise metabolische und hormonelle Reaktionen oder das Eintreten von intramuskulärer Kaskaden, die schlussendlich zur Protein Synthese und damit zum Muskelaufbau führen. Durch die Anwendung von Hypoxie sollten diese Mechanismen beeinflusst bzw. beschleunigt werden (Scott, Slattery, Sculley und Dascombe, 2014).

Im folgenden Kapitel sollen auf Basis des unlängst erschienenen Reviews von Scott et al. (2014) die aktuellen Erkenntnisse zum Einsatz von Hypoxie während eines Krafttrainings erläutert werden. Zusätzlich werden einzelne Studien vorgestellt, die verschiedene Aspekte des Krafttrainings unter Einbeziehung von Hypoxie behandeln.

3.4.1 Krafttraining und lokale Hypoxie (BFR)

Die Verwendung von Hypoxie im Krafttraining konnte ursprünglich durch das Abschnüren von Gliedmaßen erprobt werden. Bei der sogenannten blood flow restriction (BFR) Technik wird mit Hilfe von Manschetten oder elastischen Bändern das proximale Ende einer

Extremität abgeschnürt, wodurch es zu einem verringerten Blutfluss kommt. In weiterer Folge kommt es in dieser Region zu einem verminderten Gehalt an Sauerstoff, d.h. es wird eine lokale hypoxische Umgebung geschaffen (Loennecke & Pujol, 2009). Dieses Abschnüren einer Gliedmaße während des Krafttrainings ist auch unter dem „Kaatsu Training“ bekannt. Die Besonderheit des Kaatsu Trainings liegt darin, dass es bei einer Intensität von lediglich 20% des 1RM zu einem Hypertrophieeffekt kommen kann (Abe et al., 2005; Sumide et al., 2009; Takarada, Tsuruta & Ishii, 2004). Laut den Empfehlungen des American College of Sports Medicine sollte mit 60% des 1 RM trainiert werden, um eine optimale Hypertrophie zu erreichen (ACSM, 2009). Die Mechanismen bzw. die Adaptionen, die dahinter stecken, sind noch nicht eindeutig geklärt. Aufgrund der aktuellen Datenlage können dennoch bestimmte Reaktionen, die durch das BFR Training hervorgerufen werden, thematisiert werden.

Einige Studien berichten über eine stärkere Zunahme des Muskelquerschnitts durch ein Kaatsu Training, sowohl bei trainierten als auch bei untrainierten Personen. Takarada et al. (2000) konnten zeigen, dass ältere Frauen, die mittels BFR Technik trainierten, einen größeren Muskelquerschnitt aufwiesen als Frauen, die ein normales Krafttraining durchführten. Die Intensität lag dabei bei 30-50% des 1 RM. Abe et al. (2005) und Yamanaka, Farley und Caputo (2012) zeigten, dass dieser Effekt auch bei trainierten Personen auftreten kann. In weiterer Folge konnte anhand von Untersuchungen festgestellt werden, dass es bei einem BFR Training zu einer stärkeren Muskelkraftzuwachsrate kommen kann, verglichen mit einem Training ohne BFR (Takarada et al., 2000; Shinohara et al., 1998; Takarada et al., 2004). Die stärkere Kraftzunahme resultiert aus dem erhöhten Muskelquerschnitt. Neuronale Anpassungen könnten ebenfalls eine Rolle spielen.

Neben morphologischen Mechanismen nehmen auch metabolische Faktoren einen bedeutenden Faktor ein. Durch das Abschnüren von Gliedmaßen wird womöglich ein größerer metabolischer „Stress“ in der Muskulatur induziert, was zu einem überschießenden Abbau von Kreatinphosphat (Suga et al., 2012) mit gleichzeitig verringertem pH Wert sowie einer gesteigerten Laktatproduktion führt (Takarada et al., 2000; Takano et al, 2005; Pierce et al., 2006). Takarada et al. (2000) berichtete beispielsweise über doppelt so hohe Laktatkonzentrationen bei einem Training (leg extensions) mit BFR als ohne. Die Probanden trainierten dabei mit einer Intensität von 20% des 1 RM. Durch den Einsatz von BFR tritt also verstärkt der anaerobe Stoffwechsel in den Vordergrund, aufgrund der Tatsache, dass zu wenig Sauerstoff vorhanden ist. Dies könnte eventuell zur vermehrten Rekrutierung von Typ II Fasern führen. Außerdem könnten womöglich verstärkt hormonelle Reaktionen ausgelöst werden. In mehreren Untersuchungen, bei denen ein Krafttraining mit BFR durchgeführt

wurde, konnten größere hormonelle Reaktionen beobachtet werden als bei einem Krafttraining ohne BFR (Takarada et al., 2000; Kon et al., 2010; Sumide et al., 2009). Vor allem eine vermehrte Zunahme des Wachstumshormons konnte bestimmt werden. Möglicherweise führt sogar ein Krafttraining mit BFR bei geringer Intensität zu einer größeren Ausschüttung des Wachstumshormons als ein Krafttraining bei 70% des 1 RM ohne BFR. Auf die Ausschüttung von Testosteron scheint die BFR Technik jedoch keine großen Auswirkungen zu haben (Reeves et al., 2006; Fujita et al., 2007). Insgesamt weisen Scott et al. (2014) jedoch darauf hin, dass ein Krafttraining mit BFR zu denselben hormonellen Anpassungen wie ein normales Hypertrophietraining führen mag, nur das Wachstumshormon scheint stärker durch ein BFR Training beeinflusst zu werden. Von einer eindeutigen Klärung dieser Forschungsfrage kann aber noch nicht gesprochen werden.

Dies betrifft auch sogenannte intramuskuläre Signale, wie mTOR (mammalian target of rapamycin) (Wang & Proud, 2006) oder ROS (reactive oxygen species) (Takarada et al., 2000, Wernbom et al., 2009), die vermehrt durch ein Training mit BFR beeinflusst werden könnten und günstige Adaptionen auslösen dürften. Die Muskel Protein Synthese scheint durch mTOR beispielsweise beeinflusst zu werden. Dennoch, derzeit existieren noch zu wenige Untersuchungen, die sich mit diesem Thema auseinandersetzen (Scott et al., 2014).

Ein weiterer Mechanismus, der durch ein Training mit vaskulärer Okklusion hervorgerufen wird, scheint die intrazelluläre Schwellung zu sein (Loenneke et al., 2012; Schoenfeld, 2013). Diese Adaptation tritt normalerweise bei vermehrten anaeroben Aktivitäten auf. Aufgrund der zunehmenden Konzentration an Laktat kommt es zu osmotischen Veränderungen, wodurch zunehmend die Zelle anschwillt. Forscher/innen gehen davon aus, dass es durch den Einsatz von BFR zur verstärkten Akkumulation von Laktat kommt. Aufgrund der Abschnürung kann die Milchsäure (und andere Metaboliten) nicht genügend abtransportiert werden, wodurch sich das Laktat weiter anhäuft (Loenneke et al., 2012). Um den osmotischen Gradienten aufrecht zu erhalten, wandert Wasser in die Zelle ein. Diese Schwellung der Zelle scheint günstige Auswirkungen auf die Proteinsynthese (Lang et al., 1998) und auf Satellitenzellen zu haben (Dangott, Schultz & Mozdziak, 2000). Scott et al. (2014) merken aber erneut an, dass noch weitere Studien benötigt werden, um die genauen Mechanismen zu untersuchen.

Im Weiteren konnten Untersuchungen zeigen, dass durch die BFR Technik eine verstärkte Muskelaktivierung mittels Elektromyographie (EMG) gemessen wurde, verglichen mit einem Training ohne eine Extremität abzuschnüren (Takarada et al., 2000a; Yasuda et al., 2006; Moore et al., 2004). Die Autoren gehen davon aus, dass verstärkt Typ II motorische Einheiten

rekrutiert werden. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass ein Krafttraining mit BFR mit geringer Intensität nicht zu den gleichen neuronalen Anpassungen führt wie ein normales Krafttraining (ohne BFR) mit hoher Intensität (Cook, Murphy & Labarbera, 2013; Manini & Clark, 2009). Ein Krafttraining mit vaskulärer Okklusion bei geringer Intensität führt also nicht zu denselben neuronalen Anpassungen als ein „normales“ Krafttraining mit hoher Intensität.

Die folgende Tabelle bietet einen Überblick über die beobachteten Mechanismen in mehreren Studien.

Tab. 9: Zusammenfassung von physiologischen Mechanismen hervorgerufen durch ein BFR Training sowie Faktoren, die diese Mechanismen beeinflussen

Mechanism	Responses (when compared with the equivalent training without BFR)	Potential factors influencing the magnitude of responses
Metabolic stress	<ul style="list-style-type: none"> ↑ [BLa⁻] ↑ PCr depletion ↑ P_i ↓ pH 	<ul style="list-style-type: none"> Inter-set recovery period Occlusion maintained during inter-set recovery Occlusive pressure used (i.e. degree of vascular occlusion)
Hormonal responses	<ul style="list-style-type: none"> ↑ GH ↔ testosterone ? IGF-1 ? catecholamine ? cortisol 	<ul style="list-style-type: none"> The degree of metabolic stress associated with exercise Amount of muscle mass recruited during exercise
Intramuscular signalling	<ul style="list-style-type: none"> ↑ phosphorylation of S6K1 (mTOR signalling) ↑ proliferation and differentiation of satellite cells ↔ ROS ↔ myostatin 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanical stress applied (volume and intensity) Level of muscular ischaemia
Intracellular swelling	<ul style="list-style-type: none"> ? cell swelling stimulates intrinsic volume sensors ? cell swelling triggers anabolic signalling and MPS 	<ul style="list-style-type: none"> Degree of occlusion and subsequent venous pooling Metabolic stress associated with exercise
Muscle fibre recruitment	<ul style="list-style-type: none"> ↑ motor unit activation ↓ motor unit activation when compared with high-intensity exercise without BFR 	<ul style="list-style-type: none"> Degree of metabolic stress associated with exercise Possibly no effect when exercise is performed to failure
Reactive hyperaemia	<ul style="list-style-type: none"> ↑ blood flow to muscles following cuff release ? MPS 	<ul style="list-style-type: none"> Level of muscular ischaemia Magnitude of hyperaemia likely affects signalling and MPS

BFR blood flow restriction, [BLa⁻] blood lactate concentration, *PCr* phosphocreatine, *P_i* inorganic phosphate, *GH* growth hormone, *IGF-1* insulin-like growth factor-1, *S6K1* ribosomal S6 kinase 1, *mTOR* mammalian target of rapamycin, *ROS* reactive oxygen species, *MPS* muscle protein synthesis, *CSA* cross-sectional area, ↓ decrease, ↑ increase, ↔ no significant change, ? equivocal or currently unknown response

Quelle: mod. n. Scott et al. (2014, S. 1043).

Wird die Anwendung dieser Methode betrachtet, kann festgestellt werden, dass diese spezielle Form des Krafttrainings sowohl positive als auch negative Aspekte mitbringt. Ältere Menschen sowie Personen, die sich in Reha befinden, könnten jedenfalls von dieser Methode profitieren. Durch die geringe Intensität, die bei dieser Technik angewendet wird, kommt es im Vergleich zu einem schweren Krafttraining zu einer geringeren Belastung der Gelenke und Bänder. Trotz des geringen Widerstands wird eine Hypertrophie erreicht. Zudem benötigt der Muskel kürzere Regenerationszeiten (Abe, 2004). Ein negativer Aspekt des BFR Trainings ist, wie bereits erwähnt, ein geringerer neurologischer Stimulus (Cook, Murphy und

Labarbera, 2009; Manini & Clark, 2009) verglichen mit einem Widerstandstraining ohne Okklusion. Außerdem weisen Scott et al. (2014) darauf hin, dass diese Form des Krafttrainings teilweise nur schwer einzusetzen ist. Zum einen müssen bestimmte Materialien zur Abschnürung vorhanden sein, zum anderen kann diese Methode ohne Anwesenheit von Expert(inn)en nicht durchgeführt werden. Zudem können durch die Abschnürung der Gliedmaßen Kapillarblutungen oder auch Schwindel auftreten (Nakajima, Morita & Sato, 2011). Darüberhinaus kann durch die Verwendung von Manschetten oder Bändern zwar der vaskuläre Blutfluss in den Gliedmaßen reduziert werden, der Rumpf jedoch kann nicht abgeschnürt werden. Für ein Training des Rumpfes ist daher ein Training mit BFR nicht geeignet.

3.4.2 Krafttraining und systemische Hypoxie

Während durch lokale Hypoxie nur die Extremitäten trainiert werden können, kann durch systemische Hypoxie auch der Rumpf inkludiert werden. Bei der Verwendung von systemischer Hypoxie wird also der gesamte Körper einem verminderten Sauerstoffgehalt ausgesetzt. Scott et al. (2014) geben an, dass derzeit zwar zahlreiche Studien zur BFR Technik vorhanden sind, jedoch wenige Untersuchungen zur systemischen Hypoxie im Krafttraining (intermittent hypoxic resistance training, IHRT). Dennoch soll nun im nächsten Abschnitt auf spezielle physiologische Reaktionen eingegangen werden, die durch ein IHRT hervorgerufen werden.

In Bezug auf morphologische Anpassungen scheinen dieselben Mechanismen hervorgerufen zu werden, wie beim Training mit BFR. Ein Krafttraining unter intermittierender Hypoxie scheint insgesamt bessere Hypertrophieeffekte zu erzielen als ein Krafttraining in Normoxie (Scott et al., 2014). Einige Studien berichten von einer gesteigerten Muskelkraft durch ein IHRT im Vergleich zu einem Training in Normoxie. Bei der Studie von Nishimura et al. (2010) wurden männliche untrainierte Studenten in eine Normoxie- oder Hypoxiegruppe eingeteilt. Die Hypoxiegruppe führte Kräftigungsübungen (armcurls und french press) in einer Kammer bei 16% O₂ durch. Dabei wurden die Übungen aber nur mit einem Arm ausgeführt, der andere Arm blieb unbelastet. Dadurch sollte bestimmt werden, ob eine passive Hypoxieexposition Auswirkungen auf den Muskelquerschnitt oder auf die Muskelkraft hat. Somit wurde zwischen einer Hypoxie-Exercise Gruppe (belasteter Arm) und einer Hypoxie-Non Exercise Gruppe (unbelasteter Arm) unterschieden. Die Normoxiegruppe absolvierte die Kräftigungsübungen unter normoxischen Bedingungen. Das Training wurde über sechs

Wochen, zweimal wöchentlich absolviert. Die Intensität lag dabei bei 70% des 1 RM. Die Forscher untersuchten die Auswirkungen dieser Protokolle auf die Muskelkraft und auf den Muskelquerschnitt, der mittels eines MRI des Oberarms erhoben wurde. Es zeigte sich, dass die Hypoxiegruppe einen signifikant höheren Muskelquerschnitt (Hypertrophieeffekt) der Flexoren im Vergleich zur Kontrollgruppe aufwies. Die Extensoren zeigten dieselbe Tendenz. Auf das 1 RM wirkte sich das Training in Hypoxie folgendermaßen aus:

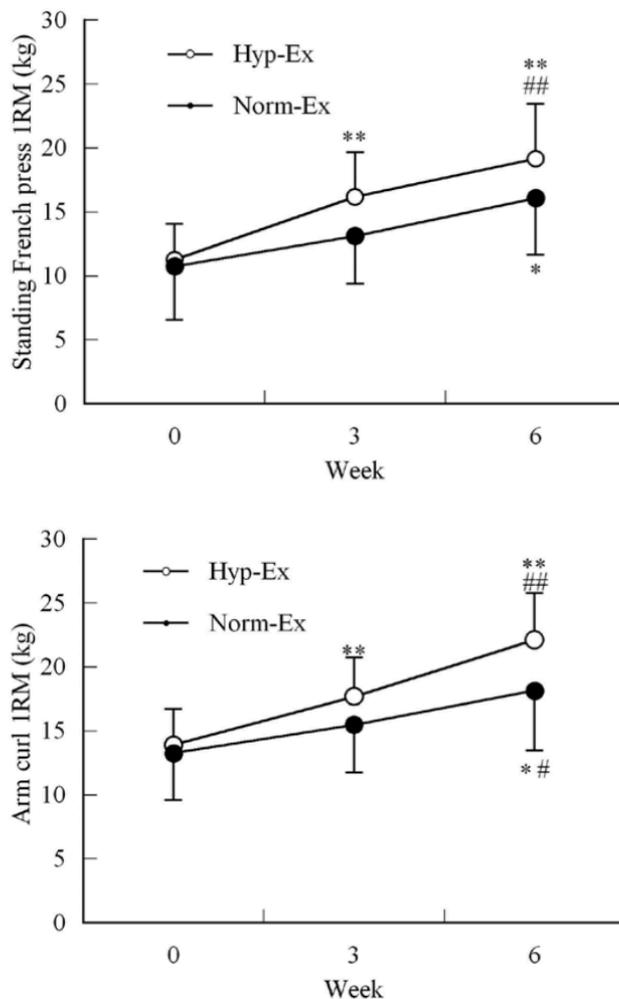


Figure 2 — Degree of change in muscle strength (1 repetition maximum [RM]) of the extensors (top) and flexor (bottom) after 6 wk of training. The Hyp-Ex and Norm-Ex groups did not significantly differ. Significant differences from pretraining values, * $P < .05$ and ** $P < .01$, respectively; significant differences from 3-wk values, # $P < .05$ and ## $P < .01$, respectively. Hyp-Ex, exercised arm of hypoxia group; Norm-Ex, exercised arm of normoxia group.

Abb. 3: Veränderungen des 1 RM (Nishimura et al., 2010, S. 503).

Nach sechs Wochen war das 1 RM in beiden Gruppen signifikant erhöht, nach bereits drei Wochen jedoch nur in der Hypoxiegruppe. Dies weist darauf hin, dass der Einsatz von Hypoxie die Steigerung der Muskelkraft beschleunigt. Zudem wird erwähnt, dass in der Hypoxiegruppe erst nach sechs Wochen ein Hypertrophieeffekt ersichtlich war, obwohl es bereits nach drei Wochen zu einem Kraftzuwachs kam. Dies erklären sich die Autoren mit

der Tatsache, dass neuromuskuläre Anpassungen vor einer Querschnittszunahme auftreten (Moritani & de Vries, 1979; Narici, Roi, Landoni, Minetti & Cerretelli, 1989). Im Weiteren konnte festgestellt werden, dass die reine passive Hypoxieexposition (unbelasteter Arm) zu keiner gesteigerten Muskelkraft führte. Auf den Muskelquerschnitt hatte die passive Hypoxieexposition ebenfalls keinen Einfluss. Zusammenfassend zu dieser Untersuchung sollte noch einmal erwähnt werden, dass die Probanden mit einer Intensität von 70% ihres 1 RM trainierten. Im Vergleich dazu lag die Intensität bei den Studien, die eine vaskuläre Okklusion verwendeten (vgl. Kapitel 3.4.1) bei 20-50%. Demnach sollten bei einem Krafttraining in systemischer Hypoxie schwere Gewichte verwendet werden.

Auch Mannimanakorn, Hamlin, Ross, Taylor und Manimmanakorn (2013) integrierten ein IHRT in ihre Untersuchung. Die Forscher versuchten herauszufinden, ob mit einem Training in systemischer Hypoxie die gleichen Effekte erzielt werden können wie bei einem Training mit lokal verursachter Hypoxie. Neben den Auswirkungen auf die Muskelkraft bzw. Kraftausdauer, wurde auch die Wirkung von Hypoxie auf sportartspezifische Parameter untersucht. Als Probandinnen standen Korbballspielerinnen zur Verfügung. Sie führten dreimal wöchentlich über die Dauer von fünf Wochen ein Krafttraining mit 20% des 1 RM durch. Es wurden „knee extensions/flexions mit Hilfe einer isotonischen „leg extension/flexion“ Maschine ausgeführt. Die Hypoxiegruppe (HG) inhalierte während des gesamten Trainings Luft mit verminderten Sauerstoffgehalt ein. Die Stärke der Hypoxie orientierte sich an der Sauerstoffsättigung der Probandinnen. Diese sollte nicht unter 80% fallen. Den Athletinnen der Kaatsu Gruppe (KG) wurden während des Trainings die Oberschenkel mit einer Manschette abgeschnürt. Zusätzlich wurde eine Kontrollgruppe (CG) integriert. Es konnte gezeigt werden, dass die Hypoxiegruppen die Muskelkraft und die Ausdauer im Vergleich zur Kontrollgruppe wesentlich steigern konnte. Beide Hypoxiegruppen vergrößerten auch ihren Muskelquerschnitt nahezu im gleichen Ausmaß. Im Vergleich zur CG war dieser wesentlich erhöht. In Bezug auf die Parameter, die die sportartspezifische Fitness widerspiegeln, zeigten beide Hypoxiegruppen wesentliche Verbesserungen. Die stärksten Fortschritte konnten jedoch in der Kaatsu Gruppe ermittelt werden. Die nachfolgende Tabelle soll die Ergebnisse noch einmal zusammenfassen:

Tab. 10: Durchschnittliche Veränderungen der Leistung der drei Gruppen sowie die Wahrscheinlichkeit, dass die Unterschiede eine "echte" Verbesserung oder Verschlechterung repräsentieren

	Change in performance (%)		Chance that the true difference is substantial		
	KT	CT	Difference ± 90 CL	Qualitative	
<i>KT vs. CT group</i>					
MVC ₃	12.1 ± 7.8	1.0 ± 14.3	11.0 ± 11.9	80	Likely
MVC ₃₀	11.4 ± 10.1	0.4 ± 7.0	10.2 ± 9.0	85	Likely
Reps201RM	140.0 ± 33.5	86.4 ± 15.7	28.9 ± 23.7	91	Likely
Vertical jump	7.3 ± 10.6	2.4 ± 6.0	4.8 ± 10.0	76	Unclear
5 m sprint ^a	-13.2 ± 3.9	3.7 ± 8.9	-16.3 ± 14.4	97	Very Likely
10 m sprint ^a	-12.0 ± 4.8	-9.1 ± 5.6	-3.3 ± 5.2	79	Unclear
505 agility ^a	-10.5 ± 8.5	-1.6 ± 1.5	-9.0 ± 6.7	98	Very Likely
20-MST	19.9 ± 4.9	7.4 ± 8.8	11.7 ± 7.4	98	Very Likely
MAS	5.6 ± 1.7	2.3 ± 2.3	3.3 ± 2.0	96	Very Likely
V O _{2max}	10.0 ± 3.6	4.2 ± 4.6	5.1 ± 3.9	96	Very Likely
<i>HT vs. CT group</i>					
MVC ₃	14.9 ± 10.7	1.0 ± 14.3	15.0 ± 13.1	86	Likely
MVC ₃₀	16.9 ± 17.9	0.4 ± 7.0	18.3 ± 17.4	89	Likely
Reps201RM	129.2 ± 37.1	86.4 ± 15.7	23.3 ± 24.0	88	Likely
Vertical jump	7.5 ± 7.6	2.4 ± 6.0	5.0 ± 6.4	86	Unclear
5 m sprint ^a	-4.4 ± 7.3	3.7 ± 8.9	-4.3 ± 9.7	73	Unclear
10 m sprint ^a	-4.1 ± 5.6	-6.5 ± 4.2	2.6 ± 4.7	73	Unclear
505 agility ^a	-2.2 ± 2.0	-0.8 ± 1.5	-1.5 ± 1.6	75	Likely
20-MST	13.7 ± 9.6	7.4 ± 8.8	4.1 ± 8.3	74	Unclear
MAS	4.7 ± 2.7	2.3 ± 2.3	1.9 ± 2.3	74	Possibly
V O _{2max}	8.6 ± 5.0	4.2 ± 4.6	3.5 ± 4.5	83	Likely
<i>KT vs. HT group</i>					
MVC ₃	12.1 ± 7.8	14.9 ± 10.7	-4.2 ± 9.4	43	Trivial
MVC ₃₀	11.4 ± 10.1	16.9 ± 17.9	-4.7 ± 15.9	53	Unclear
Reps201RM	140.0 ± 33.5	129.2 ± 37.1	5.1 ± 29.8	41	Unclear
Vertical jump	7.3 ± 10.6	7.5 ± 7.6	0.5 ± 10.2	46	Unclear
5 m sprint ^a	-13.2 ± 3.9	-4.4 ± 7.3	-7.2 ± 11.3	86	Unclear
10 m sprint ^a	-11.0 ± 4.8	-10.2 ± 5.6	-0.9 ± 6.0	49	Unclear
505 agility ^a	-10.5 ± 8.5	-2.2 ± 2.0	-7.6 ± 7.0	95	Very Likely
20-MST	19.9 ± 4.9	13.7 ± 9.6	5.5 ± 7.3	85	Unclear
MAS	5.6 ± 1.7	4.7 ± 2.7	1.1 ± 2.2	54	Unclear
V O _{2max}	10.0 ± 3.6	8.6 ± 5.0	0.9 ± 5.1	58	Unclear

±90% confidence limits; add and subtract this number to the mean effect to obtain the 90% confidence limits for the true difference. MVC₃, the peak maximum voluntary contraction in 3 s; MVC₃₀, area under the 30 s MVC curve; Reps201RM, the number of repetitions able to be performed at 20% 1RM; 20-MST, 20-m shuttle run test; MAS, maximal attained speed during the 20-m shuttle run test; V O_{2max}, estimated maximal oxygen consumption from the 20-m shuttle run test; CT, control training; KT, Kaatsu training; HT, hypoxic training.

^a Since the 5, 10 m sprint and 505 agility tests are all timed sprints a negative value represents a faster time or an improvement in performance. V.

Quelle: mod. n. Manimmanakorn et al. (2013a, S. 340).

Manimmanakorn et al. (2013a) erhoben zudem den wahrgenommenen Muskelschmerz anhand einer zehnstufigen Schmerzsskala. Die Untersuchung ergab, dass die Kaatsu Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe keine Unterschiede aufwies. Ein Training mit gleichzeitiger verminderter Sauerstoffzufuhr schien jedoch „schmerzhafter“ zu sein, da die Hypoxiegruppe höhere Werte an der Schmerzsskala angab. Die Autoren können für dieses Ergebnis jedoch keine Erklärung liefern.

Gründe bzw. physiologische Mechanismen, die zu den stärkeren Verbesserungen in Hinblick auf den Muskelquerschnitt und in Hinblick auf die Muskelkraft führten, werden von den Autoren diskutiert. Dies sind hauptsächlich Annahmen, die auch im Review von Scott et al. (2013) aufgegriffen werden. Grundsätzlich wird von denselben Mechanismen ausgegangen, die auch bei einem Training mit vaskulärer Okklusion möglicherweise induziert werden. Auch in der oben erläuterten Studie von Nishimura et al. (2010) werden auf dieselben metabolischen und hormonellen Adaptionen, die auch bei einem BFR Training eingeleitet werden, hingewiesen. Kon et al. (2010) untersuchte die metabolische Reaktion auf ein

Krafttraining mit 70% des 1 RM in Hypoxie bzw. Normoxie. Die Autoren stellten eine 1,2-fach erhöhte Laktatkonzentration in der Hypoxiegruppe fest. Dieselben Autoren hatten neben den metabolischen Reaktionen in einer weiteren Studie (2012) auch hormonelle Anpassungen untersucht. Diese scheinen ähnlich den Anpassungen des BFR Trainings zu sein, da wahrscheinlich vor allem das Wachstumshormon von einem Krafttraining unter hypoxischen Bedingungen beeinflusst wird. Laut Scott et al. (2014) liegen derzeit noch zu wenige Untersuchungen vor, die die Auswirkungen eines IHRT auf metabolische und hormonelle Mechanismen untersuchen. Somit werden wiederum noch mehr Studien benötigt, um konkrete Aussagen treffen zu können.

Unklarheit besteht auch noch in Bezug auf bestimmte intramuskuläre Signalwege, die durch ein Krafttraining in Hypoxie hervorgerufen werden. Welche Funktion beispielsweise der Hypoxie induzierte Faktor HIF-1 α während des Vorgangs der Hypertrophie einnimmt, ist noch unklar (Kawada, 2005). Zudem weisen Studien darauf hin, dass sich die Art der Hypoxie auf die Muskelhypertrophie auswirken kann (Faiss et al., 2013). Hypobare Hypoxie führt womöglich zu einer Verringerung von Stickstoffmonoxid (NO). NO agiert als ROS (reactive oxygen species) und spielt eine aktivierende Rolle bei der Hypertrophie. Eine Verringerung von NO scheint daher nicht günstig zu sein. In normobarer Hypoxie konnte jedoch keine Verminderung von NO festgestellt werden. Daraus kann geschlossen werden, dass die Hypertrophie während eines IHRT von der Art der Hypoxie abhängen kann. Manimmanakorn et al. (2013a) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass ROS wie auch NO Satellitenzellen aktivieren könnten, die eine Hypertrophie der Muskulatur bewirken könnten. Auch zu dieser Thematik werden noch zusätzliche Untersuchungen benötigt (Scott et al., 2014).

Daneben wurden Auswirkungen des IHRT auf neuromuskuläre Faktoren bislang nur wenig untersucht. Manimmanakorn et al. (2013b) untersuchte den Unterschied der elektrischen Aktivierung zwischen einem BFR Training sowie einem IHRT und einem Training in Normoxie. Aufgrund der Tatsache, dass die BFR Gruppe die größte Steigerung der elektrischen Aktivierung zeigte, kann möglicherweise gesagt werden, dass neuromuskuläre Veränderungen nicht durch Hypoxie hervorgerufen werden, sondern vielmehr durch den verminderten Blutfluss bestimmt werden. Zusätzlich weisen Scott et al. (2014) auf die Hypothese hin, dass womöglich systemische Hypoxie, ähnlich wie lokale Hypoxie, zur verstärkten Rekrutierung von Typ II motorischen Einheiten führt. Manimmanakorn et al. (2013b) führen dazu an, dass durch die vorhandene Hypoxie im Körper vermehrt Typ I Einheiten ermüden. Aufgrund der anhaltenden Belastung muss daher die Rekrutierung von

Typ II motorischen Einheiten forciert werden. Durch die progressive Steigerung der Rekrutierung dieser motorischen Einheiten kommt es zu Adaptionenmechanismen in Form von einer Hypertrophie dieser Typ II Einheiten (Kawada & Ishii, 2005).

Abschließend soll noch auf die Untersuchung von Álvarez-Herms, Julià-Sánchez, Corbi, Pagès und Viscor (2013) eingegangen werden. In der Diskussion des Artikels werden einige interessante Aspekte aufgezeigt, die durch ein Training in systemischer Hypoxie induziert werden. Die Autorengruppe führte ebenfalls eine Untersuchung durch, bei der Krafttraining während systemischer Hypoxie durchgeführt wurde. Die Forscher wollten dabei jedoch herausfinden, wie sich Krafttraining unter hypoxischen Bedingungen auf die anaerobe Ausdauerleistungsfähigkeit auswirkt. Álvarez-Herms et al. (2013) hatten die Annahme, dass die Kombination aus Hypoxie und Schnellkraft-/Kraftausdauertraining einen großen Nutzen für Athlet(inn)en hinsichtlich der anaeroben Kapazität haben könnte. Sie gingen davon aus, dass durch ein Training in Höhenlage, ein größerer physiologischer Stimulus, der zu stärkeren morphologischen und metabolischen Anpassungen führen sollte, erreicht werden kann, als ein Krafttraining in Tallage. Es wurden insgesamt zwölf Sportstudenten (neun männlich, drei weiblich) rekrutiert, die entweder in eine Hypoxie- oder in eine Normoxiegruppe eingeteilt wurden. Die Hypoxiegruppe trainierte in einer hypobaren Kammer, in der ein Klima vorherrschte, das einer Höhe von 2500 Metern entsprach. Die Studenten und Studentinnen führten dreimal wöchentlich ein Krafttraining durch. Dabei wurden Kniebeugen mit Zusatzgewicht, Hantelsprünge mit Zusatzgewicht sowie plyometrische Übungen durchgeführt. Bei den Sprungübungen wurde eine maximale Intensität und explosive Ausführung gewählt, bei den Kniebeugen kam die Kraftausdauertrainingsmethode zum Einsatz (geringe Intensität, viele Wiederholungen). Das Training wurde über einen Zeitverlauf von vier Wochen durchgeführt, Tests zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit wurden vor Trainingsbeginn und sechs Tage nach der letzten Einheit absolviert. Um die Explosivkraft zu ermitteln, wurde die maximale Sprunghöhe beim Squat-Jump und Countermovement-Jump bestimmt. Zur Bestimmung der anaeroben Kapazität wurde der 60 Sekunden Countermovement-Jump Test angewendet. Zusätzlich wurde dabei der Ermüdungsindex berechnet.

Es konnte festgestellt werden, dass sich die beiden Gruppen beim Squat-Jump und Countermovement-Jump nicht voneinander unterschieden. Beide Gruppen zeigten eine Verbesserung, die jedoch das Signifikanzniveau verfehlte. Beim 60 Sekunden Countermovement-Jump Test hingegen verbesserten sich zwar beide Gruppen vom Vor- zum Nachtest, die Hypoxiegruppe zeigte aber eine signifikant stärkere Leistungssteigerung als im

Vergleich zur Normoxiegruppe ($p=0.029$). Damit erreichte die Hypoxiegruppe eine höhere durchschnittliche Sprunghöhe. Zudem war ersichtlich, dass der Leistungsabfall bei der Normoxiegruppe stärker war, als jener der Hypoxiegruppe:

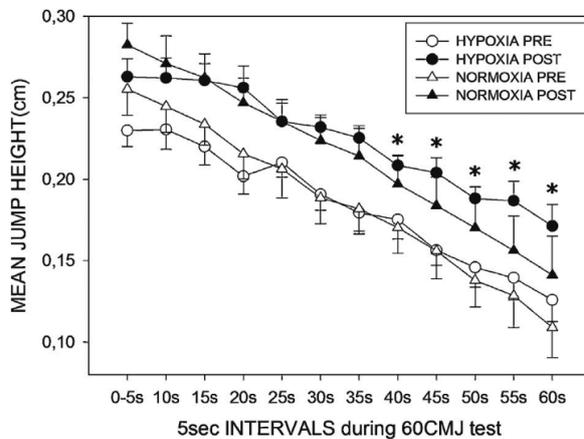


Abb. 4: Entwicklung der Ermüdung, repräsentiert durch die durchschnittliche Sprunghöhe während des CMJ60 Tests (5 Sekunden Intervalle). *: zeigt eine statistische Signifikanz zwischen den Gruppen (mod. n. Álvarez-Herms et al., 2013, S. 6).

Auch hinsichtlich des Ermüdungsindices unterschieden sich die Gruppen beim Nachtest signifikant voneinander ($p=0.031$). Wiederum zeigte die Hypoxiegruppe ein besseres Ergebnis und entwickelte eine geringere Ermüdung. Daher geben Álvarez-Herms et al. (2013) an, dass der verminderte Sauerstoffgehalt einen zusätzlichen Stimulus darstellte, der eine Trainingsintensitätserhöhung induziert, was in einer Steigerung der anaeroben Leistungsfähigkeit resultierte. Ein Grund für dieses Ergebnis könnte laut den Autoren eine erhöhte Pufferkapazität, die die Hypoxie bedingt, sein (Gore et al., 2001). Zudem könnte die Hypoxie eine erhöhte anaerobe Energieproduktion aufgrund einer Zellanpassung an erhöhten molekularen Stress hervorrufen (Paavolainen, Häkkinen, Hämmäläinen, Nummela & Rusko., 1999). Im weiteren weisen Álvarez-Herms et al. (2013) darauf hin, dass ein weiterer Grund für die gesteigerte anaerobe Kapazität eine effizientere Arbeitsweise des kardiovaskulären (Álvarez-Herms, Julià-Sánchez, Corbi, Pagès & Viscor, 2012) und des respiratorischen Systems (Amann, Pegelow, Jacques & Dempsey, 2007) sein könnte. Zum einen würde sich dadurch die Herzfrequenz nach maximaler Intensität schneller regenerieren, und zum anderen erfahren die Atemmuskeln durch die Hypoxieexposition ein zusätzliches Training. Zudem könnte der Organismus bei einem maximalen Training in Höhenlage vermehrt auf Glucose und weniger auf Fette zur Energieproduktion zurückgreifen, was wiederum auf eine gesteigerte anaerobe Kapazität zurückzuführen sein könnte (Katayama, Goto, Ishida & Ogita, 2010). Im Weiteren führen Álvarez-Herms et al. (2013), wie auch vorhin bereits erwähnt, an,

dass hormonelle Mechanismen eine Rolle gespielt haben könnten, die eine gesteigerte Muskelkraft bewirkten (Kon et al., 2012; Manimmanakorn et al., 2013). Zusätzlich weisen Álvarez-Herms et al. (2013) darauf hin, dass das von ihnen verwendete Trainingsprotokoll, das die Verwendung von intermittierender Hypoxie vorsah, die Technik bzw. die Motorik der Bewegungen nicht beeinflusste. In Kapitel 2.2.4 wurde bereits erwähnt, dass ein vermehrtes Training in Hypoxie negative Auswirkungen auf den Bewegungsfluss haben kann. Zuletzt merken die Autoren noch an, dass künftig überprüft werden müsste, ob die Form der Hypoxie (hypobar bzw. normobar) einen Einfluss auf physiologische Mechanismen hat.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich Krafttraining in systemischer Hypoxie besser für Athleten eignet als ein Training mittels BFR. Athleten müssen während des Krafttrainings oft komplexe Bewegungen ausführen, die nicht während eines Trainings mit BFR durchgeführt werden können. Dennoch, sowohl in Bezug auf das BFR Training als auch in Bezug auf das IHRT gilt: die verantwortlichen Mechanismen, die hinter den gesteigerten Kraftzuwachsrate oder Hypertrophieeffekten des BFR Trainings bzw. des IHRT stecken, scheinen nur teilweise geklärt zu sein.

Dementsprechend schwierig ist es, Empfehlungen für die Durchführung eines IHRT zu geben. Scott, Slattery und Dascombe (2014) versuchen anhand einer kurzen Zusammenfassung sämtlicher Studien, die sich bis zum Zeitpunkt der Publikation ihres Artikels mit systemischer Hypoxie befassten, einige methodische Hinweise zu geben. Sie kommen zum Schluss, dass bei geringer Intensität (20-30% des 1RM) kurze Pausen zwischen den Sätzen eingehalten werden sollten (ca. 30 Sekunden). Bei einer Intensität von ca. 70 % des 1RM sollte die Pause in etwa 60 Sekunden betragen. Die vorhin genauer analysierte Studie von Nishimura et al. (2010) verwendete dieses Trainingsprotokoll und konnte positive Ergebnisse liefern. Die Hypoxiegruppe zeigte größere Hypertrophieeffekte und wies eine höhere Kraftzuwachsrate auf als die Normoxiegruppe. Scott, Slattery und Dascombe (2014) weisen jedoch auf eine vergleichbare Untersuchung hin, die zum Schluss kam, dass der Einsatz von Hypoxie im Krafttraining keine geeignete Methode darstellt, um die Leistungsfähigkeit der Muskulatur zusätzlich zu steigern (Ho et al., 2014). In dieser Untersuchung absolvierten 18 Probanden ein Krafttraining mit 75% des 1 RM. Als Trainingsübungen führten die Männer Kniebeugen entweder in Normoxie oder in einem Zelt, das einen Sauerstoffgehalt von 15% aufwies, durch. Beide Gruppen steigerten signifikant ihr 1 RM nach dem sechswöchigen Training, zwischen den Gruppen konnte jedoch kein Unterschied festgestellt werden. Zusätzlich konnte keine Veränderung der Körperzusammensetzung, die mittels bioelektrischer Impedanzanalyse ermittelt wurde,

beobachtet werden. Scott, Slattery und Dascombe (2014) führen dazu an, dass sich die beiden Studien hinsichtlich ihrer Pause zwischen den Sätzen unterscheiden. Während Nishimura et al. (2010) eine Serienpause von 60 Sekunden wählte, verwendete Ho et al. (2014) eine Serienpause von 120 Sekunden. Die Pause war anscheinend zu lang um den durch die Hypoxie vermittelten metabolischen Stress aufrechtzuerhalten. Bei einem Training mit lokaler Hypoxie bzw. einem BFR Training wird der venöse Blutstrom gehindert, wodurch sich innerhalb der beanspruchten Muskulatur Metaboliten weiter ansammeln, da ein Abtransport durch die Abschnürung der Gliedmaße eingeschränkt wird. Im Gegensatz dazu ist dies beim Krafttraining unter systemischer Hypoxie nicht der Fall. Der venöse Blutstrom wird dabei weiter aufrechterhalten, wodurch die Möglichkeit besteht, dass die Metaboliten, die hauptsächlich ausschlaggebend für eine stärkere Anpassung der Muskulatur sein sollten, zu anderen Bereichen des Körpers abtransportiert werden. Demnach muss die Pause zwischen den Sätzen entsprechend kurz gehalten werden, um die Ansammlung von Stoffwechselendprodukten nicht zu mindern (Scott, Slattery & Dascombe, 2014).

Im Weiteren merken Scott, Slattery und Dascombe (2014) an, dass die Stärke der Hypoxie einen entscheidenden Faktor bei einem IHRT darstellt. Laut den Autoren ist es von Vorteil, eher auf eine moderate Hypoxie zurückzugreifen (FiO_2 zwischen 14 und 16%). Bei einer zu starken Hypoxie könnte die Kraftentwicklung gehindert werden. In diesem Zusammenhang verweisen die Autoren auf die Untersuchung von Friedmann et al. (2003). Diese Studie führte ein Krafttraining in systemischer Hypoxie mit geringer Intensität (30% des 1 RM) durch. Insgesamt nahmen 19 männliche untrainierte Probanden an der Studie teil. Es wurden wiederum zwei Gruppen gebildet. Eine Normoxiegruppe und eine Hypoxiegruppe, die unter normobarer Hypoxie ($FiO_2=12\%$) trainierten. Diese Untersuchung konnte im Gegensatz zu der Studie von Manimmanakorn et al. (2013a), die auch eine geringe Intensität (20% des 1 RM) integrierte, jedoch eine moderate Hypoxie wählte (80% SaO_2 durfte nicht unterschritten werden), keine Verbesserungen hinsichtlich der Kraftentwicklung zugunsten der Hypoxiegruppe feststellen.

4. Die Anwendung von Hypoxie im Gesundheitssport

Abgesehen vom Leistungssport, wo man versucht, durch den Einsatz von Hypoxie eine Verbesserung der sportlichen Leistungsfähigkeit zu erreichen, wird Hypoxie auch im Gesundheitssport bzw. Rehabilitationsbereich angewendet. Im nächsten Abschnitt soll anhand von aktuellen Studien, die Auswirkung von Hypoxie und sportlichem Training auf verschiedene Gesundheitsparameter dargestellt werden

4.1 Sportliches Training und Hypoxie bei Diabetes

Eine Einschränkung der Glukose Aufnahmefähigkeit spielt eine zentrale Rolle bei Menschen mit Diabetes Typ II (Reaven, 1988). Es konnte gezeigt werden, dass Sport aber auch Hypoxie den Glukosetransport zur Muskulatur beschleunigen kann (Klip & Marette, 1992). Lee et al. (2003) hatten daher die Annahme, dass durch beide Faktoren die Glukosetoleranzfähigkeit beeinflusst werden kann. In ihrer Untersuchung sollte herausgefunden werden, wie sich ein passiver Aufenthalt in natürlicher Höhe auf diesen Parameter auswirkt. Zudem sollte aber auch der Effekt von körperlicher Aktivität in der Höhe auf die Glukosetoleranzfähigkeit erhoben werden. Ein weiteres Vorhaben der Studie war es, den Einfluss von unterschiedlichem Gelände im Zuge körperlicher Aktivität auf die Blutzuckeraufnahmefähigkeit zu bestimmen.

28 gesunde Personen wurden für die Untersuchung, die sich in zwei Studien gliederte, rekrutiert. Die Probanden wurden in zwei Gruppen eingeteilt. In einer Gruppe befanden sich untrainierte Personen (n=9), der anderen Gruppe wurden trainierte (n=19) Personen zugeteilt. In der Studie I verbrachten die untrainierten Probanden drei Tage auf einer Höhe von 2400 Metern. Es wurde zur Bestimmung der Glukoseaufnahmefähigkeit ein oraler Glukosetoleranztest in Tallage und drei Tage nach dem Höhenaufenthalt durchgeführt. Zusätzlich wurden körperbezogene Messungen (Gewicht, Größe, Waist to hip ratio, BMI,...) absolviert. Bei der zweiten Studie führten trainierte Bergsteiger zwei jeweils dreitägige Wandertouren durch, wobei einmal im ebenen Gelände (4000 Meter Seehöhe) und einmal im hügeligen Gelände (3800 Meter Seehöhe) gegangen wurde. Zwischen den Touren lagen 45 Tage. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Glukosetoleranzlevel beider Gruppen, die in Tallage gemessen wurden.

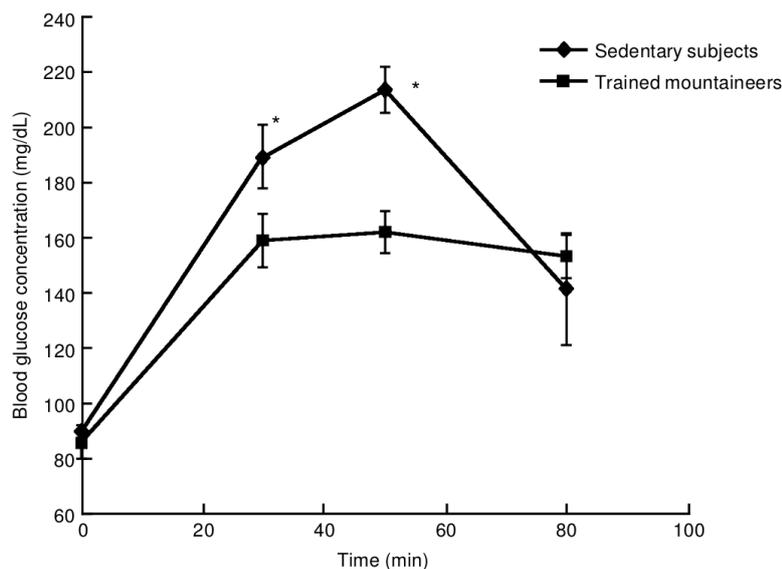


Abb. 5: Vergleich des Glukosetoleranzlevels in Tallage zwischen trainierten und untrainierten Personen. Mittelwerte \pm SD. * $p < 0.05$, signifikanter Unterschied im Vergleich zur Gruppe der Trainierten am selben Zeitpunkt während des Glukosetoleranztests (mod. n. Lee at al., 2003, S. 84).

Im Weiteren konnte ermittelt werden, dass innerhalb der Gruppe der Untrainierten übergewichtige Personen eine schlechterer Glukoseaufnahmefähigkeit zeigten als Personen mit Normalgewicht ($p < 0.05$). In der Gruppe der Bergsteiger konnte ein positiver Zusammenhang zwischen Alter und Glukosekonzentration im Blut nach dem oralen Glukosetoleranztest festgestellt werden. Je höher das Alter umso höher die Blutglukosekonzentration, d.h. umso schlechter die Blutzuckertoleranzfähigkeit ($r = 0.53$, $p < 0.05$). Die untrainierten Personen, die drei Tage auf einer Höhe von 2400 Metern verbrachten, und dort keine körperlichen Aktivitäten ausführten, wiesen unabhängig vom BMI, nach dem Höhengaufenthalt eine signifikant verbesserte Glukosetoleranzfähigkeit auf. Abgesehen von den untrainierten Personen konnte auch in der Gruppe der Bergsteiger ein weiteres positives Ergebnis beobachtet werden. Es zeigte sich, dass Bergsteigen im ebenen Gelände zu einer besseren Glukosetoleranzfähigkeit führt als Bergsteigen im kuperten Gelände ($p < 0.05$).

Die Autoren merken an, dass Wandertouren mit geringer Intensität die Glukoseaufnahmefähigkeit bereits innerhalb von drei Tagen steigern können. Die Forscher sehen diese Wandertouren nicht als schwere körperliche Aktivität an, sondern nennen in diesem Zusammenhang den Begriff der „Lebensstiländerung“. Zudem weisen die Autoren darauf hin, dass ein tatsächlicher Alterseffekt hinsichtlich der Glukosetoleranzfähigkeit bestehen sollte. Die Aufnahme von Zucker scheint sich also unabhängig von körperlicher

Aktivität mit steigendem Alter zu verschlechtern. Lee et al. (2003) erklären das positive Ergebnis nach dem passiven Aufenthalt der körperlich inaktiven Menschen damit, dass diese Personen durch die Höhe einem größeren metabolischen Stress ausgesetzt waren. Dieser erhöhte metabolische Stimulus kann laut den Autoren mit einer tatsächlichen körperlichen Aktivität in Tallage verglichen werden. Durch den erhöhten metabolischen Stress erhöhte sich die Glukoseaufnahmefähigkeit. Zuletzt diskutieren Lee et al. (2003) die Tatsache, dass ebenes Gelände die Glukoseaufnahmefähigkeit stärker beeinflusst als kuppertes Gelände. Im ebenen Gelände finden hauptsächlich konzentrische Muskelbeanspruchungen statt. Im kupperten Gelände jedoch, muss die beanspruchte Muskulatur aufgrund der bergab Passagen, auch immer wieder exzentrisch arbeiten. Asp, Daugaard, Kristiansen, Kiens und Richter (1996) zeigten, dass exzentrische Muskelaktivität zu einer verminderten Glykogen Resynthese führt. Im Weiteren kann es durch dieser Art der Muskelarbeitsweise zu einer Insulin Resistenz kommen (Kirwan et al., 1992). Auch die GLUT 4 Protein Expression könnte durch exzentrische Belastung vermindert werden (Asp et al., 1996).

Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchung kommen Lee et al. (2003) zum Schluss, dass sowohl passive als auch aktive Höhengaufenthalte als natürliche Medikation bei Menschen mit eingeschränkter Blutzuckertoleranzfähigkeit agieren könnte. Sie führen aber zusätzlich an, dass diese Aussage zuvor bei Typ II Diabetikern überprüft werden müsste.

Abgesehen von Lee et al. (2003) konnten auch Bailey, Davies, und Baker (2000) oder Mackenzie et al. (2011) zeigen, dass sich ein sportliches Training während Hypoxie positiv auf die Insulinsensitivität auswirken kann. Die Studie von Bailey et al. (2000) untersuchte jedoch die Effekte körperlicher Aktivität unter Hypoxie auf unterschiedliche Blutzuckerparameter bei gesunden Personen. Bei der Untersuchung von Meckenzie et al. (2011) nahmen Personen mit Diabetes Typ 2 teil. Dabei wurde untersucht, wie sich ein kurzzeitiger Aufenthalt in Hypoxie in Ruhe bzw. in Belastung im Vergleich zu einem Aufenthalt in Ruhe bzw. in Belastung in Normoxie auswirkt. Es konnte festgestellt werden, dass sich sowohl in Ruhe als auch unter körperlicher Aktivität unter Hypoxie die Insulinsensitivität stärker verbesserte verglichen mit Normoxie. Die Autoren kamen daher zum Schluss, dass sich eine einmalige Hypoxieexposition in Ruhe und Belastung positiv auf die kurzfristige glykämische Kontrolle auswirken kann.

Eine andere Studie von Schreuder, Nyakayiru, Houben, Thijssen und Hopman (2013) versuchte herauszufinden, wie sich ein achtwöchiges Training mit Diabetes Typ 2 Patienten auf die Leistungsfähigkeit (VO_{2max}) und auf die endothele Funktion auswirkt. Der Effekt auf

die Insulinsensitivität wurde ebenfalls ermittelt. Insgesamt nahmen 19 Proband(inn)en teil. Es wurden zufällig zwei Gruppen gebildet: eine Gruppe trainierte unter normalen Bedingungen, die andere Gruppe trainierte unter Hypoxie, entsprechend einer Höhe von 2000m (16% FiO₂). Die Proband(inn)en absolvierten dabei dreimal pro Woche 45 Minuten am Ergometer. Zusätzlich wurden Übungen mit Gewichten durchgeführt. Schlussendlich zeigte die Untersuchung folgende Ergebnisse: Nach der zweimonatigen Trainingsphase verbesserten die Teilnehmer/innen die maximale Sauerstoffaufnahme signifikant. Ein Unterschied zwischen den Gruppen bestand jedoch nicht. Der Aufenthalt in Hypoxie hatte also keinen Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit. Laut den Autoren könnte dieses Ergebnis aufgrund einer falschen Trainingsintensität zu Stande gekommen sein. Die Autoren erwähnen, dass eine frühere Untersuchung von Haufe, Wiesner, Engeli, Luft, und Jordan (2008) angab, dass die VO_{2max} unter Hypoxie bei 91% der VO_{2max} in Normoxie liegt. Schreuder et al. (2013) hatten die Trainingsherzfrequenz jedoch aus den Werten, die in Normoxie erreicht wurden, berechnet.

Im Weiteren zeigte die Studie von Schreuder et al. (2013), dass das Training keine Effekte auf die endotheliale Funktion oder auf den Blutzuckerspiegel hatte, weder in der Hypoxie- noch in der Normoxiegruppe. Den fehlenden Effekt auf die glykämische Kontrolle erläuterten die Autoren mit einem Hinweis auf die Studie von Zierath und Wallberg-Henriksson (1992), die anmerkten, dass eine Verbesserung der Insulinsensitivität durch sportliches Training eher bei jüngeren Personen als bei älteren Menschen (>55 Jahre) auftritt. Schreuder et al. (2013) hatten vermehrt ältere Menschen im Probandenkollektiv. Darüber hinaus weisen die Autoren darauf hin, dass es aufgrund des nicht blinden Studiendesigns zu Verzerrungen gekommen sein könnte. Eine zu geringe Höhe in der Hypoxiegruppe könnte auch ein Grund gewesen sein, dass keine Unterschiede in sämtlichen Parametern zwischen der Normoxie- und Hypoxiegruppe nach sportlichem Training eintraten.

Dieses verwendete Studienprotokoll von Schreuder et al. (2013) konnte keine positiven Effekte von Hypoxie und körperlicher Belastung bei Diabetes Typ 2 Patient(inn)en darstellen. Anzumerken gilt jedoch, dass diese Untersuchung mit jener von Meckenzie et al. (2011) nur schwer zu vergleichen ist. Schreuder et al. (2013) untersuchten die Effekte von Hypoxie und einem achtwöchigen Training, während Meckenzie et al. (2011) nur die Auswirkungen einer kurzzeitigen Hypoxieexposition ermittelten. Dennoch kommen Meckenzie und Kollegen (2011) aufgrund ihrer Ergebnisse zum Schluss, dass bei der Behandlung von Diabetes Typ 2 körperliche Aktivität kombiniert mit Hypoxie eingesetzt werden könnte.

4.2 Intermittierende Hypoxie bei COPD

Wie in Punkt 3.2.5 erwähnt, erzielen Aufenthalte in intermittierender Hypoxie gute Effekte bei Patient(inn)en mit kardio-respiratorischen Erkrankungen (Burtscher, 2005). Demnach könnten Aufenthalte in intermittierender Hypoxie eine begleitende Therapiemaßnahme darstellen. Durch intermittierende Hypoxieexpositionen kommt es zur Steigerung der Ventilation und zu hämatologischen Anpassungen. Das Herz-Kreislaufsystem passt sich an die hypoxische Umgebung an, indem es versucht, die Sauerstoffversorgung zum Gewebe zu verbessern. Auch die Sauerstoffnutzung im Gewebe wird gesteigert (Clanton und Klawitter, 2001). Diese Anpassungen führen zu einer gesteigerten Belastungstoleranz, was sich wiederum positiv auf die Mortalität bei älteren Personen mit koronarer Herzkrankheit (Bijnen et al., 1999) oder COPD (net al., 2003) auswirkt. Eine Studie, die Burtscher et al. (2009) durchführte, konnte ebenfalls zeigen, dass sich intermittierende Hypoxie als therapeutisches Mittel bei Patient(inn)en mit COPD eignen kann.

Insgesamt nahmen 18 Personen, sowohl Männer als auch Frauen, die eine leichte COPD aufwiesen, an der Doppelblindstudie teil. Die Plazebo kontrollierte Untersuchung umfasste ein dreiwöchiges Atmungsprogramm, das aus 15 Sitzungen bestand. Fünfmal pro Woche atmete die Hypoxiegruppe Luft mittels einer Maske mit vermindertem Sauerstoffgehalt ein (15-12% FiO₂), wobei dies in sitzender Position stattfand. Die Hypoxiegruppe atmete die Luft intervallförmig ein, d.h. nach einigen Minuten hypoxischen Perioden folgten normoxische Phasen. Jede Sitzung nahm ca. 20-35 Minuten in Anspruch. Die Normoxiegruppe befolgte dasselbe Protokoll, jedoch atmete sie normoxische Luft ein. Vor dem dreiwöchigen Atmungsprogramm und danach wurden Tests gemacht, die die Belastungstoleranz bestimmen sollten. Dazu wurde eine Spiroergometrie am Radergometer und ein six-minutes-walking-test durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchung können anhand von folgenden Tabellen bzw. Abbildungen veranschaulicht werden.

Tab. 11: Werte der Lungenfunktion, kardiorespiratorische- und Blutparameter vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm

	Hypoxia group (n=9)		Control group (n=9)		ANOVA P-value
	Pre	Post	Pre	Post	
FVC (l)	3.53 (0.90)	3.57 (0.95)	3.50 (0.77)	3.49 (0.73)	0.43
FEV ₁ (l)	2.54 (0.62)	2.67 (0.60) ²	2.32 (0.56)	2.28 (0.53)	0.001
FEV ₁ /FVC (l)	72.3 (5.7)	75.7 (5.2) ²	66.2 (4.4)	65.1 (4.5)	0.01
DLCO (% pred)	64.4 (19.2)	67.8 (16.7)	71.2 (17.3)	69.0 (15.3)	0.02
Heart rate (bpm)	77.2 (12.6)	75.2 (11.3)	71.2 (17.3)	75.4 (13.1)	0.30
Systolic blood pressure (mmHg)	137.0 (11.1)	120.9 (10.3) ²	141.9 (22.8)	120.0 (11.2) ²	0.40
Diastolic blood pressure (mmHg)	88.4 (11.7)	81.1 (7.0) ²	85.4 (13.4)	77.8 (9.4) ²	0.66
Arterial oxygen saturation (%)	96.6 (0.7)	97.0 (0.9)	97.2 (0.7)	96.7 (0.7) ²	0.004
Haemoglobin (g/dl)	14.6 (0.8)	14.5 (1.0)	15.1 (1.0)	14.9 (1.1)	0.79
Hematocrit (%)	43.4 (3.2)	42.6 (3.9)	44.0 (2.8)	43.6 (3.5)	0.76
Total haemoglobin mass (g)	843.1 (143)	874.8 (138) ²	798.4 (157)	798.8 (150)	0.04
Plasma volume (ml)	3809 (523)	4034 (509) ²	3528 (695)	3557 (593)	0.18
Total cholesterol (mg/dl)	199.6 (31.2)	190.9 (23.8)	202.3 (46.6)	191.1 (46.8)	0.82
Triglycerids (mg/dl)	167.2 (99.0)	141.4 (73.8)	165.0 (50.1)	201.0 (63.2) ²	0.04

Data are means (SD).

Abbreviations: Forced expiratory vital capacity (FVC), forced expiratory volume in 1 s (FEV₁), lung diffusion capacity for carbon monoxide (DLCO).

² Denotes significant changes within groups.

Quelle: mod. n. Burtcher et al. (2009, S. 99).

Tab. 12: Daten der Radergometrie vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm

	Hypoxia group (n=9)		Control group (n=9)		ANOVA P-value
	Pre	Post	Pre	Post	
Peak power (W/kg)	2.07 (0.79)	2.27 (0.87) ²	1.89 (0.62)	1.90 (0.56)	0.04
Total exercise time (min)	12.4 (4.8)	13.7 (5.3) ²	11.3 (3.7)	11.3 (3.4)	0.04
VO ₂ peak (ml/min/kg)	32.0 (10.2)	34.6 (11.3) ²	29.7 (7.0)	30.7 (8.3)	0.13
Heart rate peak (bpm)	162.9 (16.0)	158.4 (16.3)	165.6 (13.8)	156.9 (17.7)	0.15
VE peak (l/min)	89.1 (26.1)	94.9 (24.5)	76.7 (21.3)	81.8 (25.2)	0.89
SaO ₂ peak (%)	93.9 (2.2)	95.4 (1.7) ²	95.6 (1.7)	95.2 (1.3)	0.05
Rate of perceived exertion	5.4 (1.1)	5.7 (1.8)	5.3 (0.9)	5.3 (0.7)	0.50
Exercise time _{AT} (min)	5.7 (3.7)	6.4 (3.3) ²	5.8 (1.9)	5.4 (1.4)	0.01
VO _{2AT} (ml/min/kg)	21.2 (6.5)	22.3 (6.0) ²	19.0 (4.0)	18.5 (2.7)	0.13
Heart rate _{AT} (bpm)	128.8 (14.8)	133.7 (11.5)	124.3 (10.5)	128.3 (8.9)	0.87
SaO _{2AT} (%)	92.4 (2.1)	94.2 (1.9) ²	93.2 (1.9)	93.1 (1.5)	0.03
VE _{AT} (l/min)	49.1 (13.0)	46.0 (7.9)	44.0 (10.5)	44.8 (8.8)	0.27
VE/VO _{2AT}	30.6 (5.6)	27.2 (5.0) ²	31.0 (6.1)	32.0 (4.5)	0.02
VE/VCO _{2AT}	30.6 (5.5)	27.3 (5.1) ²	31.0 (6.2)	32.1 (4.6)	0.02

Data are means (SD).

Abbreviations: Peak oxygen uptake (VO₂ peak), peak minute ventilation (VE peak), peak arterial oxygen saturation (SaO₂ peak); oxygen uptake at the anaerobic threshold (VO_{2AT}), arterial oxygen saturation at the anaerobic threshold (SaO_{2AT}), minute ventilation (VE_{AT}), and ventilatory equivalents for oxygen and carbon dioxide at the anaerobic threshold (VE/VO_{2AT}, VE/VCO_{2AT}).

² Denotes significant changes within groups.

Quelle: mod. n. Burtcher et al. (2009, S.100).

Die gesteigerte Belastungstoleranz bei Patienten mit leichter COPD nach einem dreiwöchigen Aufenthalt in intermittierender Hypoxie kann als das Hauptergebnis der Untersuchung bezeichnet werden. Diese gesteigerte Belastungstoleranz zeigt sich laut Burtcher et al. (2009) zum einen durch eine verbesserte Gesamtbelastungszeit und zum anderen durch eine Verbesserung in der Zeit bis zum Erreichen der anaeroben Schwelle. Die Autoren begründen die verbesserte Gesamtbelastungszeit durch eine Zunahme der Hämoglobinmasse in der Hypoxiegruppe.

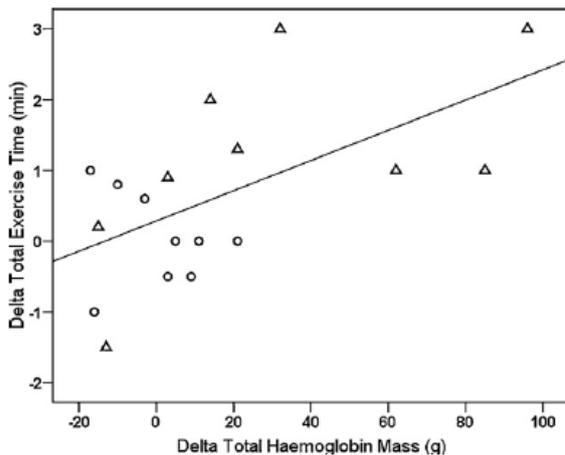


Abb. 6: Zusammenhang zwischen der Veränderung der Gesamtbelastungszeit der Radergometrie und der Veränderung der Hämoglobinmasse ($r=0.59$, $p<0.05$); Dreiecke=Hypoxiegruppe, Kreise=Kontrollgruppe (mod. n. Burtcher et al., 2009, S. 100).

Die Forscher erwähnen dabei jedoch, dass eine gesteigerte Hämoglobinmasse kein erwartetes Ergebnis war, da insgesamt der Höhengaufenthalt relativ kurz war. Anscheinend reagieren Patient(inn)en mit COPD sensibler auf intermittierende Hypoxie als Athlet(inn)en. Dies könnte laut den Autoren dadurch erklärt werden, dass der Hypoxie induzierte Faktor HIF-1 α verstärkt durch Hypoxie aber auch durch Mediatoren, die auf Entzündungsreize reagieren, angeregt wird. COPD könnte so einen Entzündungsreiz darstellen (Frede, Berchner-Pfanschmidt & Fandrey, 2007). Dennoch sollte diese Hypothese durch weitere Studien überprüft werden.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Untersuchung stellt eine Zunahme der Zeit bis zum Erreichen der anaeroben Schwelle in der Hypoxiegruppe dar. Eine mögliche Erklärung könnte in der gesteigerten Lungendiffusionskapazität für Kohlenmonoxid (DLCO) in Ruhe liegen. Die Autoren erwähnen dabei, dass die Veränderungen der DLCO nur die submaximale Leistung positiv beeinflusste.

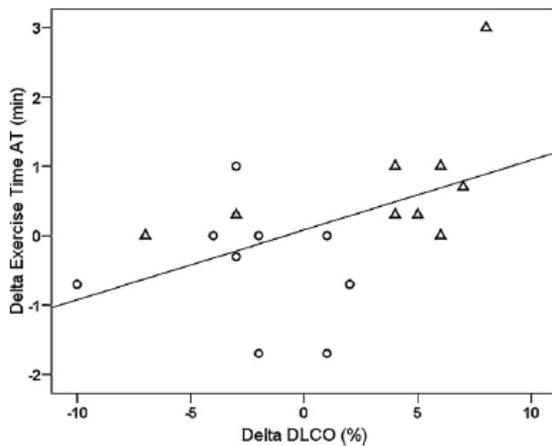


Abb. 7: Zusammenhang zwischen der Veränderung der Zeit bis zum Erreichen der anaeroben Schwelle (AT) der Radergometrie und der Veränderung der DLCO ($r=0.48$, $p<0.05$); Dreiecke=Hypoxiegruppe, Kreise=Kontrollgruppe (mod. n. Burtscher et al., 2009, S. 101).

Die VO_2 max veränderte sich zwar positiv bei beiden Gruppen, aber zwischen den Gruppen konnte keine Signifikanz festgestellt werden. Im Weiteren konnte eine verminderte Herzfrequenz sowie eine reduzierte Laktatproduktion in der Hypoxiegruppe erhoben werden. Dieses Ergebnis weist auf eine gesteigerte submaximale Belastung hin (Burtscher et al., 2009). Darüber hinaus wurden auch respiratorische Parameter wie die Einsekundenkapazität (FEV1) und das Verhältnis der Einsekundenkapazität zur forcierten Vitalkapazität (FEV1/FVC) durch intermittierende Hypoxie positiv verändert. Die gesteigerten Werte könnten entweder durch die Hypoxie an sich oder durch das vermehrte Atemmuskeltraining, das aufgrund der Hyperventilation während der Hypoxieexpositionen induziert wurde, erklärt werden (Burtscher et al., 2009).

Abschließend sollte noch erwähnt werden, dass diese Ergebnisse nicht auf Patient(inn)en mit schwerer COPD übertragen werden können. Zudem kann nicht bestimmt werden, wie lange diese Effekte anhalten. Dazu müssten neuerliche Tests zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden, und nicht nur kurz nach dem Atmungsprogramm. Dennoch kam die Studie zu dem Ergebnis, dass ein intermittierendes, hypoxisches Atmungsprogramm über drei Wochen zu einer gesteigerten Belastungstoleranz bei Patienten mit milder COPD führt. Daher könnte ein Atmungsprogramm in dieser Form eine begleitende Therapiemaßnahme darstellen (Burtscher et al., 2009).

Abgesehen von Burtscher et al. (2009) wurde im selben Jahr eine Untersuchung durchgeführt, die ein ähnliches Protokoll aufwies wie die vorhin beschriebene Studie. Die gemessenen Parameter und auch das Ziel der Studie von Haider et al. (2009) waren jedoch unterschiedlich.

Im Fokus stand dieses Mal die autonome kardiovaskuläre und respiratorische Kontrolle bei Menschen mit COPD. Personen mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung können zum einen eine verminderte Baroreflexsensitivität aufweisen (Patakas, Louridas & Kakavelas, 1982) und zum anderen eine geringere Herzfrequenzvariabilität (Bartels, Jelic, Ngai & Basner, 2003). Zudem kann eine erhöhte Sympathikus Aktivität auftreten und bei schwerer COPD kann eine Unterdrückung von peripheren und zentralen Chemoreflexen vorkommen. Insgesamt tritt demnach eine kardiovaskuläre autonome Dysfunktion in Erscheinung. Diese Dysfunktion des autonomen Nervensystems stellt einen Risikofaktor für eine kardiale Morbidität bzw. Mortalität dar (Bartels, Gonzales, Kim & De Meeresman, 2000). Intervallförmiges hypoxisches „Training“ kann die Sympathikus Aktivierung mindern und die hypoxische Atemantwort (hypoxic ventilatory response, HVR) beeinflussen (Bernardi, Passino, Serebrovskaya, Serebrovskaya & Appenzeller, 2001). Dadurch kann bei Menschen mit COPD das kardiovaskuläre Ungleichgewicht und die inkorrekte Atemantwort normalisiert werden. Haider et al. (2009) untersuchten bei 18 Personen mit leichter COPD die Auswirkungen einer dreiwöchigen intermittierenden Hypoxieintervention auf die kardiovaskuläre und respiratorische Kontrolle. Ziel war es herauszufinden, ob zum einen bereits zu Studienbeginn Einschränkungen bestehen und ob zum anderen mögliche Einschränkungen durch die intervallförmige intermittierende Hypoxie beeinflusst werden können. Die Probanden wurden in eine Trainings- oder in eine Placebogruppe eingeteilt, zusätzlich war eine Kontrollgruppe mit 14 gesunden Personen vorhanden. Die Trainingsgruppe inhalierte fünfmal wöchentlich ein Gas mit einem Sauerstoffgehalt von 15-12% in sitzender Position. Dabei hatte das Atmungsprogramm intervallförmigen Charakter, d.h. es wurde zwischen hypoxischen und normoxischen Phasen gewechselt. Zu den wichtigsten erhobenen Parametern zählten unter anderem die Baroreflexsensitivität, der systolische Blutdruck, der Abstand zwischen den R-R Intervallen sowie die HVR und die HCVR (hypercapnic ventilatory response). Es konnte festgestellt werden, dass die Patienten im Vergleich zur Kontrollgruppe bereits vor der Intervention Anzeichen auf eine erhöhte Sympathikus Aktivität aufwiesen, da eine signifikant höhere Herzfrequenz und reduzierte Baroreflexsensitivität festgestellt wurde. Die HVR und die HCVR unterschieden sich jedoch nicht zwischen den Gruppen zu Beginn. Nach der dreiwöchigen passiven Trainingsphase zeigte die Trainingsgruppe eine Verringerung der Herzfrequenz ($p < 0.05$) und eine gesteigerte Sensitivität der Baroreflexe ($p < 0.05$) im Vergleich zur Placebogruppe. Zudem konnte eine signifikante Steigerung der HCVR erhoben werden.

Die Autoren stellten daher fest, dass sich die Parameter, die zu Beginn nicht der Norm entsprachen, durch das „Training“ in Hypoxie normalisierten. Aufgrund der Ergebnisse kommen Haider et al. (2009) zum Schluss, dass in einem frühen Stadium der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung eine funktionelle Einschränkung des autonomen Nervensystems besteht. Diese ist jedoch durch eine intervallförmige Hypoxieexposition zu normalen Werten zurückzuführen. Zudem führen die Forscher weiter an, dass eine veränderte Baroreflexsensitivität ein frühes Anzeichen einer autonomen Einschränkung sein kann, aber es ist möglich, diese Beeinträchtigung durch intervallförmige hypoxische Aufenthalte zu revidieren. Die verringerte Baroreflexsensitivität bei Personen mit COPD kann zu einem erhöhten Risiko eine kardiovaskuläre Erkrankung zu erleiden, führen. Zudem kann es zur Entwicklung eines Lungenhochdrucks kommen (Barabra, Peinado & Santos, 2003). Ein Lungenhochdruck kann sich auch bei Patient(innen)en mit verminderter Chemosensitivität bzw. HCVR aufgrund nächtlicher Hypoxämie entwickeln. Daneben besteht bei Menschen mit COPD mit eingeschränkter Chemosensitivität die Gefahr, eine Hyperkapnie zu bekommen (Hida, 1999). Dementsprechend ist es wichtig, eine hohe hypercapnic ventilatory response (HCVR) zu erreichen.

Haider et al. (2009) kommen zum Schluss, dass intermittierende bzw. intervallförmige Hypoxie zu einer gesteigerten Belastungstoleranz im täglichen Leben bei Menschen mit COPD führen kann. Akute Hypoxie steigert die Sympathikus Aktivität und die Ventilation. Daher fungiert das intervallförmige hypoxische „Training“ als eine Art Stress Training. Die gesteigerte sympathische Aktivität während der hypoxischen Zyklen (akute Hypoxie) führt in weitere Folge zu einer gesteigerten Stresstoleranz während des täglichen Lebens. Deshalb sehen Haider et al. (2009) das intervallförmige hypoxische Atmungsprogramm als eine gute Behandlungsmöglichkeit an, um die zum Großteil funktionellen Einschränkungen des autonomen Nervensystems bei Menschen mit COPD zu normalisieren.

4.3 Intermittierende Hypoxie bei Koronarer Herzkrankheit (KHK)

Wie in Punkt 4.2 beschrieben, führte Burtscher et al. (2009) eine Untersuchung zur Bestimmung der Effekte von intermittierender Hypoxie auf die Belastungstoleranz bei Patienten und Patientinnen mit einer chronischen obstruktiven Lungenerkrankung durch. Im Jahr 2004 bereits ermittelten Burtscher und Kolleg(inn)en die Auswirkungen von intermittierender Hypoxie auf die Belastungstoleranz bei Männern mit und ohne koronarer Herzkrankheit (KHK). Der Ablauf dieser Untersuchung war nahezu ident mit jener von 2009.

Bereits unter Kapitel 4.2 wurde erwähnt, dass intermittierende Hypoxie eine Reihe von Anpassungserscheinungen, wie z.B. hämatologische Adaptionen, oder eine verbesserte Sauerstoffbereitstellung und -nutzung bewirkt (Bisgard & Neubauer, 1995; Bailey, Davies & Baker, 2000; Clanton & Klawitter, 2001). Diese Anpassungserscheinungen können zu einer erhöhten Belastungstoleranz führen, was sich positiv auf die Mortalität bei Patienten mit KHK auswirken kann (Bijinen et al., 1999; Gordon et al., 1986). Studien von russischen Forschern und Forscherinnen zeigten, dass intervallförmige intermittierende Hypoxie eine gute Verträglichkeit bei älteren Personen aufweist. Außerdem wirkte sich diese Form der Hypoxie positiv auf unterschiedliche Krankheitsbilder aus (Meerson, Ustinova & Orlova, 1987; Ustimova et al., 1988). Orientiert an den russischen Studien entschieden sich Burtscher et al. (2004) ebenfalls, eine Untersuchung mit einem intervallförmigen, intermittierenden, hypoxischen Atmungstraining durchzuführen.

Es nahmen insgesamt 16 Männer an der Studie teil. Einige Probanden hatten bereits einen Myokardinfarkt, einige jedoch nicht. Die Doppelblindstudie wies ein randomisiertes, plazebo-kontrolliertes Design auf. Die Probanden wurden in eine Hypoxiegruppe und eine Normoxiegruppe geteilt. Die Teilnehmer unterzogen sich einem dreiwöchigen Atmungsprogramm mit jeweils fünf Sitzungen pro Woche. Die Hypoxiegruppe atmete über eine Maske Luft mit 14-10% O₂ ein, in der Normoxiegruppe war der Sauerstoffgehalt nicht reduziert. Das Protokoll war mit jenem Protokoll wie in 2.3 beschrieben, ident. Vor und nach dem Atmungstraining wurde eine Spiroergometrie am Radergometer durchgeführt.

Die Studie kam zu folgenden Ergebnissen: Die Hypoxiegruppe wies eine signifikant größere Hämoglobinmasse und Masse an roten Blutkörperchen auf, wodurch es zu einer gesteigerten Sauerstofftransportkapazität kommt. Wie auch in der Studie von 2009 stellte dieses Ergebnis eine Überraschung dar, da nur kurzzeitige Hypoxieexpositionen zu einer Erythropoetin Reaktion führte. Burtscher et al. (2004) verwiesen dabei auf die Untersuchung von Knaupp et al. (1992), die zeigte, dass einzelne Hypoxieaufenthalte bis 60 Minuten zu keiner Erythropoetin Stimulation führte. Wobei hingegen die Untersuchung von Bernardi et al. (2000) ebenfalls hämatologische Reaktionen zeigen konnte. Das Protokoll von dieser Studie kann mit jenem von Burtscher et al. (2004) verglichen werden. Im Weiteren erwähnen Burtscher et al. (2004), dass, obwohl eine Zunahme der Hämoglobinmasse erreicht wurde, keine Veränderung des Hämatokritwertes beobachtet werden konnte. Die Blutviskosität stieg also nicht an, was als eine positive Nebenerscheinung gesehen werden kann.

Die folgende Tabelle zeigt die Veränderungen verschiedener kardiovaskulärer und respiratorischer Parameter bei submaximaler Belastung.

Tab. 13: Kardiovaskuläre und respiratorische Reaktionen bei submaximaler Belastung (1W/kg) der Hypoxie- und der Kontrollgruppe vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm

	Hypoxia group (n = 8)		Control group (n = 8)		p-value
	Before	After	Before	After	
Heart rate (bpm)	112 (18.5)	103 (16.9)	96 (11.9)	94 (11.3)	0.03
Systolic blood pressure (mm Hg)	165 (36.9)	156 (33.3)	163 (16.9)	164 (11.0)	0.02
Rate pressure product	18,986 (6593)	16,380 (5419)	15,746 (3033)	15,443 (2386)	0.02
Oxygen consumption (ml/min/kg)	15.6 (1.3)	15.4 (1.4)	16.2 (0.7)	15.5 (1.2)	0.35
Respiratory exchange ratio	0.84 (0.08)	0.85 (0.07)	0.83 (0.07)	0.82 (0.06)	0.60
Minute ventilation (l/min)	35.8 (7.6)	36.6 (7.2)	35.7 (3.5)	32.8 (2.9)	0.06
Arterial oxygen saturation (%)	95.4 (1.4)	97.0 (0.9)	96.8 (1.3)	97.0 (1.3)	<0.01
Arterial oxygen content (ml/l)	186.3 (11.0)	197.6 (10.3)	191.8 (11.1)	192.4 (13.8)	<0.01
Blood lactate concentration (mmol/l)	2.8 (0.6)	2.3 (0.5)	2.3 (0.5)	2.4 (0.6)	<0.01
Perceived exertion	12.4 (1.2)	11.0 (1.2)	11.6 (1.2)	11.8 (1.3)	<0.01

Data represent means (SD). p-values for differences in changes between groups.

Quelle: mod. n. Burtcher et al. (2004, S. 249).

Die Autoren erklären die stärker verringerte Herzfrequenz der Hypoxiegruppe während der Belastung durch den gesteigerten arteriellen Sauerstoffgehalt nach intermittierender Hypoxie. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen einer verringerten Herzfrequenz und einem gesteigerten arteriellen Sauerstoffgehalt ($r = -0.7$, $p < 0.05$). Burtcher et al. (2004) geben im Weiteren an, dass eine reduzierte Herzfrequenz, abhängig vom arteriellen Sauerstoffgehalt, wahrscheinlich durch einen reduzierten sympathischen Tonus beeinflusst wurde.

Tab. 14: Hämatologische Parameter der Hypoxie- und Kontrollgruppe vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm

Haematological parameters of the hypoxia and the control group before and after the 3 week breathing program

	Hypoxia group (n=8)		Control group (n=8)		p-value
	Before	After	Before	After	
RBC (10 ⁶ /ml)	4.89 (0.24)	5.08 (0.19)	4.94 (0.41)	4.77 (0.41)	0.02
Hb (g/dl)	14.4 (0.8)	15.0 (0.7)	14.6 (0.9)	14.6 (1.0)	0.04
Hct (%)	44.1 (2.5)	44.3 (3.0)	45.0 (4.1)	43.8 (3.8)	0.38
MCV (fl)	90.3 (2.6)	87.3 (6.5)	91.2 (4.9)	92.0 (4.8)	0.22
MCH (pg)	29.4 (0.9)	29.5 (1.6)	29.6 (1.8)	30.7 (1.3)	0.73
MCHC (g/dl)	32.6 (1.0)	33.9 (1.1)	32.5 (2.1)	33.4 (1.6)	0.59

Data represent means (SD). p-values for differences in changes between groups.

Abbreviations: Red Blood Cell Count (RBC), Haemoglobin (Hb), Haematocrit (Hct), Mean Cell Volume (MCV), Mean Cell Haemoglobin (MCH), Mean Cell Haemoglobin Concentration (MCHC).

Tab. 15: Kardiovaskuläre und respiratorische Reaktionen bei maximaler Belastung der Hypoxie- und der Kontrollgruppe vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm

	Hypoxia group (n=8)		Control group (n=8)		p-value
	Before	After	Before	After	
Exercise time (min)	9.3 (2.4)	9.7 (2.5)	10.6 (2.6)	10.7 (2.7)	0.40
Workload (W)	189 (57.1)	209 (53.6)	224 (53.7)	224 (56.7)	0.07
Heart rate (bpm)	162 (16.5)	162 (12.1)	147 (15.5)	146 (16.2)	0.71
Systolic blood pressure (mm Hg)	213 (36.2)	211 (24.5)	218 (32.1)	218 (39.6)	0.73
Rate pressure product	34,661 (7939)	33,994 (4399)	32,161 (7037)	31,961 (8576)	0.78
Oxygen consumption (ml/min)	2330 (586)	2475 (546)	2813 (747)	2729 (765)	<0.001
Minute ventilation (l/min)	88.0 (14.5)	102.3 (13.3)	100.1 (19.7)	102.2 (22.8)	0.03
Arterial oxygen saturation (%)	94.9 (1.9)	96.6 (1.3)	94.5 (1.2)	94.9 (0.6)	<0.01
Arterial oxygen content (ml/l)	185.3 (10.6)	196.8 (9.6)	187.2 (9.6)	188.2 (13.2)	<0.01
Blood lactate (mmol/l)	8.4 (1.8)	6.6 (2.0)	7.8 (1.5)	7.3 (1.8)	0.04

Data represent means (SD). p-values for differences in changes between groups.

Quelle: mod. n. Burtcher et al. (2009, S. 250).

Die Autoren geben an, dass sich in der Hypoxiegruppe die maximale Sauerstoffaufnahme aufgrund einer höheren Hämoglobinmasse und einer erhöhten maximalen VE steigerte. Der maximale Arbeitsumfang (peak workload) konnte nur tendenziell durch den Einsatz von Hypoxie verbessert werden. Burtcher und Kolleg(inn)en merken im Weiteren an, dass zwischen der maximalen Sauerstoffaufnahme und dem arteriellen Sauerstoffgehalt ein guter Zusammenhang besteht ($r=0.9$, $p<0.01$). Die Autoren weisen zudem darauf hin, dass 81% der

veränderten VO_{2max} Werte durch die Änderung des arteriellen Sauerstoffgehalts erklärt werden können.

Die Probanden reagierten insgesamt ähnlich auf den hypoxischen Stimulus, egal, ob sie bereits einen Myokardinfarkt hatten oder nicht. Jedoch zeigte sich eine tendenziell stärkere Veränderung der hämatologischen Parameter sowie eine stärkere Reaktion auf maximale Belastungen bei Menschen mit KHK. Der stärkere hypoxische Stimulus bei Patienten mit KHK könnten die gesteigerten hämatologischen Effekte erklären.

Burtscher et al. (2004) werfen abschließend die Frage auf, ob durch die Kombination von Hypoxie und gleichzeitiger körperlicher Aktivität eine noch größere Effizienz erreicht werden hätte können. Zudem geben die Autoren an, dass aufgrund der Untersuchung von Burtscher et al. (1999, zit. n. Burtscher et al., 2004, S. 253) die beobachteten Effekte ca. ein Monat nach Beendigung des Atmungsprogramms anhalten sollten.

Zusammenfassend wurden also die aerobe Kapazität und die Belastungstoleranz nach einem dreiwöchigen passiven Atmungsprogramm gesteigert. Die wahrgenommene Belastungsanstrengung (RPE), die Laktatanhäufung und der myokardiale Sauerstoffverbrauch waren bei submaximaler Belastung reduziert. Die VO_{2max} konnte aufgrund intermittierender Hypoxie gesteigert werden. Die Veränderungen im Bereich der aeroben Kapazität werden durch einen hypoxie-induzierten Anstieg des arteriellen Sauerstoffgehalts und durch eine verringerte Sympathikus-Aktivierung erklärt (Burtscher et al., 2004).

Abschließend sollte zum Kapitel 4.2 und 4.3 angemerkt werden, dass derzeit (zu) wenige Studien vorhanden sind, um detaillierte Aussagen hinsichtlich der Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit COPD oder KHK treffen zu können. In einem Review von Burtscher, Gatterer, Szubski, Pierantozzi und Faulhaber (2010) wird ersichtlich, dass zwar Studien bestehen, die die Anwendung von intermittierender Hypoxie bzw. intervallförmiger Hypoxie bei gesunden Menschen beleuchten, jedoch kaum Untersuchungen, die als Probanden oder Probandinnen Personen mit COPD oder KHK vorweisen können. Dennoch kommen die Autoren zum Schluss, dass intervallförmige Hypoxie bei Menschen mit COPD und KHK möglicherweise mehr Effekte bewirken könnte, als bei Athleten und Athletinnen. Um diese Aussage jedoch zu bestätigen sind weitere Untersuchungen notwendig.

4.5 Die Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit metabolischem Syndrom (MS)

Das metabolische Syndrom inkludiert die Symptome Fettleibigkeit, Hyperglykämie, verringerte HDL- bzw. gesteigerte Triglyzeridwerte und einen erhöhten Blutdruck. Es wird in Verbindung mit zunehmender Adipositas sowie einem vermehrten inaktiven Lebensstil der Gesellschaft gebracht. Dadurch steigt die Prävalenz des metabolischen Syndroms weltweit an (Alberti et al., 2009). Es konnte festgestellt werden, dass chronische Entzündungswerte ebenfalls in Zusammenhang mit dem metabolischen Syndrom stehen (Matsuo, Hashizume, Shioji, & Akasaka, 2008). Entzündungen können eine bedeutende Rolle im Hinblick auf Arteriosklerose spielen (Libby, Ridker & Maseri, 2002). Man nimmt an, dass durch die Bestimmung des C-reaktiven Proteins (CRP), ein Marker, der auf eine Entzündung hinweist, das kardiovaskuläre Risiko determiniert werden kann. Im Weiteren kann körperliche Aktivität das Risiko einer kardiovaskulären Erkrankung bei Menschen mit Fettleibigkeit, Diabetes Typ II oder Bluthochdruck verringern (Guo et al., 2011; Braz et al., 2012; Becker-Grunig et al., 2013).

Nun besteht die Frage, wie sich Hypoxie auf die oben genannten Risikofaktoren auswirken kann. Einige Studien konnten zeigen, dass körperliche Aktivität in Normoxie entzündungshemmende Faktoren initiiert (Mattusch et al., 2000; Okita et al., 2004).

In der Untersuchung von Shi et al. (2014) wurden die Auswirkungen von körperlicher Aktivität unter hypoxischen Bedingungen auf Risikofaktoren des metabolischen Syndroms, sowie auf den CRP-Spiegel ermittelt. Zudem wurden die Effekte auf das preperitoneale Fett, auf die arterielle Steifigkeit und auf zahlreiche Blutparameter untersucht.

Insgesamt nahmen 14 Männer an der Studie, die ein cross-over-design aufweist, teil. Die Teilnehmer wurden zufällig einer Hypoxie- bzw. einer Normoxiegruppe zugeteilt. Nach einer vierwöchigen Trainingsphase wechselten die Probanden die Gruppe. Drei 50-minütige Trainingseinheiten am Laufband pro Woche wurden absolviert, entweder unter hypoxischen Bedingungen (15,4% O₂) oder unter normoxischen Bedingungen. Die Trainingsintensität lag bei 60% der Herzfrequenz der VO_{2max}. Vor bzw. nach der Trainingsintervention wurden folgende Parameter erhoben:

1. Anthropometrische Daten wie Taillenumfang, Größe, Gewicht, Fettmasse und BMI
2. Blutproben zur Bestimmung mehrerer Parameter wie Gesamtcholesterin, HDL/LDL Cholesterin, Triglyzeride, Glucose- und Insulinspiegel, Leptin, hs-CRP (high sensitivity CRP) und Interleukin (IL)- 6

3. VO_{2max} , mittels eines Astrand Protokolls erhoben
4. Pulswellengeschwindigkeit (PWV) und anke-brachial-index, (ABI) als Indikatoren für die Arterielle Steifigkeit, die einen Index für Arteriosklerose darstellt
5. Preperitoneales Fett und subkutanes Fett, das mittels Ultraschall erhoben wurde

Die Ergebnisse der Untersuchung von Shi et al. (2014) sollen anhand von folgenden Tabellen und Abbildungen dargestellt werden.

Tab. 16: Physische Parameter sowie Laborparameter der Probanden vor und nach dem Training

Parameter	Group (n)	Training		Two-way ANOVA (F-value)			Post hoc test (Tukey's HSD)
		Before	After	Group	Training	Interaction	
Weight, kg	Normoxia (n = 14)	70.3 ± 3.1	69.9 ± 3.0	0.23	3.89	1.03	NS
	Hypoxia (n = 14)	70.2 ± 3.4	69.3 ± 3.2				
Percentage	Normoxia (n = 14)	20.3 ± 1.9	20.6 ± 2.0	6.49	0.35	3.13	After training: hypoxia < normoxia
Body fat, %	Hypoxia (n = 14)	19.5 ± 2.0	18.8 ± 2.0	(P = 0.024)			
Waist	Normoxia (n = 14)	81.8 ± 3.3	80.9 ± 2.9	0.03	6.21	1.73	Hypoxia group: after < before training
Circumference, cm	Hypoxia (n = 14)	82.4 ± 3.5	80.6 ± 3.3				
BMI, kg m ⁻²	Normoxia (n = 14)	23.1 ± 1.0	22.9 ± 1.0	0.19	5.02	1.52	NS
	Hypoxia (n = 14)	23.1 ± 1.1	22.8 ± 1.0				
PWV, cm sec ⁻¹	Normoxia (n = 14)	1118.2 ± 47.2	1129.6 ± 47.0	3.17	0.78	4.84	After training: hypoxia < normoxia
	Hypoxia (n = 14)	1109.1 ± 45.8	1066.9 ± 40.7				
SFT, mm	Normoxia (n = 14)	7.0 ± 1.6	6.8 ± 1.6	4.24	6.70	0.13	After training: hypoxia < normoxia
	Hypoxia (n = 14)	6.0 ± 1.3	5.7 ± 1.3				
PFT, mm	Normoxia (n = 14)	11.1 ± 1.5	10.1 ± 1.4	0.55	16.89	0.24	Hypoxia group: after < before training
	Hypoxia (n = 14)	10.9 ± 1.5	9.6 ± 1.5				
TC, mg dL ⁻¹	Normoxia (n = 14)	181.8 ± 7.6	184.9 ± 7.8	3.06	0.54	0.10	NS
	Hypoxia (n = 14)	174.3 ± 6.6	175.7 ± 6.5				
HDL, mg dL ⁻¹	Normoxia (n = 14)	54.7 ± 3.1	59.2 ± 3.3	6.57	10.28	0.59	NS
	Hypoxia (n = 14)	51.7 ± 3.2	54.4 ± 2.6				
LDL, mg dL ⁻¹	Normoxia (n = 14)	107.1 ± 7.6	108.4 ± 8.1	0.79	1.40	0.34	NS
	Hypoxia (n = 14)	102.4 ± 6.2	106.4 ± 7.4				
Adiponectin, ug mL ⁻¹	Normoxia (n = 14)	7.82 ± 0.84	8.02 ± 0.98	0.09	0.03	0.53	NS
	Hypoxia (n = 14)	7.86 ± 0.78	7.74 ± 0.96				

Values are means ± SE. BMI, body mass index; PWV, brachial-ankle pulse wave velocity; PFT, preperitoneal fat thickness; SFT, subcutaneous fat thickness; TC, total cholesterol; HDL, high-density lipoprotein cholesterol; LDL, low-density lipoprotein cholesterol; NS, not significant.

Quelle: mod. n. Shi et al. (2014, S. 5).

Tab. 17: Prozentuelle Veränderung einiger Parameter vor und nach dem Training

Parameters	Group	Training		Percentage change (%)	Wilcoxon's test (P-Value)
		Before	After		
SBP, mmHg	Normoxia	124.1 ± 1.9	121.8 ± 2.3	-1.8 ± 1.8	0.363
	Hypoxia	119.1 ± 3.1	120.7 ± 2.6	1.7 ± 2.0	
DBP, mmHg	Normoxia	72.1 ± 1.8	71.4 ± 2.0	-1.0 ± 1.2	0.972
	Hypoxia	70.9 ± 3.2	69.5 ± 2.0	-0.4 ± 3.3	
Glucose, mg dL ⁻¹	Normoxia	90.4 ± 2.5	90.4 ± 2.5	0.2 ± 1.9	0.140
	Hypoxia	92.4 ± 3.2	96.6 ± 3.0	5.5 ± 3.5	
Insulin, μ J mL ⁻¹	Normoxia	5.3 ± 0.7	3.9 ± 0.5	-15.9 ± 9.9	0.638
	Hypoxia	10.3 ± 3.5	6.0 ± 1.2	-3.0 ± 19.8	
TG, mg dL ⁻¹	Normoxia	105.6 ± 15.8	88.8 ± 12.8	-2.2 ± 11.2	0.245
	Hypoxia	122.7 ± 35.1	81.8 ± 16.5	-18.7 ± 9.1	
Leptin, ng mL ⁻¹	Normoxia	3.84 ± 1.03	2.82 ± 0.61	-12.4 ± 12.6	0.638
	Hypoxia	4.30 ± 1.28	3.32 ± 1.10	-19.2 ± 8.8	
hs-CRP, ng mL ⁻¹	Normoxia	448.6 ± 117.3	512.9 ± 254.1	32.8 ± 44.1	0.013
	Hypoxia	664.3 ± 241.5	207.1 ± 51.6	-41.4 ± 13.6	
IL-6, pg mL ⁻¹	Normoxia	1.9 ± 1.3	8.3 ± 6.4	339.7 ± 295.3	0.091
	Hypoxia	18.2 ± 16.8	13.1 ± 12.3	-28.9 ± 24.5	

Values are means ± SE. SBP, systolic blood pressure; DBP, diastolic blood pressure; TG, triglycerides; hs-CRP, high-sensitive C-reactive protein; IL-6, Interleukin-6.

Quelle: mod. n. Shi et al. (2014, S. 6).

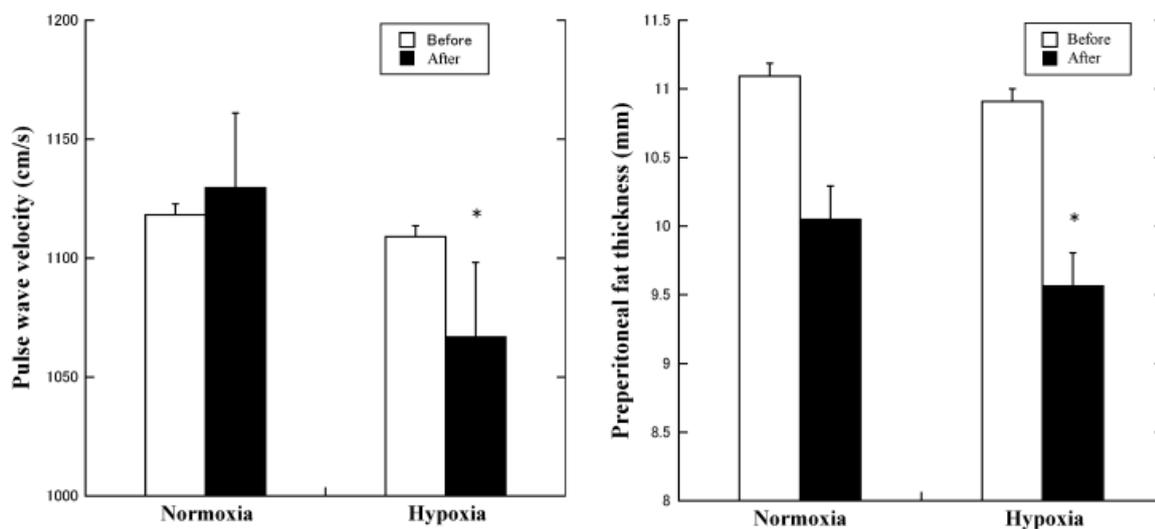


Abb. 8: Die Abbildung links zeigt die Veränderung der Pulswellengeschwindigkeit in der Normoxie- und Hypoxiegruppe; Die Abbildung rechts zeigt die Veränderung des preperitonealen Fetts in der Normoxie- und Hypoxiegruppe; * $p < 0.05$ im Vergleich zu den Messwerten vor dem Training in der Hypoxiegruppe (mod. n. Shi et al., 2014, S. 6).

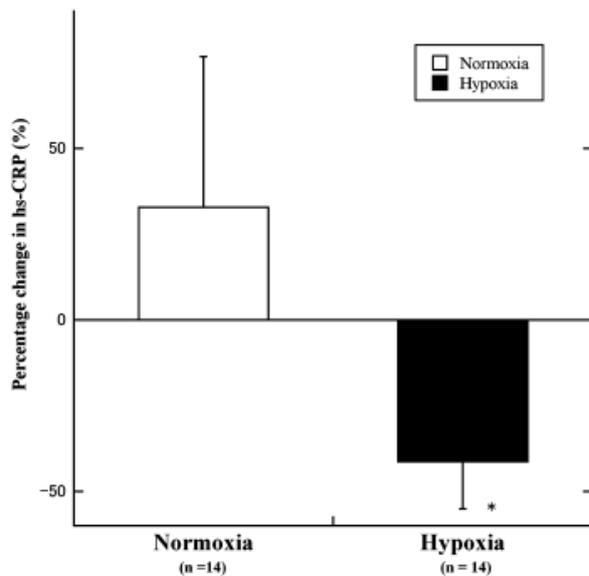


Abb. 9: Die Veränderung der hs-CRP Werte in der Normoxie- und Hypoxiegruppe; hs-CRP= high sensitivity C-reactive protein; * $p < 0.05$ im Vergleich zu den Messwerten vor dem Training in der Hypoxiegruppe (mod. n. Shi et al., 2014, S. 7).

Die Untersuchung von Shi et al. (2014) zeigte, dass das vierwöchige Training während Hypoxie zu einer Verringerung des Hüftumfangs und des preperitonealen Fettgewebes führte. Zudem konnte eine signifikante Verringerung der Pulswellengeschwindigkeit und des hs-CRP Wertes festgestellt werden. Shi et al. (2014) geben daher an, dass körperliches Training während kurzzeitiger Hypoxie einen präventiven Charakter bezüglich des abdominalen Fetts und bezüglich arterieller Steifigkeit aufweist. Die Pulswellengeschwindigkeit ist ein Kennzeichen für Artherosklerose (van Popele et al., 2001). Die Untersuchungen von Nishiwaki et al. (2011) und Katayama et al. (2013) konnten zeigen, dass ein Training während hypoxischer Bedingungen positive Effekte auf die „flow-mediated dilatation“ aufweist. Daher scheint körperliche Aktivität während Hypoxie zu vaskulären Anpassungen zu führen. Auch Shi et al. (2014) zeigten, dass Training unter hypoxischen Bedingungen zu einer verringerten Pulswellengeschwindigkeit und demnach zu einer verbesserten Gefäßfunktion führt.

Shi et al. (2014) weisen in ihrem Artikel darauf hin, dass, obwohl die Untersuchung zu verringerten CRP-Werten führte, die verantwortlichen Mechanismen dafür nicht erläutert werden können. Eine Erhebung des endothelial heme oxygenase-1 (HO-1) Enzyms könnte weiteren Aufschluss darüber bringen. HO-1 spielt eine Rolle in der Prävention von vaskulären Entzündungen (Abraham & Kappas, 2008).

Neben der signifikanten Verringerung des Hüftumfangs und des preperitonealen Fettgewebes in der Hypoxiegruppe im Vergleich zu Trainingsbeginn und –ende verringerten sich die

Leptin Werte tendenziell stärker in der Hypoxiegruppe als in der Normoxiegruppe. Leptin steht in Zusammenhang mit dem BMI sowie mit der Körperfettmasse (Ryan & Elahi, 1996). Da der Hüftumfang und das Körperfettgewebe einen Risikofaktor für das metabolische Syndrom darstellen, kommen die Autoren zum Schluss, dass hypoxisches Training präventiv im Hinblick auf die Entstehung eines metabolischen Syndroms sein kann (Shi et al., 2014). Dennoch merken die Forscher an, dass die Gründe, die für eine verringerte viszerale Fettmasse verantwortlich sind, nicht geklärt werden können. Dazu müssten noch weitere Studien durchgeführt werden.

Auch in den sogenannten „Austrian Moderate Altitude Studies (AMAS)“ wurde das metabolische Syndrom zu einem Forschungsschwerpunkt. Die Austrian Moderate Altitude Studies (AMAS) bestehen aus zwei großen Studien (AMAS I und AMAS II). Zu jeder Studie wurden mehrere Artikel über einen Zeitraum von 1998 bis 2008 publiziert. Der Artikel von Schoberberger et al. (2010) fasst die Ergebnisse der einzelnen Studien zusammen. Ziel der AMAS Untersuchungen war es hauptsächlich herauszufinden, wie sich moderate Höhengaufenthalte in den Alpen auf die Gesundheit auswirken. Einen großen Forschungsschwerpunkt stellten dabei die Konsequenzen von Höhenexpositionen bei Menschen mit metabolischem Syndrom dar. Vor allem die AMAS I Studie widmete sich Menschen mit dieser Erkrankung. Sie soll im folgenden Abschnitt genauer erläutert werden. Zudem wird die AMAS II Studie im Anschluss vorgestellt. Auch sie untersuchte Parameter, die das metabolische Syndrom beeinflussen können.

Die AMAS I Studie umfasste eine Pilot-Studie und eine Haupt-Studie. Die Forschungsfragen der AMAS I Studie waren i) Wie passen sich Personen mit metabolischem Syndrom an einen Höhengaufenthalt an, ii) Gibt es irgendwelche Risiken aufgrund moderater Hypoxie, iii) Bestehen positive Auswirkungen auf die Gesundheit durch einen Aktivurlaub in den Alpen verglichen mit einem Aktivurlaub im Tal?

Im Zuge der Pilotstudie nahmen 22 Männer mit metabolischem Syndrom teil. Der Aktivurlaub, der in Oberlech in den Tiroler Alpen auf 1700 Metern stattfand, nahm drei Wochen in Anspruch. Pro Woche wurden vier bis fünf Wanderungen in den Bergen absolviert. Es wurden vor, während und nach dem dreiwöchigen Höhengaufenthalt die Auswirkungen der Hypoxie auf das kardio-vaskuläre System (Blutdruck, Herzfrequenz, ...) untersucht. Zudem wurden Effekte von moderater Hypoxie auf glykämische Parameter erhoben. Auch der Lipid-Metabolismus stand im Mittelpunkt des Interesses..

Bereits nach einer Woche konnte ein verringerter systolischer Blutdruck festgestellt werden. Dieser Effekt bestand nach dem Urlaub noch für eine Woche. Nach den drei Wochen konnte eine verringerte durchschnittliche Herzfrequenz und ein reduzierter durchschnittlicher Blutdruck erhoben werden (Schoberberger et al., 2003). Zudem wiesen die Probanden nach dem Urlaub eine verminderte Insulin Resistenz auf (mittels Homeostasis Model Assessment Index, HOMA erhoben), sowie einen niedrigeren Wert der Blutglukose im Vergleich zu den Werten, die vor dem Urlaub erhoben wurden. Im Weiteren zeigte sich nach dem Aktivurlaub in der Höhe eine Steigerung des HDL Cholesterins, Serum Erythropoetins sowie der Retikulozyten.

Die Hauptstudie hatte zum Ziel herauszufinden, ob diese Effekte höhenpezifisch oder urlaubsspezifisch waren. Dazu konnten 71 Männer mit metabolischem Syndrom rekrutiert werden. Sie wurden zufällig einer Höhengruppe (1700m) oder einer Talgruppe (200m) zugewiesen. Wiederum wurden in beiden Gruppen innerhalb von drei Wochen zwölf moderate Wandertouren absolviert. Entspannungsaktivitäten standen ebenfalls am Programm.

Es konnte festgestellt werden, dass es bei Patienten mit metabolischem Syndrom zu keiner Verschlechterung der kardialen Funktion aufgrund eines Aufenthalts in moderater Hypoxie kam. Dies konnte anhand von EKG Analysen ermittelt werden (Mair et al., 2008). Beide Gruppen wiesen während des gesamten Urlaubs einen niedrigeren Blutdruck auf (Greie et al., 2006). Im Weiteren hatten die Probanden am Ende der Intervention ein reduziertes Körpergewicht sowie einen verminderten Fettanteil. Auch das Gesamtcholesterin bzw. das LDL war in beiden Gruppen vermindert. Die Hypoxiegruppe zeigte bereits am ersten Tag der Höhenexposition mehr Retikulozyten und ein vermehrtes Serum EPO. Beide Gruppen zeigten eine verbesserte wahrgenommene Gesundheit (Strauss-Blasche et al., 2004).

Die AMAS I Studie kam also zum Ergebnis, dass ein Aktivurlaub alle vier Parameter, die das metabolische Syndrom bestimmen (Adipositas, Bluthochdruck, Typ II Diabetes und Dyslipidemie), verbessern kann. Anzumerken gilt jedoch, dass diese Parameter unabhängig von der Höhe erzielt wurden. Einen Effekt hatte die Höhe auf eine Stimulierung der Erythropoese, was zu einer Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve führte. Dadurch kann eine verbesserte Sauerstoffnutzung im Gewebe, auch während der Belastung, erfolgen (Schoberberger et al., 2005). Insgesamt scheinen die Effekte jedoch durch den Urlaub an sich hervorgerufen worden zu sein. Der Urlaub führte zu einer Stressreduzierung bzw. kann der Urlaub mit einem „lifestyle change“ verglichen werden. Ein lifestyle change wird vor allem bei Patienten mit metabolischem Syndrom als therapeutisches Mittel angesehen (Alberti et al.,

2005). Die AMAS I Studie konnte zeigen, dass ein Aktivurlaub einem lifestyle change gleichgesetzt werden kann und als eine mögliche Therapiestrategie angesehen werden kann (Schoberberger et al. 2010).

Die AMAS II Studie untersuchte weitere Aspekte, die die Gesundheit des Menschen mitbestimmen. Sie nahm sich zum Ziel, den Einfluss von Hypoxie in Kombination mit körperlicher Aktivität auf Progenitorzellen zu untersuchen. Progenitorzellen wandern bei Ischämie ins betroffene Gewebe (z.B. Herz) und bewirken dort die Neuentstehung von Blutgefäßen und verbessern die Funktion des Organs (Umemura & Higashi, 2008; Brunner, Engelmann & Franz, 2008). Eine gesteigerte Anzahl an zirkulierenden Progenitorzellen ist ein Hinweis für ein erhöhtes kardiovaskuläres Risiko. Es konnte bereits gezeigt werden, dass körperliche Aktivität bei Patienten mit Durchblutungsstörungen Progenitorzellen stimulieren kann (Adams et al., 2004; Steiner et al., 2005). Bei gesunden Menschen konnte dieser Effekt jedoch nicht nachgewiesen werden. Die Autoren stellten sich die Frage, ob durch moderate Hypoxie mit gleichzeitiger körperlicher Aktivität Progenitorzellen bei gesunden Menschen stimuliert werden könnten. Ein weiteres Vorhaben der AMAS II Studie war es, bio-psychische Parameter zu erheben. Zudem sollten die Effekte von kurzzeitiger Hypoxie auf das autonome Nervensystem erfasst werden.

13 gesunde Proband(inn)en konnten für die Untersuchung gefunden werden. Sie verbrachten eine Woche in Oberlech auf 1700 Metern und absolvierten fünf Wandertouren während dieser Woche.

Die Studie lieferte folgende Ergebnisse: Der einwöchige Aufenthalt in der Höhe in Kombination mit Wandertouren führte zu einem signifikanten Anstieg der Progenitorzellen im peripheren Blut. Über die Mechanismen dahinter können keine eindeutigen Aussagen getroffen werden, dazu sind weitere Studien notwendig. Dennoch könnte ein Aktivurlaub einen positiven Beitrag zur regenerativen Medizin leisten und somit neue therapeutische Ansätze liefern (Schoberberger et al., 2010).

In Bezug auf die Auswirkung des Aktivurlaubs auf bio-psychische Parameter konnten sehr positive Effekte erreicht werden. Zur Erhebung dieser Parameter wurden zwei Fragebögen benutzt. Zum einen der „WHO 5 questionnaire“ (Bech, 2004), um das Wohlbefinden zu erheben, und zum anderen der „EBF-24 Erholungs-Belastungsfragebogen“ (Kallus, 2005). Insgesamt sanken während der Woche in der Höhe alle Stressphänomene und alle Erholungsphänomene erfuhren einen Anstieg. Die Ergebnisse beim WHO Fragebogen waren nach dem Urlaub um 16,2% verbessert. Somit konnte in Bezug auf die bio-psychische

Gesundheit ein exzellenter Effekt eines Aktivurlaubs in den Alpen erzielt werden (Schobersberger et al., 2010).

Die Auswirkungen des Höheng Aufenthalts auf das autonome Nervensystem wurden mittels Messungen zur Herzfrequenzvariabilität (HFV) untersucht. Anhand einer speziellen Software wurde dabei die Vagusaktivität bestimmt. Die Proband(inn)en zeigten eine gesteigerte Vagusaktivität in Ruhe nach dem einwöchigen Aktivurlaub. Die Autoren begründen dieses Resultat mit einer verbesserten Atmung nach dem Urlaub. Die Atmung nimmt eine wichtige Rolle in Hinblick auf die kurzzeitige Herzfrequenzvariabilität ein (Eckberg, 2003). Die Daten der HFV während der Belastung scheinen kontrovers zu sein. Insgesamt kann jedoch aus Sicht der Autoren ein Aktivurlaub in moderater Höhe zu einer gesteigerten Vagusaktivierung führen.

Abschließend sollte erwähnt werden, dass in der AMAS II Studie keine Kontrollgruppe vorhanden war, daher müssen sämtliche Ergebnisse als eine Konsequenz verschiedener Faktoren gesehen werden (moderate Höhe in Kombination mit aktiven und passiven Interventionen). Zudem merken die Forscher an, dass Ergebnisse nicht generell auf Urlaube in den Alpen übertragen werden können.

Zusammenfassend stellen Schobersberger et al. (2010) fest, dass eine Veränderung des Lebensstils, die zu einem gesünderen und aktiveren Leben führen soll, anhand eines wissenschaftlich basierten Gesundheitsurlaubs initiiert werden kann.

4.6 Der Einfluss von Hypoxie kombiniert mit körperlicher Aktivität bei Adipositas

Einige Studien berichten, dass intermittierende Hypoxieexpositionen positive Effekte in Hinblick auf eine Gewichtsreduktion bei adipösen Personen zeigen, sowohl in natürlicher Höhe (Kayser & Verges, 2013; Lippl et al., 2010), als auch in künstlicher Hypoxie (Netzer, Chytra & Kuppel, 2008; Wiesner et al., 2010). Mehrere physiologische Mechanismen könnten zu diesen Effekten führen. Sowohl Bewegung als auch Hypoxie stimulieren den Glukose- und Lipidstoffwechsel. Beide Stimuli wiederum steigern die Produktion des Hypoxie-induzierten Faktors (HIF) (Ameln et al., 2005). Dieser Faktor bestimmt Gene, die unter anderem beim Sauerstoff- und Glukosetransport bzw. im Rahmen der Glykolyse mitwirken. Zudem hat HIF Auswirkungen auf das Sättigungsgefühl (Wenger, 2002). Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass Hypoxie die Leptin Expression *in vitro* erhöht (Guerrero-Millo, Grosfeld & Issad, 2002, zit. n. Wiesner et al., 2010, S. 116). Dies könnte zu einer (unwillkürlichen) Gewichtsreduktion unter hypoxischen Bedingungen führen. Darüberhinaus

kann körperliche Aktivität unter hypoxischen Bedingungen einen weiteren Faktor anregen, der die mitochondriale Biogenese anregt und der im Zuge der Fettsäureoxidation in der Muskulatur eine entscheidende Rolle spielt. Gemeint ist der „peroxisome proliferator-activated receptor- γ co-activator-1 α “ (Gilde & Van Bilsen, 2003). Daher sollte die Kombination aus Bewegung und Hypoxie einen positiven Effekt auf den Stoffwechsel und auf die Körperzusammensetzung haben. Im folgenden Abschnitt werden nun Untersuchungen vorgestellt, die diese Forschungsfrage analysierten.

Eine aktuelle Studie von Kong, Zang und Hu (2013) untersuchte die Auswirkungen von intermittierender Hypoxie bei adipösen Menschen. Die Autoren weisen darauf hin, dass obwohl zahlreiche Untersuchungen positive Effekte bezüglich einer Gewichtsreduktion lieferten, nicht eindeutige Aussagen getroffen werden können, da in den bisherigen Studien zu dieser Thematik die Nahrungsaufnahme nicht klar kontrolliert wurde.

Ziel der Untersuchung von Kong, Zang und Hu (2013) war es, die Auswirkungen von intermittierendem hypoxischen Training in Kombination mit strenger diätetischer Kontrolle bei adipösen Personen zu ermitteln.

Es wurden 22 junge Personen (männlich und weiblich) zwischen 17 und 25 Jahren für ein vierwöchiges Trainingscamp rekrutiert. Sie wiesen einen BMI von mindestens 27,5 kg/m² auf. Die Proband(inn)en wurden entweder der Hypoxietrainingsgruppe oder der Normoxietrainingsgruppe zugeteilt. Beide Gruppen absolvierten wöchentlich 22 Stunden sportliche Aktivität. Die Hypoxiegruppe verbrachte von den 22 Stunden sechs Stunden in der Hypoxiekammer. Der Sauerstoffgehalt wurde allmählich von 16,4% auf 14,5% reduziert. Dieser Sauerstoffgehalt entspricht einer Höhe von 2000 bzw. 3000 Metern. Die Teilnehmer/innen übten aerobes Ausdauertraining bei 60-70% der HF_{max} aus, und sie machten zusätzliches Krafttraining bei 40-50% der Maximalkraft.

Tab. 18: Trainingsprotokoll

Physical activities	Normoxia (h/week)	Hypoxia/normoxia	
		(h/week)	Intensity
Running	4	2	60–70 % HR _{max} ; velocity <8 km/h
Cycling	0	1	50–70 % HR _{max}
Stepping	5	1	50–70 % HR _{max}
Dumbbell exercise	3	0	4–6 motions, 3 sets, 10–15 reps with light weight (<5 lb)
Strength training	4	2	40–50 % maximal strength for 4–6 motions, 3sets, 15–20 reps

Quelle: mod. n. Kong, Zang & Hu (2013, S. 593).

Während des vierwöchigen Trainingscamps standen die Teilnehmer/innen unter strenger Kontrolle eines Diätologen. Sämtliche Parameter, die in den folgenden Tabellen ersichtlich sind, wurden zwei Tage vor und einen Tag nach dem Camp erhoben.

Tab. 19: Veränderungen der Körperzusammensetzung vor und nach der vierwöchigen Intervention

Variable	HT (n=10, 5M5F)			NT (n=8, 5M3F)			Within group			Interaction group		
	Pre	Post	Δ HT	Pre	Post	Δ NT	F	p	Partial η^2	F	p	Partial η^2
Age (y)	19.8 ± 2.2 ^{b*}			22.3 ± 1.7								
Weight (kg)	99.0 ± 19.5	92.0 ± 17.9	-6.9 ± 1.9 ^{a***b**}	103.4 ± 24.7	99.1 ± 24.2	-4.3 ± 1.5 ^{a***}	186.98	0.00	0.92	9.96	0.01	0.38
FM (kg)	38.0 ± 11.7	31.1 ± 12.0	-6.9 ± 4.3 ^{a***b#}	36.7 ± 9.3	32.8 ± 8.0	-3.9 ± 1.8 ^{a***}	44.01	0.00	0.73	3.94	0.08	0.18
MM (kg)	57.1 ± 12.1	57.1 ± 10.9	0.0 ± 4.4	62.6 ± 16.0	62.2 ± 16.4	-0.4 ± 1.3	0.04	0.84	0.00	0.04	0.84	0.00
Water (kg)	44.7 ± 9.4	44.8 ± 8.6	0.1 ± 3.4	49.0 ± 12.6	48.8 ± 13.0	-0.2 ± 1.0	0.00	0.96	0.00	0.51	0.83	0.00
BMC (kg)	3.8 ± 0.7	3.8 ± 0.6	0.0 ± 0.3	4.2 ± 0.9	4.1 ± 0.9	-0.0 ± 0.1	0.03	0.87	0.00	0.09	0.73	0.00
BMI (kg/m ²)	34.7 ± 5.3	32.1 ± 4.8	-2.5 ± 0.7 ^{a***b#}	33.8 ± 5.6	33.6 ± 4.6	-0.3 ± 3.7	5.63	0.03	0.26	3.79	0.07	0.19
WHR	1.00 ± 0.09	0.94 ± 0.09	-0.06 ± 0.03 ^{a***b#}	1.00 ± 0.07	0.97 ± 0.07	-0.03 ± 0.01 ^{a***}	69.69	0.00	0.81	4.00	0.06	0.20

All values are means ± standard deviation

HT normobaric hypoxia training, NT normoxia training, Δ HT change from pre-intervention in HT, Δ NT change from pre-intervention in NT, FM fat mass, MM muscle mass, BMC bone mineral capacity, BMI body mass index, WHR waist/hip ratio

^a Comparison with pre-intervention

^b Comparison with normoxia

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, # $p < 0.10$

Quelle: mod. n. Kong, Zang & Hu (2013, S. 594).

Tab. 20: Hämodynamische Veränderungen vor und nach dem vierwöchigen Trainingscamp

Variable	HT (n=9, 5M4F)			NT (n=8, 5M3F)			Within group			Intervention group		
	Pre	Post	Δ HT	Pre	Post	Δ NT	F	p	Partial η^2	F	p	Partial η^2
HR (beats/min)	74 ± 10	61 ± 16	-12 ± 16 [#]	79 ± 19	63 ± 6	-16 ± 18 ^{a*}	11.35	0.00	0.43	0.46	0.51	0.03
SBP (mmHg)	131 ± 12	121 ± 11	-10 ± 12 ^{a*}	127 ± 29	123 ± 16	-3 ± 21	2.87	0.11	0.16	0.03	0.86	0.00
DBP (mmHg)	70 ± 6	65 ± 8	-4 ± 7	67 ± 12	66 ± 8	-1 ± 9	2.21	0.16	0.13	0.04	0.85	0.00
MBP (mmHg)	90 ± 7	84 ± 9	-6 ± 8 [#]	87 ± 17	85 ± 10	-2 ± 13	2.66	0.12	0.15	0.04	0.85	0.00

All values are means ± standard deviation

HT normobaric hypoxia training, NT normoxia training, Δ HT change from pre-intervention in HT, Δ NT change from pre-intervention in NT, HR heart rate, SBP systolic blood pressure, DBP diastolic blood pressure, MBP mean blood pressure

^a Comparison with pre-intervention

* $p < 0.05$, # $p < 0.10$

Quelle: mod. n. Kong, Zang & Hu (2013, S. 595).

Es konnte festgestellt werden, dass das vierwöchige Trainingscamp mit kontrollierter Ernährung in beiden Gruppen zu einer signifikanten Verbesserung des Körpergewichts, BMI, WHR und der Fettmasse führte. Zudem wurden der systolische Blutdruck und der mittlere

Blutdruck tendenziell verbessert. Die arterielle Steifigkeit (mittels der Pulswellengeschwindigkeit und des Knöchel-Arm-Index gemessen) hingegen konnte durch die vierwöchige Intervention nicht verbessert werden. Darüber hinaus konnten durch das Training unter Hypoxie signifikant stärkere Verbesserungen des Körpergewichts, sowie größere Verbesserungen des BMI, WHR, der Fettmasse und des systolischen Blutdrucks erzielt werden.

Das Training unter hypoxischen Bedingungen führte zu einem zusätzlichen Gewichtsverlust von 2,7%. Die Autoren merken an, dass der Mechanismus, der zu einem zusätzlichen Gewichtsverlust durch Hypoxie führt, eine Kombination aus einem erhöhten Kalorienverbrauch (Lippl et al., 2010) sowie einem verringerten Appetit aufgrund ständiger Anpassungsvorgänge an die Umwelt ist (Urdampilleta, 2012). Zudem sind auch neuroendokrine Faktoren an dem Mechanismus beteiligt (Kayser und Verges, 2013). In Bezug auf den stärker verringerten Blutdruck in der Hypoxiegruppe geben die Forscher an, dass Hypoxie möglicherweise den Durchmesser der Arteriolen steigert und dass dadurch eine periphere Vasodilatation entsteht (Urdampilleta et al., 2012). Darüberhinaus wird der periphere Widerstand verringert (Ostadal & Kolar, 2007). Im Weiteren weisen die Autoren darauf hin, dass die arterielle Steifigkeit nicht von den Verbesserungen des Blutdrucks und des Körpergewichts abhängt. Die arterielle Steifigkeit zeigte keine positiven Effekte, weder in der Hypoxie, noch in der Normoxiegruppe.

Zusätzlich geben die Autoren an, dass sie eine bessere Trainingsqualität in der Hypoxiegruppe beobachteten. Die Hypoxiegruppe konnte tendenziell eine größere Laufdistanz zurücklegen als die Normoxiegruppe. Dies erklären die Autoren durch eine mögliche verbesserte Leistung, die auch bei Athleten durch intermittierende Hypoxie beobachtet werden kann (Levine et al., 2005).

Zum Schluss weisen die Autoren darauf hin, dass chronische intermittierende Hypoxie zu einer gesteigerten Sympathikus Aktivierung und in weiterer Folge zu einem erhöhten Blutdruck führen kann. Daher sollte ein IHT bei adipösen Personen mit Vorsicht betrachtet werden. Als Limitation geben die Autoren eine geringe Gruppengröße an.

Abgesehen von Kong, Zang und Hu (2013), führten Wiesner et al. (2009) eine weitere Untersuchung durch, die die Auswirkung von Hypoxie und körperlicher Aktivität bei adipösen Menschen betrachtete. Wiesner et al. (2009) wollten erforschen, ob bei fettleibigen Menschen ein Training in Hypoxie im Vergleich zu einem Training in Normoxie gleiche oder bessere Ergebnisse hinsichtlich der Körperzusammensetzung und hinsichtlich metabolischer

Risikofaktoren erzielt. Es konnten insgesamt 45 Probanden (männlich und weiblich), die übergewichtig oder fettleibig waren für die Einfachblindstudie rekrutiert werden. Sie wurden entweder der Normoxie- oder der Hypoxiegruppe zugeteilt. Beide Gruppen trainierten in einer Kammer, wobei die Normoxiegruppe bei einem Sauerstoffpartialdruck von 150mmHg trainierte. Die Hypoxiegruppe hingegen trainierte bei einem PiO_2 von 103mmHg, dieser Druck entspricht einer natürlichen Höhe von 2740 Metern. Es wurde also ein hypobares Höhenklima geschaffen. Beide Gruppen waren über einen Zeitraum von vier Wochen (dreimal wöchentlich) am Laufband aktiv. Die Intensität lag in beiden Gruppen bei jener Herzfrequenz, die bei 65% der VO_{2max} in Normoxie erreicht wurde. Daher hatten beide Gruppen dieselbe relative Intensität. Die VO_{2max} und weitere Parameter wurde mittels eines Stufentests im Vorhinein bestimmt. Nach Abschluss der Untersuchung wurde ersichtlich, dass die Arbeitslast (Watt/kg/ VO_{2max}) in der Hypoxiegruppe um 17,5% geringer war ($p < 0.01$) als in der Normoxiegruppe. Die nachfolgende Tabelle zeigt die weiteren Ergebnisse der Untersuchung:

Tab. 21: Werte der Belastungstests und kardiovaskuläre und respiratorische Risikofaktoren vor und nach der Intervention

	Hypoxia group		Normoxia group	
	Before	After	Before	After
Maximal				
VO_{2max} , ml/kg/min	36 ± 1.5	38 ± 1.4	32 ± 1.2	33 ± 1.3
Lactate _{max} , mmol/l	7.5 ± 0.6	6.7 ± 0.4	8.7 ± 0.7	7.6 ± 0.5
TtE, min:ss	18:47 ± 01:29	22:02 ± 01:21	16:05 ± 01:08	18:47 ± 01:15
Anaerobic threshold				
RQ	0.99 ± 0.02	0.93 ± 0.01*	0.97 ± 0.02	0.95 ± 0.02
Lactate, mmol/l	4.1 ± 0.4	3.5 ± 0.3*	4.4 ± 0.3	4.3 ± 0.3
Risk factors				
Systolic BP, mmHg	128 ± 3.0	126 ± 2.6	129 ± 2.9	126 ± 2.5
Diastolic BP, mmHg	83 ± 2.1	80 ± 1.7	80 ± 2.2	79 ± 1.7
LDL, mg/dl	115 ± 5.1	112 ± 6.1	121 ± 7.8	116 ± 9.8
Fat-free mass, %	69 ± 1.9	71 ± 2*	68 ± 1.4	68 ± 1.6
Waist circumference, cm	99 ± 2.9	95 ± 2.5*	92 ± 2.9	90 ± 2.7
Fasting insulin, mU/ml	8.4 ± 1.3	5.3 ± 0.7*	9.7 ± 1.5	6.5 ± 0.7*
HOMA index	1.9 ± 0.3	1.1 ± 0.2*	2.1 ± 0.3	1.4 ± 0.2*

Data are mean ± s.e.m.

BP, blood pressure; HOMA, homeostasis model assessment; LDL, low-density lipoprotein; RQ, respiratory quotient; TtE, time to exhaustion; VO_2 , oxygen uptake.

* $P < 0.05$ compared with before training.

Quelle: mod. n. Wiesner et al. (2009, S. 118).

Hinsichtlich der Körperzusammensetzung konnte ebenfalls ein signifikantes Ergebnis in der Hypoxiegruppe festgestellt werden. Die Hypoxiegruppe wies nach der Trainingsintervention eine signifikant höhere fettfreie Masse auf. Im Weiteren wiesen beide Gruppen nach der

vierwöchigen Ausdauertrainingsphase ein signifikant verringertes Nüchterninsulin auf. Auch der HOMA Index verbesserte sich in beiden Gruppen signifikant.

Die Autoren führen eine Reduktion der Fettmasse auf eine mögliche gesteigerte Lipid Oxidation in der Hypoxiegruppe zurück.

Wiesner et al. (2010) weisen darauf hin, dass beide Gruppen den gleichen kardiovaskulären Stimulus hatten, da sie mit derselben Herzfrequenz trainierten. Die Arbeitslast hingegen war in der Hypoxiegruppe signifikant geringer. Trotzdem führte das Ausdauertraining in Hypoxie zu ähnlich guten Adaptionen hinsichtlich metabolischer Marker und sogar zu stärkeren Verbesserungen hinsichtlich der Körperzusammensetzung. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass ein Training in Normoxie ähnliche Verbesserungen der Fitness und der metabolischen Risikofaktoren bringt wie ein Training mit geringerer Arbeitslast in Hypoxie. Durch die Verwendung von Hypoxie kann ein zusätzlicher Effekt in Bezug auf eine verbesserte Körperzusammensetzung erzielt werden. Eine geringere Arbeitslast zieht eine reduzierte Belastung der Gelenke nach sich. Dementsprechend könnte das Risiko für orthopädische Verletzungen, die bei adipösen Menschen eine Rolle spielen, vermindert werden (Wiesner et al., 2009).

4.7 Gesundheitliche Folgen von Höhengefahren

Im ersten Abschnitt der vorliegenden Masterarbeit konnte dargestellt werden, dass ein Höhentherapie die Leistungsfähigkeit steigern kann. Anhand des zweiten Abschnitts der Arbeit wird ersichtlich, dass der Einsatz von Hypoxie als gezieltes therapeutisches Mittel bei unterschiedlichen Erkrankungen große Anwendung findet. Das letzte Kapitel des zweiten Abschnitts widmet sich den gesundheitlichen Auswirkungen und Risiken von kurz- und langzeitigen Aufenthalten in der Höhe, die nicht im Rahmen von therapeutischen Zwecken vorkommen. Im Vordergrund steht dabei Hypoxieexposition in natürlicher Höhe. Zum Schluss des Kapitels wird eine Studie vorgestellt, die den Einfluss von Hypoxie auf Merkmale des Immunsystems bestimmte.

Ein Aufenthalt in natürlicher Höhe kann zum einen durch geografische Bedingungen der Wohnsituation gegeben sein oder zum anderen durch Freizeitaktivitäten wie Bergsteigen, Schifahren, etc. Daneben sind Piloten, und Pilotinnen sowie Flugbegleiter/innen oder andere Berufsgruppen wie Brandschutzarbeiter/innen unterschiedlich großen Höhen ausgesetzt. Bartscher (2010) versuchte in seinem Beitrag eine Höhe zu definieren, die für den Menschen die Gesundheitsverträglichkeitsgrenze nicht überschreitet. Grundsätzlich kann gesagt werden,

dass der akute Aufenthalt in Höhen von 2500-3000 Metern bzw. der inspiratorische Sauerstoffgehalt (FiO_2) bis zu 15% von allen Personengruppen gut vertragen wird, sofern keine kardiovaskulären oder respiratorischen Erkrankungen vorliegen. Trotzdem werden schon auf Höhen unter 2000 Metern körperliche Anpassungsreaktionen beobachtet. Diese Adaptionen wurden großteils in den einzelnen Kapiteln des zweiten Abschnitts der vorliegenden Arbeit bereits aufgegriffen. Zu den Anpassungsmechanismen zählen beispielsweise eine verstärkte Ventilation, eine zelluläre Hypoxieantwort, die vor allem durch den „hypoxia inducible factor“ HIF vermittelt wird, und eine Aktivierung des sympathischen Nervensystems. Zudem kann sich der Grundumsatz erhöhen (Brooks & Butterfield, 2001, zit. n. Burtcher, 2010, S. 365). Gesundheitliche Beschwerden treten mit zunehmender Höhe häufiger auf. Die Inzidenz der akuten Bergkrankheit beispielsweise erhöht sich mit steigender Höhe linear (Maggiorini, Bühler, Walter & Oelz, 1990). Dabei treten vor allem Kopfschmerzen oder auch gastrointestinale Beschwerden oder Schwindel und Schlafprobleme auf. Ursache für ein Erscheinen der akuten Bergkrankheit kann ein zu rascher Aufstieg bei nicht akklimatisierten Personen sein. Zu weiteren pathologischen Hypoxiereaktionen zählen das Höhenlungenödem und das Höhenhirnödem, die jedoch bei Aufenthalten unter 3000 Metern praktisch nicht auftreten (Bärtsch & Gibbs, 2007; Wilson, Newman & Imray, 2009). Burtcher (2010, S. 369) kommt daher zu folgendem Schluss: „Unter Berücksichtigung eines Sicherheitspuffers können somit Höhen bis 2700m oder FiO_2 -Werte bis 15% als durchaus gesundheitsverträglich erachtet werden.“ Auch bei Kindern, älteren Menschen und Schwangeren stellt ein Höhengaufenthalt bis 3000 Metern keine Gesundheitsgefährdung dar (Burtcher, 2010).

Abgesehen von kurzzeitigen Aufenthalten in der Höhe, sind viele Menschen aufgrund ihrer Wohnsituation, verschieden starken Höhen auf Dauer ausgesetzt. Weltweit leben mehr als 140 Millionen Menschen über 2500 Meter (Penalozza & Arias-Stella, 2007), wobei auch ganzjährig bewohnte Siedlungen über 5000 Meter bestehen (Burtcher, 2010). Der Review von Burtcher (2013) beschäftigt sich mit den gesundheitlichen Folgen von Langzeitaufenthalten in der Höhe. Dabei wird auf die Entwicklung verschiedener Krankheiten, wie kardiovaskuläre Krankheiten, COPD oder Krebs aufgrund der Höhenexposition eingegangen.

Grundsätzlich sind es viele Faktoren, die bestimmen, ob sich eine bestimmte Krankheit entwickelt oder nicht. Ein Zusammenspiel aus genetischen und umweltbedingten Faktoren mögen Einfluss auf die Gesundheit oder Krankheit des Menschen haben (Latham, Sapienza & Engel, 2012). Im Zuge des Aufenthalts in der Höhe treten weitere Faktoren auf, die Einfluss

auf die Gesundheit des Menschen nehmen. Dazu zählen die Hypoxie oder die vermehrte UV-Strahlung (Prabhakar & Semenza, 2012). Burtscher (2013) führt in seinem Beitrag einige Studien an, die die Höheneffekte auf die Mortalität von kardiovaskulären Erkrankungen betrachten. Dabei wird deutlich, dass eher positive Auswirkungen von dauerhaften Höhenexpositionen beobachtet werden. Es besteht insgesamt eine geringere kardiovaskuläre und zerebrovaskuläre Mortalität bei Menschen, die dauerhaft in der Höhe leben. In Griechenland konnte von Baibas, Trichopoulou, Vordis und Trichopoulos (2005) erhoben werden, dass ein Leben in den Bergen zu einem geringeren Risiko führt, an einer koronaren Erkrankung zu sterben, als im Vergleich zu einer Region auf Meereshöhe (Hazard ratio 0.39 für Männer, 0.46 für Frauen).

Die Mechanismen, die zu den protektiven Effekten führen, sind nicht eindeutig belegt und bleiben spekulativ. Ein möglicher Grund könnte eine höhere Fitness sein, die die Bewohner/innen von Höhenregionen möglicherweise aufweisen (Mortimer, Monson & MacMahon, 1977). Aufgrund der Tatsache, dass höher gelegene Regionen, wie die Alpen beispielsweise, ein kuptiertes Gelände bieten, das für den Menschen im alltäglichen Leben oft eine Herausforderung darstellt, könnten sich bei den Bewohnern dieser Regionen höhere Fitnesslevel entwickeln (Burtscher, 2004). Ein weiterer Faktor, der zur verringerten kardiovaskulären Mortalitätsrate beiträgt, könnte der Hypoxie-induzierte-Faktor HIF 1 sein, der durch den verminderten Sauerstoffgehalt stimuliert wird. Er reguliert verschiedene Mechanismen wie die Erythropoese oder die Angiogenese beispielsweise. Zudem wird HIF-1, das einen Risikofaktor für kardiovaskuläre Erkrankungen darstellt, durch HIF 1 vermindert (Sullivan, Bailey & Zacharski, 2010). Im Weiteren kommt es während körperlicher Aktivität in der Höhe zu einem Stimulus, der mit intermittierender Hypoxie vergleichbar ist. Passt sich der Organismus an einen solchen Stimulus an, ist er künftig resistenter gegenüber weiteren möglichen schweren hypoxischen Stimuli und gegenüber anderen Stressfaktoren (Cai, Luo, Zhan & Semenza, 2013). Die erhöhte UV-Strahlung in der Höhe könnte ebenfalls eine Rolle in Bezug auf die reduzierte kardiovaskuläre Mortalität spielen, da eine höhere Konzentration des Thrombus-schützenden Vitamin D besteht (Scragg, 1981). Ein weiterer Grund könnte eine verringerte Luftverschmutzung sein, die mit steigender Höhe vorzufinden ist (Faeh, Gutzwiller, Bopp & Swiss National Cohort Study Group, 2009). Burtscher (2013) merkt jedoch an, dass grundsätzlich die kardiovaskuläre und zerebrovaskuläre Mortalität in der Höhe reduziert zu sein scheint, bei bestehender Erkrankung jedoch können sich dauerhafte Höhengaufenthalte als eher schädlich erweisen. Diese Aussage kann auf die respiratorische Erkrankung COPD übertragen werden. Bei Patient(inn)en, mit

bestehender COPD können dauerhafte Höhengaufenthalte zu weiterer Atemnot und zur Entwicklung eines Cor Pulmonale führen (Ezzati et al., 2012; Pierson, 2000). Die Entwicklung bzw. die Prävalenz einer COPD scheint in höher gelegenen Regionen jedoch geringer zu sein (Burtscher, 2013). In Hinblick auf Krebserkrankungen kann festgestellt werden, dass bei zumindest einigen Formen von Krebs eine geringere Mortalitätsrate in höher gelegenen Gebieten vorzufinden ist. Das bereits vorhin genannte Vitamin D könnte auch in der Entwicklung von Krebs einen entscheidenden protektiven Effekt bringen (Hayes, 2010). Auch die Regelmäßigkeit von sportlicher Aktivität bei Bewohnern und Bewohnerinnen von mehr oder weniger höher gelegenen Gegenden ist ein wichtiger Schutzfaktor. Reguläre sportliche Betätigung kann die Inzidenz einer Krebserkrankung um 40 % reduzieren (Newton & Galvao, 2008). Vor allem bei Dickdarm- und Brustkrebs sollte sich regelmäßige körperliche Aktivität am meisten auswirken.

Abgesehen von den positiven Effekten der Höhe, könnte die erhöhte UV-Strahlung auch negative Mechanismen bewirken. Die hohe UV-Strahlung kann zur Entwicklung von Melanomen beitragen (Aceituno-Madera et al., 2011). Zudem bestehen bei bereits vorhandener Krebserkrankung eher negative Folgen von (dauerhaften) Höhenexpositionen, da HIF 1 den Tumor durch Angiogenese und der Bildung von Metastasen weiter fördert (Tang & Yu, 2013).

Es wird also ersichtlich, dass sowohl positive als auch negative Folgen auf die Gesundheit durch die Höhenexposition zu erwarten sind. Das Ausmaß der Höhe spielt dabei eine Rolle. Insgesamt werden eher moderate Höhen und nicht große oder sehr große Höhen als gesundheitsfördernd betrachtet (Burtscher, 2013).

Wie bereits erwähnt, wird die Gesundheit des Menschen durch die Interaktion mehrerer Faktoren beeinflusst. Das Immunsystem spielt dabei eine entscheidende Rolle. Bei exzessiven Aufenthalten in Hypoxie kann es zur Alterung von Immunzellen kommen (Larbi et al., 2007; van Baarle et al., 2005), was zu einem erhöhten Risiko führt, an einer Infektion bzw. an einer Autoimmunstörung zu erkranken.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels sollen anhand einer aktuellen Untersuchung die Effekte von körperlicher Aktivität unter hypoxischen Bedingungen auf einen Bereich des Immunsystems dargestellt werden. Dazu wird die Studie von Wang, Chen und Weng (2011) herangezogen.

Um die komplexe Thematik besser nachvollziehen zu können, werden kurz einige wichtige Begriffe, die in der Studie erläutert werden, erklärt.

1. Killer cell lectin-like receptor G1 (KLRG1): liefert Hinweise für die Alterung von T-Lymphozyten und wird mit einer altersverbundenen Dysfunktion des Immunsystems in Verbindung gebracht (Beyersdorf et al., 2007).
2. CD 28: ein Protein auf den T-Zellen; wenn T-Lymphozyten eine Verringerung des CD 28 aufweisen, kann das Risiko, eine Infektion oder Autoimmunerkrankung zu erleiden, steigen (Beck et al., 2003; Weng et al., 2009)
3. Interferon-Gamma (IFN- γ): ein Zytokin, das eine antivirale und antitumorale Wirkung sowie eine immunmodulatorische Wirkung besitzt.
4. Th 1 Zellen: Subgruppe der T-Helfer Zellen.

Es sind Studien wie jene von Wang und Lin (2010) vorhanden, die zeigen, dass akute Hypoxieexposition zu negativen Immunreaktionen führen können. Im Gegensatz dazu wurden Studien durchgeführt, die zeigten, dass durch Krafttraining oder Ausdauertraining über einen längeren Zeitraum die CD28-Molekül-Expression und in weitere Folge die IFN- γ Produktion von T-Lymphozyten gesteigert werden konnte. Diese Studien wurden jedoch in Normoxie durchgeführt (Kohut & Senchina, 2004; Shimizu et al., 2008). Wang et al. (2007) zeigten, dass schwere körperliche Aktivität oder akute intermittierende Hypoxie über einen Zeitraum von acht Wochen die entzündungsfördernde Zytokin Produktion (IL-1 β) unterdrückt.

Wang, Chen und Weng (2011) hatten daher die Hypothese, dass Training während Hypoxie die phänotypische Charakteristik und die Zytokin-Spiegel von T-Lymphozyten beeinflusst. Die Autoren gaben in ihrer Untersuchung an, dass bisher noch nicht untersucht wurde, ob hypoxische körperliche Aktivität die Expression von alters-verbundenen Molekülen und Zytokinen von T-Lymphozyten beeinflusst.

Das Ziel der Untersuchung von Wang, Chen und Weng (2011) war es, eine sichere und effektive hypoxische Trainingsstrategie zu finden, die zu einer Steigerung der aeroben Kapazität führt, und die zugleich durch eine Verzögerung der Alterung von T-Lymphozyten das Infektionsrisiko minimiert.

Es wurden 50 gesunde Männer für die Untersuchung rekrutiert. Sie wurden zufällig in fünf Gruppen eingeteilt:

1. Normoxic control (N-C): 21% O₂ in Ruhe
2. Hypoxic control (H-C): 15% O₂ in Ruhe
3. Normoxic exercise (N-T): Training unter 21% O₂ bei 50% W_{max}

4. Hypoxic-relative exercise (H-RT): Training unter 15% O₂ bei 50% HRR_{max}
5. Hypoxic-absolute exercise (H-AT): Training unter 15% O₂ bei 50% W_{max}

Trainiert wurde jeweils für 30 Minuten, fünf mal wöchentlich über einen Zeitraum von vier Wochen in einer Höhenkammer. Die N-C und H-C Gruppen hielten sich in einer sitzenden Position in der Kammer auf. Vor und nach dem vierwöchigen Training wurden Belastungstests am Rad Ergometer (graded exercise test) durchgeführt und Blutproben entnommen.

Tab. 22: Auswirkungen der unterschiedlichen Protokolle auf die Lymphozyten-Teilmenge-Anzahl und auf das Verhältnis zwischen CD4 und CD8 Lymphozyten im Blut

	H-AT		H-RT		N-T		H-C		N-C	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
<i>Total lymphocyte, ×10³ cells/μl</i>										
Rt	2.78 ± 0.23	2.98 ± 0.33	2.75 ± 0.12	2.57 ± 0.18	2.43 ± 0.15	2.27 ± 0.14	2.78 ± 0.19	2.82 ± 0.29	2.37 ± 0.16	2.78 ± 0.27
Ex	4.87 ± 0.35*	5.42 ± 0.32*	4.53 ± 0.24*	5.00 ± 0.34*	3.78 ± 0.30*	4.18 ± 0.18*	4.50 ± 0.25*	4.88 ± 0.44*	4.48 ± 0.30*	4.87 ± 0.28*
Rc	1.63 ± 0.24*	1.68 ± 0.27*	1.42 ± 0.12*	1.58 ± 0.08*	1.42 ± 0.09*	1.37 ± 0.09*	1.77 ± 0.13*	1.80 ± 0.15*	1.30 ± 0.14*	1.63 ± 0.13*
<i>CD3 lymphocyte, ×10³ cells/μl</i>										
Rt	2.14 ± 0.23	2.33 ± 0.26	2.21 ± 0.13	2.26 ± 0.17	1.89 ± 0.15	1.88 ± 0.15	2.08 ± 0.18	2.26 ± 0.25	1.96 ± 0.17	2.14 ± 0.27
Ex	2.90 ± 0.26*	3.31 ± 0.23*	2.95 ± 0.18*	3.22 ± 0.26*	2.51 ± 0.17*	2.63 ± 0.15*	2.59 ± 0.22*	2.85 ± 0.36*	2.48 ± 0.23*	2.90 ± 0.38*
Rc	1.23 ± 0.19*	1.30 ± 0.25*	1.06 ± 0.07*	1.17 ± 0.09*	1.04 ± 0.10*	1.02 ± 0.11*	1.24 ± 0.08*	1.40 ± 0.15*	0.91 ± 0.11*	1.23 ± 0.14*
<i>CD4 lymphocyte, ×10³ cells/μl</i>										
Rt	0.93 ± 0.12	1.11 ± 0.15	0.94 ± 0.10	1.08 ± 0.12	0.89 ± 0.07	0.89 ± 0.08	0.97 ± 0.06	1.10 ± 0.12	0.88 ± 0.06	0.93 ± 0.12
Ex	0.96 ± 0.12	1.17 ± 0.14	0.96 ± 0.10	1.11 ± 0.13	0.92 ± 0.07	1.08 ± 0.10	1.09 ± 0.1	1.13 ± 0.16	0.86 ± 0.05	0.96 ± 0.16
Rc	0.61 ± 0.11*	0.64 ± 0.13*	0.58 ± 0.05*	0.61 ± 0.05*	0.53 ± 0.05*	0.53 ± 0.06*	0.62 ± 0.02*	0.72 ± 0.07*	0.53 ± 0.04*	0.61 ± 0.07*
<i>CD8 lymphocyte, ×10³ cells/μl</i>										
Rt	1.06 ± 0.12	1.12 ± 0.18	0.98 ± 0.07	0.93 ± 0.08	0.95 ± 0.10	0.95 ± 0.10	1.11 ± 0.12	1.09 ± 0.12	0.92 ± 0.08	1.06 ± 0.13
Ex	1.83 ± 0.12*	2.34 ± 0.18* ⁺	1.77 ± 0.18*	1.97 ± 0.21*	1.46 ± 0.11*	1.75 ± 0.14*	1.79 ± 0.16*	1.97 ± 0.16*	1.78 ± 0.10*	1.83 ± 0.15*
Rc	0.63 ± 0.10*	0.66 ± 0.12*	0.48 ± 0.04*	0.55 ± 0.06*	0.51 ± 0.6*	0.50 ± 0.04*	0.63 ± 0.07*	0.65 ± 0.07*	0.47 ± 0.05*	0.63 ± 0.06*
<i>CD8^{bright} lymphocyte, ×10³ cells/μl</i>										
Rt	0.73 ± 0.13	0.90 ± 0.12	0.77 ± 0.06	0.74 ± 0.07	0.75 ± 0.08	0.78 ± 0.09	0.82 ± 0.11	0.85 ± 0.10	0.68 ± 0.06	0.73 ± 0.10
Ex	1.10 ± 0.09*	1.47 ± 0.09* ⁺	1.15 ± 0.14*	1.29 ± 0.15*	0.99 ± 0.09*	1.16 ± 0.07*	1.05 ± 0.13*	1.22 ± 0.13*	1.06 ± 0.06*	1.10 ± 0.13*
Rc	0.51 ± 0.09*	0.52 ± 0.10*	0.36 ± 0.02*	0.41 ± 0.05*	0.40 ± 0.05*	0.39 ± 0.04*	0.43 ± 0.05*	0.49 ± 0.07*	0.34 ± 0.03*	0.51 ± 0.15*
<i>CD4/CD8 lymphocyte, ratio</i>										
Rt	0.91 ± 0.04	0.99 ± 0.07	0.96 ± 0.08	1.16 ± 0.09	0.94 ± 0.07	0.94 ± 0.09	0.87 ± 0.08	1.01 ± 0.11	0.96 ± 0.09	0.88 ± 0.07
Ex	0.52 ± 0.05*	0.50 ± 0.04*	0.54 ± 0.10*	0.56 ± 0.05*	0.63 ± 0.07*	0.62 ± 0.05*	0.61 ± 0.03*	0.57 ± 0.06*	0.48 ± 0.03*	0.52 ± 0.05*
Rc	0.97 ± 0.06	0.97 ± 0.05	1.21 ± 0.14	1.11 ± 0.10	1.04 ± 0.09	1.06 ± 0.07	0.98 ± 0.11	1.11 ± 0.09	0.91 ± 0.06	0.97 ± 0.05

Values are mean ± SE. H-AT, hypoxic-absolute exercise group; H-RT hypoxic-relative exercise group; N-T, normoxic exercise group; H-C, hypoxic control group; N-C normoxic control group. Pre, pre-intervention and Post, post-intervention. Rt, resting; Ex, immediately after exercise; and Rc, 2 h after exercise.

* p < 0.05, Rt vs. Ex or Rc.

⁺ p < 0.05, Pre vs. Post.

Quelle: mod. n. Wang, Chen und Weng (2011, S. 271).

Tab. 23: Auswirkungen der unterschiedlichen Protokolle auf die aktivitätsabhängigen Lymphozyten-Teilmenge-Anzahl im Blut

Table 3
Effects of various normoxic and hypoxic regimens on activation-related lymphocyte subset counts in blood.

	H-AT		H-RT		N-T		H-C		N-C	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
<i>CD62L⁺ lymphocyte, × 10³ cells/μl</i>										
<i>CD62L/CD3</i>										
Rt	1.58 ± 0.07	1.74 ± 0.07	1.61 ± 0.06	1.68 ± 0.05	1.48 ± 0.03	1.53 ± 0.03	1.59 ± 0.07	1.83 ± 0.07	1.44 ± 0.02	1.48 ± 0.02
Ex	1.64 ± 0.12	1.93 ± 0.13	1.83 ± 0.07	1.93 ± 0.10	1.67 ± 0.07	1.70 ± 0.06	1.75 ± 0.08	2.00 ± 0.08	1.50 ± 0.03	1.70 ± 0.06
Rc	0.88 ± 0.04 [*]	0.96 ± 0.04 [*]	0.76 ± 0.03 [*]	0.79 ± 0.04 [*]	0.82 ± 0.02 [*]	0.80 ± 0.01 [*]	0.97 ± 0.04 [*]	1.11 ± 0.03 [*]	0.65 ± 0.02 [*]	0.81 ± 0.02 [*]
<i>CD62L/CD4</i>										
Rt	0.80 ± 0.02	0.95 ± 0.02 [*]	0.79 ± 0.06	0.91 ± 0.05	0.80 ± 0.04	0.80 ± 0.04	0.86 ± 0.02	0.90 ± 0.03	0.86 ± 0.03	0.80 ± 0.03
Ex	0.77 ± 0.03	0.93 ± 0.05 [*]	0.77 ± 0.07	0.87 ± 0.07	0.80 ± 0.03	0.90 ± 0.02	0.95 ± 0.04	0.99 ± 0.03	0.81 ± 0.04	0.81 ± 0.05
Rc	0.50 ± 0.02 [*]	0.55 ± 0.01 [*]	0.47 ± 0.01 [*]	0.49 ± 0.02 [*]	0.47 ± 0.01 [*]	0.47 ± 0.03 [*]	0.55 ± 0.02 [*]	0.64 ± 0.02 [*]	0.56 ± 0.03 [*]	0.55 ± 0.03 [*]
<i>CD62L/CD8</i>										
Rt	0.66 ± 0.05	0.65 ± 0.06	0.61 ± 0.04	0.59 ± 0.04	0.64 ± 0.03	0.70 ± 0.04	0.69 ± 0.07	0.67 ± 0.06	0.56 ± 0.03	0.61 ± 0.02
Ex	0.86 ± 0.08 [*]	0.96 ± 0.09 [*]	0.87 ± 0.04 [*]	0.96 ± 0.04 [*]	0.83 ± 0.05 [*]	0.97 ± 0.04 [*]	0.87 ± 0.09 [*]	0.92 ± 0.08 [*]	0.84 ± 0.07 [*]	0.88 ± 0.07 [*]
Rc	0.37 ± 0.04 [*]	0.39 ± 0.03 [*]	0.28 ± 0.02 [*]	0.31 ± 0.03 [*]	0.34 ± 0.01 [*]	0.35 ± 0.01 [*]	0.41 ± 0.04 [*]	0.44 ± 0.03 [*]	0.27 ± 0.02 [*]	0.38 ± 0.03 [*]
<i>CD62L/CD8^{bright}</i>										
Rt	0.50 ± 0.03	0.57 ± 0.04	0.52 ± 0.03	0.50 ± 0.03	0.55 ± 0.02	0.56 ± 0.03	0.60 ± 0.05	0.61 ± 0.05	0.46 ± 0.05	0.50 ± 0.03
Ex	0.51 ± 0.06	0.64 ± 0.08	0.51 ± 0.05	0.67 ± 0.06	0.48 ± 0.03	0.53 ± 0.03	0.51 ± 0.05	0.59 ± 0.05	0.51 ± 0.07	0.51 ± 0.04
Rc	0.33 ± 0.03 [*]	0.33 ± 0.03 [*]	0.23 ± 0.02 [*]	0.25 ± 0.02 [*]	0.29 ± 0.01 [*]	0.29 ± 0.01 [*]	0.32 ± 0.02 [*]	0.36 ± 0.02 [*]	0.21 ± 0.03 [*]	0.33 ± 0.03 [*]
<i>CD11a⁺ lymphocyte, × 10³ cells/μl</i>										
<i>CD11a/CD3</i>										
Rt	0.75 ± 0.01	0.96 ± 0.11 [*]	0.83 ± 0.07	0.87 ± 0.06	0.67 ± 0.02	0.65 ± 0.07	0.78 ± 0.02	0.73 ± 0.04	0.78 ± 0.07	0.75 ± 0.03
Ex	1.61 ± 0.20 [*]	2.01 ± 0.23 ^{*,†}	1.45 ± 0.14 [*]	1.73 ± 0.12 [*]	1.33 ± 0.08 [*]	1.42 ± 0.11 [*]	1.40 ± 0.08 [*]	1.47 ± 0.09 [*]	1.46 ± 0.10 [*]	1.61 ± 0.08 [*]
Rc	0.39 ± 0.06 [*]	0.51 ± 0.07 ^{*,†}	0.35 ± 0.04 [*]	0.44 ± 0.13 [*]	0.33 ± 0.03 [*]	0.36 ± 0.05 [*]	0.46 ± 0.03 [*]	0.49 ± 0.01 [*]	0.33 ± 0.03 [*]	0.39 ± 0.01 [*]
<i>CD11a/CD4</i>										
Rt	0.25 ± 0.03	0.33 ± 0.04 [*]	0.24 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.23 ± 0.05	0.29 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.24 ± 0.03	0.26 ± 0.02
Ex	0.31 ± 0.03 [*]	0.49 ± 0.06 ^{*,†}	0.29 ± 0.03 [*]	0.37 ± 0.02 [*]	0.33 ± 0.02 [*]	0.35 ± 0.06 [*]	0.36 ± 0.02 [*]	0.37 ± 0.04 [*]	0.34 ± 0.03 [*]	0.31 ± 0.02 [*]
Rc	0.18 ± 0.03 [*]	0.20 ± 0.04 [*]	0.14 ± 0.01 [*]	0.20 ± 0.03 [*]	0.14 ± 0.01 [*]	0.16 ± 0.03 [*]	0.16 ± 0.01 [*]	0.18 ± 0.01 [*]	0.10 ± 0.01 [*]	0.14 ± 0.01 [*]
<i>CD11a/CD8</i>										
Rt	0.46 ± 0.06	0.63 ± 0.08 [*]	0.48 ± 0.04	0.45 ± 0.03	0.43 ± 0.03	0.39 ± 0.07	0.53 ± 0.03	0.49 ± 0.03	0.46 ± 0.03	0.51 ± 0.02
Ex	1.26 ± 0.09 [*]	1.92 ± 0.18 ^{*,†}	1.46 ± 0.14 [*]	1.71 ± 0.13 [*]	1.12 ± 0.09 [*]	1.37 ± 0.09 [*]	1.310.09 [*]	1.55 ± 0.10 [*]	1.44 ± 0.09 [*]	1.70 ± 0.12 [*]
Rc	0.29 ± 0.04 [*]	0.36 ± 0.04 ^{*,†}	0.24 ± 0.12 [*]	0.31 ± 0.03 [*]	0.23 ± 0.02 [*]	0.24 ± 0.04 [*]	0.31 ± 0.02 [*]	0.31 ± 0.01 [*]	0.25 ± 0.02 [*]	0.29 ± 0.02 [*]
<i>CD11a/CD8^{bright}</i>										
Rt	0.33 ± 0.04	0.44 ± 0.05 [*]	0.32 ± 0.04	0.31 ± 0.03	0.27 ± 0.02	0.27 ± 0.05	0.30 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.28 ± 0.02
Ex	0.63 ± 0.06 [*]	1.09 ± 0.09 ^{*,†}	0.66 ± 0.06 [*]	0.85 ± 0.10 [*]	0.53 ± 0.04 [*]	0.66 ± 0.06 [*]	0.57 ± 0.04 [*]	0.66 ± 0.04 [*]	0.67 ± 0.03 [*]	0.68 ± 0.03 [*]
Rc	0.21 ± 0.03 [*]	0.23 ± 0.03 [*]	0.15 ± 0.02 [*]	0.20 ± 0.02 [*]	0.13 ± 0.02 [*]	0.14 ± 0.02 [*]	0.15 ± 0.02 [*]	0.17 ± 0.01 [*]	0.14 ± 0.02 [*]	0.16 ± 0.02 [*]

Values are mean ± SE. H-AT, hypoxic-absolute exercise group; H-RT hypoxic-relative exercise group; N-T, normoxic exercise group; H-C, hypoxic control group; N-C, normoxic control group. Pre, pre-intervention and Post, post-intervention. Rt, resting; Ex, immediately after exercise; and Rc, 2 h after exercise.

^{*} p < 0.05, Rt vs. Ex or Rc.

[†] p < 0.05, Pre vs. Post.

Quelle: mod. n. Wang, Chen und Weng (2011, S. 272).

Tab. 24: Auswirkungen der unterschiedlichen Protokolle auf die altersabhängige Lymphozyten-Teilengen- Anzahl im Blut

Table 4
Effects of various normoxic and hypoxic regimens on senescence-related lymphocyte subset counts in blood.

	H-AT		H-RT		N-T		H-C		N-C	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
<i>CD28⁺ lymphocyte, × 10³ cells/μl</i>										
<i>CD28/CD3</i>										
Rt	1.03 ± 0.07	1.79 ± 0.07 [†]	1.07 ± 0.06	1.16 ± 0.08	1.12 ± 0.05	1.17 ± 0.07	1.04 ± 0.07	1.17 ± 0.13	0.92 ± 0.08	1.04 ± 0.10
Ex	1.08 ± 0.11	2.03 ± 0.23 ^{†*}	1.23 ± 0.11	1.47 ± 0.15	1.44 ± 0.04	1.56 ± 0.07	1.21 ± 0.06	1.41 ± 0.12	1.12 ± 0.09	1.26 ± 0.13
Rc	0.69 ± 0.04 [†]	1.03 ± 0.13 ^{†*}	0.56 ± 0.02 [†]	0.64 ± 0.03 [†]	0.63 ± 0.02 [†]	0.63 ± 0.03 [†]	0.59 ± 0.04 [†]	0.74 ± 0.05 [†]	0.46 ± 0.04 [†]	0.54 ± 0.04 [†]
<i>CD28/CD4</i>										
Rt	0.46 ± 0.04	0.99 ± 0.03 [†]	0.56 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.58 ± 0.01	0.59 ± 0.03	0.56 ± 0.04	0.65 ± 0.04	0.45 ± 0.03	0.51 ± 0.04
Ex	0.36 ± 0.04	0.91 ± 0.06 [†]	0.54 ± 0.03	0.66 ± 0.04	0.59 ± 0.02	0.70 ± 0.05	0.63 ± 0.03	0.65 ± 0.05	0.42 ± 0.03	0.46 ± 0.04
Rc	0.33 ± 0.03 [†]	0.59 ± 0.02 ^{†*}	0.36 ± 0.01 [†]	0.40 ± 0.01 [†]	0.34 ± 0.01 [†]	0.35 ± 0.01 [†]	0.35 ± 0.02 [†]	0.43 ± 0.02 [†]	0.22 ± 0.02 [†]	0.26 ± 0.02 [†]
<i>CD28/CD8</i>										
Rt	0.55 ± 0.03	0.73 ± 0.04 [†]	0.50 ± 0.03	0.45 ± 0.03	0.48 ± 0.02	0.53 ± 0.02	0.61 ± 0.06	0.59 ± 0.05	0.51 ± 0.03	0.50 ± 0.04
Ex	0.66 ± 0.05	1.07 ± 0.11 ^{†*}	0.60 ± 0.07	0.71 ± 0.10	0.56 ± 0.06	0.68 ± 0.05	0.69 ± 0.10	0.71 ± 0.06	0.66 ± 0.09	0.71 ± 0.06
Rc	0.34 ± 0.02	0.45 ± 0.03 ^{†*}	0.21 ± 0.01 [†]	0.24 ± 0.03 [†]	0.26 ± 0.01 [†]	0.27 ± 0.01 [†]	0.33 ± 0.03 [†]	0.39 ± 0.02 [†]	0.28 ± 0.02 [†]	0.33 ± 0.02 [†]
<i>CD28/CD8^{bright}</i>										
Rt	0.42 ± 0.03	0.68 ± 0.03 [†]	0.37 ± 0.03	0.37 ± 0.02	0.44 ± 0.01	0.48 ± 0.02	0.39 ± 0.04	0.43 ± 0.05	0.31 ± 0.03	0.34 ± 0.03
Ex	0.49 ± 0.04	0.91 ± 0.04 ^{†*}	0.46 ± 0.04	0.53 ± 0.05	0.55 ± 0.02	0.57 ± 0.05	0.44 ± 0.03	0.54 ± 0.05	0.45 ± 0.05	0.47 ± 0.05
Rc	0.30 ± 0.02 [†]	0.40 ± 0.02 ^{†*}	0.18 ± 0.01 [†]	0.21 ± 0.02 [†]	0.24 ± 0.01 [†]	0.24 ± 0.01 [†]	0.20 ± 0.02 [†]	0.23 ± 0.02 [†]	0.16 ± 0.01 [†]	0.19 ± 0.01 [†]
<i>KLRG1⁺ lymphocyte, × 10² cells/μl</i>										
<i>KLRG1/CD3</i>										
Rt	0.40 ± 0.07	0.31 ± 0.06	0.31 ± 0.04	0.30 ± 0.10	0.43 ± 0.03	0.37 ± 0.06	0.43 ± 0.07	0.58 ± 0.08	0.35 ± 0.05	0.33 ± 0.04
Ex	0.80 ± 0.11 [†]	0.72 ± 0.14 [†]	0.80 ± 0.08 [†]	0.72 ± 0.06 [†]	0.63 ± 0.05 [†]	0.79 ± 0.17 [†]	0.85 ± 0.18 [†]	1.13 ± 0.16 [†]	0.70 ± 0.09 [†]	0.99 ± 0.07 [†]
Rc	0.29 ± 0.05 [†]	0.19 ± 0.06 [†]	0.21 ± 0.04 [†]	0.23 ± 0.03 [†]	0.24 ± 0.02 [†]	0.21 ± 0.04 [†]	0.28 ± 0.08 [†]	0.28 ± 0.05 [†]	0.18 ± 0.03 [†]	0.17 ± 0.02 [†]
<i>KLRG1/CD4</i>										
Rt	0.75 ± 0.10	0.39 ± 0.02 [†]	0.67 ± 0.04	0.59 ± 0.04	0.66 ± 0.07	0.63 ± 0.05	0.72 ± 0.11	0.71 ± 0.06	0.66 ± 0.12	0.71 ± 0.09
Ex	1.24 ± 0.18 [†]	0.75 ± 0.08 ^{†*}	0.91 ± 0.09 [†]	1.08 ± 0.06 [†]	1.23 ± 0.14 [†]	1.30 ± 0.15 [†]	1.40 ± 0.29 [†]	1.18 ± 0.14 [†]	0.99 ± 0.20 [†]	1.35 ± 0.16 [†]
Rc	0.51 ± 0.10 [†]	0.23 ± 0.04 ^{†*}	0.43 ± 0.03 [†]	0.38 ± 0.02 [†]	0.41 ± 0.03 [†]	0.37 ± 0.02 [†]	0.48 ± 0.09 [†]	0.38 ± 0.06 [†]	0.32 ± 0.09 [†]	0.32 ± 0.04 [†]
<i>KLRG1/CD8</i>										
Rt	1.43 ± 0.14	1.42 ± 0.45	1.46 ± 0.02	1.22 ± 0.17	1.55 ± 0.15	1.37 ± 0.15	1.50 ± 0.26	1.42 ± 0.20	1.40 ± 0.27	1.25 ± 0.12
Ex	4.66 ± 0.34 [†]	3.80 ± 0.36 ^{†*}	4.59 ± 0.44 [†]	3.94 ± 0.50 [†]	4.14 ± 0.29 [†]	5.17 ± 0.24 [†]	4.26 ± 0.67 [†]	4.40 ± 0.78 [†]	5.47 ± 0.55 [†]	5.54 ± 0.45 [†]
Rc	0.90 ± 0.18 [†]	0.85 ± 0.18 [†]	0.73 ± 0.16 [†]	0.82 ± 0.14 [†]	0.96 ± 0.11 [†]	0.86 ± 0.09 [†]	0.85 ± 0.13 [†]	0.85 ± 0.16 [†]	0.77 ± 0.15 [†]	0.87 ± 0.14 [†]
<i>KLRG1/CD8^{bright}</i>										
Rt	0.34 ± 0.04	0.27 ± 0.08	0.30 ± 0.08	0.42 ± 0.08	0.48 ± 0.05	0.44 ± 0.02	0.44 ± 0.08	0.35 ± 0.07	0.35 ± 0.09	0.34 ± 0.06
Ex	1.16 ± 0.11 [†]	0.80 ± 0.12 ^{†*}	1.01 ± 0.12 [†]	0.80 ± 0.14 [†]	1.18 ± 0.08 [†]	0.89 ± 0.07 [†]	1.09 ± 0.09 [†]	0.91 ± 0.05 [†]	0.99 ± 0.12 [†]	0.91 ± 0.07 [†]
Rc	0.16 ± 0.07 [†]	0.15 ± 0.03 [†]	0.18 ± 0.03 [†]	0.22 ± 0.02 [†]	0.26 ± 0.04 [†]	0.21 ± 0.02 [†]	0.23 ± 0.03 [†]	0.18 ± 0.02	0.22 ± 0.04 [†]	0.16 ± 0.03 [†]

Values are mean ± SE. H-AT, hypoxic-absolute exercise group; H-RT hypoxic-relative exercise group; N-T, normoxic exercise group; H-C, hypoxic control group; N-C, normoxic control group. Pre, pre-intervention and Post, post-intervention. Rt, resting; Ex, immediately after exercise; and Rc, 2 h after exercise.

[†] p < 0.05, Rt vs. Ex or Rc.

^{*} p < 0.05, Pre vs. Post.

Quelle: mod. n. Wang, Chen und Weng (2011, S. 273).

Die Studie lieferte folgende Ergebnisse: Das H-AT Training war im Hinblick auf eine gesteigerte aerobe Kapazität im Vergleich zu dem N-T oder H-RT Training effektiver. Zudem konnte beobachtet werden, dass das H-AT Training für vier Wochen die Expression der CD3, CD4, CD8 oder CD8^{bright} steigerte, was zur Ko-Stimulation von CD28 oder CD11a Molekülen führte. Im Weiteren wurden die alternde (KLRG1+) CD4 Lymphozytenanzahl im Blut in Ruhe reduziert. Gleichzeitig wurde die Mobilisation von alternden CD4, CD8 oder CD8^{bright} Lymphozyten ins periphere Blut während körperlicher Aktivität verringert. Darüber hinaus wurden durch das H-AT Training die IFN-γ Spiegel gesteigert und zugleich die MPO (Myeloperoxidase) und IL-6 Spiegel verringert.

Die gesteigerte CD28 Expression in T-Lymphozyten und der verringerte KLRG1, die durch H-AT Training induziert wurden, könnten zu einer Zunahme der T-Lymphozyten (clonal expansion) im Blut beitragen. Im Weiteren könnte die gesteigerte CD28 Expression, die möglicherweise eine vermehrte IFN-γ Produktion förderte, zu einer T-lymphozyt-vermittelten

antiviralen Immunität bei den H-AT Probanden führen. Die Autoren geben jedoch an, dass die Mechanismen, die dieser gesteigerten Expression des CD28 zu Grunde liegen, unklar sind. Sie führen aber weiter an, dass die Unterdrückung von oxidativen Stress und entzündungsfördernden Zytokinen durch das H-AT Training wahrscheinlich zu einer verstärkten Regulierung der CD28 Expression von T-Lymphozyten führte.

Zusammenfassend stellen Wang, Chen und Weng (2011) fest, dass das vierwöchige H-AT Training die aerobe Fitness aufgrund einer gesteigerten Ventilation und gesteigerten Sauerstoffnutzung im Gewebe verbesserte. Zugleich führte dieses hypoxische Training zu einer Unterdrückung der Alterung von T-Lymphozyten, die eine zunehmende Dominanz von Th1 Zytokinen induziert. Diese Ergebnisse können künftig dazu beitragen, ein sowohl effektives und zugleich ein Immunsystem-schützendes Protokoll für ein Hypoxie Training zu finden.

5. Diskussion

Ziel der vorliegenden Masterarbeit war es, den aktuellen Forschungsstand zur Anwendung von Hypoxie im Leistungs- und Gesundheitssport bzw. im Rahmen therapeutischer Maßnahmen aufzuzeigen. In Hinblick auf den Einsatz von Hypoxie im Leistungssport wurde zu Beginn auf die Anwendung von Hypoxie im Ausdauersport eingegangen. Dabei wurde versucht, aktuelle Erkenntnisse zur Durchführung eines Höhentrainings zu liefern und es wurden einzelne Themen, die derzeit von Forschern und Forscherinnen diskutiert werden, aufgegriffen. Die Frage nach der optimalen Höhe während des Höhentrainings sowie die Frage nach dem optimalen Zeitpunkt, wieder in Tallage zurückzukehren, stellten beispielsweise Diskussionspunkte dar, die im Rahmen der Masterarbeit behandelt wurden. Im Weiteren bilden auch die Anpassungsreaktionen, die eine Hypoxieexposition nach sich zieht, einen Forschungsschwerpunkt. Die Arbeit widmete sich im Weiteren dem Einsatz von intermittierender Hypoxie, die in vielen aktuellen Studien Anwendung findet. Abgesehen vom klassischen Ausdauersport, bieten Teamsportarten bzw. intermittierende Sportarten ein noch relativ junges Forschungsfeld zum Gebrauch von Hypoxie. Ein ähnlich junges Forschungsfeld, das jedoch möglicherweise mehr Aufmerksamkeit erlangt, stellt ein Krafttraining unter hypoxischen Bedingungen dar. Neben dem Blood Flow Restriction (BFR) bzw. Kaatsu Training rückt nun auch das Krafttraining unter systemischer Hypoxie weiter in den Vordergrund. Das zweite große Themengebiet, das im Rahmen der Arbeit behandelt wurde, war der Einsatz von vermindertem Sauerstoffgehalt im Gesundheitssport bzw. zu therapeutischen Zwecken. Der Gebrauch von Hypoxie bei Herzkreislauf- und Lungenerkrankungen, beim metabolischen Syndrom, bei Diabetes und Adipositas wurden dabei aufgezeigt.

Im Rahmen des Kapitels 3.1 wurde bereits kurz angedeutet, dass das Forschungsgebiet „Höhentaining“ im Leistungssport ein relativ schwieriges und weitläufiges Forschungsfeld darstellt. Es ist teilweise nicht leicht, aus der Theorie Rückschlüsse zu ziehen, die in der Praxis umgesetzt werden könnten. Aus der Sicht eines Trainers oder einer Trainerin ist es daher nicht einfach, anhand der aktuellen Literatur, plausible Empfehlungen für das Training zu erlangen. Je mehr Studien betrachtet werden, umso mehr bemerkt man, dass die Ergebnisse sehr oft variieren. Es ist schwer, Studien zu finden, die dieselbe Methodik verwendeten, ein vergleichbares Trainingsprotokoll, mit demselben Trainingsszustand der Proband(inn)en, etc. Natürlich muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass es nicht Aufgabe von Forschern und Forscherinnen ist, bereits vorhandene Studien zu duplizieren, sondern es sollen stets neue

Erkenntnisse gewonnen werden. Dazu müssen klarerweise wieder neue Forschungsfragen formuliert werden, die bisher noch nicht betrachtet wurden. Dementsprechend unterschiedlich sind daher auch die Resultate. Dennoch, würden mehr ähnliche Studien bestehen, die in ihrem Aufbau vergleichbar sind, könnten einheitliche Empfehlungen abgeleitet werden. Auch Millet et al. (2010), die in ihrem Review versuchen die verschiedenen Höhentrainingsmethoden zu vergleichen, erwähnen diese Problematik innerhalb der Höhentrainingsforschung. Dennoch probieren Millet et al. (2010) im Rahmen ihres Artikels, Empfehlungen bzw. eine Art Periodisierung für die Durchführung eines Höhentrainings zu entwickeln. Diese Leitlinien richten sich dabei an Ausdauersportler/innen, aber auch an Trainer/innen oder Sportler/innen von „laktaziden“ Sportarten und intermittierenden Sportarten bzw. Spielsportarten (vgl. Kapitel 3.2.5, Abb. 2). Dabei ist auffallend, dass die Autoren vor allem für den klassischen Ausdauersport, das LHTH Protokoll zu Beginn des Jahres empfehlen. Diese Empfehlung ist aus Sicht der Verfasserin nur schwer nachvollziehbar. Millet et al. (2010, S. 5) führen in ihrem Artikel folgendes an: „Since the 1990s, the LHTH method has largely been complemented by other hypoxic methods.“ Obwohl das LHTH, das, wie die Forscher erwähnen vor allem vor den 1990er Jahren zur Anwendung kam, durch andere Methoden ersetzt wurde, wird es für Athleten und Athletinnen dennoch empfohlen. Nicht nur in Ausdauersportarten sondern auch in „laktaziden“ und intermittierenden Sportarten sollte ein LHTH, wie in der Grafik veranschaulicht wird, durchgeführt werden. In einer gewissen Weise scheint diese Empfehlung aber einen Widerspruch darzustellen. Die Autoren jedenfalls merken an, dass während des Winters ein LHTH angemessen erscheint, da der damit verbundene Rückgang der Trainingsintensität zu diesem Zeitpunkt nicht von Bedeutung sei. Da die Autoren jedoch mehrere LHTH Blöcke empfehlen, besteht die Frage, ob sich diese Verringerung der Intensität nicht zu einem späteren Zeitpunkt der Saison negativ auswirken könnte. Möglicherweise wäre es besser, den einen oder anderen LHTH Block durch einen LHTL Block zu ersetzen, um die hohe Intensität aufrecht zu erhalten. Diese Empfehlungen für Ausdauersportler/innen sollten jedenfalls mit Vorsicht betrachtet werden. Abgesehen von Trainingsvorschlägen für Ausdauersportarten, liefern Millet et al. (2010) auch Angaben für eine mögliche Wettkampfvorbereitung mit Hilfe eines Höhentrainings für intermittierende Sportarten. Dazu zählen Sportarten wie Tennis und Squash oder Teamsportarten wie American Football oder Fußball (Millet et al., 2010; Girard et al., 2013). Betrachtet man die Trainingsempfehlungen der Autoren für diese Sportarten, ist ersichtlich, dass nur ein Hauptwettkampf während des ganzen Jahres eingeplant wurde. Dies ist kritisch zu hinterfragen und erscheint äußerst unrealistisch zu sein. Im Tennis beispielsweise steht

nahezu jede Woche ein Wettkampf an. Einen wirklichen Hauptwettkampf gibt es quasi nicht, wobei die vier Grand Slam Turniere (Australian Open, French Open, Wimbledon, US Open) die bedeutendsten Turniere der Saison darstellen. Auch im Fußball ist bekannt, dass es nicht nur einen Hauptwettkampf pro Saison gibt. Die Athleten sind im Laufe der Saison im Zuge der Bundesliga, Champions oder Europa League, Qualifikationsspiele, etc. ständig im Einsatz. Demnach kann die Empfehlung von Millet et al. (2010) für eine mögliche Trainingsvorbereitung mit einem bzw. mehreren Höhentrainings in dieser Art und Weise nicht umgesetzt werden, da sie sich an einen Hauptwettkampf orientiert. Abgesehen von Millet et al. (2010) liefern auch Burtscher (2005) und Chapman et al. (2014a) und Chapman et al. (2014b) Hinweise zur Durchführung eines Höhentrainings. Die optimale Höhe, auf der während eines LHTL Höhentrainings gewohnt werden soll, liegt zwischen 2000 und 2500 Metern. Im Vergleich dazu geben Millet et al. (2010) eine Höhe von 2200 bis 3100 Metern an, um optimale hämatologische Anpassungen zu erzielen. Dabei ist jedoch zu überlegen, wie sich eine Höhe von über 3000 Metern, abgesehen von gewinnbringenden hämatologischen Adaptionen, auf die Leistungsfähigkeit in Tallage auswirkt. Je größer die Höhe während eines Höhentrainings, umso eher steigt die Gefahr von negativen Begleiterscheinungen (verminderter Schlaf, milde akute Bergkrankheit,...), die die Leistungsfähigkeit in Tallage reduzieren. Dementsprechend scheint die Empfehlung von Chapman et al. (2014a) plausibler zu sein. Im Weiteren gibt Burtscher (2005) konkrete Vorschläge zum Einsatz von Hypoxie bei Leistungssportlern. Diese Empfehlungen orientieren sich jedoch nicht am klassischen Höhenttraining (LHTL) sondern beziehen sich auf den Einsatz von intermittierender Hypoxie (vgl. Kapitel 3.2.5, Tab. 2).

Ob bzw. wann nun ein LHTL Höhenttraining oder ein Training mit intermittierender Hypoxie gewählt werden sollte, kann nicht einheitlich definiert werden. Daher kann auch die erste Forschungsfrage dieser Arbeit („Welches Höhenttrainingsprotokoll zeigt die größten Effekte im Ausdauersport?“) nicht eindeutig beantwortet werden. Insgesamt sollten sich jedoch Ausdauersportler/innen am LHTL Modell orientieren, wenn hämatologische Adaptionen erreicht werden sollten, und wenn die Trainingsintensität aufrecht erhalten werden soll. Ein längeres intermittierendes hypoxisches Training über mehrere Stunden pro Tag kommt dem LHTL Protokoll sehr Nahe. Auch das LHTLH Protokoll kann womöglich gute Effekte hinsichtlich einer gesteigerten Leistung in Tallage bringen. Wahrscheinlich müssen Athleten und Athletinnen in Zusammenarbeit mit den Trainern und Trainerinnen selbst herausfinden, welches Protokoll für sie am besten geeignet ist.

Ein Teil der vorliegenden Literaturarbeit widmete sich dem Höhenttraining in Teamsportarten. An dieser Stelle sollte angemerkt werden, dass im Allgemeinen der Einsatz eines Höhenttrainings in Teamsportarten kritisch betrachtet werden sollte. Es muss hinterfragt werden, in wie fern sich ein oder mehrere Höhenttrainingslager für eine ganze Mannschaft überhaupt rentieren. Selbst für einen Einzelsportler wie z.B. einen Langstreckenläufer bzw. eine Langstreckenläuferin, stellt ein Höhenttraining einen großen Aufwand dar. Wenn beispielsweise die LHTL oder die LHTLH Methode gewählt wird, muss der Sportler mit seinen Trainer(inne)n und Betreuer(inne)n ständig zwischen Tallage und Höhenlage pendeln. Allein aus organisatorischen Gründen wäre dies für eine Fußballmannschaft ein noch weit größerer Aufwand. Girard et al. (2013) merken ebenfalls an, dass entsprechende Kapazitäten am Ort des Höhenttrainingslagers vorhanden sein müssen. Neben den Wohnmöglichkeiten müssen auch optimale Trainingsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Bevor ein Höhenttraining jedoch überhaupt geplant wird, muss das Ziel dieses großen Aufwandes klar definiert sein. Soll das Höhenttrainingslager zur unmittelbaren Vorbereitung auf einen Wettkampf in Höhenlage durchgeführt werden, zielt das Trainingslager auf eine bestmögliche Gewöhnung an die klimatischen Gegebenheiten vor Ort ab. Eine Steigerung der Hämoglobinspeicherkapazität und eine damit verbundene Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit stehen damit nicht im Vordergrund. Im Allgemeinen gilt es zu hinterfragen in wieweit eine gesteigerte Hämoglobinspeicherkapazität bzw. eine größere Anzahl an roten Blutkörperchen bei einem Fußballer oder einer Fußballerin beispielsweise notwendig sind. Die Ausdauerleistungsfähigkeit ist sicherlich eine wichtige Komponente im Fußball bzw. in Teamsportarten oder sonstigen intermittierenden Sportarten, sie ist aber nicht wie in klassischen Ausdauersportarten der leistungsbestimmende Faktor. Es sind noch weitere Faktoren vorhanden, die die Gesamtleistung eines/einer Fußballers/Fußballerin oder eines/einer Tennisspielers/Tennisspielerin bestimmen. Dazu zählen die Technik, die Taktik und klarerweise andere motorische Grundeigenschaften wie die Schnelligkeit oder die Kraft beispielsweise. Nicht zu vergessen sind auch psychische Faktoren. Möglicherweise nimmt die Schnellkraft in intermittierenden Sportarten eine zentrale Rolle ein. Demnach sollten speziell Vereine von großen Mannschaften, wie es im Fußball der Fall ist, sich genauestens überlegen, ob sich die Kosten im Verhältnis zu dem Nutzen eines Höhenttrainingslagers rentieren. Man müsste ja auch bedenken, dass jeder Athlet und jede Athletin einer Mannschaft einen eigenen Trainingsplan während des Höhenttrainings benötigen würde. Girard et al. (2013) erwähnen nämlich, dass das Höhenttraining auf jeden einzelnen Spieler bzw. jede einzelne Spielerin einer Mannschaft abgestimmt werden sollte. Dies würde unter anderem eine Erhöhung der

Betreuer/innen während eines Höhentrainingslagers bedeuten, womit sich die Kosten wiederum erhöhen würden. Wahrscheinlich kann eine Verbesserung der Ausdauerleistung der Athleten und Athletinnen, die intermittierenden Sportarten angehören, auch durch ein Training in Tallage verbessert werden. Zumindest in dem Ausmaß, das für einen Schnellkraftsportler oder für eine Schnellkraftsportlerin von Nöten ist.

Ein Höhentaining zur Vorbereitung auf einen Wettkampf in Höhenlage ist aber in intermittierenden und Mannschaftssportarten mit Sicherheit sinnvoll. Girard et al. (2013) erwähnen, dass in der Höhe andere physikalische Gegebenheiten vorzufinden sind, die den/die Sportler/in in verschiedener Art und Weise beeinflussen. Wenn man an den verringerten Luftwiderstand denkt, sind vor allem Ballsportarten von dem Höhenklima betroffen. Die Flugeigenschaften des Balles verändern sich, wodurch der/die Athlet/in Adaptionen hinsichtlich der Technik und Taktik vornehmen muss. Auch dabei gilt es zu bedenken, dass es innerhalb einer Mannschaft Unterschiede hinsichtlich der Adaption zwischen den einzelnen Spielern und Spielerinnen gibt. Individuelle Trainingseinheiten sollten daher zur Verfügung stehen. Abschließend kann hinsichtlich der Forschungsfrage („In welcher Form kommt ein Höhentaining bei Spielsportarten und intermittierenden Sportarten zum Einsatz, und welche Effekte können beobachtet werden?“) folgendes festgestellt werden: Sowohl das LHTLH, als auch das LHTL interspersed und das LLTH Modell wird von Autoren und Autorinnen empfohlen. Eventuell kann auch ein Sprinttraining in Hypoxie im Vergleich zu einem Sprinttraining in Normoxie zusätzliche Effekte in Hinblick auf die spezielle Ausdauerleistungsfähigkeit, die in vielen Spielsportarten benötigt wird, bringen. Die Studie von Galvin et al. (2013) lieferte Hinweise darauf. Bezugnehmend zum Artikel von Girard et al. (2010) steht aber aus derzeitiger Forschungslage noch nicht eindeutig fest, ob ein Höhentaining in Teamsportarten überhaupt rentabel ist.

Abgesehen vom Ausdauertraining, kann auch ein Krafttraining unter hypoxischen Bedingungen stattfinden. Die Masterarbeit betrachtete sowohl das Blood Flow Restriction bzw. Kaatsu Training (lokale Hypoxie) als auch ein Krafttraining unter systemischer Hypoxie. Bereits bei der Literaturrecherche war auffallend, dass zahlreiche Studien zum BFR Training bestehen, die systemische Hypoxie ist jedoch noch weniger erforscht. Obwohl mehrere Studien zum Kaatsu Training vorhanden sind, wird stets diskutiert, welche physiologischen Mechanismen beim Training mit vaskulärer Okklusion ausgelöst werden. In weiterer Folge kann auch beim Krafttraining in systemischer Hypoxie nicht eindeutig angegeben werden, welche Faktoren hinsichtlich einer Hypertrophie oder Kraftentwicklung verantwortlich sind. Wahrscheinlich ist aber der durch die Hypoxie induzierte metabolische

Stress der Hauptauslöser von muskulären Anpassungsreaktionen. Solche Anpassungsreaktionen könnten z.B. auch in der Studie von Nishimura et al. (2010) oder Manimmanakorn et al. (2012) ausgelöst worden sein. Beide Studien zeigten, dass ein Krafttraining unter systemischer Hypoxie zu größeren Effekten führte als ein Krafttraining in Normoxie. Auffallend und verwirrend zugleich ist jedoch die Tatsache, dass sich die Untersuchungen hinsichtlich der Trainingsintensität stark unterscheiden. Während Nishimura et al. (2010) eine Intensität von 70% des 1 RM wählte, führten die Probandinnen bei Manimmanakorn et al. (2012) die Übungen mit 20% des 1 RM durch. Möglicherweise konnte aber die Studie von Manimmanakorn und Kollegen aufgrund der höheren Wiederholungsanzahl die geringere Intensität ausgleichen. Die Probandinnen führten so viele Wiederholungen bei jeder Übung durch wie möglich waren. Daneben besteht die Untersuchung von Ho, Kuo, Liu, Dong und Tung (2014), die ebenfalls eine Intensität von 75% des 1 RM integrierte. Diese Studie führte jedoch zu keinen besseren Ergebnissen in der Hypoxiegruppe. Scott, Slattery und Dascombe (2014) führen dieses Ergebnis aufgrund der zu lang gewählten Pause zwischen den Serien zurück. Möglicherweise könnte das unterschiedliche Ergebnis aber auch auf die verschiedenen Trainingsübungen zurückzuführen sein. Auch Ho et al. (2014) selbst geben diese Tatsache in ihrem Artikel an. In ihrer Untersuchung führten die Probanden Kniebeugen durch, die mehrere und vor allem große Muskeln (Oberschenkelmuskulatur, Gesäßmuskeln) gleichzeitig beanspruchen. Nishimura et al. (2010) hingegen wählte als Übungen Armcurls und Triceps Extensions, die kleinere Muskeln beanspruchen. Möglicherweise ist es daher bei größeren Muskelgruppen schwieriger, einen erhöhten metabolischen Stress zu provozieren, der ausschlaggebend für die positiven Effekte bei einem Krafttraining in systemischer Hypoxie sein soll. Wie bereits in Kapitel 3.4.2 erwähnt, ist es ähnlich dem Ausdauertraining nur schwer möglich, eine allgemeine Empfehlung für die Durchführung eines Krafttrainings in Hypoxie zu geben. Scott, Slattery und Dascombe (2014) verdeutlichen diese Tatsache. Anscheinend sind es kleine Unterschiede in der Durchführung des Krafttrainings, die bestimmen, ob es zu signifikanten Effekten kommt oder nicht. Die Kombination aus Intensität, Wiederholungsanzahl und Stärke der Hypoxie sind womöglich die entscheidenden Faktoren.

Neben der Anwendung von Hypoxie im Leistungssport wurde in der vorliegenden Literaturarbeit auch die Nützlichkeit von vermindertem Sauerstoffgehalt zu therapeutischen Zwecken betrachtet. Bereits bei der Literatursuche war ersichtlich, dass im Vergleich zum Höhentherapie im Leistungssport bzw. zum Kaatsu Training, weniger Studien bestehen. Vor allem im Bereich der Herz-Kreislauf- und Lungenerkrankungen sind wenige Untersuchungen

vorhanden. Insgesamt ist es derzeit schwierig, wirklich gewinnbringende Effekte durch Hypoxie im Rehabilitationsbereich zu erkennen. Was beispielsweise die Anwendung von Hypoxie bei Diabetes Typ II Patienten und Patientinnen betrifft, konnten zwar Meckenzie et al. (2011) zeigen, dass sich ein Aufenthalt bzw. körperliche Aktivität in Hypoxie im Vergleich zu Normoxie besser auf die Insulinsensitivität auswirkt, Schreuder et al. (2013) hingegen konnten keine positiven Auswirkungen von Hypoxie bei Menschen mit Diabetes Typ II zeigen. Die Ergebnisse von Lee et al. (2003) zeigen zwar positive Wirkungen von einem Höhengaufenthalt (sowohl passiv als auch aktiv) auf die Glukoseaufnahmefähigkeit, können aber nicht auf Menschen mit Diabetes übertragen werden, da in der Studie gesunde Personen teilnahmen. Im Rahmen dieser Untersuchung wäre noch interessant gewesen, wenn sowohl in Studie I und II eine Kontrollgruppe, welche Wandertouren in Tallage durchführte, integriert worden wäre. Dadurch könnten detailliertere Aussagen getroffen werden, inwiefern sich tatsächlich die Höhe auf die verbesserte Glukoseaufnahmefähigkeit auswirkte. Denn es ist nicht klar, ob nicht rein die sportliche Aktivität zu den verbesserten Werten führte. Zumal ja die Autoren selbst anführen, dass in der Gruppe, die nur einen passiven Höhengaufenthalt verbrachte, die gesteigerte Glukosetoleranzfähigkeit auf eine verstärkte körperliche Beanspruchung, bedingt durch die Höhe, zurückzuführen ist. Im Weiteren wäre es interessant zu erfahren, wie lange eine verbesserte Glukosetoleranzfähigkeit bzw. Insulinsensitivität zu messen ist. Dazu müssten wiederholte Messungen nach der Höhenexposition durchgeführt werden.

Im Weiteren stellte die Masterarbeit Studien vor, die sich der Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit COPD widmeten. Zusätzlich wurde eine Studie vorgestellt, die die Auswirkungen von intermittierender Hypoxie bei Personen mit koronarer Herzerkrankung betrachtet. Sowohl die Untersuchungen mit Menschen mit COPD als auch die Studie, die Patienten mit KHK integrierte, konnten positive Ergebnisse liefern. So wurde beispielsweise die Belastungstoleranz bei den Probanden in den Studien von Burtscher et al. (2009) und Burtscher et al. (2004) gesteigert. Letztere Untersuchung führte auch zu einer gesteigerten VO_{2max} nach intermittierender Hypoxie bei den Studienteilnehmern. Haider et al. (2009) konnten zeigen, dass intermittierende Hypoxie funktionelle Einschränkungen des autonomen Nervensystems bei Personen mit COPD positiv beeinflussen kann. Damit könnte, wie die Autoren dieser Untersuchungen auch angeben, Hypoxie bei herzkreislauf- und lungenerkrankten Personen zu einer besseren Belastungstoleranz im alltäglichen Leben führen. Leider bestehen derzeit zu wenige Studien, die erkrankte Personen als Probanden und Probandinnen rekrutieren konnten. Auch Burtscher, Gatterer, Szubski, Pierantozzi und

Faulhaber (2010) weisen darauf hin, dass zwar zahlreiche Untersuchungen mit gesunden Menschen vorhanden sind, jedoch kaum mit erkrankten Personen. Es würden mehr Studien benötigt werden, um dieses Forschungsgebiet weiter zu untersuchen. Dadurch könnte beobachtet werden, ob es wirklich sinnvoll ist, Hypoxie als erweiterte Therapiemaßnahme zu integrieren. Es ist wahrscheinlich äußerst schwer, kranke Personen für Studien, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden, zu gewinnen. Möglicherweise haben solche Patienten und Patientinnen Bedenken, dass sich ihr gesundheitlicher Zustand durch die Teilnahme an solch einer Studie verschlechtern könnte. Dadurch, dass noch ungenügend Untersuchungen durchgeführt wurden, kann eventuell nicht genau bestimmt werden, wie die Proband(inn)en reagieren werden. Eine wirkliche gesundheitliche Gefahr sollte jedoch nicht bestehen, da ansonsten die bereits vorhandenen Studien aufgrund ethischer Vorschriften nicht hätten durchgeführt werden können. Im Weiteren sollte noch angemerkt werden, dass die Teilnehmer/innen der vorgestellten Arbeiten keine körperliche Aktivität während der Hypoxieexposition ausführten. Sie inhalierten passiv ein Gas, das einen verminderten Sauerstoffgehalt aufwies. Möglicherweise könnte die Kombination aus Sport und Hypoxie weitere positive Faktoren erzielen. Auch Burtscher et al. (2004) führen diese Frage in ihrem Artikel an. Es wird sich zeigen, ob künftig weitere Studien erscheinen werden, die die Auswirkungen von Hypoxie bei herzkreislauf- oder lungenerkrankten Menschen bestimmen.

Neben Lungen- und Herzkreislaufkrankungen wurde auch versucht Artikel vorzustellen, die die Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit metabolischem Syndrom beleuchten. Dazu konnte Shi et al. (2014) zeigen, dass Faktoren, die zu einer Entstehung des metabolischen Syndroms führen, durch Hypoxie kombiniert mit körperlicher Aktivität positiv beeinflusst werden können. Die AMAS Studien liefern ebenfalls Hinweise für positive Auswirkungen von einem Höhengaufenthalt bei Menschen mit metabolischem Syndrom. Auch bei gesunden Personen könnten durch eine Höhenexposition bestimmte Risikofaktoren, die bei der Entstehung des metabolischen Syndroms mitwirken, wie z.B. ein verringerter HDL-Wert, positiv verändert werden. Dennoch sollte angemerkt werden, dass die erzielten Effekte der AMAS Studien wahrscheinlich aufgrund eines Urlaubs an sich, egal ob in Höhenlage oder nicht, erreicht wurden. Damit konnte nicht gezeigt werden, dass ein aktiver Aufenthalt in Hypoxie zu besseren Ergebnissen führt als ein Aktivurlaub in Tallage. Zudem kann auch nicht bestimmt werden, welchen Beitrag sportliche Aktivitäten zu den Resultaten geliefert haben. Zumal ja auch Entspannungsaktivitäten von den Studienteilnehmern und Teilnehmerinnen ausgeführt wurden. Ob nun die entspannenden oder aktiven Tätigkeiten einen größeren Einfluss hatten, kann nicht bestimmt werden. Die Autoren geben daher auch an, dass einfach

eine Veränderung des Lebensstils sich positiv bei Menschen mit metabolischem Syndrom auswirken kann. Ein eindeutig positiver Effekt, der rein auf einen verminderten Sauerstoffgehalt zurückzuführen ist, kann in den AMAS Studien nicht bestimmt werden.

Es sollte noch angemerkt werden, dass das metabolische Syndrom eine Kombination aus mehreren Symptomen ist. Dazu zählen ein gestörter Kohlehydratstoffwechsel, Dyslipidämie, Hypertonie und (abdominelle) Fettleibigkeit. Es wurden im Rahmen der Literaturliteraturarbeit Studien vorgestellt, die sich mit diesen Symptomen befassten. Die Untersuchungen, die im Kapitel 4.1 vorgestellt wurden, könnten damit auch bei Menschen mit metabolischem Syndrom eine Rolle spielen. Ein anderes Kapitel der Arbeit widmete sich einem weiteren Faktor, der zur Entstehung eines metabolischen Syndroms führen kann, nämlich die Fettleibigkeit/Adipositas. Einige Studien ermittelten im Rahmen ihrer Untersuchungen, wenn auch nicht als zentrales Element, die Auswirkungen von Hypoxie in Kombination mit körperlicher Aktivität auf das Körpergewicht oder auf die Fettmasse. Weitere Studien wurden in der vorliegenden Masterarbeit vorgestellt, die adipöse Menschen als Probanden und Probandinnen rekrutieren konnten und bei denen der Einfluss von reduziertem Sauerstoffgehalt in Kombination mit Sport auf die Körperzusammensetzung berechnet wurde. Diese Untersuchungen lieferten durchaus positive Ergebnisse hinsichtlich eines Einsatzes von Hypoxie. Neben einem signifikant stärkeren Gewichtsverlust durch Hypoxie scheinen sich tendenziell auch weitere Parameter (WHR, Fettmasse, BMI) besser durch den Einsatz von vermindertem Sauerstoffgehalt in Kombination mit körperlicher Tätigkeit beeinflussen lassen als ohne dem Gebrauch von Hypoxie (Kong, Zang und Hu, 2013). Auch die Tatsache, dass durch den Einsatz von Hypoxie der gleiche Gewichtsverlust erzielt werden kann wie ein Training in Normoxie, und das, obwohl in Hypoxie eine geringere Arbeitslast verwendet wurde (Wiesner et al., 2010), scheint einen vielversprechenden Ansatz zu liefern. Bei stark übergewichtigen Menschen ist es schwierig, geeignete sportliche Tätigkeiten zu finden, die keine Gelenksschäden aufgrund des starken Übergewichts nach sich ziehen. In Hinblick auf die Wahl der Intensität ist dementsprechend große Vorsicht geboten. Sie darf besonders zu Beginn des Trainings nicht zu hoch gewählt werden. Erst nachdem die betroffene Person einiges an Körpergewicht verloren hat, kann eine Intensitätssteigerung erfolgen. Ein Training zum Erreichen einer besseren Körperzusammensetzung, könnte sich demnach als eher schleppend erweisen und womöglich die Motivation der Person negativ beeinflussen. Zumal ein körperliches Training für stark übergewichtige Personen oftmals eine Überwindung darstellt. Wenn die Person jedoch bemerkt, dass für eine gewisse Reduktion des Körpergewichts ein nicht so großer Aufwand von Nöten ist, könnte die Bereitschaft, sportlich

aktiv zu sein, erhöht werden. Die Anwendung von Hypoxie könnte daher einen positiven Beitrag zur Gewichtsreduktion und zur persönlichen Motivation von adipösen Menschen liefern.

6. Limitationen und Ausblick

Die vorliegende Masterarbeit hatte zum Ziel, die Auswirkungen von Hypoxie in den Bereichen Leistungs- und Gesundheitssport/Rehabilitationssport anhand von aktuellen Untersuchungen zu beleuchten. Wie bereits in Kapitel 2. erwähnt, erwies sich die Suche nach geeigneter Literatur oftmals als schwierig. Zum einen, weil entweder sehr viel bzw. sehr wenig Literatur vorhanden war. In Hinblick auf den ersten großen Abschnitt der Arbeit, nämlich die Anwendung von Hypoxie im Gesundheitssport, konnte ausreichend Literatur gefunden werden. Besonders viele Studien gibt es beispielsweise hinsichtlich des BFR Trainings. Aber auch Untersuchungen zum Höhentraining im Ausdauersport (vgl. Kapitel 3.2.5) waren zahlreich vorhanden. Dementsprechend mussten von der Verfasserin bewusst Studien ausgewählt werden, die für die Literaturliste aus ihrer Sicht relevant waren. Womöglich hätte es aber noch einige weitere Untersuchungen gegeben, die weitere interessante Erkenntnisse geliefert hätten. Der untersuchte Zeitraum hätte, was einige Kapitel dieser Arbeit betrifft, deshalb kürzer gewählt werden können. Möglicherweise hätte bei manchen Themenfeldern der Zeitraum von den vergangenen fünf bis zehn Jahren gereicht. Der zu erforschende Zeitraum wurde aber trotzdem größer gehalten, da zur Anwendung von Hypoxie im Rehabilitationsbereich teilweise sehr wenige Artikel vorhanden waren. Um noch die ein oder andere Studie in die Arbeit inkludieren zu können, wurde die Zeitspanne nicht verkleinert. Dies betrifft vor allem die Anwendung von Hypoxie bei Menschen mit Herzkreislauf- und Lungenerkrankungen.

Dennoch kann festgestellt werden, dass die vorliegende Arbeit einen guten Einblick in aktuelle Erkenntnisse zu den unterschiedlichen Anwendungsfeldern von reduziertem Sauerstoffgehalt liefert. Es ist ersichtlich, dass das Forschungsfeld „Hypoxie“, egal ob im Leistungssport oder zu therapeutischen Zwecken, noch viele offene Fragen beinhaltet. Künftige Studien müssen versuchen, möglichst viele dieser offenen Fragen zu beantworten. Das betrifft beispielsweise die genauen Mechanismen, die dem BFR Krafttraining oder auch dem Krafttraining in systemischer Hypoxie zu Grunde liegen. Zudem kann beispielsweise untersucht werden, in wie weit der Gebrauch von Hypoxie ein Mittel zur Intensitätssteigerung im Krafttraining darstellt. Besonders für den Leistungssport kann dies interessant sein. Die Untersuchung von Álvarez-Herms et al. (2013), die im Kapitel 3.4.2 vorgestellt wurde, liefert Hinweise darauf. Die Erkenntnisse dieser Untersuchung könnten auch speziell für Schnellkraft- bzw. Spitzensportler/innen interessant sein, da die Schnellkraft in dieser Studie eine Rolle spielt.

Im weiteren sollte künftig analysiert werden, in welcher Art und Weise ein BFR Training bei Menschen nach Operationen oder bei alten Menschen eingesetzt werden könnte. Zu trainingstherapeutischen Zwecken könnte lokale Hypoxie einen entscheidenden Beitrag zum Muskelaufbau liefern. Dazu müssten aber Studien mit betroffenen Patienten und Patientinnen, z.B. nach dem Einsatz eines künstlichen Kniegelenks, durchgeführt werden. Abgesehen vom Krafttraining sollten zukünftige Untersuchungen, die ein Höhenttraining im Ausdauersport durchführen, das Protokoll Live High Train Low and High vermehrt integrieren. Einige Autoren geben zwar an, dass diese Methode vielversprechend sei, jedoch sind derzeit noch wenige Studien vorhanden. Damit könnten wiederum weitere Empfehlungen für die Durchführung eines Höhenttrainings abgeleitet werden.

Außerdem ist auffallend, dass es kaum Studien gibt, die ihre Aussagen geschlechtsspezifisch differenzieren können. Oft werden nur männliche Probanden auserwählt, und falls das weibliche Geschlecht ebenfalls integriert wird, können die (eventuell) vorhandenen Effekte nicht geschlechtsspezifisch betrachtet werden. Sowohl im Leistungssport als auch im Rehabilitationsbereich sollte vermehrt geschlechtsspezifisch geforscht werden.

Zusätzlich ist beobachtbar, dass die Form der Hypoxie, nämlich hypobar oder normobar, von Studie zu Studie variiert, wodurch oftmals die Vergleichbarkeit nicht unbedingt gegeben ist. Es wurde bereits in der vorliegenden Arbeit erwähnt, dass möglicherweise in Abhängigkeit der Hypoxie unterschiedliche Mechanismen beobachtet werden. Deshalb könnten vermehrte Untersuchungen, die gezielt ein hypobares mit einem normobaren Training vergleichen, Aufschluss darüber geben, welche Form der Hypoxie sich für das zu verbessernde Merkmal am besten eignet. Dies betrifft sowohl die unterschiedlichsten Einsatzgebiete im Leistungssport als auch im Gesundheitssport oder zu therapeutischen Zwecken.

Literaturverzeichnis

- Abe, T., Yasuda, T., Midorikawa, T., Sato, Y., Kearns, K., Inoue, K., ... Ishii, N. (2005). Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily KAATSU resistance training. *International Journal of KAATSU Training Research*, 1(1), 6–12.
- Abraham, N. G. & Kappas, A. (2008). Pharmacological and clinical aspects of heme oxygenase. *Pharmacological Reviews*, 60(1), 79-127.
- Aceituno-Madera, P., Buendía-Eisman, A., Olmo, F. J., Jiménez-Moleón, J. J., Serrano-Ortega, S. (2011). [Melanoma, altitude, and UV-B radiation]. *Actas Dermosifiliogr*, 102, 199-205.
- Adams, V., Lenk, K., Linke, A., Lenz, D., Erbs, S., Sandri, M., ... Tarnok, A. (2004). Increase of circulating endothelial progenitor cells in patients with coronary artery disease after exercise-induced ischemia. *Arteriosclerosis, thrombosis and vascular biology*, 24(4), 684–690.
- Alberti, K.G., Zimmet, P., Shwa J., & IDF Epidemiology Task Force Consensus Group. (2005). The metabolic syndrome – a new worldwide definition. *Lancet*, 366(9491), 1059–1062.
- Alberti, K. G., Eckel, R.H., Grundy, S. M., Zimmet, P. Z., Cleeman, J. I., Donato, K. A., ... International Association for the Study of Obesity. (2009). Harmonizing the metabolic syndrome: a joint interim statement of the International Diabetes Federation Task Force on Epidemiology and Prevention; National Heart, Lung, and Blood Institute; American Heart Association; World Heart Federation; International Atherosclerosis Society; and International Association for the Study of Obesity. *Circulation*, 120(16), 1640–1645.
- Álvarez-Herms, J., Julia-Sanchez, S., Corbi, F., Pagès, T. & Viscor, G. (2012). Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia. *Apunts Medicina de l'Esport*, 47(173), 23-9.
- Álvarez-Herms, J., Julia-Sanchez, S., Corbi, F., Pagès, T. & Viscor, G. (2013). Anaerobic performance after endurance strength training in hypobaric environment. *Science & Sports*, doi: 10.1016/j.scispo.2013.11.002.

- Ameln, H., Gustafsson, T., Sundberg, C. J., Okamoto, K., Jansson, E., Poellinger, L. & Makino, Y. (2005). Physiological activation of hypoxia inducible factor-1 in human skeletal muscle. *FASEB journal*, 19(8), 1009-11.
- American College of Sports Medicine (ACSM). (2009). American College of Sports Medicine position stand: progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(3), 687–708.
- Amman, M., Pegelow, D. F., Jacques, A. J. & Dempsey, J. A. (2007). Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy humans. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 293(5), 2036-45.
- Ashenden, M. J., Gore, C. J., Martin, D. T., Dobson, G. P. & Hahn, A. G. (1999). Effects of a 12-day “live high, train low” camp on reticulocyte production and haemoglobin mass in elite female road cyclists. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 80(5), 472-478.
- Ashenden, M. J., Gore, C. J., Dobson, G. P., Boston, T. T., Parisotto, R., Emslie, K. R., ... Hahn, A. G. (2000). Simulated moderate altitude elevates serum erythropoietin but does not increase reticulocyte production in welltrained runners. *European Journal of Applied Physiology*, 81(5), 428-435.
- Asp, S., Dugaard, J.R., Kristiansen, S., Kiens, B. & Richter, E.A. (1996). Eccentric exercise decreases maximal insulin action in humans: muscle and systemic effects. *The Journal of Physiology*, 494(3), 891-898.
- Aughey, R. J. (2011). Applications of GPS technologies to field sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 295–310.
- Bangsbo, J., Iaia, M. & Krstrup, P. (2008). The Yo-Yo intermittent recovery test. A useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Medicine*, 38(1), 37–51.
- Bailey, D. M., Davies, B. & Baker, J. (2000). Training in hypoxia: Modulation of metabolic and cardiovascular risk factors in men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(6), 1058–1066.
- Barbera, J. A., Peinado, V. I. & Santos, S. (2003). Pulmonary hypertension in chronic obstructive pulmonary disease. *The european respiratory journal*, 21(5), 892–905.

- Bartels, M. N., Gonzalez, J. M., Kim, W. & De Meersman, R. E. (2000). Oxygen supplementation and cardiac-autonomic modulation in COPD. *Chest*, *118*, 691–696.
- Bartels, M. N., Jelic, S., Ngai, P., Basner, R. C. & DeMeersman, R. E. (2003). High-frequency modulation of heart rate variability during exercise in patients with COPD. *Chest*, *124*, 863–869.
- Bärtsch, P. & Gibbs, J. S. (2007). Effect of altitude on the heart and the lungs. *Circulation*, *116*(19), 2191–2202.
- Bech, P. (2004). Measuring the dimensions of psychological general well-being by the WHO-5. *QoL Newsletter*, *32*, 15–16.
- Beck, J.M., Blackmon, M.B., Rose, C.M., Kimzey, S.L., Preston, A.M., Green, J.M. (2003). T cell costimulatory molecule function determines susceptibility to infection with pneumocystis carinii in mice. *Journal of Immunology*, *171*(4), 1969–1977.
- Becker-Grunig, T., H. Klose, N. Ehlken, M. Lichtblau, C. Nagel, C. Fischer, ... Grünig, E. (2013). Efficacy of exercise training in pulmonary arterial hypertension associated with congenital heart disease. *International Journal of Cardiology*, *168*(1), 375–381.
- Bernardi, L., Passino, C., Serebrovskaya, Z., Serebrovskaya, T. & Appenzeller, O. (2000). Respiratory and cardiovascular adaptations to progressive hypoxia. Effect of interval hypoxic training. *European Heart Journal*, *22*(10), 879– 886.
- Beyersdorf, N., Ding, X., Tietze, J.K. & Hanke, T. (2007). Characterization of mouse CD4 T cell subsets defined by expression of KLRG1. *European Journal of Immunology*, *37*(12), 3445–3454.
- Bieri, K., Gross, M., Wachsmuth, N., Schmidt, W., Hoppeler, H. & Vogt, M. (2013). HIIT in young soccer players—block periodization of high-intensity aerobic interval training. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, *64*(10), 307–312.
- Bijnen, F.C., Feskens, E.J., Caspersen, C.J., Nagelkerke, N., Mosterd, W.L., Kromhout, D., (1999) . Baseline and previous physical activity in relation to mortality in elderly men: the Zutphen Elderly Study. *American Journal of Epidemiology*, *150*(12), 1289–1296.
- Bisgard, G. E. & Neubauer, J. A. (1995). Peripheral and central effects of hypoxia on the control of ventilation. In: Dempsey, J. A., Pack, A., editors. *Regulation of Breathing*. 2nd ed. New York, NY: Marcel Dekker, 617–68.

- Braz, N. F., Carneiro, M. V., Oliveira-Ferreira, F., Arrieiro, A. N., Amorim, F. T., Lima, M. M., ... Peixoto, M. F. (2012). Influence of aerobic training on cardiovascular and metabolic parameters in elderly hypertensive women. *International journal of preventive medicine*, 3(9), 652–659.
- Brunner, S., Engelmann, M. G. & Franz, W. M. (2008). Stem cell mobilisation for myocardial repair. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 8(11), 1675–1690
- Buchheit, M. (2008). The 30–15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(2), 365–374.
- Buchheit, M., Simpson, B. M., Garvican-Lewis, L. A., Hammond, K., Kley, M. Schmidt, W. F., ... Bourdon, P. C. (2013). Wellness, fatigue and physical performance acclimatisation to a 2-week soccer camp at 3600 m (ISA3600). *British journal of sports medicine*, 47 Suppl 1:i100–106.
- Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J. C., Hocking, J., Mendez-Villanueva, A., Bourdon, P. C. ... Coutts, A. J. (2013). Adding heat to the live-high trainlow altitude model: a practical insight from professional football. *British journal of sports medicine*, 47 Suppl 1:i59–69.
- Burtscher, M., Pachinger, O., Ehrenbourg, I., Mitterbauer, G., Faulhaber, M., Pühringer, R., Tkatchouk, E. (2004). Intermittent hypoxia increases exercise tolerance in elderly men with and without coronary artery disease. *International Journal of Cardiology*, 96(2), 247-54.
- Burtscher, M. (2005). Intermittierende Hypoxie: Höhenvorbereitung, Training, Therapie. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 53(2), 61-67
- Burtscher, M., Haider, T., Domej, W., Linser, T., Gatterer, H., Faulhaber, M., ... Bernardi L. (2009). Intermittent hypoxia increases exercise tolerance in patients at risk for or with mild COPD. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 165(1), 97-103.
- Burtscher, M. (2010). Auswirkungen akuter Höhenexposition: Welche Höhe ist gesundheitlich verträglich? *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 160(13-14), 362-371.
- Burtscher, M., Gatterer, H., Szubski, C., Pierantozzi, E. & Faulhaber, M. (2010). Effects of interval hypoxia on exercise tolerance: special focus on patients with CAD or COPD. *Sleep & Breathing*, 14(3), 209-220.

- Burtscher, M. (2013). Effects of living at higher altitude on mortality: a narrative review. *Aging and Disease*, 5(4), 274-280.
- Buskirk, E. R., Kollias, J., Akers, R. F., Prokop, E. K., Reategui, E. P. (1967a). Maximal performance at altitude and on return from altitude in conditioned runners. *Journal of Applied Physiology*, 23(2), 259–266.
- Buskirk, E. R., Kollias, J., Akers, R. F., Prokop, E. K., Reategui, E. P. (1976b). Physiology and performance of track runners at various altitudes in the United States and Peru. In: International Symposium on the Effects of Altitude on Physical Performance, edited by Goddard R. Athletic Institute, Chicago.
- Brugniaux, J. V., Schmitt, L., Robach, P., Nicolet, G., Fouillot, J. P., Moutereau, S., ... Richalet, J. P. (2006). Eighteen days of “living high, training low” stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners. *Journal of Applied Physiology*, 100(1), 203–211.
- Cai, Z., Luo, W., Zhan, H. & Semenza, G. L. (2013). Hypoxia- inducible factor 1 is required for remote ischemic preconditioning of the heart. *Proceedings of the National Academy of Sciences in the United States of America*, 110(43), 17467-7.
- Chapman, R. F., Karlsen, T., Resaland, G. K., Ge, R. L., Harber, M. P., Witkowski, S., ... Levine, B. D. (2014a). Defining the "dose" of altitude training: how high to live for optimal sea level performance enhancement. *Journal of Applied Physiology*, 116(6), 595-603.
- Chapman, R. F., Laymon Stickford, A. S., Lundby, C. & Levine, B. D. (2014b). Timing of return from altitude training for optimal sea level performance. *Journal of Applied Physiology*, 116(7), 837-43.
- Chapman, R. F., Stray-Gundersen, J. & Levine, B. D. (1998). Individual variation in response to altitude training. *Journal of Applied Physiology*, 85(4), 1448–1456.
- Charlot, K., Pichon, A., Richalet, J. P. & Chapelot, D. (2013). Effects of a high-carbohydrate versus high-protein meal on acute responses to hypoxia at rest and exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 113(3), 691–702.
- Clanton, T.L. & Klawitter, P.F., (2001). Adaptive responses of skeletal muscle to intermittenthypoxia: the known and the unknown. *Journal of Applied Physiology*, 90, 2476– 2487.

- Clark, S., Quod, M., Clark, M., Martin, D., Saunders, P. & Gore, C. (2009). Time course of haemoglobin mass during 21 days live high:train low simulated altitude., *European Journal of Applied Physiology*, 106(3), 399–406.
- Cook, S. B, Murphy, B. G. & Labarbera, K. E. (2013). Neuromuscular function after a bout of low-load blood flow-restricted exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 45(1), 67–74.
- Daniels, J. & Oldridge, N. (1970). The effects of alternate exposure to altitude and sea level on world-class middle-distance runners. *Medicine and science in sports*, 2(3), 107–112.
- Dangott, B., Schultz, E. & Mozdziak, P. E. (2000). Dietary creatine monohydrate supplementation increases satellite cell mitotic activity during compensatory hypertrophy. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1),13–6.
- Eckberg, D. L. (2003). The human respiratory gate. *The Journal of Physiology*, 548(pt 2), 339–352.
- Ezzati, M., Horwitz, M. E., Thomas, D. S., Friedman, A. B., Roach, R., Clark, T., ... Honigman, B. (2012). Altitude, life expectancy and mortality from ischaemic heart disease, stroke, COPD and cancers: national population-based analysis of US counties. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 66(7): e17.
- Faeh, D., Gutzwiller, F., Bopp, M. & Swiss National Cohort Study Group, (2009). Lower mortality from coronary heart disease and stroke at higher altitudes in Switzerland. *Circulation*, 120, 495-501
- Faiss, R., Leger, B., Vesin, J. M., Fournier, P. E., Eggel, Y., Dériaz, O. & Millet, G. P. (2013). Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS ONE*, 8(2):e56522.
- Faude, O., Koch, T. & Meyer, T. (2012). Straight sprinting is the most frequent action in goal situations in professional football. *Journal of sport sciences*, 30(7), 625–31.
- Frede, S., Berchner-Pfannschmidt, U., Fandrey, J. (2007). Regulation of hypoxia-inducible factors during inflammation. *Methods in Enzymology*, 435, 405–419.
- Friedmann, B., Kinscherf, R., Borisch, S., Richter, G., Bartsch, P. & Billeter, R. (2003). Effects of low -resistance/high-repetition strength training in hypoxia on muscle structure and gene expression. *Pflügers Archiv: European journal of physiology*, 446(6), 742-51.

- Fujita, S., Abe, T., Drummond, M. J., Cadenas, J. G., Dreyer, H. C., Sato, Y., ... Rasmussen, B. B. (2007). Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *Journal of applied physiology*, *103*(3), 903–10.
- Galvin, H., Cooke, K., Sumners, D. P., Mileva, K. N. & Bowtell, J. L. (2013). Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *British Journal of Sports Medicine*, *47 Suppl 1*:i74–9.
- Garvican, L. A., Hammond, K., Varley, M. C., Gore, C. J., Billaut, F. & Aughey, R. J. (2013). Lower running performance and exacerbated fatigue in soccer played at 1600 m. *International journal of sports physiology and performance*, *9*(3), 397-404.
- Garvican-Lewis, L. A., Clark, S., Polglaze, T., McFadden, G. & Gore, C. J. (2013). Ten days of simulated live high: train low altitude training increases Hbmass in elite water polo players., *British Journal of Sports Medicine*, *47 Suppl 1*:i70–3.
- Garvican, L. A., Pottgiesser, T., Martin, D. T., Schumacher, Y. O., Barras, M., Gore, C. J. (2011). The contribution of haemoglobin mass to increases in cycling performance induced by simulated LH TL. *European journal of applied physiology*, *111*(6), 1089–1101.
- Ge, R. L., Witkowski, S., Zhang, Y., Alfrey, C., Sivieri, M., Karlsen, T., ... Levine, B. D. (2002). Determinants of erythropoietin release in response to short-term hypobaric hypoxia. *Journal of applied physiology*, *92*, 2361–2367
- Gilde, A. J. & van Bilsen, M. (2003). Peroxisome proliferator-activated receptors (PPARS): regulators of gene expression in heart and skeletal muscle. *Acta physiologica scandinavica*, *178*, 425-434.
- Girard, O., Amann, M., Aughey, R., Billaut, F., Bishop, D. J., Bourdon, P., ... Schumacher, Y. O. (2013). Position statement - altitude training for improving team-sport players' performance: current knowledge and unresolved issues. *British Journal of Sports Medicine*, *47 Suppl 1*:i8-16.
- Gordon, D. J., Ekelund, L. G., Karon, J. M., Probstfield, J. L., Rubenstein, C., Sheffield, L. T. & Weissfeld, L. (1986). Predictive value of the exercise tolerance test for mortality in North American men: the lipid research clinics mortality follow-up study. *Circulation*, *74*(2), 252–261.

- Gore, C. J., Hahn, A. G., Aughey, R. J., Martin, D. T., Ashenden, M. J., Clark, S. A., ... McKenna, M. J. (2001). Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiologica Scandinavica*, 173(3), 275–286.
- Gore, C. J. & Hopkins, W. G. (2005). Counterpoint: positive effects of intermittent hypoxia (live high: train low) on exercise performance are not mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of applied physiology*, 99(5), 2055-7; discussion 7-8.
- Gore, C. J., Clark, S. A. & Saunders, P. U. (2007). Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(9), 1600-9.
- Greie, S., Humpeler, E., Gunga, H. C., Koralewski, E., Klingler, A., Mittermeyer, M., ... Schobersberger, W. (2006). Improvement of metabolic syndrome markers through altitude specific hiking vacation. *Journal of endocrinological investigation*, 29(6), 497–504.
- Guo, W., Kawano, H., Piao, L., Itoh, N., Node, K. & Sato, K.. (2011). Effects of aerobic exercise on lipid profiles and high molecular weight adiponectin in Japanese workers. *International Medicine*, 50(5), 389–395.
- Haider, T., Casucci, G., Linser, T., Faulhaber, M., Gatterer, H., Ott, G., ... Bernardi, L. (2009). Interval hypoxic training improves autonomic cardiovascular and respiratory control in patients with mild chronic obstructive pulmonary disease. *Journal of Hypertension*, 27, 1648-1654.
- Hamlin, M. J., Marshall, H. C., Hellemans, J., Ainslie, P. N. & Anglem, N. (2010). Effect of intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scandinavian journal of medicine and science in sports*, 20, 651-661.
- Harms, C. A., Wetter, T. J., St Croix, C. M., Pegelow, D. F. & Dempsey, J. A. (2000). Effects of respiratory muscle work on exercise performance. *Journal of applied physiology*, 89, 131–138.
- Haufe, S., Wiesner, S., Engeli, S., Luft, F. C., & Jordan, J. (2008). Influences of normobaric hypoxia training on metabolic risk markers in human subjects. *Medicine and science in sports and exercise*, 40,1939– 1944.
- Hayes, D. P. (2010). Cancer protection related to solar ultraviolet radiation, altitude and vitamin D. *Medical Hypotheses*, 75(4), 378-382.

- Hida, W. (1999). Role of ventilatory drive in asthma and chronic obstructive pulmonary disease. *Current opinion in pulmonary medicine*, 5(6), 339–343.
- Hill-Haas, S. V., Dawson, B., Impellizzeri, F. M., & Coutts, A. J. (2011). Physiology of small-sided games training in football: a systematic review. *Sports medicine*, 41(3), 199–220.
- Ho, J. Y., Kuo, T. Y., Liu, K. L., Dong, X. Y. & Tung, K. (2014). Combining normobaric hypoxia with short-term resistance training has no additive beneficial effect on muscular performance and body composition. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(4), 935-941.
- Hoppeler, H. & Vogt, M. (2001). Muscle tissue adaptations to hypoxia. *The journal of experimental biology*, 204(Pt 18), 3133–3139.
- Huff, R. L., Lawrence, J. H., Siri, W. E, Wasserman, L. R. & Hennessy, T. G. (1951). Effects of changes in altitude on hematopoietic activity. *Medicine*, 30, 197–217.
- Humberstone-Gough, C. E., Saunders, P. U., Bonetti, D. L., Stephens, S., Bullock, N., Anson, J. M. & Gore, C. J. (2013). Comparison of live high: train low altitude and intermittent hypoxic exposure. *Journal of Sports Science and Medicine*, 12, 394-401.
- Jelkmann, W. & Lundby, C. (2011). Blood doping and its detection. *Blood*, 118(9), 2395–2404.
- Kallus, K. W. (2005). Erholungs-Belastungs-Fragebogen. Swets & Zeitlinger, Lisse..
- Katayama, K., Fujita, O., Sato, Y., Ishida, K., Iwasaki, K. & Miyamura, M. (2005). Effect of a repeated series of intermittent hypoxic exposures on ventilation response in humans. *High Altitude Medicine & Biology*, 6, 50-59
- Katayama, K., Goto, K., Ishida, K. & Ogita, F. (2010). Substrat utilization during exercise recovery at moderate altitude. *Metabolism*, 59(7), 959-966.
- Katayama, K., Fujita, O., Iemitsu, M., Kawano, H., Iwamoto, E., Saito, M. & Ishida, K. (2013). The effect of acute exercise in hypoxia on flow-mediated vasodilation. *European Journal of applied physiology*, 113(2), 349–357.
- Kawada, S. (2005). What phenomena do occur in blood flow-restricted muscle? *International Journal of KAATSU Training Research*, 1(2), 37–44.
- Kawada, S. & Ishii, N. (2005). Skeletal muscle hypertrophy after chronic restriction of venous blood flow in rats. *Med Sci Sports Exerc*, 37(7), 1144-1150.

- Kayser, B., Narici, M., Binzoni, T., Grassi, B. & Cerretelli, P. (1994). Fatigue and exhaustion in chronic hypobaric hypoxia: influence of exercising muscle mass. *Journal of applied physiology*, 76, 634–640.
- Kayser, B. & Verges, S. (2013). Hypoxia, energy balance and obesity: from pathophysiological mechanisms to new treatment strategies. *Obesity Reviews*, 14(7), 579–592.
- Kirwan, J.P., Hickner, R.C., Yarasheki, K.E., Kohrt, W.M., Wiethop, B.V. & Holloszy, J.O. (1992). Eccentric exercise induces transient insulin resistance in healthy individuals. *Journal of applied physiology*, 72(6), 2197–2202.
- Klip, A. & Marette, A. (1992). Acute and chronic signals controlling glucose transport in skeletal muscle. *Journal of cellular biochemistry*, 48(1), 51–60.
- Knaupp, W., Khilnani, S., Sherwood, J., Scharf, S. & Steinberg, H. (1992). Erythropoietin response to acute normobaric hypoxia in humans. *Journal of applied physiology*, 73(3), 837–40.
- Kon, M., Ikeda, T., Homma, T., Akimoto, T., Suzuki, Y. & Kawahara, T. (2010). Effects of acute hypoxia on metabolic and hormonal responses to resistance exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(7), 1279–785.
- Kon M, Ikeda T, Homma T, & Suzuki, Y. (2012). Effects of low-intensity resistance exercise under acute systemic hypoxia on hormonal responses. *Journal of Strength Conditioning Research*, 26(3), 611–7.
- Kong, Z., Zang, Y. & Hu, Y. (2013). Normobaric Hypoxia causes more weight loss than normoxia training after a 4-week residential camp for obese young adults. *Sleep & Breathing*, 18(3), 591–7.
- Lang, F., Busch, G. L., Ritter, M., Völk, H., Waldegger, S., Gulbins, E. & Häussinger, D. (1998). Functional significance of cell volume regulatory mechanisms. *Physiological Reviews*, 78(1), 247–306.
- Larbi, A., Kempf, J., Pawelec, G., (2007). Oxidative stress modulation and T cell activation. *Experimental Gerontology*, 42, 852–858.
- Latham, K. E., Sapienza, C. & Engel, N. (2012). The epigenetic lora: gene-environment interactions in human health. *Epigenomics*, 4, 383–402.

- Laymon Stickford, A. S., Lundgren, E. A., McKenzie, J. M., Wilhite, D. P., Chapman, R. F. (2007). Running economy changes after altitude training: role of running mechanics. *Medicine and science in sports and exercise*, 41, 507.
- Lee, W. C., Chen, J. J., Ho, H. Y., Hou, C. W., Liang, M. P., Shen, Y. W. & Kuo, C. H. (2003). Short-term altitude mountain living improves glycemic control. *High altitude medicine & biology*, 7(1), 81-91.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (1992). A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *International Journal of Sports Medicine*, 13, 209–S212.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (1997). “Living high-training low”: effect of moderate altitude acclimatization with low altitude training on performance. *Journal of applied physiology*, 83, 102–112.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (2005). Point: positive effects of intermittent hypoxia (live high: train low) on exercise performance are mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of applied physiology*, 99(5), 2053-5.
- Levine, B. D., Stray-Gundersen, J., Gore, C. J. & Hopkins, G. W. (2005). Point: Counterpoint: Positive effects of intermittent hypoxia (live high: train low) on exercise are/are not mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of applied physiology* 199(5), 2053–2058.
- Levine, B. D., Stray-Gundersen, J. & Mehta, R. D. (2008). Effect of altitude on football performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18 Suppl 1, 76–84.
- Levine, B. D. (2008). VO₂max: what do we know, and what do we still need to know? *Journal of Physiology*, 586, 25–34.
- Libby, P., Ridker, P. M. & Maseri, A. (2002). Inflammation and atherosclerosis. *Circulation* 105, 1135–1143.
- Lippl, F. J., Neubauer, S., Schipfer, S., Lichter, N., Tufman, A., Otto, B. & Fischer, R. (2010). Hypobaric hypoxia causes body weight reduction in obese subjects. *Obesity (Silver Spring)*, 18(4), 675–681.
- Loenneke, J. P. & Pujol, T. J. (2009). The use of occlusion training to produce muscle hypertrophy. *Strength and Conditioning Journal*, 31(3), 77–84.

- Mackenzie, R., Maxwell, N., Castle, P., Brickley, G. & Watt, P. (2011). Acute hypoxia and exercise improve insulin sensitivity (S(I) (2*)) in individuals with type 2 diabetes. *Diabetes/metabolism research and reviews*, 27(1), 94–101.
- Maggiorini, M., Bühler, B., Walter, M. & Oelz, O. (1990). Prevalence of acute mountain sickness in the Swiss Alps. *BMJ*, 301(6756), 853–855.
- Mair, J., Hammerer-Lercher, A., Mittermayr, M., Klingler, A., Humpeler, E., Pachinger, O. & Schobersberger, W. (2008). 3-week hiking holidays at moderate altitude do not impair cardiac function in individuals with metabolic syndrome. *International Journal of Cardiology*, 123(2), 186–188.
- Manimmanakorn, A., Hamlin, M., Ross, J., Taylor, R. & Manimmanakorn, N. (2013). Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 16, 337-342.
- Manimmanakorn, A., Manimmanakorn, N., Taylor, R., Draper, N., Billaut, F., Shearman, J. P. & Hamlin, M. J. (2013b). Effects of resistance training combined with vascular occlusion or hypoxia on neuromuscular function in athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 113, 1767-1774.
- Manini, T. M. & Clark, B. C. (2009). Blood flow restricted exercise and skeletal muscle health. *Exercise and sport sciences reviews*, 37(2), 78–85.
- Martin, D. E. (1994). The challenge of using altitude to improve performance. *New Studies in Athletics*, 9, 51–57.
- Matsuo, Y., Hashizume, T., Shioji, S. & Akasaka, T. (2008). Metabolic syndrome is strongly associated with chronic subclinical inflammation in patients achieving optimal low-density lipoprotein-cholesterol levels in secondary prevention of cardiovascular disease. *Circulation Journal*, 72(12), 2046–2050.
- Mattusch, F., Dufaux, B., Heine, O., Mertens, I. & Rost, R. (2000). Reduction of the plasma concentration of C-reactive protein following nine months of endurance training. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1), 21–24.
- Meerson, F. Z., Ustinova, E. E. & Orlova, E. H. (1987). Prevention and elimination of heart arrhythmias by adaptation to intermittent high altitude hypoxia. *Clin Cardiology*, 10(12), 783– 9.

- Meyer, L. B., Pace, N. & Vaughan, B. E. (1956). Erythrolysis on return of altitude acclimatized individuals to sea level. *Journal of applied physiology*, 9, 141–144.
- Merino, C. F. (1950). Studies on blood formation and destruction in the polycythemia of high altitude. *Blood*, 5(1), 1–31.
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X. & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1-25.
- Moore, D. R., Burgomaster, K. A., Schofield, L. M., Gibala, M. J., Sale, D. G. & Phillips, S. M. (2004). Neuromuscular adaptations in human muscle following low intensity resistance training with vascular occlusion. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4–5), 399–406.
- Moritani, T. & de Vries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *American Journal of Physical Medicine*, 58(3), 115-130.
- Mortimer, E. A. Jr, Monson, R. R. & MacMahon, B. (1977). Reduction in mortality from coronary heart disease in men residing at high altitude. *The new england journal of medicine*, 296(11), 581- 585.
- Nakajima, T., Morita, T. & Sato, Y. (2011). Key considerations when conducting KAATSU training. *Internationa Journal of KAATSU Training Research*, 7(1):1–6.
- Narici, M. V., Roi, G. S., Landoni, L., Minetti, A. E. & Ceretelli, O. (1989). Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 59(4), 310-9.
- Netzer, N. C., Chytra, R. & Küpper, T. (2008). Low intense physical exercise in normobaric hypoxia leads to more weight loss in obese people than low intense physical exercise in normobaric sham hypoxia. *Sleep and Breathing*, 12(2), 129–134
- Neubauer, J. A. (2001). Physiological and pathophysiological responses to intermittent hypoxia. *Journal of applied physiology*, 90, 1593–1599.
- Newton, R. U. & Galvão, D. A. (2008). Exercise in prevention and management of cancer. *Current Treatment Options in Oncology*, 9(2-3), 135-146.
- Neya, M., Enoki, T., Kumai, Y., Sugoh, T. & Kawahara, T. (2007). The effects of nightly normobaric hypoxia and high intensity training under intermittent normobaric hypoxia

- on running economy and hemoglobin mass. *Journal of applied physiology*, 103(3), 828-34.
- Nishimura, A., Sugita, M., Kato, K., Fukuda, A., Sudo, A. & Uchida, A. (2010). Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. *International journal of sports physiology and performance*, 5(4), 497-508.
- Nishiwaki, M., Kawakami, R., Saito, K., Tamaki, H., Takekura, H. & Ogita, F. (2011). Vascular adaptations to hypobaric hypoxic training in postmenopausal women. *The Journal of physiological sciences*, 61, 83–91.
- Oga, T., Nishimura, K., Tsukino, M., Sato, S., Hajiro, T., (2003). Analysis of the factors related to mortality in chronic obstructive pulmonary disease: role of exercise capacity and health status. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 4, 544–549.
- Okita, K., Nishijima, H., Murakami, T., Nagai, T., Morita, N., Yonezawa, K., ... Kitabatake, A. (2004). Can exercise training with weight loss lower serum C-reactive protein levels? *Arteriosclerosis, thrombosis and vascular biology*, 24(10), 1868–1873.
- Ostadal, B. & Kolar, F. (2007). Cardiac adaptation to chronic high-altitude hypoxia: beneficial and adverse effects. *Respiratory physiology & neurobiology*, 158(2–3), 224–236.
- Paavolainen, L., Häkkinen, Hamäläinen, I., Nummela, A. & Rusko, H. (1999). Explosive strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of applied physiology*, 86(5), 1527-33.
- Patakas, D., Louridas, G. & Kakavelas, E. (1982). Reduced baroreceptor sensitivity in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Throax*, 37, 292 – 295.
- Phiel-Aulin, K., Svedenhag, J. & Wide, L. (1998). Short-term intermittent normobaric hypoxia: haematological, physiological and mental effects. *Scandinavian Journal of medicine and science in sports*, 18, 132-7.
- Pierce, J. R., Clark, B.C., Ploutz-Snyder, L. L., & Kanaley, J. A. (2006). Growth hormone and muscle function responses to skeletal muscle ischemia. *Journal of applied physiology*, 101(6),1588–95.
- Pierson, D. J. (2000). Pathophysiology and clinical effects of chronic hypoxia. *Respiratory Care*, 45(1), 39-51.

- Prabhakar, N. R. & Semenza, G. L. (2012). Adaptive and maladaptive cardiorespiratory responses to continuous and intermittent hypoxia mediated by hypoxia-inducible factors 1 and 2. *Physiological Reviews*, 92(3), 967-1003.
- Reaven, G.M. (1988). Banting lecture. Role of insulin resistance in human disease. *Diabetes*, 37(12), 1595-1607.
- Reeves, G. V., Kraemer, R. R., Hollander, D. B., Clavier, J., Thomas, C.m Francois, M. & Castracane, V. D. (2006). Comparison of hormone responses following light resistance exercise with partial vascular occlusion and moderately difficult resistance exercise without occlusion. *Journal of applied physiology*, 101(6), 1616–22.
- Rice, L. & Alfrey, C. P. (2005). The negative regulation of red cell mass by neocytolysis: physiologic and pathophysiologic manifestations. *International journal of experimental cellular physiology, biochemistry and pharmacology*, 15(6), 245–250.
- Roach, R. C., Wagner, P. D. & Hackett, P. H. (2014). Translation in progress: hypoxia. *Journal of applied physiology*, 116(7), 835-6.
- Robach, P. & Lundby, C. (2012). Is live high train low altitude training relevant for elite athletes with already high total hemoglobin mass? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 22, 303-305
- Robach, P., Schmitt, L., Brugniaux, J. V., Roels, B., Millet, G., Hellard, P., ... Richalet, J. P. (2006). Living high-training low: effect on erythropoiesis and aerobic performance in highly-trained swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 423–433.
- Robertson, E. Y., Saunders, P. U., Pyne, D. B., Aughey, R. J., Anson, J. M. & Gore, C. J. (2010). Reproducibility of performance changes to simulated live high/train low altitude. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(2), 394–401.
- Ryan, A. S., & Elahi, D. (1996). The effects of acute hyperglycemia and hyperinsulinemia on plasma leptin levels: its relationships with body fat, visceral adiposity, and age in women. *The journal of endocrinology and metabolism*, 8(12), 4433–4438.
- Sargent, C., Schmidt, W., Aughey, R., Bourdon, P. C., Soria, R., Claros, J. C., ... Roach, G. D. (2013). The impact of altitude on the sleep of young elite soccer players (ISA3600). *British journal of sports medicine*, 47 Suppl 1:i86–92.

- Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Cunningham, R. B., Gore, C. J., Hahn, A. G. & Hawley, J. A. (2004). Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *Journal of applied physiology*, 96(3), 931-7.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Gore, C. J. (2009). Endurance training at altitude. *High Altitude Medicine & Biology*, 10(2), 135–48.
- Saunders, P. U., Ahlgrim, C., Vallance, B., Green, D. J., Robertson, E. Y., Clark, S. A., Schumacher, Y. O., Gore, C. J. (2010). An attempt to quantify the placebo effect from a three-week simulated altitude training camp in elite race walkers. *International journal of sports physiology and performance*, 5(4), 521–534.
- Schobersberger, W., Schmid, P., Lechleitner, M., von Duvillard, S. P., Hörtnagl, H., Gunga, H. C., ... Humpeler, E. (2003.) Austrian Moderate Altitude Study 2000 (AMAS 2000). The effects of moderate altitude (1,700 m) on cardiovascular and metabolic variables in patients with metabolic syndrome. *European Journal of Applied Physiology*, 88(6), 506–514.
- Schobersberger, W., Greie, S., Humpeler, E., Mittermeyer, M., Fries, D., Schobersberger, D., ... Gunga, H. C. (2005). Austrian Moderate Altitude Study (AMAS 2000): erythropoietic activity and Hb-O₂ affinity during a 3-week hiking holiday at moderate altitude in persons with metabolic syndrome. *High altitude medicine & biology*, 6(2), 167–177.
- Schobersberger, W., Leichtfried, V., Mueck-Weymann, M. & Humpeler, E. (2010). Austrian Moderate Altitude Studies (AMAS): benefits of exposure to moderate altitudes (1,500-2,500 m). *Sleep and Breathing*, 14(3), 201-7.
- Scragg, R. (1981). Seasonality of cardiovascular disease mortality and the possible protective effect of ultra-violet radiation. *International journal of epidemiology*, 10, 337-341.
- Siebenmann, C., Robach, P., Jacobs, R. A., Rasmussen, P., Nordsborg, N. B., Díaz, V., ... Lundby, C. (2012). “Live high – train low” using normobaric hypoxia: a double-blinded, placebo-controlled study. *Journal of applied physiology*, 112(1), 106–117.
- Shi, B., Watanabe, T., Shin, S., Yabumoto, T., Takemura, M. & Matsuoka, T. (2013). Effect of hypoxic training on inflammatory and metabolic risk factors: a crossover study in healthy subjects. *Physiological Reports*, 2(1), keine Seitenangabe.
- Shinohara, M., Kouzaki, M., Yoshihisa, T. & Fukunga, T. (1998). Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 77(1–2), 189–91.

- Schmitt, L., Millet, G., Robach, P., Nicolet, G., Brugniaux, J. V.m Fouillot, J. P. & Richalet, J. P. (2006). Influence of “living high-training low” on aerobic performance and economy of work in elite athletes. *European journal of applied physiology*, 97(5), 627-36.
- Schoenfeld, B. J. (2013). Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Medicine*, 43(3), 179–94.
- Schreuder, T. H., Nyakayiru, J., Houben, J., Thijssen, D. H. & Hopman, M. T. (2013). Impact of hypoxic versus normoxic training on physical fitness and vasculature in diabetes. *High Altitude Medicine & Biology*, 15(3), 349-55.
- Scott, B.R., Slattery, K.M. & Dascombe, B.J. (2014). Intermittent hypoxic resistance training: does it provide added benefit? *Frontiers in Physiology*, 5(397), doi: 10.3389/fphys.2014.00397
- Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V. & Dascombe, B. J. (2014). Hypoxia and resistance exercise: a comparison of localized and systemic methods. *Sports Medicine*, 44, 1037-1054.
- Steiner, S., Niessner, A., Ziegler, S., Richter, B., Seidinger, D., Pleiner, J., ... Kopp, C. W. (2005.) Endurance training increases the number of endothelial progenitor cells in patients with cardiovascular risk and coronary artery disease. *Atherosclerosis*, 181(2), 305–310.
- Stolen, T., Chamari, K., Castagna, C. & Wisloff, U. (2005). Physiology of soccer. An update. *Sports Medicine*, 35(6), 501–36.
- Strauss-Blasche, G., Riedmann, B., Schobersberger, W., Ekmekcioglu, C., Riedmann, G., Waanders, R., ... Humpeler, E. (2004). Vacation at moderate and low altitude improves perceived health in individuals with metabolic syndrome. *Journal of travel medicine*, 11(5), 300–304.
- Stray-Gundersen, J., Chapman, R. F., Levine, B. D. (2001). “Living high - training low” altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *Journal of applied physiology*, 91, 1113–1120.
- Stray-Gundersen, J. & Levine, B. D. (2008). Live high, train low at natural altitude. *Scandinavian journal of medicine and science in sports*, 18 (suppl1), 21-28.

- Suga, T., Okita, K., Takada, S., Omokawa, M., Kadoguchi, T., Yokota, T., ... Tsutsui, H. (2012). Effect of multiple set on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *European journal of applied physiology*, *112*(11), 3915–20.
- Sullivan, J. L., Bailey, D. M. & Zacharski, L. R. (2010). Letter by Sullivan et al regarding article, "Lower mortality from coronary heart disease and stroke at higher altitudes in Switzerland". *Circulation*, *121*: e376.
- Sumide, T., Sakuraba, K., Sawaki, K., Ohmura, H. & Tamura, Y. (2009). Effect of resistance exercise training combined with relatively low vascular occlusion. *Journal of science and medicine in sports*, *12*(1), 107–12.
- Takano, H., Morita, T., Iida, H., Asada, K., Kato, M., Uno, K., ... Nakajima, T. (2005). Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. *European journal of applied physiology*, *95*(1), 65–73.
- Takarada, Y., Tsuruta, T. & Ishii, N. (2004). Cooperative effects of exercise and occlusive stimuli on muscular function in low-intensity resistance exercise with moderate vascular occlusion. *The Japanese journal of physiology*, *54*(6), 585–92.
- Takarada, Y., Nakamura, Y., Aruga, S., Onda, T., Miyazaki, S. & Ishii, N. (2000). Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *Journal of applied physiology*, *88*(1), 61–5.
- Takarada, Y., Takazawa, H., Sato, Y., Takebayashi, S., Tanaka, Y. & Ishii, N. (2000). Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *Journal of applied physiology*, *88*(6), 2097–106.
- Tang, C. M., Yu, J. (2013). Hypoxia-inducible factor-1 as a therapeutic target in cancer. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, *28*(3), 401-405.
- Trial, J. & Rice, L. (2004). Erythropoietin withdrawal leads to the destruction of young red cells at the endothelial-macrophage interface. *Current pharmaceutical design*, *10*(2), 183–190.
- Umemura, T. & Higashi, Y. (2008). Endothelial progenitor cells: therapeutic target for cardiovascular diseases. *Journal of Pharmacological Sciences*, *108*, 1–6.

- Urdampilleta, A., González-Muniesa, P., Portillo, M. P., Martínez, J. A. (2012). Usefulness of combining intermittent hypoxia and physical exercise in the treatment of obesity. *Journal of physiology & biochemistry*, 68(2), 289–304.
- Ustinova, E. E., Saltykova, V. A., Didenko, V. V., Beloshitskii, P. V. & Meerson, F. Z. (1988). Effect of adaptations to periodic and continuous hypoxia in disorders of electrical stability of the heart in postinfarction cardiosclerosis. *Bull Exp Biol Med*, 105, 533–5.
- van Baarle, D., Tsegaye, A., Miedema, F., Akbar, A. (2005). Significance of senescence for virus-specific memory T cell responses: rapid ageing during chronic stimulation of the immune system. *Immunology Letters*, 97(1), 19–29.
- van Popele, N. M., Grobbee, D. E., Bots, M. L., Asman, R., Topouchian, J., Reneman, R. S., ... Witteman, J. C. (2001). Association between arterial stiffness and atherosclerosis – The Rotterdam study. *Stroke*, 32(2), 454–460.
- Vogt, M., Puntchart, A., Geiser, J., Zuleger, C., Billeter, R. & Hoppeler, H. (2001). Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *Journal of applied physiology*, 91, 173–182.
- Wachsmuth, N., Kley, M., Spielvogel, H., Aughes, R. J., Gore, C. J., Bourdon, P. C., ... Garvican-Lewis, L. A. (2013). Changes in blood gas transport of altitude native soccer players near sea-level and sea-level native soccer players at altitude (ISA3600). *British journal of sports medicine*, 47 Suppl 1:i93–9.
- Wang, X. & Proud, C. G. (2006). The mTOR pathway in the control of protein synthesis. *Physiology (Bethesda)*, 21, 362–9.
- Wang, J.S. & Lin, C.T. (2010). Systemic hypoxia promotes lymphocyte apoptosis induced by oxidative stress during moderate exercise. *European journal of applied physiology*, 108, 371–382.
- Wang, J. S., Chen, W. L., & Weng, T. P. (2011). Hypoxic exercise training reduces senescent T-lymphocyte subsets in blood. *Brain, Behavior, and Immunity*, 25(2), 270-8.
- Wehrlin, J. P., Zuest, P., Hallen, 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.

- Wenger, R. H. (2002). Cellular adaptation to hypoxia: O₂-sensing protein hydroxylases, hypoxia-inducible transcription factors, and O₂-regulated gene expression. *FASEB journal*, 16(10), 1151-62.
- Weng, N.P., Akbar, A.N. & Goronzy, J. (2009). CD28- T cells: their role in the age-associated decline of immune function. *Trends in Immunology*, 30(7), 306–312.
- Wernbom, M., Jarrebring, R., Andreasson, M. A. & Augustsson, J. (2009). Acute effects of blood flow restriction on muscle activity and endurance during fatiguing dynamic knee extensions at low load. *Journal of strength and conditioning research*, 23(8), 2389–95.
- Wetter, T. J., Harms, C. A., Nelson, W. B., Pegelow, D. F. & Dempsey, J. A. (1999). Influence of respiratory muscle work on V̇_{O₂} and leg blood flow during submaximal exercise. *Journal of applied physiology*, 87, 643–651.
- Wiesner, S., Haufe, S., Engeli, S., Mutschler, H., Haas, U., Luft, F. C. & Jordan J. (2010). Influences of normobaric hypoxia training on physical fitness and metabolic risk markers in overweight to obese subjects. *Obesity (Silver Spring)*, 18(1), 116–120.
- Wilber, R. L., Stray-Gundersen, J. & Levine, B. D. (2007). Effect of hypoxic “dose” on physiological responses and sea-level performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 39, 1590–1599.
- Wilber, R. L. (2007a). Live high—Train low: thinking in terms of an optimal hypoxic dose. *International Journal of sports physiology and performance*, 2(3), 223–38.
- Wilber, R. L. (2007b). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 39, 1610–1624.
- Wilson, R. C., Oldfield, W. L. G. & Jones, P. W. (1993). Effect of residence at altitude on the perception of breathlessness on return to sea level in normal subjects. *Clinical Science (London)* 84(2), 159–167.
- Wilson, M. H., Newman, S. & Imray, C. H. (2009). The cerebral effects of ascent to high altitudes. *The Lancet. Neurology*, 8(2), 175–191.
- Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Duvallet, A., Richalet, J. P. & Lamberto, C. (2007). Prolonged expiration down to residual volume leads to severe arterial hypoxemia in athletes during submaximal exercise. *Respiratory physiology & neurobiology*, 158(1), 75-82.

- Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Duvallet, A., Richalet, J. P. & Lamberto, C. (2008). Effects of a 4-week training with voluntary hypoventilation carried out at low pulmonary volumes. *Respiratory physiology & neurobiology*, 160 (2), 123-30.
- Yamanaka, T., Farley, R. S. & Caputo, J. L. (2012). Occlusion training increases muscular strength in division IA football players. *Journal of strength and conditioning research*, 26(9),2523–9.
- Zierath, J. R. & Wallberg-Henriksson, H. (1992). Exercise training in obese diabetic patients. Special Considerations. *Sports Medicine*, 14, 171-189.

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Themenblöcke und verwendete Suchwörter</i>	5
<i>Tab. 2: Effekte und Einsatzbereiche unterschiedlicher IH Protokolle</i>	20
<i>Tab. 3: Blut- und Belastungsparameter der LHTL-, IHE- oder Placebo Gruppe jeweils vor und nach der Hypoxieexposition</i>	21
<i>Tab. 4: Prozentueller Unterschied der veränderten Blut- und Laufparameter nach entweder LHTL oder IHE im Vergleich mit der Placebo Gruppe</i>	22
<i>Tab. 5: Durchschnittliche Veränderungen der Leistung und physiologischer Parameter nach der Intervention, und die Wahrscheinlichkeit, dass die Unterschiede in den Veränderungen "echt" sind</i>	23
<i>Tab. 6: Durchschnittliche Veränderungen der hämatologischen Parameter nach der Intervention sowie die Wahrscheinlichkeit, dass die Unterschiede in den Veränderungen "echt" sind</i>	24
<i>Tab. 7: Ergebnisse der Feldtests in Normoxie vor und nach der vierwöchigen Trainingsintervention der Hypoxiegruppe (HYP) und der Normoxiegruppe (NRM)</i>	28
<i>Tab. 8: Physiologische Parameter des RSA Tests am nicht motorisierten Laufband ermittelt in Normoxie vor (PRE) und nach (POST) dem vierwöchigen Training; HYP= Hypoxiegruppe; NRM= Normoxiegruppe</i>	28
<i>Tab. 9: Zusammenfassung von physiologischen Mechanismen hervorgerufen durch ein BFR Training sowie Faktoren, die diese Mechanismen beeinflussen</i>	35
<i>Tab. 10: Durchschnittliche Veränderungen der Leistung der drei Gruppen sowie die Wahrscheinlichkeit, dass die Unterschiede eine "echte" Verbesserung oder Verschlechterung repräsentieren</i>	39
<i>Tab. 11: Werte der Lungenfunktion, kardiorespiratorische- und Blutparameter vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm</i>	50
<i>Tab. 12: Daten der Radergometrie vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm</i>	50
<i>Tab. 13: Kardiovaskuläre und respiratorische Reaktionen bei submaximaler Belastung (1W/kg) der Hypoxie- und der Kontrollgruppe vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm</i>	56

<i>Tab. 14: Hämatologische Parameter der Hypoxie- und Kontrollgruppe vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 15: Kardiovaskuläre und respiratorische Reaktionen bei maximaler Belastung der Hypoxie- und der Kontrollgruppe vor und nach dem dreiwöchigen Atmungsprogramm</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 16: Physische Parameter sowie Laborparameter der Probanden vor und nach dem Training</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 17: Prozentuelle Veränderung einiger Parameter vor und nach dem Training</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 18: Trainingsprotokoll</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 19: Veränderungen der Körperzusammensetzung vor und nach der vierwöchigen Intervention</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 20: Hämodynamische Veränderungen vor und nach dem vierwöchigen Trainingscamp</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 21: Werte der Belastungstests und kardiovaskuläre und respiratorische Risikofaktoren vor und nach der Intervention</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 22: Auswirkungen der unterschiedlichen Protokolle auf die Lymphozyten-Teilmenge-Anzahl und auf das Verhältnis zwischen CD4 und CD8 Lymphozyten im Blut</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 23: Auswirkungen der unterschiedlichen Protokolle auf die aktivitätsabhängigen Lymphozyten-Teilmenge-Anzahl im Blut</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 24: Auswirkungen der unterschiedlichen Protokolle auf die altersabhängige Lymphozyten- Teilmenge- Anzahl im Blut</i>	<i>78</i>

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Veränderungen der Hämoglobinmasse (mod. n. Robach und Lundby, 2012, S. 304).</i>	13
<i>Abb. 2: Einsatz hypoxischer Methoden in Ausdauersportarten, glykolytischen und intermittierenden Sportarten; LHTH=live high-train high; LHTLHi=live high-train low and high interspersed; IHT= intermittient hypoxic training (mod. n. Millet et al. 2010, S. 19).</i>	25
<i>Abb. 3: Veränderungen des 1 RM (Nishimura et al., 2010, S. 503).</i>	37
<i>Abb. 4: Entwicklung der Ermüdung, repräsentiert durch die durchschnittliche Sprunghöhe während des CMJ60 Tests (5 Sekunden Intervalle). *: zeigt eine statistische Signifikanz zwischen den Gruppen (mod. n. Álvarez-Herms et al., 2013, S. 6).</i>	42
<i>Abb. 5: Vergleich des Glukosetoleranzlevels in Tallage zwischen trainierten und untrainierten Personen. Mittelwerte \pm SD. *$p < 0.05$, signifikanter Unterschied im Vergleich zur Gruppe der Trainierten am selben Zeitpunkt während des Glukosetoleranztests (mod. n. Lee et al., 2003, S. 84).</i>	46
<i>Abb. 6: Zusammenhang zwischen der Veränderung der Gesamtbelastungszeit der Radergometrie und der Veränderung der Hämoglobinmasse ($r=0.59$, $p < 0.05$); Dreiecke=Hypoxiegruppe, Kreise=Kontrollgruppe (mod. n. Burtscher et al., 2009, S. 100).</i>	51
<i>Abb. 7: Zusammenhang zwischen der Veränderung der Zeit bis zum Erreichen der anaeroben Schwelle (AT) der Radergometrie und der Veränderung der DLCO ($r=0.48$, $p < 0.05$); Dreiecke=Hypoxiegruppe, Kreise=Kontrollgruppe (mod. n. Burtscher et al., 2009, S. 101).</i>	52
<i>Abb. 8: Die Abbildung links zeigt die Veränderung der Pulswellengeschwindigkeit in der Normoxie- und Hypoxiegruppe; Die Abbildung rechts zeigt die Veränderung des preperitonealen Fetts in der Normoxie- und Hypoxiegruppe; *$p < 0.05$ im Vergleich zu den Messwerten vor dem Training in der Hypoxiegruppe (mod. n. Shi et al., 2014, S. 6).</i>	61
<i>Abb. 9: Die Veränderung der hs-CRP Werte in der Normoxie- und Hypoxiegruppe; hs-CRP= high sensitivity C-reactive protein; *$p < 0.05$ im Vergleich zu den Messwerten vor dem Training in der Hypoxiegruppe (mod. n. Shi et al., 2014, S. 7).</i>	62

Abkürzungsverzeichnis

ABI	ankle-brachial-index
AMAS	Austrian Moderate Altitude Studies
BFR	bloof flow restriction
BMI	Body Mass Index
CD	Cluster of Differentiation
CO ₂	Kohlendioxid
COPD	chronic obstructive pulmonary disease
DLCO	Lungendiffusionskapazität für Kohlenmonoxid
EMG	Elektromyografie
EPO	Erythropoetin
FEV ₁	Einsekundenkapazität
FVC	forcierte Vitalkapazität
FiO ₂	fraction of inspired oxygen
GLUT	Glukosetransporter
Hb	Hämoglobin
HCVR	hypercapnic ventilatory response
HDL	high density lipoprotein
HIF	Hypoxie induzierter Faktor
HO	endothelial heme oxygenase
HOMA	homeostasis modell asesment
HVR	hypoxic ventilatory response
hs-CRP	high sensitivity C-reactive protein
HRR _{max}	maximale Herzfrequenzreserve
IFN	Interferon
IH	intermittierende Hypoxie

IHE	intermittent hypoxic exposure
IHT	intermittierendes hypoxisches Training
IHRT	intermittent hypoxic resistance training
IL	Interleukin
KLRG1	Killer cell lectin-like receptor G1
KHK	Koronare Herzkrankheit
LDL	low density lipoprotein
LHTL	Live High-Train Low
LHTLH	Live High-Train Low and High
LHTH	Live High-Train High
LLTH	Live Low-Train High
MPO	Myeloperoxidase
NO	Stickstoffmonoxid
O ₂	Sauerstoff
PWV	pulse wave velocity
sTfR	soluble transferrin receptor
1 RM	one repetition maximum
RER	Respiratorischer Quotient
ROS	reactive oxygen species
RPE	rate of percieved exertion
SaO ₂	arterielle Sauerstoffsättigung
Th Zelle	T-Helfer Zelle
VE	Ventilation
VO _{2max}	Maximale Sauerstoffaufnahme
WHR	Waist to Hip Ratio
W _{max}	maximale Arbeitslast (Watt)

Anhang

Lebenslauf

- Persönliche Angaben:** Iris Khanna, BSc
e-mail: iris.khanna@hotmail.com
Staatsangehörigkeit: Österreich
- Schulbildung:** 1994 -1998 Volksschule Telfs
1998 -2002 Gymnasium Stams
2002-2007 Oberstufenrealgymnasium für
Leistungssportler in Innsbruck
Reifeprüfung am 3. Juni 2007
- Berufsausbildung:** 2008-2009 Ausbildung zur Dipl. Body- Vitaltrainerin an der
Body and Health Academy in Wien
2010-2013 Bachelorstudium Gesundheits- und Leistungssport in
Innsbruck
Seit 2013 Masterstudium Sportwissenschaft mit Schwerpunkt
Trainingstherapie in Wien
2012-2013 Ausbildung zur staatlich geprüften
Tennisinstructorin in Innsbruck
2013-2014 Ausbildung zur staatlich geprüften Tennislehrerin in
Wien
- Praktika:** November 2014-Dezember 2014, Rehabilitationszentrum Bad
Pirawarth, Trainingstherapie/Sporttherapie
Jänner 2015-Feber 2015, Rehamed-Tirol Innsbruck,
Trainingstherapie/Sporttherapie
Feber 2015-März 2015, Rehabilitationszentrum Bad Häring,
Trainingstherapie/Sporttherapie

Besondere Kenntnisse

und Eigenschaften: ehemalige Leistungstennispielerin

Sprachkenntnisse: Englisch in Wort und Schrift
Französisch Grundkenntnisse

Sonstiges: Führerschein B

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und nur die ausgewiesenen Hilfsmittel verwendet habe. Diese Arbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht (z. B. für andere Lehrveranstaltungen) noch von anderen Personen (z. B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt.

Wien, im April 2015

Iris Khanna