

Einfluss von Höhentrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

**Inwieweit wirken sich die
Höhentrainingskonzepte „living high – training
high“ und „living high – training low“ unter
Betrachtung der physiologischen
Anpassungsmechanismen auf die
Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage aus?**

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Bachelor of Education (B. Ed.)

an der Fakultät Sport- und Gesundheitswissenschaften der Technischen Universität
München.

Betreuer/-in	M.Sc. Katharina Appel Lehrstuhl für Präventive Pädiatrie
Aufgabensteller/-in	M.Sc. Katharina Appel Lehrstuhl für Präventive Pädiatrie
Eingereicht von	Kira Reichling

Eingereicht am	München, den 30.07.2021
-----------------------	-------------------------

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1. Einleitung	1
2. Theoretischer Hintergrund	3
2.1. Höhe und physiologische Anpassungsprozesse	3
2.1.1. Einteilung von Höhe	3
2.1.2. Akklimatisation	4
2.1.3. Physiologische Anpassungsprozesse	6
2.1.3.1. Erythrozyten	6
2.1.3.2. Hämoglobin	6
2.1.3.3. Erythropoetin und Erythropoese.....	7
2.1.3.4. Retikulozyten.....	7
2.1.3.5. Hämatokrit	7
2.1.3.6. Blutplasma und Plasmavolumen	7
2.1.4. Relevanz von Höhentraining im Ausdauersport.....	8
2.1.5. Ausdauerleistungsfähigkeit	9
2.1.6. Maximale Sauerstoffaufnahme VO ₂ max	10
2.1.7. Höhentraining	10
2.1.7.1. „Living high – training high“	10
2.1.7.2. „Living high – training low“.....	11
2.1.7.3. „Living low – training high“	11
3. Ziele und Hypothesen	12
4. Methodik.....	13
4.1. Datenbanken und Suchbegriffe	13
4.2. Ein- und Ausschlusskriterien.....	14
4.3. Durchführung der Recherche.....	15
4.4. Qualitative Auswertung	17
5. Ergebnisse	19
5.1. LHTL-Studien: Ergebnisse vor und nach dem Höhentraining.....	21

5.2. LHTH-Studien: Ergebnisse vor und nach dem Höhentraining	27
5.3. LHTL vs. LHTH im direkten Vergleich: Ergebnisse vor und nach dem Höhentraining.....	28
6. Diskussion	35
6.1. Zusammenfassung und kritische Betrachtung der Ergebnisse.....	35
6.2. Einflussfaktoren auf die Verbesserung der Leistungsfähigkeit nach der Höhe	36
6.3. Vergleich der Höhentrainingskonzepte LHTH und LHTL	40
6.4. Limitationen.....	41
7. Fazit und Ausblick.....	42
8. Literaturverzeichnis	43

Abstract

Hintergrund und Zielsetzung: Höhenttraining ist heute fester Bestandteil des Trainingsplanes eines jeden Ausdauerleistungssportlers, um die Konkurrenzfähigkeit sicherzustellen. Das primäre Ziel ist die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit. Umstritten ist allerdings die Wirksamkeit von Höhenttrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage. Diese Arbeit untersucht schließlich die Forschungsfrage, inwieweit sich die zwei Höhenttrainingskonzepte „living high – training high“ und „living high – training low“ auf die Ausdauerleistungsfähigkeit im Flachland nach absolvierter Höhenexposition auswirken.

Methode: Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Datenbanken wurden nach Studien mit den beiden Höhenttrainingskonzepten durchsucht. Die Treffereingrenzung erfolgte mit Hilfe von Ein- und Ausschlusskriterien und der Phasen des PRISMA – Flussdiagramms. Die Qualitätsüberprüfung erfolgte mit Hilfe der CASP Checklisten. So ergab sich ein Einschluss von acht Studien, die hinsichtlich der Auswirkungen der beiden Höhenttrainingskonzepte auf die Leistungsfähigkeit untersucht wurden.

Ergebnisse: Die Auswertung und Analyse der dieser Bachelorarbeit zugrundeliegenden Studien erfolgten über die definierten Blutwerte Hämoglobingesamtmasse bzw.-konzentration, dem Hämatokrit, dem Erythrozytenvolumen und EPO sowie VO₂max und Time Trials der Athleten vor und nach dem Höhenttraining. Die Ergebnisse zeigten, dass sich in sieben von acht Studien hämatologische Anpassungsprozesse nachweisen ließen, die bei Kontrollgruppen nicht beobachtet wurden. Daraus ergab sich nachweislich in sieben von acht Studien eine verbesserte Ausdauerleistungsfähigkeit im Flachland nach dem Höhenttraining. Ein Vergleich der beiden untersuchten Höhenttrainingskonzepte deutete darauf hin, dass speziell die Studien nach dem LHTL – Konzept diese deutlich verbessern konnten.

Diskussion: Die Ergebnisse der Studien beweisen, dass die Höhenexposition bei beiden Höhenttrainingskonzepten grundsätzlich zu physiologischen Anpassungsprozessen führt. Diese sorgen insbesondere beim LHTL für einen positiven Einfluss auf die Ausdauerleistungsfähigkeit. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Konzepten zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit scheint in der Höhe des zu absolvierenden Trainings zu liegen. Somit eignet sich speziell das LHTL – Konzept zur Verbesserung dieser in Tallage.

Abstract

Background and study aim: Altitude training is an integral part of any competitive endurance athlete's training plan to ensure competitiveness. This is supposed to help to improve the endurance performance. However, it is controversial whether altitude training concepts influence the endurance performance at sea level. This paper examines the extent to which the two altitude training concepts "living high – training high" and "living high – training low" affect the endurance performance after exposure to altitude.

Methods: To answer this research question, a systematic literature review was conducted. Databases were searched for trials using the two altitude training concepts. The hits were narrowed down using inclusion and exclusion criteria and the phases of the PRISMA flowchart. The quality check was performed using the CASP checklists. This led to an inclusion of eight trials that were examined regarding the effects of the two altitude training concepts on endurance performance.

Results: The evaluation and analysis of the trials examined were performed on the blood values of total hemoglobin mass or concentration, hematocrit, erythrocyte volume, and EPO, as well as VO_2 max and time trials of the athletes before and after altitude training. The results show that hematological adaptation processes occurred in seven out of eight trials, which could not be seen in control groups. This demonstrably resulted in improved endurance performances at sea level after altitude training in seven out of eight trials. A comparison of the two altitude training concepts which were examined, indicated that especially the studies that trained according to the LHTL were able to improve their endurance performance significantly.

Discussion: The results of the studies indicate that altitude exposure leads to physiological adaptation processes in both altitude training concepts. Especially with the LHTL concept, these adaptations have a positive influence on endurance performance. The main difference between the two concepts for improving performances seems to be in the altitude of the training completed. Thus, the LHTL concept is particularly suitable for improving endurance performance at sea level.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen des „norwegischen Modells“, Eigene Darstellung nach Wehrlin, 2005, S. 72.....	5
Abbildung 2: Übersicht der Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, Eigene Darstellung.....	9
Abbildung 3: Übersicht zum Ablauf der Literaturrecherche, Eigene Darstellung.....	13
Abbildung 4: Übersicht der Phasen des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung nach Moher et al., 2009	17
Abbildung 5: Time Trial nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019	22
Abbildung 6: VO ₂ max nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019	22
Abbildung 7: Time Trial nach Stray-Gundersen et al., 2001, Eigene Darstellung nach Stray-Gundersen et al., 2001	23
Abbildung 8: VO ₂ max nach Stray-Gundersen et al., 2001, Eigene Darstellung nach Stray-Gundersen et al., 2001	24
Abbildung 9: Time Trial nach Wehrlin et al., 2006, Eigene Darstellung nach Wehrlin et al., 2006	25
Abbildung 10: VO ₂ max nach Bruginaux et al., 2005, Eigene Darstellung nach Bruginaux et al., 2005	26
Abbildung 11: Time Trial nach Levine et al., 1997, Eigene Darstellung nach Levine et al., 1997	29
Abbildung 12: VO ₂ max nach Levine et al., 1997, Eigene Darstellung nach Levine et al., 1997	30
Abbildung 13: VO ₂ max nach Christoulas et al., 2011, Eigene Darstellung nach Christoulas et al., 2011	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Höhe, Eigene Darstellung nach Pollard und Murdoch, 1997, S. 1 f.....	3
Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien zur Auswahl der Studien, Eigene Darstellung	15
Tabelle 3: Phase Identifikation des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung	16
Tabelle 4: Übersicht der eingeschlossenen Studien nach PRISMA-Flussdiagramm, Eigene Darstellung.....	20
Tabelle 5: Blutwerte nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019	22
Tabelle 6: Blutwerte nach Stray-Gundersen et al., 2001, Eigene Darstellung nach Stray-Gundersen et al., 2001	24
Tabelle 7: Blutwerte nach Bruginaux et al., 2005, Eigene Darstellung nach Bruginaux et al., 2005	26
Tabelle 8: Blutwerte nach Garvican-Lewis et al., 2015, Eigene Darstellung nach Garvican-Lewis et al., 2015	27
Tabelle 9: Blutwerte nach Levine et al., 1997, Eigene Darstellung nach Levine et al., 1997	29
Tabelle 10: Blutwerte nach Christoulas et al., 2011, Eigene Darstellung nach Christoulas et al., 2011	31
Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse der Studien, Eigene Darstellung	32

Abkürzungsverzeichnis

Bzw.	-	Beziehungsweise
Ca.	-	Circa
CASP	-	Critical Appraisal Skills Program
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
Con	-	Kontrollgruppe
DI	-	Deziliter
EPO	-	Erythropoetin
Etc.	-	Ecetera
Fe ²⁺	-	Eisen
G	-	Gramm
H	-	Stunde
Hb _{conc}	-	Hämoglobinkonzentration
Hb _{mass}	-	Hämoglobingestamtmasse
HiHiLo	-	High-High-Low
Hkt	-	Hämatokrit
Kg	-	Kilogramm
LHTH	-	Living high – training high
LHTL	-	Living high – training low
M	-	Meter
Max.	-	Maximal
MCV	-	Erythrozytenvolumen
Min	-	Minute
ml	-	Milliliter
O ₂	-	Sauerstoff
P	-	Signifikanzniveau
PICO	-	Population, Intervention, Comparison, Outcome
PR	-	Personal Record
PRISMA	-	Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses
RCT	-	Randomised Controlled Trial
Sec	-	Sekunde
U.a.	-	Unter anderem
Vgl.	-	Vergleich
VO ₂ max	-	Maximale Sauerstoffaufnahme
Z.T.	-	Zum Teil

1. Einleitung

Marathonweltrekord in 2:01:39 h (BMW Berlin-Marathon, 2021). Eine solche Laufzeit auf der Strecke eines Marathons kann nur durch strukturiertes und planmäßiges Ausdauertraining erreicht werden. Insgesamt hat die Leistungsdichte und somit auch die Anzahl an Weltrekorden im Ausdauerbereich in den letzten Jahren stark zugenommen (vgl. Wehrlin, 2005, S. 68). Diese Zunahme ist auch auf die Etablierung von Trainingseinheiten in der Höhe zurückzuführen. In der Tat sind Höhentrainingskonzepte, deren physiologischen Effekte, wie beispielsweise die hämatologischen Anpassungsprozesse, heute kaum noch aus dem Training von Athleten wegzudenken und bilden einen festen Bestandteil im Ausdauersport. Bis heute besitzt Höhenttraining eine enorme Relevanz im Ausdauersport. Es ist bekannt, dass Läufer*innen aus Kenia und Äthiopien, die dauerhaft in der Höhe leben und trainieren, besonders im Ausdauerbereich die Weltspitze dominieren. Aus diesem Grund absolvieren Profisportler regelmäßig Höhentrainingslager und erhoffen sich somit eine Leistungssteigerung.

Das Konzept des Höhentrainings findet spätestens seit den Olympischen Spielen 1968 große Beachtung (vgl. Friedemann 2000, S. 418). Der Austragungsort Mexiko City, eine Stadt, die auf ca. 2300 Höhenmeter liegt, zeigte auf, dass speziell Ausdauersportler unter den hypoxischen¹ Bedingungen an Leistungsfähigkeit einbüßten. Infolgedessen kam es zur Entwicklung von ersten Höhentrainingskonzepten. Diese sollten zur Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit unter Höhenbedingungen führen (vgl. Marées, 2003, S. 597). Daraus entwickelte sich das erste und bekannteste Höhentrainingskonzept „living high – training high“. Inzwischen haben sich neben dem klassischen „living high – training high“ noch weitere Konzepte wie das „living high – training low“ und „living low – training high“ etabliert. Das wesentliche Ziel des Höhentrainings ist es, dass sich der Organismus an die hypoxischen Bedingungen, die in der Höhe herrschen, akklimatisiert und somit eine Verbesserung der aeroben² Leistungsfähigkeit erzeugt wird (vgl. Friedmann 1997, S. 987).

Höhenttraining kann unterschiedlich eingesetzt werden. Zum einen nutzen Athleten dieses zur „Vorbereitung auf einen Wettkampf in der Höhe“ (Schobersberger, 2017, S. 520), zum anderen zur „Vorbereitung auf einen Wettkampf in Tallage/Normoxie“ (Schobersberger, 2017, S. 520). Dabei ist in der Wissenschaft unumstritten, dass sich die „living high – training high“ Methode als optimale Trainingsmethode eignet, um sich auf die in

¹ Hypoxie bezeichnet einen Sauerstoff (O₂) - Mangel der Umgebung, respektive eine O₂-Mangelversorgung von Organen oder des Gesamtorganismus (Berghold, 2015, S. 294)

² Energiegewinnung durch oxidativen Abbau von Kohlenhydraten, Fetten, Eiweißen (Spring, 2008, S. 24)

Höhe stattfindenden Wettkämpfe vorzubereiten (vgl. Wehrlin, 2005, S. 68). Deutlich umstrittener ist die Durchführung von Höhentraining zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit im Flachland (vgl. Marées, 2003, S. 597).

Aufgrund der oben aufgezeigten Hintergründe, der Relevanz und Aktualität wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit untersucht, inwieweit sich Höhentrainingskonzepte wie das „living high – training high“ und „living high – training low“ auf die Ausdauerleistungsfähigkeit auswirken und zur Steigerung dieser im Flachland führen. Zur Analyse werden zunächst in *Kapitel 2* im theoretischen Hintergrund die relevanten hämatologischen Parameter und die physiologischen Anpassungsprozesse bei Höhenexposition erläutert sowie die unterschiedlichen Höhentrainingskonzepte definiert und vorgestellt. In *Kapitel 4 und 5*, die die Methodik und die Studienergebnisse umfassen, werden die durchgeführte systematische Literaturrecherche und die sich daraus resultierenden Ergebnisse dargestellt. Anschließend werden in *Kapitel 6* die Ergebnisse unter Betrachtung der Fragestellung und der aufgestellten Hypothesen aus *Kapitel 3* kritisch beurteilt und diskutiert. Für die Analyse bilden die hämatologischen Anpassungsprozesse die Grundlage zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit. Abschließend wird in *Kapitel 7* ein Fazit gezogen, welches die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfasst und einen Ausblick für die Zukunft dieses Forschungsgebietes gibt.

2. Theoretischer Hintergrund

Folgend werden die theoretischen Hintergründe für diese Bachelorarbeit näher erläutert. Dabei wird zunächst „Höhe“ definiert und auf die Einteilung von Höhe sowie Akklimatisation eingegangen. Die Blutparameter, die sich aufgrund der hypoxischen Verhältnisse verändern bzw. anpassen und für diese Arbeit von Relevanz sind, werden anschließend näher beleuchtet. Des Weiteren wird die Relevanz von Höhentraining im Ausdauersport erläutert. Im Anschluss wird auf die Ausdauerleistungsfähigkeit eingegangen, bevor abschließend die unterschiedlichen Höhentrainingskonzepte vorgestellt werden.

2.1. Höhe und physiologische Anpassungsprozesse

Die Hypoxie in der Höhe bewirkt physiologische Anpassungsprozesse im Körper (vgl. Marées, 2003, S. 589), welche im Folgenden im Zusammenhang mit Höhe vorgestellt werden.

2.1.1. Einteilung von Höhe

In der medizinischen Literatur wird Höhe entsprechend den physiologischen Auswirkungen auf den Menschen unterteilt. Höhe wird grundsätzlich in Bezug auf den Meeresspiegel gemessen. So sind die Höhenangaben im weiteren Verlauf dieser Bachelorarbeit zu verstehen. Demnach unterscheiden Pollard und Murdoch (1997) folgende Höhenlagen (vgl. *Tabelle 1: Einteilung von Höhe, Eigene Darstellung nach Pollard und Murdoch, 1997, S. 1 f.*):

Tabelle 1: Einteilung von Höhe, Eigene Darstellung nach Pollard und Murdoch, 1997, S. 1 f.

Definition	Höhenmeter (in m)	Eigenschaften
Mittlere Höhe	1500 - 2500	Erste physiologische Veränderungen aufgrund hypoxischer Begebenheiten; arterielle Sauerstoffsättigung verbleibt bei >90%
Große Höhe	2500 - 3500	Hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Höhenkrankheit

Definition	Höhenmeter (in m)	Eigenschaften
Sehr große Höhe	3500 - 5800	Arterielle Sauerstoffsättigung <90%; bei Belastung deutliche Hypoxie
Extreme Höhe	>5800	Extreme Verschlechterung der Sauerstoffversorgung

In der Tabelle ist zu erkennen, dass mit zunehmender Höhe die gesundheitlichen Einschränkungen für den Menschen zunehmen. Dieses Phänomen lässt sich damit erklären, dass mit steigender Höhe der Luftdruck reduziert ist (vgl. Friedemann, 1997, S. 987). Der Sauerstoffpartialdruck (O_2 -Partialdruck) in der Einatemluft sinkt, was zu einer Verminderung dieses im arteriellen Blut führt (vgl. Wehrin, 2005, S.69). Dies hat zur Folge, dass der Sauerstoffgehalt in der Luft und somit auch im menschlichen Organismus sinkt. Der Körper adaptiert sich an den zunehmenden relativen Sauerstoffmangel (hypoxische Verhältnisse) in der Luft mit einer Reihe von Anpassungsreaktionen, auch Akklimation genannt (vgl. Pollard und Murdoch, 1997, S. 4).

2.1.2. Akklimation

Der physiologische Prozess der Anpassung, wie unter 2.1.1. abschließend erwähnt, wird in der Fachsprache als Akklimation bezeichnet, welche ab einer Höhe von 1500 m stattfindet (vgl. Pollard und Murdoch, 1997, S. 4). Ziel dieser Anpassung ist ein verbesserter O_2 -Transport zu den Zellen durch eine gesteigerte Atemfrequenz, Atmungstiefe sowie einer gesteigerten Herzfrequenz und Steigerung der Anzahl der roten Blutkörperchen zu gewährleisten (vgl. Pollard und Murdoch, 1997, S. 4 f.). Grundsätzlich ist Akklimation bis zu einer Höhe von 5500 m möglich (vgl. Pollard und Murdoch, 1997, S. 5). Ab dieser Höhe nehmen die gesundheitlichen Einschränkungen zu. Akklimation ist ein sehr individueller Prozess. Grundsätzlich gilt allerdings, dass jeder Mensch in der Lage ist, sich an die veränderten Bedingungen in der Höhe anzupassen (vgl. Pollard und Murdoch, 1997, S. 5). Eine Akklimation bis zu 4000 m ist innerhalb von wenigen Tagen bis zu einer Woche möglich (vgl. Mees, 2006, S. 24). Ein Anstieg des Erythropoetinspiegels, der eine gesteigerte Erythropoese und somit eine Zunahme von Erythrozyten (Erläuterung folgt unter *Kapitel 2.1.3.3*) bedingt, ist bereits nach ein bis zwei Stunden in der Höhe zu verzeichnen (vgl. Friedemann, 1997, S. 988). Diese physiologischen Anpassungsprozesse auf hämatologischer Ebene machen sich Ausdauersportler im

Rahmen ihres Trainings zunutze. Für die optimale Nutzung dieser Effekte spielt die zeitliche Synchronisation von Akklimation und Wettkampf eine wichtige Rolle für die Verbesserung der Leistungsfähigkeit. Diese zeitliche Abfolge wird beispielsweise durch das „*norwegische Modell*“ definiert. Die Gültigkeit dieses Modells gilt allerdings unter Einschränkungen der individuellen Voraussetzungen von Athleten (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Das Modell besagt, dass die ersten zwei Tage nach der Rückkehr aus der Höhe als Ruhephase gelten. Dennoch definiert Wehrlin, 2005, diese Zeitspanne nach der Rückkehr vom Höhentaining als geeignet für eine gute Leistungsfähigkeit unter der Bedingung, dass nur ein Wettkampf absolviert wird. Denn nach diesen zwei Tagen folgt im „*norwegischen Modell*“ eine instabile acht-tägige Trainingsphase mit gesteigerter Trainingsmenge und -intensität (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Diese Trainingsphase wird auch „*period of poor performance*“ genannt und es wird von der Teilnahme an Wettkämpfen abgeraten (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Darauf folgt die Vorwettkampfphase (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Die Vorwettkampfphase ist gekennzeichnet durch stabile Leistungen und erhöhte Leistungsfähigkeit (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Das Trainingsniveau in dieser Phase ist hoch. Das Absolvieren von Testwettkämpfen ist hier sinnvoll. Diese Phase hält fünf bis elf Tage an (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Im Anschluss folgt schließlich die vier bis sieben Tage dauernde Wettkampfphase, in der Höchstleistung erreicht werden kann (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Nach dem „*norwegischen Modell*“ eignet sich die Zeitspanne 16 bis 24 Tage nach dem Höhentaining für die beste Leistungsfähigkeit (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Der hier vorgestellte Phasenablauf ist in *Abbildung 1: Phasen des „norwegischen Modells“*, *Eigene Darstellung nach Wehrlin, 2005, S. 72* dargestellt.

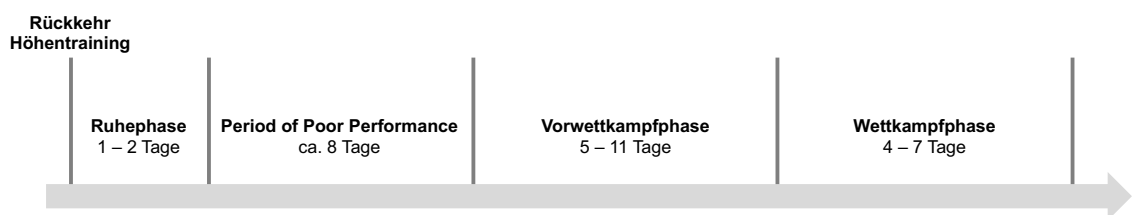


Abbildung 1: Phasen des „norwegischen Modells“, Eigene Darstellung nach Wehrlin, 2005, S. 72

Hintergrund dieser Empfehlung des „*norwegischen Modells*“ ist, dass sich die Erythro-poetinkonzentration unmittelbar nach dem Höhentaining zunächst verringert. Dies führt gleichzeitig zu einer Reduktion der in der Höhe erworbenen Hämoglobinmasse (vgl. Burtcher, 2010, S. 160). Aus dem Grund empfiehlt das „*norwegische Modell*“ eine Teilnahme an Wettkämpfen zwei bis drei Wochen nach Rückkehr.

2.1.3. Physiologische Anpassungsprozesse

2.1.3.1. Erythrozyten

Die Erythrozyten, auch rote Blutkörperchen genannt, sind neben den Leukozyten und Thrombozyten Bestandteil des menschlichen Blutes (vgl. Schmitz, 2015, S. 294). Die Hauptaufgabe der Erythrozyten ist der Transport von Atemgasen (vgl. Schmitz, 2015, S. 294). Sie sind runde, bikonkave³ Zellen, welche sich leicht verformen (vgl. Schmitz, 2015, S. 294). Diese Verformbarkeit ermöglicht es ihnen, in alle Gefäße des menschlichen Organismus von unterschiedlichsten Durchmessern zu gelangen. Das Hämoglobin ist der wichtigste Bestandteil der Erythrozyten. Dieses ist Voraussetzung, dass die Atemgase O₂ und Kohlendioxid (CO₂) von den Erythrozyten zu den Organen hin- und abtransportiert werden können (vgl. Schmitz, 2015, S. 294).

Das Erythrozytenvolumen, auch MCV (mittleres korpuläres Volumen) genannt, beschreibt die durchschnittliche Größe eines Erythrozyten und wird durch das Verhältnis Hämatokrit zu Erythrozytenanzahl errechnet (vgl. Amboss, 2020). Eine Erhöhung des Erythrozytenvolumens geht mit einer verbesserten Sauerstofftransportkapazität einher (vgl. Schmidt, 1999, S. 346).

2.1.3.2. Hämoglobin

Hämoglobin ist das Hauptprotein in Erythrozyten und gibt dem Blut seine charakteristisch rote Farbe. Es setzt sich aus zwei Teilen zusammen: dem Protein Globin und der Hämgruppe. Jedes Hämoglobinmolekül besteht aus vier Globinen, die wiederum vier Hämgruppen gebunden haben (vgl. Schmitz, 2015, S. 294). Die Hämgruppe enthält ein zweiwertiges Eisenatom (Fe²⁺) (vgl. Schmitz, 2015, S. 294), das die Bindungsstelle für den Sauerstoff ist. Bei vollständiger Besetzung der vier Hämgruppen kann ein Hämoglobinmolekül daher maximal vier Sauerstoffmoleküle transportieren (vgl. Schmitz, 2015, S. 295). Der Gasaustausch findet in den Alveolen der Lungen mittels Diffusion statt und O₂ kann dort an das Hämoglobin binden. Physiologisch ist eine Sauerstoffsättigung von 98% im arteriellen Blut (vgl. Schmitz, 2015, S. 295).

Die totale Hämoglobinmenge, auch Hämoglobingesamtmasse genannt, beschreibt die „absolut verfügbare Menge des sich im Körper befindlichen sauerstofftransportierenden Moleküls“ (Prommer, 2009, S. 293) und liefert in der sportmedizinischen Diagnostik einen Anhaltspunkt über die aerobe Leistungsfähigkeit (vgl. Prommer, 2009, S. 293). Eine Steigerung der totalen Hämoglobinmenge kann durch Ausdauer- und Höhenttraining erzielt werden. Diese in Kombination mit einem erhöhten Herzminutenvolumen ermöglicht

³ von beiden Seiten eingedellt

einen hohen Sauerstofftransport, was wiederum zu einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit (siehe *Kapitel 2.1.5*) führt (vgl. Prommer, 2009, S. 293).

2.1.3.3. Erythropoetin und Erythropoese

Erythropoetin, kurz EPO, ist ein Hormon, das überwiegend im Nierengewebe gebildet wird. Die wichtigste Aufgabe dieses Hormons ist es, die Bildung der roten Blutkörperchen im Knochenmark anzuregen und dadurch die Konzentration zu erhöhen (vgl. Schmitz, 2015, S. 243). Durch eine vermehrte Ausschüttung von EPO kann die Sauerstofftransportkapazität gesteigert werden (vgl. Schmitz, 2015, S. 243). Die Produktion und Ausschüttung von EPO wird durch einen sinkenden O₂-Partialdruck im Nierengewebe ange-regt.

Der Prozess der Bildung und Reifung der Erythrozyten wird als Erythropoese bezeichnet. Für diesen Prozess der Neubildung fungiert das oben genannte Hormon EPO neben Sauerstoffmangel als einer der wichtigsten hormonellen Stimulatoren (vgl. Schobersberg, 2017, S. 518). Die Erythropoese läuft überwiegend im Knochenmark ab und dauert fünf bis sieben Tage (vgl. Schmitz, S. 306). Ausgehend für diese ist die hämatopoetische Stammzelle. Diese entwickelt sich folgend in eine myeloische Vorläuferzelle. EPO und andere Faktoren induzieren die Entwicklung des Proerythroblasts, der im folgenden Schritt weiter zum Erythroblasten und zum Normoblasten reift. Aus diesem entsteht der Retikulozyt, der im letzten Schritt der Erythropoese zum Erythrozyten im Blut reift (vgl. Schmitz, 2015, S. 306).

2.1.3.4. Retikulozyten

Der Retikulozyt ist die direkte Vorläuferzelle des Erythrozyten. Das Vorhandensein von Retikulozyten im Blut kann Hinweise auf die Knochenmarksaktivität geben (vgl. Schmitz, 2015, S. 306). Eine gesteigerte Anzahl an Vorläuferzellen kann also auf eine gesteigerte Erythropoese hindeuten.

2.1.3.5. Hämatokrit

Der Hämatokrit ist das Verhältnis von zellulären (festen) Bestandteilen zu Flüssigkeit im Blut, sprich fester zu flüssiger Bestandteile. Da Erythrozyten 99% der zellulären Bestandteile ausmachen, lässt sich aus dem Hämatokrit der Erythrozytenanteil am Gesamtblutvolumen feststellen (vgl. Schmitz, 2015, S. 291).

2.1.3.6. Blutplasma und Plasmavolumen

Das Blut setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: den Blutzellen, die circa 42% des Gesamtvolumens ausmachen, die verbleibenden 58% sind das Blutplasma (vgl. Menche, 2017, S. 190). Blutplasma besteht zu 90% aus Wasser und zu 10% aus

Proteinen, Metaboliten (Stoffwechselprodukte) und Elektrolyten (vgl. Schmitz, 2015, S. 292). Das Volumen des gesamten Blutplasmas wird auch Plasmavolumen genannt.

2.1.4. Relevanz von Höhenttraining im Ausdauersport

Die relevantesten Anpassungsprozesse beim Höhenttraining, die durch das „live high“ hervorgerufen werden, sind die Zunahme des Erythrozytenvolumens und die Zunahme der Hämoglobingesamtmasse (vgl. Wehrlin, 2005, S. 69). Durch die Erhöhung der Anzahl der roten Blutkörperchen und somit auch die des Hämoglobins ist ein gesteigerter Sauerstofftransport im Körper der Athleten möglich. Dies führt schlussendlich zu einer Zunahme der maximalen Sauerstoffaufnahme ($VO_2\text{max}$) (siehe *Kapitel 2.1.6.*) und somit zu einer Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit (vgl. Wehrlin, 2005, S.69). Kennzeichen der Höhenlage ist generell ein im Vergleich zur Tallage verringerter O_2 -Partialdruck. Aufgrund dieser Situation kommt es zu einer reduzierten O_2 -Sättigung im arteriellen Blut, was die Produktion und Ausschüttung des in der Niere produzierten Hormons EPO stimuliert (vgl. West, 2013, S. 128). Diese Anpassung erfolgt typischerweise sehr schnell, was bereits nach zwei Stunden zu einer messbaren Erhöhung der EPO-Konzentration in hypoxischer Umgebung führt (vgl. West, 2013, S. 128). Die daraus resultierende gesteigerte Erythropoese führt zu einem Anstieg der Erythrozytenmasse (vgl. West, 2013, S.130). Der Anstieg der Hämoglobinkonzentration lässt sich neben der Vermehrung der Erythrozytenmasse auch durch Abnahme des Plasmavolumens durch eine u.a. gesteigerte Diurese in der Höhe erklären (vgl. Friedemann, 2000, S. 420). Die gesteigerte Hämoglobingesamtmasse sorgt nun für eine zunehmende Sauerstofftransportkapazität. Daraus resultiert ein Anstieg der O_2 -Konzentration im Blut (vgl. West, 2013, S.132) und so kann der reduzierte arterielle Sauerstoffpartialdruck im menschlichen Organismus kompensiert werden.

Neben Anpassungen der Muskulatur bzw. des Muskelstoffwechsels, der Atmung, der Herzfrequenz, etc. sind die oben aufgelisteten hämatologischen Akklimatisationseffekte der Grund, weswegen Ausdauersportler auf Höhenttraining zur Verbesserung ihrer Leistungsfähigkeit setzen. Sie spielen im Leistungssport eine bedeutende Rolle zur Vorbereitung auf Wettkämpfe. Die nachfolgende Abbildung zeigt diese Faktoren zur Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden die hämatologischen Anpassungsprozesse fokussiert, welche in *Abbildung 2: Übersicht der Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, Eigene Darstellung* in der unteren Hälfte zu sehen sind, und der Einfluss dieser auf die Ausdauerleistungsfähigkeit analysiert.

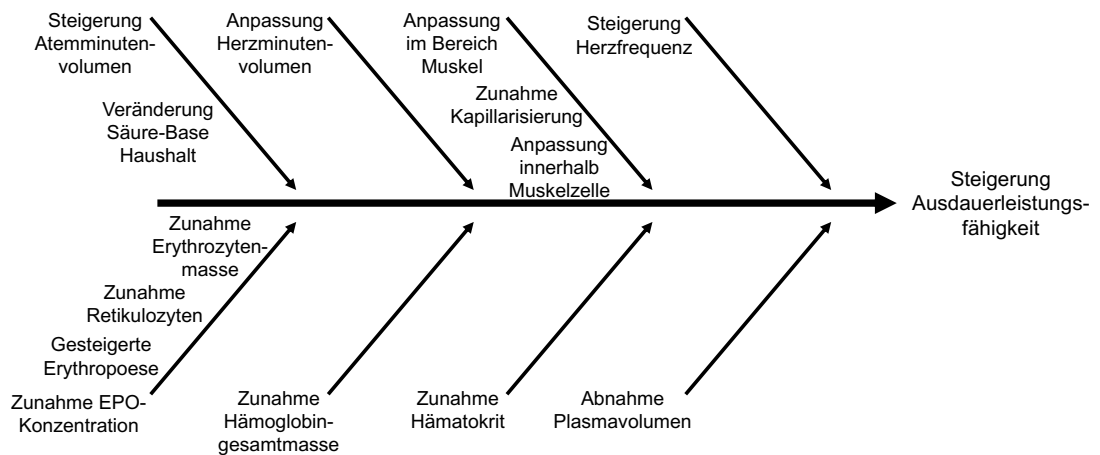


Abbildung 2: Übersicht der Einflussfaktoren auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, Eigene Darstellung

2.1.5. Ausdauerleistungsfähigkeit

Ausdauer beschreibt die Fähigkeit des menschlichen Körpers, eine sportliche Leistung über einen möglichst langen Zeitraum entgegen einem Ermüdungszustand durchzuhalten (vgl. Spring, 2008, S. 51). Ausdauer wird wie folgt kategorisiert (vgl. Hollmann & Strüder, 2009, S. 298 f.): Kurzzeitausdauer beschreibt eine Beanspruchung auf allgemein aerober Ebene mit einer Belastungsdauer von drei bis zehn Minuten, z.B. ein 3000 m Lauf. Von Mittelzeitausdauer wird gesprochen, wenn die Beanspruchungsdauer zwischen zehn bis dreißig Minuten liegt wie bei einem 5000 bis 10.000 m Lauf. Langzeitausdauer beschreibt eine kontinuierliche Belastung von über 30 Minuten (vgl. Hollmann & Strüder, 2009, S. 298 f.). Die Faktoren Ermüdungswiderstandsfähigkeit und Erholungsfähigkeit beeinflussen die Ausdauerfähigkeit maßgeblich (vgl. Spring, 2008, S. 51).

Körperliche Leistungsfähigkeit bedeutet willentlich, sportartspezifische Bewegungsabläufe auszuführen (vgl. Marées, 2003, S. 442). Leistungsfähigkeit lässt sich in fünf motorische Hauptbeanspruchungsformen unterteilen: Koordination, Flexibilität, Kraft, Schnelligkeit und von besonderer Relevanz für diese Bachelorarbeit, die Ausdauer (vgl. Marées, 2003, S. 442). Ausdauerleistungsfähigkeit ist demnach die Fähigkeit dem Ermüdungswiderstand entgegenzuwirken (vgl. Faude, 2019, S. 2), sportliche Leistung möglichst lange im aeroben Bereich durch einen gesteigerten Stoffwechsel durchzuführen (vgl. Faude, 2019, S. 3). Eine gesteigerte Ausdauerleistungsfähigkeit ermöglicht es dem Organismus, eine große Menge an Sauerstoff aus der Luft aufzunehmen und diesen schnell zur Energiebereitstellung an die Muskulatur weiter zu transportieren (vgl. Faude, 2019, S. 2). Eine wichtige Kenngröße des Energiestoffwechsels im Ausdauersport ist die $VO_2\text{max}$ (vgl. Marées, 2003, S. 442).

2.1.6. Maximale Sauerstoffaufnahme VO₂max

Die VO₂max gilt als wichtiger Messparameter der aeroben Leistungsfähigkeit (vgl. Friedemann, 2000, S. 421). Diese wird mittels Spirometrie ermittelt und gilt als das Maß für den aeroben Energieumsatz (vgl. Marées, 2003, S. 455 f.) und ist somit eine wichtige Messgröße für die allgemeine aerobe Ausdauer. Die VO₂max ist ein Beurteilungskriterium der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit und gibt an, welche Energie über eine Zeitspanne von wenigen Minuten aerob angewandt wird (vgl. Hollmann & Strüder, 2009, S. 371). Dabei gelten externe Faktoren wie ein niedriger O₂-Partialdruck in der Einatemungsluft, wie das in der Höhe der Fall ist, leistungsbegrenzend (vgl. Hollmann & Strüder, 2009, S. 371).

Im Durchschnitt liegt die VO₂max bei 20- bis 30-Jährigen bei 35 bis 40 ml/min/kg. Spitzensportler können mitunter Werte von 80 bis 90 ml/min/kg erreichen (vgl. Spomedial, 2009). Im Zusammenhang mit der Hämoglobinmasse ist zu sagen, dass die Zunahme von 1g Hämoglobin/kg zu einer Steigerung der VO₂max von circa 3 ml/min/kg führt (vgl. Burtscher, 2010, S. 159).

2.1.7. Höhenttraining

Höhentraining ist sehr populär und gilt als eine spezielle Trainingsform in der Sportmedizin und im Spitzensport (vgl. Schobersberger, 2017, S.520). Das Ziel des Höhentrainings ist es, durch Hypoxie die Ausdauerleistungsfähigkeit zu steigern. Höhenttraining ist klassischerweise gekennzeichnet durch einen permanenten Aufenthalt während der Trainingsphase in Höhen zwischen 1800 m und 2500 m für eine Dauer von zwei bis drei Wochen (vgl. Schobersberger, 2017, S. 521). Diese Trainingsform wird im Ausdauerbereich seit einigen Jahren regelmäßig zur speziellen Vorbereitung auf Wettkämpfe für Weltmeisterschaften, Olympische Spiele etc. angewandt. Im Laufe der Zeit haben sich „aufgrund innovativer Technologien und eingeschränkter zeitlicher und finanzieller Ressourcen“ (Schobersberger, 2017, S. 521) verschiedene Höhentrainingskonzepte entwickelt, die über die klassische Definition hinausgehen. Die drei wichtigsten Formen werden in diesem Kapitel nachstehend erläutert. Dabei wird zunächst auf das klassische Konzept des „living high – training high“ eingegangen, im Anschluss daran auf das „living high – training low“ sowie auf das „living low – training high“. Letzteres wird hier definiert, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

2.1.7.1. „Living high – training high“

Das „living high – training high“ funktioniert nach dem Konzept in der Höhe zu leben und auch zu trainieren. Das bedeutet, dass sowohl das Training als auch das Wohnen in mittlerer Höhe zwischen 1800 m und 2500 m stattfindet (vgl. Schobersberger, 2017, S.

521). Damit findet sowohl das Leben als auch das Training unter hypoxischen Bedingungen statt. Diese Form des Höhentrainings gilt als die klassische Form und wird im Verlaufe mit LHTH betitelt.

2.1.7.2. „Living high – training low“

Das Konzept „living high – training low“ bedeutet in der Höhe zu leben, allerdings in Tieflagen zu trainieren. Demnach halten sich die Athleten „in ihrer Freizeit in Hypoxie auf und führen ihr Training wie gewohnt im Tiefland durch“ (Friedemann, 2000, S. 422). Hier werden die Effekte des Höhenaufenthaltes durch das „live high“, wie beispielsweise die Zunahme der Hämoglobingemessung, genutzt und gleichzeitig kann die absolute Trainingsintensität in Tallage durch das „train low“ beibehalten werden (vgl. Gatterer, 2019, S. 428). Es wird versucht, die Schwierigkeiten der Trainingssteuerung (z.B. höhenassoziierte Reduktion der absoluten Trainingsintensität), die sich bei dem klassischen Konzept ergeben, zu vermeiden, aber die Akklimatisationsprozesse, wie sie in *Kapitel 2.1.2* und *2.1.4* erläutert wurden, auszunutzen (vgl. Friedemann, 2000, S. 422). Die Sportler leben unter hypoxischen Bedingungen auf einer Höhe von 2500 m - 3000 m, trainieren aber in Normoxie⁴. Diese Form des Höhentrainings entwickelte sich aus dem klassischen „living high – training high“. Im Folgenden wird die Abkürzung LHTL verwendet.

Bei dem sogenannten „High-high-low“ (HiHiLo) handelt es sich um eine abgewandelte Form des LHTL – Konzeptes, bei der auf mittlerer Höhe gelebt und Training mit niedriger Intensität durchgeführt wird. Trainingseinheiten mit hoher Intensität, wie das Intervalltraining, werden auf geringer Höhe bis Meereshöhe durchgeführt (vgl. Stray-Gundersen, 2001, S. 1114).

2.1.7.3. „Living low – training high“

Bei dieser Trainingsform handelt es sich um das umgekehrte Konzept des „living high – training low“. Hierbei leben die Sportler im Tiefland in Normoxie und führen Teile von Trainingseinheiten in der Höhe unter hypoxischen Bedingungen auf 2300 m - 3000 m durch (vgl. Schobersberger, 2017, S. 521). Da dieses Konzept kein Bestandteil der Untersuchung dieser Bachelorarbeit ist, wird es hier nicht näher erläutert.

⁴ O₂-Normalbedingungen auf Meereshöhe

3. Ziele und Hypothesen

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkungen von Höhentrainingskonzepten des „living high – training high“ und des „living high – training low“ auf die Ausdauerleistungsfähigkeit. Zur Beurteilung dieser stehen in dieser Arbeit neben den beiden genannten Trainingskonzepten die Veränderungen auf hämatologischer Ebene, die durch die Höhenexposition erreicht werden, im Fokus. Wie bereits im *Kapitel 1* erwähnt, wird in der Forschung kontrovers diskutiert, ob sich Höhentraining für die Vorbereitung auf die im Flachland stattfindenden Wettkämpfe eignet. In dieser Arbeit wird diese Problematik analysiert. Die hämatologischen Veränderungen durch Höhenexposition ermöglichen eine Vergleichbarkeit und bilden die Grundlage zur Beurteilung der Auswirkungen von Höhentraining auf die Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage.

Die auf dem oben genannten Ziel aufbauende Fragestellung wird durch das PICO-Schema folgendermaßen formuliert: Ausdauer(-leistungs)sportler sind als zu untersuchende Zielgruppe (Population) zu verstehen. Als Intervention wird das Höhentraining nach den LHTH – und LHTL – Konzepten definiert. Wie bereits erwähnt, dienen Blutparameter der Vergleichbarkeit (Comparison) zur Beurteilung der Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit (Outcome) im Flachland.

Aufgrund der aufgezeigten Fragestellung ergeben sich folgende Hypothesen:

Nullhypothese H (0)

Höhentrainingskonzepte wie „living high – training high“ und „living high – training low“ verbessern die Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage nicht.

Alternativhypothese H (1)

Höhentrainingskonzepte wie „living high – training high“ und „living high – training low“ verbessern die Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage.

4. Methodik

Im folgenden Kapitel wird das Vorgehen der systematischen Literaturrecherche dieser Bachelorarbeit näher erläutert. Diese Literaturarbeit wurde auf Grundlage der 26 Punkte der Checklisten zum Bericht einer systematischen Übersicht erstellt (vgl. Moher et al., 2009). Dafür wird zunächst auf die Datenbanken, Suchbegriffe und Ein- und Ausschlusskriterien sowie auf die Durchführung der Recherche und die Auswertung des Datenmaterials eingegangen. Die daraus resultierende Anzahl relevanter Studien wird am Ende dieses Kapitels aufgezeigt.

Im ersten Schritt der systematischen Literaturarbeit wurden die Datenbanken festgelegt, in denen nach Studien gesucht wird. Im Anschluss wurden die Suchbegriffe sowie Ein- und Ausschlusskriterien definiert. Darauffolgend konnte die Recherche mit den Schlagworten in den festgelegten Datenbanken durchgeführt werden. Abschließend wurden die Treffer selektiert und qualitativ beurteilt. Dieses Vorgehen ist nachfolgend in der *Abbildung 3: Übersicht zum Ablauf der Literaturrecherche, Eigene Darstellung* dargestellt.

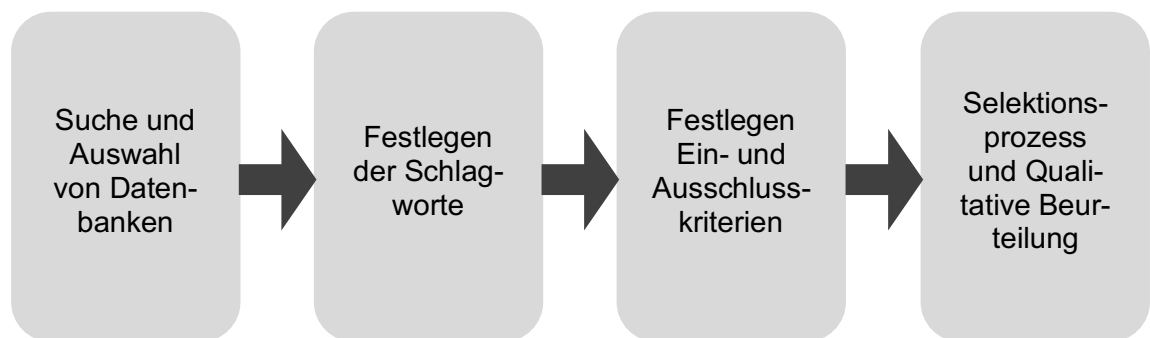


Abbildung 3: Übersicht zum Ablauf der Literaturrecherche, Eigene Darstellung

4.1. Datenbanken und Suchbegriffe

Vor Beginn der systematischen Übersichtsarbeit wurden neben der konkreten Fragestellung die Schlagwörter sowie die Ein- und Ausschlusskriterien und die Datenbanken zur Recherche festgelegt. Da es sich bei der Arbeit um ein sportmedizinisches Thema handelt, wurden für die Recherche primär die folgenden medizinischen und sportwissenschaftlichen Datenbanken herangezogen:

- Pubmed
- Sportlit
- Scopus
- Sportdiscus

- Medline
- Cochrane
- Web of science

Um relevante Studien zu dem zuvor festgelegten Themenschwerpunkt zu erhalten, wurden themenspezifische Suchbegriffe bestimmt. Diese sind die Folgenden:

**Altitude training, *altitude training concepts, *living high training high, *living high training low, *endurance performance, *endurance athletes, *athletes, *hypoxic, *hypoxic training, *hypoxia, *erythropoietin, *epo, *erythropoiesis, *blood oxygen capacity, *hematological variables*

Die Schlagworte dienten der Recherche in den ausgewählten Datenbanken und ermöglichten eine Eingrenzung auf das Thema. Dabei wurden die Suchbegriffe aus dem Schlagwortpool unterschiedlich kombiniert und in den Datenbanken eingesetzt. Mit Hilfe von Booleschen Operatoren „AND“ und „OR“ wurden die Schlagworte kombiniert (z.B. (altitude training) OR (living high training high)) OR (living high training low)) AND (endurance performance)) AND (endurance athletes), um eine Verknüpfung mehrerer Begriffe zu erreichen. Der Recherchezeitraum erstreckte sich vom 08. April 2021 bis zum 28. April 2021.

4.2. Ein- und Ausschlusskriterien

Um die systematische Literaturrecherche in Hinblick auf die hohe Trefferanzahl nach passenden Studien zu selektieren, wurden Ein- und Ausschlusskriterien festgelegt. Sobald ein Ausschlusskriterium vorlag, wurde die Studie im weiteren Prozess nicht berücksichtigt. Die Ein- und Ausschlusskriterien sind in *Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien zur Auswahl der Studien, Eigene Darstellung* zu finden.

Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien zur Auswahl der Studien, Eigene Darstellung

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Höhentrainingskonzept: Studien mit Trainingskonzepten „living high – training high“ und „living high – training low“	Höhentrainingskonzept: Studien mit Trainingskonzept „living low – training high“
Höhe: Leben und Training in mittlerer bis großer Höhe	Höhe: Leben und Training ab sehr großer Höhe
Sportart: Ausdauersportler im Bereich Laufen und Langlauf	Sportart: Sportler aus anderen Sportarten (wie bspw. Radfahren, Triathlon, Schwimmen, Teamsportarten)
Akklimation: Sportler, die zu Studienbeginn aus Normoxie kommen	Akklimation: Sportler, die zu Studienbeginn aus hypoxischen Bedingungen kommen
Studiendauer: länger als 15 Tage	Studiendauer: kürzer als 15 Tage
Gesamtstudienpopulation: N>5	Gesamtstudienpopulation: N<5
Erscheinungsjahr: Studien nach 1995	Erscheinungsjahr: Studien vor 1995
Datenerfassung: vergleichbare Blutparameter und Kennzahlen zur Leistungsfähigkeit	
	Studienausrichtung: Fokus nicht auf Leistungsfähigkeit, sondern auf anderen Auswirkungen von Höhentraining (wie bspw. Erkrankungen, Ernährung, etc.)

4.3. Durchführung der Recherche

Die Datenbanken wurden in Hinblick auf die Fragestellung und mit Hilfe der Schlagworte systematisch durchsucht. Dabei wurde das „PRISMA“- Flussdiagramm („Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses“) (vgl. Moher, et al., 2009) herangezogen. Dieses bietet die Möglichkeit des strukturierten Vorgehens bei der systematischen Literaturrecherche. In *Tabelle 3: Phase Identifikation des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung* sind die Ergebnisse aus den verschiedenen Datenbanken aus der Identifikationsphase des „PRISMA“- Flussdiagramms aufgelistet.

Tabelle 3: Phase Identifikation des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung

Phase	Datenbank	Trefferanzahl
Identifikation	Pubmed (advanced)	239
	Spolit	89
	Scopus	148
	Sportdiscus	902
	Medline	137
	Cochrane	10
	Web of science	220

Wie in der *Tabelle 3: Phase Identifikation des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung* zu erkennen, lieferten die Schlagwortkombinationen, wie oben beschrieben, eine hohe Trefferzahl. In Sportdiscus konnten 902 Treffer erzielt werden, gefolgt von Pubmed. Die wenigsten Treffer wurden in Cochrane erzielt. Auf Basis der Titel konnten bereits viele der gefundenen Treffer ausgeschlossen werden, da sie thematisch keine Relevanz aufwiesen.

Nach der Phase der Identifikation folgte die Phase der Vorauswahl. Ab dieser Phase wurde die Konsolidierung der Ergebnisse der Datenbanken betrachtet und Duplikate nach dem PRISMA-Flussdiagramm entfernt. Die mit Hilfe der Schlagwörter in den Datenbanken gefundenen Treffer wurden einer Vorauswahl unterzogen. Die Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien ergibt eine Eingrenzung der relevanten Studien, wie die *Abbildung 4: Übersicht der Phasen des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung nach Moher et al., 2009* verdeutlicht. Bei den verbliebenen wurden im nächsten Schritt die Volltexte gesichtet und auf Eignung beurteilt. Schließlich wurden die Studien mittels der „CASP“ Checkliste („Critical appraisal skills programme“) auf ihre Qualität überprüft.

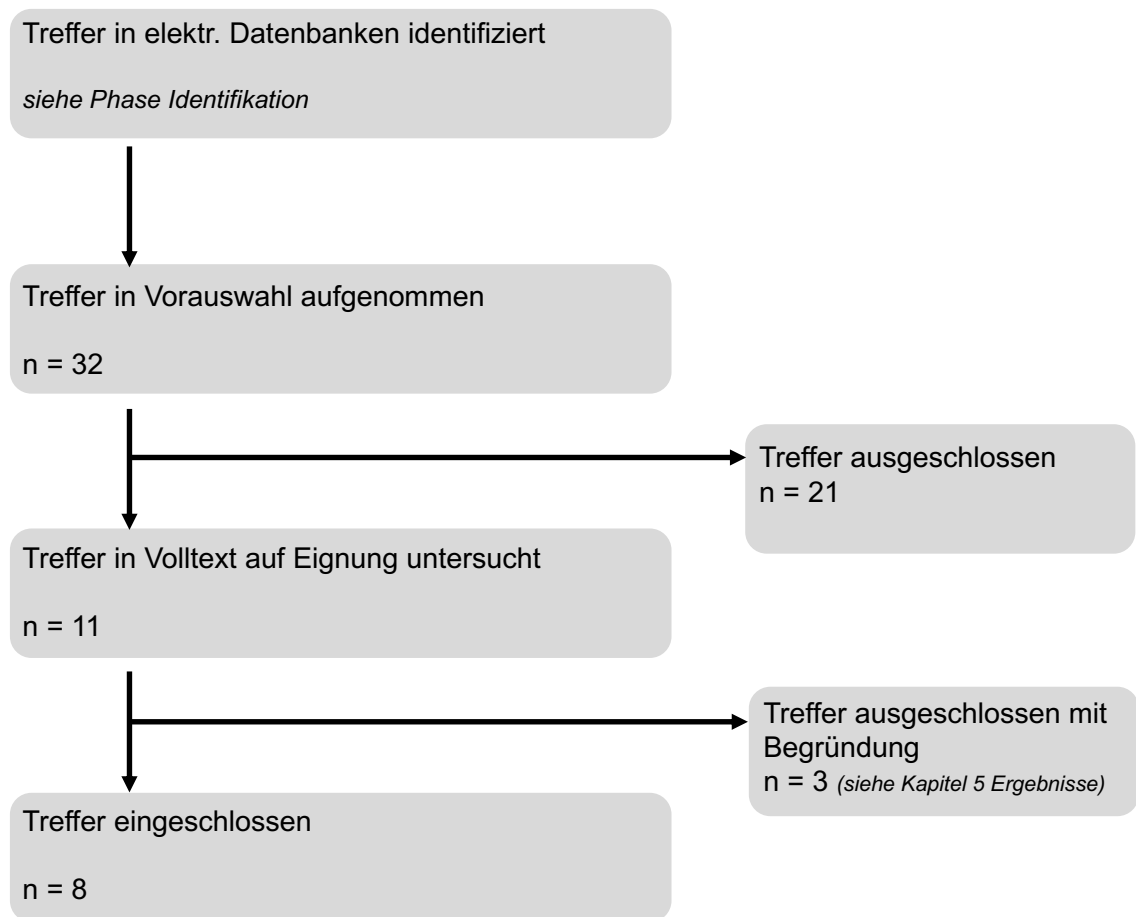


Abbildung 4: Übersicht der Phasen des PRISMA-Flussdiagramms, Eigene Darstellung nach Moher et al., 2009

4.4. Qualitative Auswertung

Das „CASP“ ist ein Programm, mit welchem mit Hilfe von Checklisten die Qualität von Studien überprüft wird. Das „CASP“ bietet Checklisten für die folgenden verschiedenen Studiendesigns (vgl. CASP UK, 2021):

- CASP Randomised Controlled Trails Checkliste
- CASP Systematic Review Checkliste
- CASP Qualitative Studien Checkliste
- CASP Cohort Study Checkliste
- CASP Diagnostic Studis Checkliste
- CASP Case Control Study Checkliste
- CASP Economic Evaluation Checkliste
- CASP Clinical Prediction Rule Checkliste

Bei den für diese Arbeit selektierten Studien handelt es sich um RCT's (Randomised Controlled Trials), Kohortenstudien und Qualitative Studien. Daraus ergab sich, dass Einfluss von Höhentrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

primär die Checklisten dieser Studiendesigns zur Auswertung herangezogen wurden. Die konkreten Fragestellungen dieser Checklisten können in CASP UK, 2021, eingesehen werden. Zum einen wurden die Studien auf ihre Qualität anhand der Checklisten analysiert, zum anderen wurde die Vergleichbarkeit der ausgewählten Studien untersucht. Diese sollte durch die Messung ähnlicher Blutparameter bzw. Time Trials⁵ gegeben sein, wie sie zu Beginn von *Kapitel 5* aufgezeigt werden. Dabei wurden n=3 Studien ausgeschlossen. Darauf wird im folgenden Kapitel näher eingegangen. Abschließend ergab sich eine Studienanzahl von n=8, die in dieser Arbeit eingeschlossen wurden (siehe *Tabelle 4: Übersicht der eingeschlossenen Studien nach PRISMA-Flussdiagramm, Eigene Darstellung*).

⁵ Absolvieren einer spezifischen Distanz mit Zeitmessung (vgl. Cambridge Dictionary, 2014)

5. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der für diese Bachelorarbeit eingeschlossenen Studien dargelegt. Hierzu wird zunächst auf die Anwendung der Methodik eingegangen. Insbesondere wird dargestellt, wie aus der Methodik im nächsten Schritt geeignete Studien ausgeschlossen wurden und sich daraus die Menge an eingeschlossenen Studien ergab.

Aus den $n=11$ Studien, die in der Phase der Eignung mit den CASP Checklisten bewertet wurden, erfüllten drei Studien nicht die Anforderungen der Checklisten. Zum einen *Neya et al., 2013: Increased Hemoglobin Mass and VO_2 max With 10 h Nightly Simulated Altitude at 3000 m*, da die Studie nicht die Forschungsfrage direkt adressiert, was in Teil A der CASP RCT Checkliste gefordert wird. Hintergrund ist, dass sowohl die Interventionsgruppe (LHTL) als auch die Kontrollgruppe mindestens in einer mittleren Höhe lebte und trainierte. Die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen ist somit nicht gegeben. Die Einteilung und Effekte von Höhe sind in *Kapitel 2.1.* beschrieben. Zum anderen *Czuba et al., 2014: The Effects of Hypobaric Hypoxia on Erythropoiesis, Maximal Oxygen Uptake and energy Cost of Exercise Under Normoxia in Elite Biathletes*, da der Zeitpunkt der Datenerhebung ausschließlich vor und während der Höhenexposition stattfand. Unklar jedoch ist, wie und ob die Daten nach der Höhenexposition erhoben worden sind. Dies erfüllt nicht die Anforderungen des Teils C der CASP RCT Checkliste. Außerdem erfüllt *Schmidt et al., 2005: A Three-Week Traditional Altitude Training Increases Hemoglobin Mass and Red Cell Volume in Elite Biathlon Athletes* nicht die Anforderungen der CASP Qualitative Studien Checkliste des Teils A. Dies liegt darin begründet, dass keine Kontrollgruppe vorhanden ist, somit ist ein Vorliegen von Blutwerten vor und nach Höhenexposition eine wichtige Voraussetzung. Unter anderem sind keine Blutwerte vor dem Höhenttraining zur Hämoglobingestamtsmasse und zum Erythrozytenvolumen vorhanden. Dadurch ist die Aussagefähigkeit zur Veränderung der Blutwerte durch Höhenexposition und damit zur Ausdauerleistungsfähigkeit nicht gegeben.

Aus diesem Vorgehen ergeben sich die folgenden und in *Tabelle 4: Übersicht der eingeschlossenen Studien nach PRISMA-Flussdiagramm, Eigene Darstellung* aufgeführten Studien, welche die Grundlage für die Untersuchungen dieser Bachelorarbeit bilden.

Tabelle 4: Übersicht der eingeschlossenen Studien nach PRISMA-Flussdiagramm, Eigene Darstellung

Titel	Autor	Erscheinungsjahr
Living High-Training Low for 21 Days Enhances Exercise Economy, Hemodynamic Function, and Exercise Performance of Competitive Runners	Hun-Young Park, Wonil Park, und Kiwon Lim	2019
„Living high-training low“ altitude training improves sea level performance in male and female elite runners	James Stray-Gundersen, Robert F. Chapman, und Benjamin D. Levine	2001
Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes	Jon Peter Wehrlin, Peter Zuest, Jo-stein Hallén, und Bernard Marti	2006
Eighteen days of „living high, training low“ stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners	Julien V. Brugniaux, Laurent Schmitt, Paul Robach, Gérard Nicolet, Jean-Pierre Fouillot et al.	2005
Altitude Exposure at 1800 m Increases Haemoglobin Mass in Distance Runners	Laura A. Garvican-Lewis, Iona Halliday, Chris R. Abbiss, Philo U. Saunders, und Christopher J. Gore	2015
Training Quantification and Periodization during Live High Train High at 2100 M in Elite Runners: An Observational Cohort Case Study	Avish P. Sharma, Philo U. Saunders, Laura A. Garvican-Lewis, Julien D. Périard, Brad Clark et al.	2018
„Living high-training low“: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance	Benjamin D. Levine und James Stray-Gundersen	1997
„Living high – training low“ vs. „living high – training high“: erythropoietic responses and performance of adolescent cross-country skiers	K. Christoulas, M. Karamouzis, und K. Mandroukas	2011

Im folgenden Verlauf dieser Bachelorarbeit werden die eingeschlossenen Studien über den ersten Autor und das Erscheinungsjahr referenziert.

Diese acht Studien werden unter Einbezug bestimmter objektiver Blutparameter systematisch verglichen und deren Ergebnisse gegenübergestellt. Diese sind die Folgenden:

- Hämoglobing Gesamtmasse oder Hämoglobinkonzentration
- Hämatokrit
- ErythrozytENVolumen
- EPO
- VO₂max

Wo vorhanden, werden auch Laufzeiten, auch Time Trials genannt, der Athleten verglichen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studien zu der in *Kapitel 3* aufgestellten Nullhypothese bzw. Alternativhypothese und der Fragestellung vorgestellt. Zunächst werden die Studien, die nach dem LHTL-Konzept trainiert haben, analysiert, im Anschluss die LHTH. Abschließend werden die Ergebnisse der beiden Studien, die im direkten Vergleich LHTL und LHTH durchgeführt haben, ausgewertet. Dabei sind die zu den jeweiligen Studien aufgezeigten Inhalte aus diesen entnommen und können dort entsprechend nachgeschlagen werden.

5.1. LHTL-Studien: Ergebnisse vor und nach dem Höhenttraining

In der Studie von Park et al., 2019, nahmen 24 männliche Läufer teil. Diese wurden zufällig in zwei Gruppen randomisiert, zum einen in die Höhenttrainingsgruppe (n=12), zum anderen die Kontrollgruppe (n=12). Das Alter betrug $23,5 \pm 2,1$ Jahre. Die LHTL-Gruppe verbrachte über 12 Stunden pro Tag in Hypoxiezelten⁶, welche Verhältnisse auf 3000 m Höhe simulierten. Trainiert wurde an sechs Tagen die Woche gemeinsam mit der Kontrollgruppe auf Meereshöhe. Jeweils vor und nach dem 21-tägigen Höhenttraining gab es eine siebentägige Testungswoche, in der jeweils nach drei Tagen hämatologische Tests, die hämodynamische Funktion sowie die Trainingsleistung untersucht wurden. Dabei zeigten sich die in der *Tabelle 5: Blutwerte nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019* aufgeführten Ergebnisse.

⁶ Durchströmung mit sauerstoffarmer Luft, sodass Höhenbedingungen simuliert werden (vgl. Marées, 2003, S. 598)

Tabelle 5: Blutwerte nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019

Parameter	Kontrollgruppe		LHTL Gruppe	
	Prä	Post	Prä	Post
Hämoglobin- konzentration (g/dl)	14,7 ± 0,7	14,7 ± 0,7	14,2 ± 0,8	14,4 ± 0,8
Hämatokrit (%)	45,2 ± 2,4	45,6 ± 2,1	44,2 ± 2,7	45,1 ± 2,7

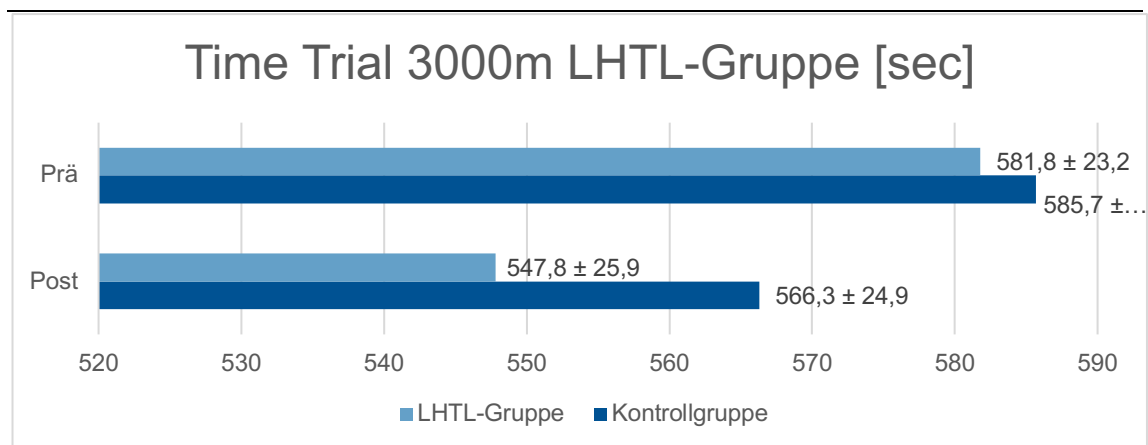


Abbildung 5: Time Trial nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019

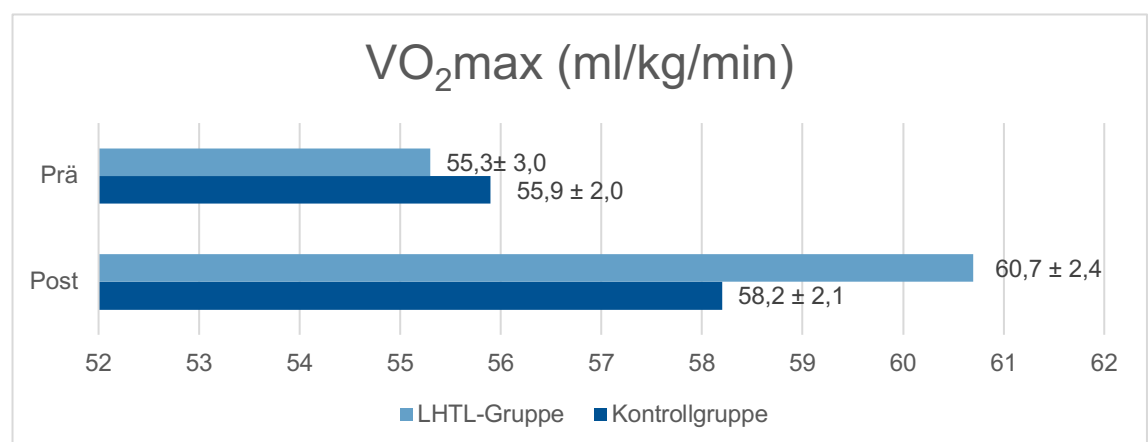


Abbildung 6: VO₂max nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019

Während weder die Höhentrainingsgruppe noch die Kontrollgruppe wesentliche Veränderungen der Hämatologie aufwiesen, verbesserte sich die $VO_2\text{max}$ der Höhentrainingsgruppe signifikant ($p= 0,0001$) mit $5,40 \text{ ml/kg/min}$. Auch die Laufzeiten der Teilnehmer der beiden Gruppen verbesserten sich. In der Höhentrainingsgruppe lässt sich ein signifikanter ($p= 0,022$) Unterschied von minus $34,0$ Sekunden erkennen.

An der Studie von Stray-Gundersen et al., 2001, nahmen 22 Leistungssportler (Läufer), davon 14 Männer und acht Frauen, teil. Der Altersdurchschnitt der Männer betrug 25 ± 3 Jahre, der der Frauen 24 ± 3 Jahre. Diese absolvierten ein 27-tägiges Höhentaining nach dem HiHiLo-Prinzip. Gelebt wurde auf 2500 m , während der Großteil des Trainings auf $2000 \text{ m} - 2800 \text{ m}$ abgehalten wurde. Die „high-intensity“ Trainingseinheiten wie Intervalltraining wurden auf 1250 m absolviert. Bei dieser Studie gab es keine Kontrollgruppe als Referenzgruppe. Da Blutwerte von den Athleten prä- und post- Intervention vorliegen, ist die Vergleichbarkeit dennoch gegeben. Die 3000 m Time Trials wurden drei Tage vor und einen Tag nach dem Höhentrainingslager abgehalten. Die Blutproben wurden drei Tage vor und nach den ersten 20 Stunden in der Höhe abgenommen sowie am 20. Tag in der Höhe und 20 Stunden nach Rückkehr auf Meereshöhe.

Sowohl die Männer als auch die Frauen verbesserten ihre 3000 m Zeiten von vor dem Höhentrainingslager signifikant ($p \leq 0,05$, $p < 0,10$) um $5,8$ Sekunden.

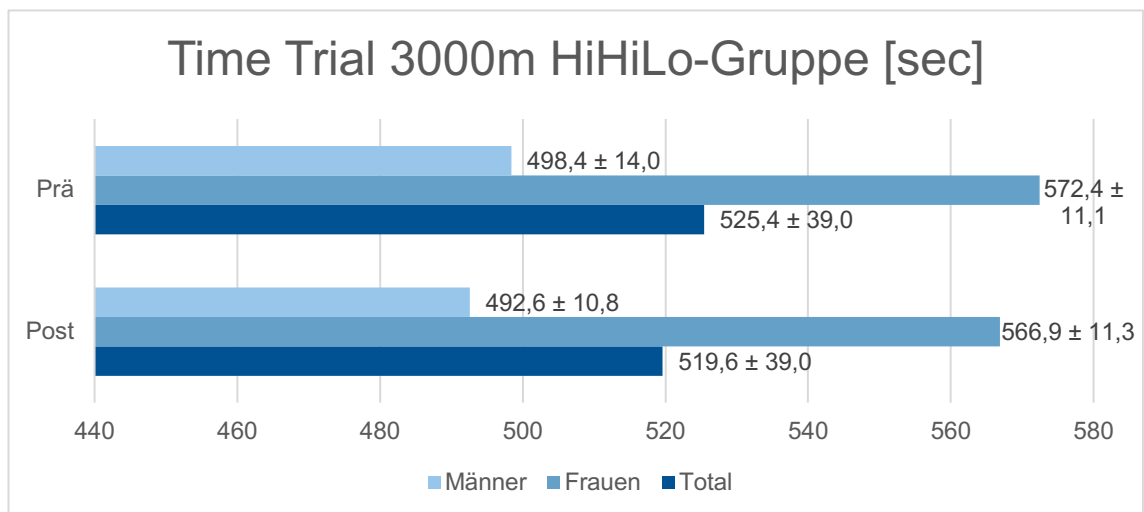


Abbildung 7: Time Trial nach Stray-Gundersen et al., 2001, Eigene Darstellung nach Stray-Gundersen et al., 2001

Die $VO_2\text{max}$ zeigte einen deutlichen Anstieg von 3% nach dem Höhentrainingslager ($p= 0,0006$).

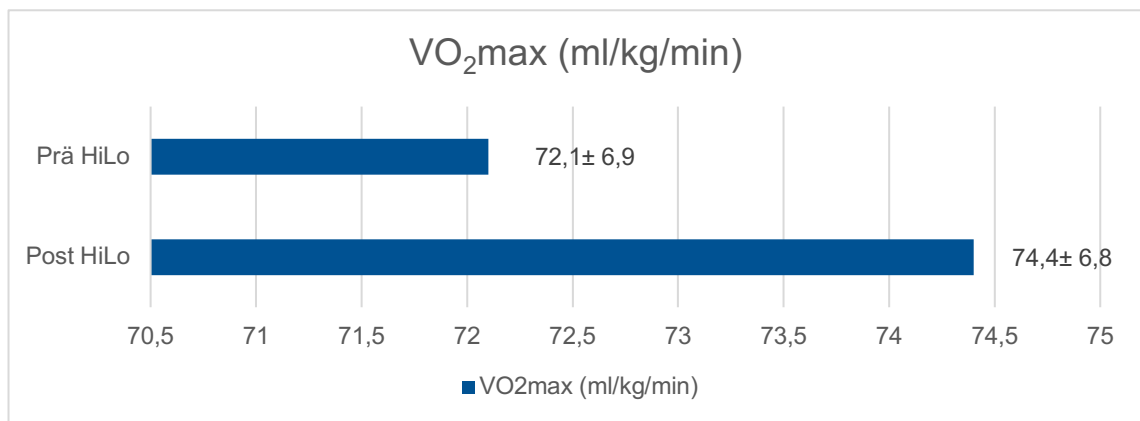


Abbildung 8: VO₂max nach Stray-Gundersen et al., 2001, Eigene Darstellung nach Stray-Gundersen et al., 2001

Bei den Blutwerten zeigte sich nach (post) Intervention ein erhöhter Hämoglobinspiegel und Hämatokritwert ($p < 0,05$), wie die nachstehende Tabelle verdeutlicht. Die EPO-Konzentration verdoppelte sich bereits 20 Stunden nach Höhenexposition und sank nach Beendigung des Trainingslagers sogar unter den Ausgangswert.

Tabelle 6: Blutwerte nach Stray-Gundersen et al., 2001, Eigene Darstellung nach Stray-Gundersen et al., 2001

Parameter	Prä	20 h in Höhe	19. Tag in Höhe	Post
Hämoglobin g/dl	13,3 ± 1,1	14,3 ± 1,2	15,1 ± 1,2	14,3 ± 1,1
Hämatokrit %	41,0 ± 2,5	40,6 ± 2,5	42,5 ± 2,6	42,8 ± 2,8
Erythropoetin ng/ml	8,5 ± 2,5	16,2 ± 4,6	9,7 ± 2,0	7,4 ± 2,1

Wehrlin et al., 2006, untersuchte in seiner Studie zehn Läufer, davon fünf männlich, fünf weiblich (Alter: 23 ± 4 Jahre), welche das Höhenttraining nach dem LHTL absolvierten. Als Kontrollgruppe galten zusätzlich sieben Langläufer (vier weiblich, drei männlich, Alter: 21 ± 1 Jahr), welche auf einer Höhe von 500 m bis 1600 m lebten und trainierten. Die Interventionsgruppe lebte 18 Stunden täglich für 24 Tage auf 2456 m, trainierte auf 1000 m - 1800 m Höhe, wobei die „high-intensity“ Trainingseinheiten auf 1000 m durchgeführt wurden. Einen Tag vor dem Trainingslager wurden Blutproben, VO₂max und 5000 m Time Trial auf Meeresspiegelhöhe erhoben. Zusätzlich wurde der Höhenttrainingsgruppe am ersten, 12. und 24. Tag der Höhenexposition Blut entnommen. Acht

Tage nach der Trainingsphase durchliefen beide Gruppen das gleiche Prozedere wie vor Beginn. Die Kontrollgruppe führte keinen erneuten $VO_2\text{max}$ Test durch. In der Blutentnahme post Intervention zeigte sich eine Zunahme der Hämoglobingestammasse um 5,3% (prä 805 g zu post 849 g) und des Erythrozytenvolumens um 5% in der Interventionsgruppe. In der Kontrollgruppe ergaben sich keine Unterschiede. Sowohl die EPO-Konzentration als auch die Retikulozytenanzahl der Interventionsgruppe zeigten sich signifikant ($p < 0,001$) erhöht. Die EPO-Konzentration stieg am ersten Tag im Trainingslager stark an, nahm langsam ab, aber hielt sich auch post-Intervention noch über dem Ausgangsniveau. Die Retikulozyten zeigten am ersten Tag einen leichten Rückgang, bevor die Anzahl dann exponentiell zunahm. Auch die $VO_2\text{max}$ erhöhte sich signifikant ($p < 0,05$) um 4,1% (Frauen: 50,8 zu 54,5 ml/kg/min; Männer: 62,3 zu 63,8 ml/kg/min) im Vergleich zu prä-Intervention in der Interventionsgruppe. Die 5000 m Zeiten verbesserten sich um 18 Sekunden im Vergleich prä zu post in der Interventionsgruppe signifikant ($p < 0,05$), wie die nachstehende Abbildung verdeutlicht.

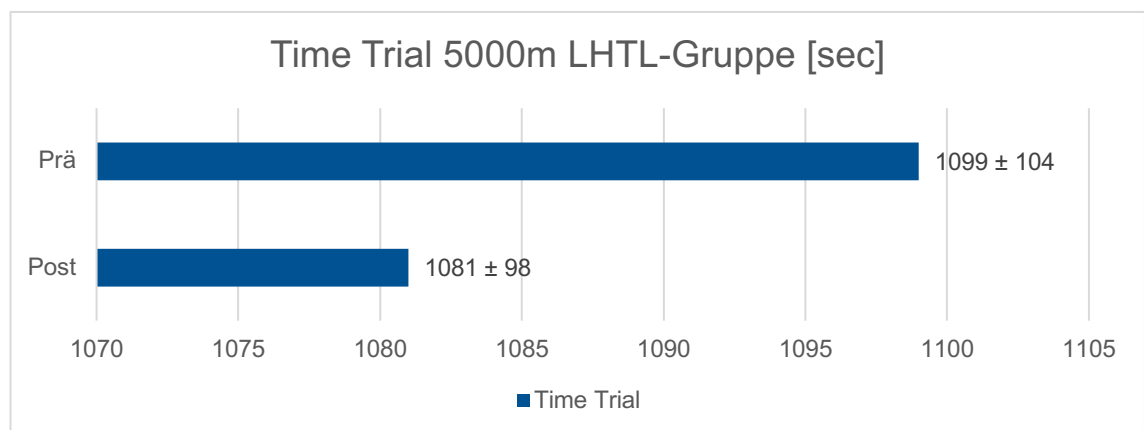


Abbildung 9: Time Trial nach Wehrlin et al., 2006, Eigene Darstellung nach Wehrlin et al., 2006

Auch Bruginaux et al., 2005, untersuchte in seiner Studie die Auswirkungen vom LHTL. An dieser Studie nahmen elf männliche Athleten teil, dabei wurden $n=5$ Mittelstreckenläufer (Alter: 24 ± 5 Jahre) der Interventionsgruppe (LHTL) zugeordnet. Sechs Sportler im Alter von 23 ± 1 Jahr dienten als Kontrollgruppe. Der Trainingszeitraum dieser Studie erstreckte sich über 18 Tage. Die LHTL-Gruppe verbrachte 14 Stunden täglich in Hypoxiezellen, wobei die ersten sechs Tagen äquivalent zu einer Höhe von 2500 m waren und die folgenden zwölf Tage zu 3000 m. Trainiert wurde auf 1200 m. Die Kontrollgruppe lebte und trainierte auf 1200 m. Innerhalb der vier Tage vor Studienbeginn wurden Blutproben entnommen und die $VO_2\text{max}$ gemessen. Drei Tage (Post 1) und 15 Tage (Post 2) nach Beendigung der 18-tägigen Trainingsperiode wurden erneut die gleichen Parameter gemessen und verglichen. Der Trainingsumfang der beiden Gruppen war gleich. In den Ergebnissen zeigte sich eine signifikant verbesserte $VO_2\text{max}$ von 9,6% an Post 1 Einfluss von Höhentrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

und 5,2% an Post 2 ($p < 0,01$) im Vergleich zu den Werten prä-Intervention in der LHTL-Gruppe.

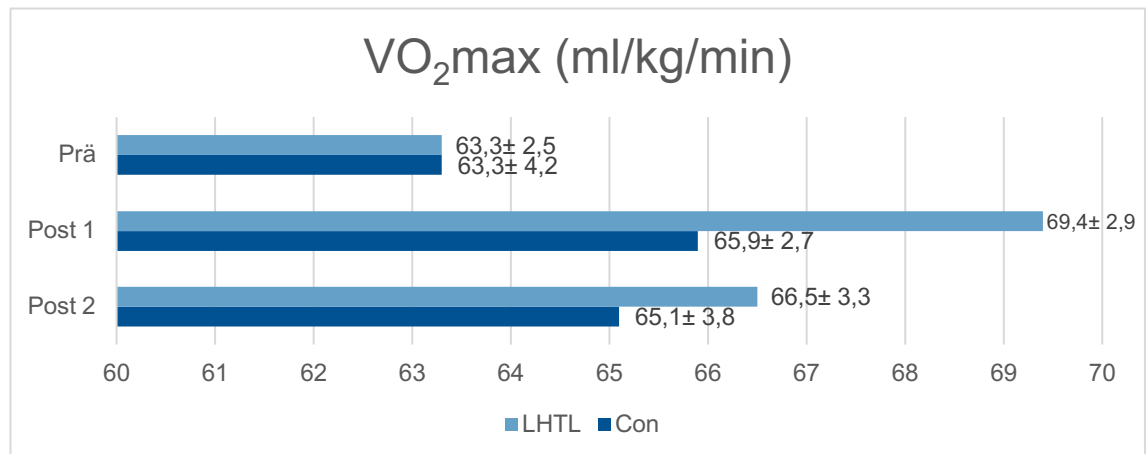


Abbildung 10: VO₂max nach Bruginaux et al., 2005, Eigene Darstellung nach Bruginaux et al., 2005

Vergleicht man die Blutwerte der Athleten der Interventions- und der Kontrollgruppe, dann zeigt sich in ersterer vor allem zum Messzeitpunkt Post 1 eine signifikant erhöhte Hämoglobingesamtmasse ($p < 0,05$). Dieser Wert näherte sich allerdings zum Zeitpunkt Post 2 wieder dem Ausgangswert an. Der Hämatokritwert zeigte keine signifikanten Änderungen in der LHTL-Gruppe. Die Retikulozytenanzahl nahm bei beiden Gruppen ab.

Tabelle 7: Blutwerte nach Bruginaux et al., 2005, Eigene Darstellung nach Bruginaux et al., 2005

Parameter	Prä	Post 1	Post 2
Hämoglobingesamtmasse (mmol)			
CON	45,0 ± 5,3	45,1 ± 6,3	45,4 ± 6,0
LHTL	42,5 ± 5,9	46,9 ± 6,3	44,7 ± 4,8
Hämatokrit (%)			
CON	44,2 ± 1,3	45,7 ± 2,0	45,8 ± 1,8
LHTL	45,4 ± 2,4	45,3 ± 1,8	46,3 ± 0,9
Retikulozyten (%)			
CON	1,6 ± 0,4	1,5 ± 0,3	1,2 ± 0,3
LHTL	1,8 ± 0,4	1,5 ± 0,3	1,3 ± 0,3

Die Nullhypothese $H(0)$ wird bei allen vier Studien verworfen und es trifft die Alternativhypothese $H(1)$ zu.

5.2. LHTH-Studien: Ergebnisse vor und nach dem Höhenttraining

In der Studie von Garvican-Lewis et al., 2015, trainierten über drei Wochen $n=5$ Athleten (männlich, Alter: $22 \pm 3,7$ Jahre) nach dem LHTH-Konzept. Als Kontrollgruppe dienten $n=8$ (5 männl., 3 weibl., Alter: $25,9 \pm 5,2$). Die Interventionsgruppe lebte auf 1800 m Höhe und trainierte zwischen 1700 m und 2200 m. Die Kontrollgruppe verbrachte das Trainingslager auf 600 m Höhe. Blutproben wurden vor Antritt des Trainingslagers bei beiden Gruppen entnommen sowie zwei und drei Wochen nach Beendigung des Trainingslagers. Bei der Auswertung der Blutwerte ergab sich eine signifikant erhöhte Retikulozytenanzahl nach zwei Wochen ($p=0,02$) und nach drei Wochen ($p=0,27$) in der LHTH-Gruppe. Die Hämoglobing Gesamtmasse nahm um 3% nach den drei Trainingswochen in der Interventionsgruppe zu. Des Weiteren war eine Zunahme des Hämatokritwertes zu verzeichnen, die einen signifikanten Unterschied zu den Werten der Kontrollgruppe darstellte.

Tabelle 8: Blutwerte nach Garvican-Lewis et al., 2015, Eigene Darstellung nach Garvican-Lewis et al., 2015

Parameter	Prä	2. Woche Post	3. Woche Post
Retikulozyten ($\times 10^9/L$)			
CON	$38,2 \pm 9,3$	$40,7 \pm 7,7$	$43,7 \pm 9,9$
LHTH	$37,2 \pm 10,8$	$58,3 \pm 17,3$	$52,5 \pm 16,4$
Hämatokrit (%)			
CON	$42,4 \pm 2,9$	$41,7 \pm 2,9$	$41,1 \pm 3,7$
LHTH	$44,2 \pm 2,1$	$45,1 \pm 1,8$	$45,3 \pm 2,3$

In der Studie Sharma et.al., 2018, nahmen $n=8$ Läufer teil, davon sechs Männer und zwei Frauen (Alter: 25 ± 6 Jahre). $N=3$ absolvierten drei Wochen des Trainingslagers und $n=5$ vier Wochen auf 2100 m Höhe. Die Studie war nach dem LHTH-Konzept ausgerichtet. Alle acht Athleten nahmen in der Woche vor Beginn des Höhentrainingslagers an Wettkämpfen ($n=1$ 800 m, $n=6$ 1500 m und $n=1$ Halbmarathon) teil. Blutproben wurden 24-48 Stunden vor Antritt und nach Beendigung des Trainingslagers entnommen, um so vergleichbare Werte zu erhalten. Sieben der acht Athleten absolvierten innerhalb

der ersten acht Tage nach Rückkehr auf Meeresspiegelhöhe einen Wettkampf der gleichen Distanz wie vor dem Höhenttraining (Durchschnitt 3,7 Tage post Höhenttrainingslager). Der achte Athlet absolvierte seinen 800 m Lauf am 57. Tag post Höhenexposition. Vergleicht man die Wettkampfzeiten von prä und post Höhenexposition, zeigt sich, dass alle acht Athleten persönliche Bestzeiten liefen und somit ihre Laufzeiten um $1,1\% \pm 0,7\%$ ($p=0,2$) verbesserten. An der post Blutentnahme konnten nur sieben der acht Athleten teilnehmen. Ein Athlet musste aufgrund von Krankheit von der Studie ausgeschlossen werden. Alle der getesteten Läufer nahmen an Hämoglobing Gesamtmasse signifikant ($p=0,006$) zu von prä $785 \text{ g} \pm 203$ zu $826 \text{ g} \pm 210$ g post Höhe. Das entspricht einer Zunahme der Gesamtmasse um 5,3% nach LHTH.

Auch bei diesen beiden Studien muss die Nullhypothese $H(0)$ verworfen werden und die Alternativhypothese $H(1)$ wird bestätigt.

5.3. LHTL vs. LHTH im direkten Vergleich: Ergebnisse vor und nach dem Höhenttraining

Levine et al., 1997, führte eine Studie zum Thema Höhenttrainingskonzepte durch. Daran nahmen $n=39$ Collegeläufer teil (27 Männer, 12 Frauen, Alter: 18-31 Jahre). Alle Athleten wurden in der sogenannten „lead-in phase“ nach Dallas gebracht. Nach dieser zweiwöchigen „lead-in phase“ trainierten alle gemeinsam für vier Wochen in Dallas, in welcher ebenfalls Blut entnommen, der Leistungstest und der 5000 m Time Trial durchgeführt wurden. Anschließend folgte die vierwöchige Höhenttrainingsphase. Dazu wurden die 39 Athleten gleichmäßig ($n=13$) zufällig den Gruppen LHTL, LHTH und der Kontrollgruppe zugeteilt. Letztere lebte und trainierte während dieser Phase auf 150 m, die LHTL-Gruppe lebte auf 2500 m und absolvierte ihr Training auf 1200 und 1400 m Höhe. Die LHTH-Gruppe lebte auf 2500 m und trainierte auf dieser und 2700 m Höhe. Nach dem Höhenttraining folgte eine dreiwöchige „sea-level testing period“. Die Blutentnahmen fand am zweiten Tag post Höhenttraining statt, der Leistungstest, der die $VO_2\text{max}$ beinhaltete, wurde am vierten Tag durchgeführt. In der ersten Woche post Rückkehr wurden am dritten und siebten Tag 5000 m Time Trials durchgeführt. Sowohl die LHTL-Gruppe als auch die LHTH-Gruppe zeigten einen signifikanten ($p<0,01$) Anstieg des Erythrozytenvolumens um 9% und eine Zunahme der Hämoglobinkonzentration. Auch die $VO_2\text{max}$ verbesserte sich signifikant ($p<0,05$) um 5% in beiden Höhenttrainingsgruppen. Nichtsdestotrotz konnte nach dem Höhenttraining ausschließlich die High-Low Gruppe ihre 5000 m Zeiten um $13,4 \pm 10$ Sekunden ($p<0,05$) verbessern. Die High-High Gruppe konnte ihre Zeiten nicht signifikant steigern, sondern war $3,3 \pm 9$ Sekunden langsamer

als prä Höhenttraining. Das gleiche Ergebnis zeigte sich bei der Kontrollgruppe, die ihre Laufzeiten ebenfalls nicht verbesserten und im Schnitt $26,7 \pm 13$ Sekunden langsamer als vor Beginn des Höhenttrainingsuntersuchungsphase liefen.

Tabelle 9: Blutwerte nach Levine et al., 1997, Eigene Darstellung nach Levine et al., 1997

Parameter	Prä	Post
Erythrozytenvolumen		
Low-Low	$28 \pm 0,96$	$27,8 \pm 1,1$
High-Low	$28,1 \pm 1,0$	$29,6 \pm 1,4$
High-High	$28,7 \pm 1,1$	$31,7 \pm 0,96$
Hämoglobin mg/dl		
Low-Low	$14,0 \pm 0,24$	$14,1 \pm 0,3$
High-Low	$13,5 \pm 0,24$	$14,8 \pm 0,23$
High-High	$13,8 \pm 0,22$	$15,0 \pm 0,2$

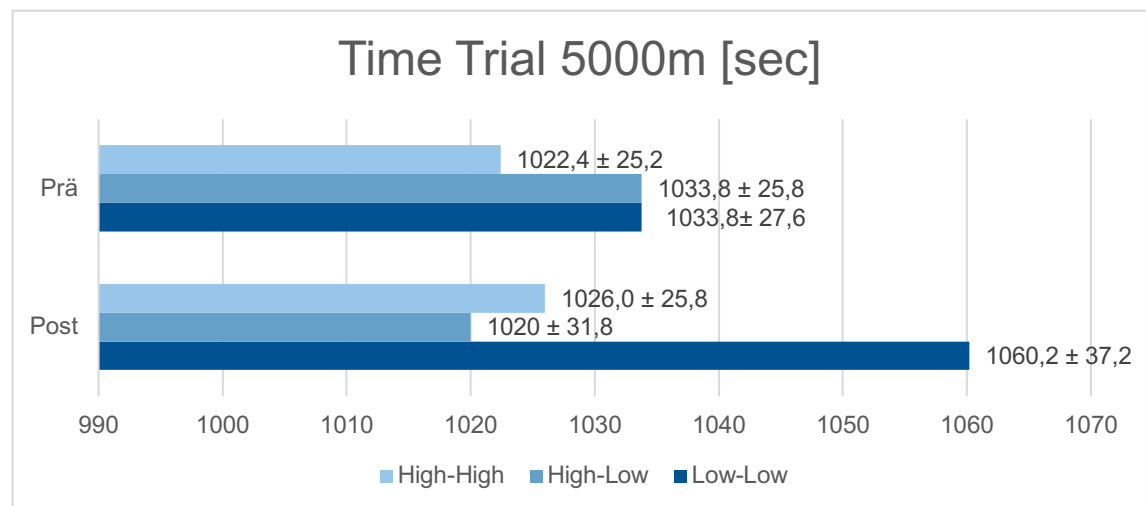


Abbildung 11: Time Trial nach Levine et al., 1997, Eigene Darstellung nach Levine et al., 1997

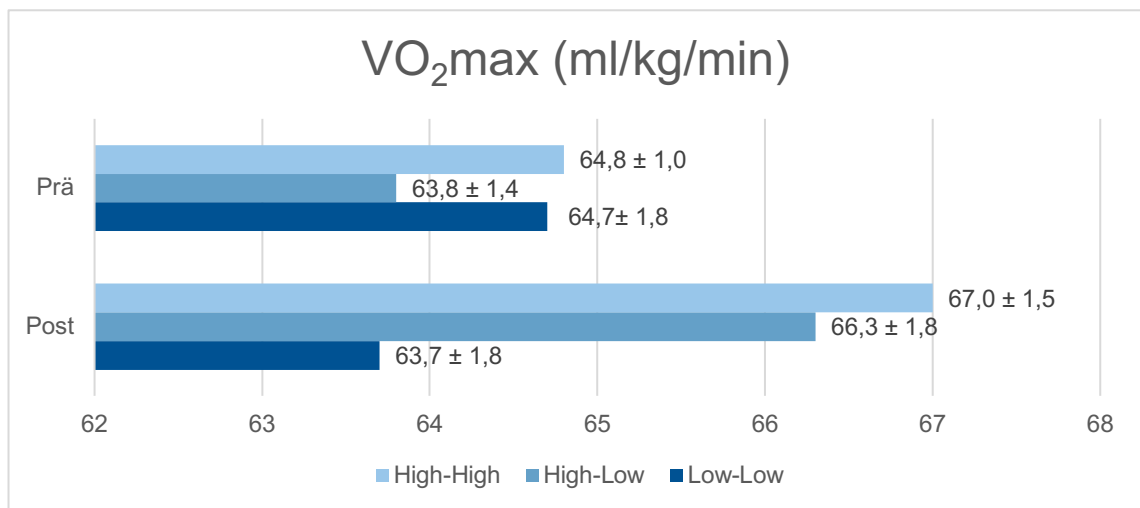


Abbildung 12: VO₂max nach Levine et al., 1997, Eigene Darstellung nach Levine et al., 1997

Christoulas et al., 2011, stellte beide Höhentrainingskonzepte LHTL vs. LHTH gegenüber. An dieser Studie nahmen n=15 (9 weiblich, 6 männlich) Langläufer teil. In der ersten Phase der Untersuchung absolvierten die Athleten das Höhenttraining nach dem LHTH-Konzept. Sie lebten für 21 Tage auf 1550 m und trainierten auf 1550 bis 2050 m Höhe. Ein Jahr später führten genau diese ein erneutes Trainingslager durch, diesmal nach dem LHTL-Konzept. Hier reduzierte sich die Teilnehmerzahl auf n=12 (7 weiblich, 5 männlich). Dabei lebten die Sportler erneut auf 1550 m Höhe, trainierten allerdings auf 450-550 m. Blut sowie Leistungstests zur Bestimmung der VO₂max wurden am ersten bis vierten Tag vor Antritt des Höhentrainings sowie am ersten und 21. Tag in der Höhe durchgeführt bzw. entnommen. Nach der Rückkehr wurden Blutproben innerhalb der ersten zwei Tage abgenommen und die VO₂max erneut kontrolliert. Bei den Männern zeigte sich eine signifikante Steigerung ($p < 0,05$) der VO₂max sowohl bei der High-High Gruppe als auch der High-Low Gruppe, während bei den Frauen ausschließlich die High-Low Gruppe ein verbesserte VO₂max aufwies. Es zeigte sich bei beiden Geschlechtern und bei beiden Gruppen (LHTH und LHTL) vor allem am ersten Tag der Höhenexposition eine signifikant ($p < 0,05$) erhöhte EPO-Konzentration, welche post Höhenexposition auf den Ausgangswert zurückkehrte. Der Hämatokritwert war bei Frauen und Männern bei beiden Trainingskonzepten deutlich erhöht ($p < 0,05$). Die Hämoglobinkonzentration und das Erythrozytenvolumen zeigten sich nach dem High-High Training ausschließlich bei Frauen, nach dem High-Low Training bei beiden Geschlechtern erhöht.

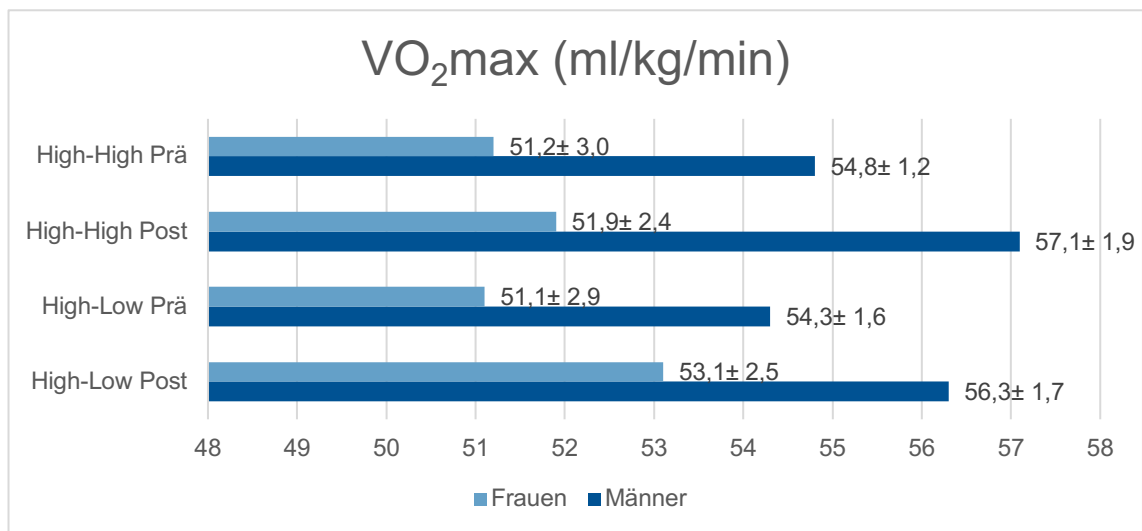


Abbildung 13: VO₂max nach Christoulas et al., 2011, Eigene Darstellung nach Christoulas et al., 2011

Tabelle 10: Blutwerte nach Christoulas et al., 2011, Eigene Darstellung nach Christoulas et al., 2011

Parameter	Prä		1. Tag		21. Tag		Post		
	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen	
EPO mU/ml	High-High max.	12,2 ± 0,4	13,3 ± 1,5	15,8 ± 0,7	19,1 ± 1,4	13,6 ± 0,6	16,6 ± 1,1	11,5 ± 0,4	12,0 ± 1,2
	High-Low max.	10,8 ± 0,8	12,4 ± 0,9	13,8 ± 0,6	15,1 ± 0,4	11,8 ± 0,4	13,4 ± 0,3	9,6 ± 0,4	11,6 ± 0,6
Hämatokritwert %	High-High	44,7 ± 1,0	40,6 ± 0,6	46,6 ± 0,8	41,7 ± 0,6	47,2 ± 1,1	42,7 ± 0,7	48,1 ± 1,0	42,9 ± 0,7
	High-Low	45,0 ± 1,3	40,8 ± 0,8	46,2 ± 1,2	42,6 ± 0,9	48,2 ± 1,3	44,2 ± 1,0	48,2 ± 1,3	44,4 ± 0,9
Hämoglobin %	High-High	14,6 ± 0,3	12,8 ± 0,3	15,0 ± 0,2	13,3 ± 0,3	15,3 ± 0,4	13,6 ± 0,2	15,6 ± 0,4	13,8 ± 0,3
	High-Low	14,4 ± 0,4	13,0 ± 0,4	14,9 ± 0,3	13,5 ± 0,3	15,6 ± 0,3	14,1 ± 0,3	15,8 ± 0,3	14,3 ± 0,2

Parameter		Prä		1. Tag		21. Tag		Post	
		Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen
Erythrozytenvolumen $\times 10^6$ -ul	High-	4,92 \pm 0,09	4,34 \pm 0,06	5,05 \pm	4,57 \pm 0,11	5,15 \pm	4,63 \pm 0,09	5,20 \pm 0,11	4,81 \pm 0,11
	High			0,14		0,15			
	High-	4,93 \pm 0,12	4,54 \pm 0,11	5,06 \pm	4,69 \pm 0,11	5,37 \pm	4,90 \pm 0,09	5,44 \pm 0,14	4,95 \pm 0,11
	Low			0,14		0,12			

Bei diesen beiden Vergleichsstudien verbesserte sich die Ausdauerleistungsfähigkeit speziell beim LHTL Konzept nach der Höhenexposition. Somit wird die Nullhypothese H (0) verworfen und die Alternativhypothese H (1) bestätigt. Die nachfolgende *Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse der Studien, Eigene Darstellung* bietet eine Zusammenfassung über die Ergebnisse.

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse bieten nun die Grundlage für die nachfolgende Diskussion.

Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse der Studien, Eigene Darstellung

Studien	Teilnehmer		Höhe Intervention		Höhe Kontrolle	Dauer	Ergebnis Intervention
	Intervention	Kontrolle	Live	Train			
Live high – train low (LHTL)							
Park et. al., 2019	12	12	>12h in 3000m	Meereshöhe	Meeres- höhe	21 Tage	<ul style="list-style-type: none"> • VO₂max ↑ • Time Trial ↓
Stray-Gundersen et al., 2001	22	x	2500m	<ul style="list-style-type: none"> • Base Train 2000 -2800m • High Intensity Training 1250m 	x	27 Tage	<ul style="list-style-type: none"> • Hb_{conc} ↑ • Hkt ↑ • VO₂max ↑ • Time Trial ↓
			>18h in 2456m	<ul style="list-style-type: none"> • Base Train 1800m • High Intensity Training 1000m 	500m	24 Tage	<ul style="list-style-type: none"> • Hb_{mass} ↑ • MCV ↑ • VO₂max ↑ • Time Trial ↓
Wehrlin et al., 2006	10	7	>18h in 2456m				
Brugniaux et al., 2005	5	6	6 Tage 2500m 12 Tage 3000m	1200m	1200m	18 Tage	<ul style="list-style-type: none"> • EPO ↑ • Hb_{mass} ↑ • VO₂max ↑

Studien	Teilnehmer		Höhe Intervention		Höhe Kontrolle	Dauer	Ergebnis Intervention
	Intervention	Kontrolle	Live	Train			
Live high – train high (LHTH)							
Garvican-Lewis et al., 2015	5	8	1800m	1800m + 2x/Woche 1000m	600m	21 Tage	<ul style="list-style-type: none"> Hb_{mass} ↑ Hkt ↑
Sharma et al., 2018	8	x		2100m	x	21 Tage 28 Tage	<ul style="list-style-type: none"> Hb_{mass} ↑ PR ↓
Live high – train low (LHTL) vs. Live high – train high (LHTH)							
Levine et al., 1997	LHTL: 13	13	2500m	1300 / 1400m	150m	28 Tage	<ul style="list-style-type: none"> Hb_{mass} ↑ MCV ↑ VO₂max ↑ Time Trial ↓ (nur LHTL)
	LHTH: 13		2500m	2500 / 2700m			
Christoulas et al., 2011	LHTH: 15	x	1550m	1550m – 2050m	x	21 Tage	<ul style="list-style-type: none"> Hb_{conc} ↑ (Frauen) Hkt ↑ VO₂max ↑ (Männer)
	LHTL: 13		1550m	450m – 550m			

6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel abschließend bewertet und diskutiert.

6.1. Zusammenfassung und kritische Betrachtung der Ergebnisse

In diesem Teilkapitel werden die Ergebnisse aus *Kapitel 5* zusammengefasst und kritisch beurteilt. Dabei bietet *Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse der Studien, Eigene Darstellung in Kapitel 5* eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse.

Alle unter *Kapitel 5.1* aufgeführten LHTL – Studien wiesen eine signifikant verbesserte $VO_2\text{max}$ im Vergleich zu den Kontrollgruppen und vor dem Höhenttraining auf. Abgesehen von Brugniaux et.al., 2005, der keine Time Trials durchführte, zeigten die drei anderen Studien ebenfalls eine signifikante Verbesserung der 3000 m bzw. 5000 m Time Trials in den jeweiligen Interventionsgruppen und im Vergleich zu vor dem Höhenttraining. Abgesehen von Park et. al, 2019, erhöhten sich auch die Blutparameter wie die Hämoglobinkonzentration bzw. -masse, Hämatokritwert, Erythrozytenvolumen und die EPO-Konzentration. Diese physiologischen Anpassungsprozesse, wie sie in *Kapitel 2.1.3* aufgezeigt wurden, verdeutlichen, dass sich die einzelnen Athleten während des Höhenttrainings höhenakklimatisierten, wodurch eine Leistungsverbesserung möglich war. Die Zunahme der Hämoglobinkonzentration und des Erythrozytenvolumens als hämatologische Anpassungsprozesse an die Höhe ermöglichen schließlich einen besseren Sauerstofftransport, wodurch die maximale Sauerstoffkapazität gesteigert wird (vgl. Wehrin, 2005, S. 69). Dies führt zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit. Das konnte in den Studien nachgewiesen werden.

Die zwei unter *Kapitel 5.2* vorgestellten LHTH – Studien ergaben eine Erhöhung der Hämoglobing Gesamtmasse. Das Ergebnis zeigt auf, dass das „live high“ Prinzip auch hier die Zunahme der Hämoglobing Gesamtmasse als einen der relevantesten Akklimatisierungseffekte (vgl. Wehrin, 2005, S. 69) bewirkt, wodurch ein verbesserter Sauerstofftransport ermöglicht wird. Zur weiteren Leistungsbeurteilung ließen Sharma et al., 2018, die Athleten nach dem Höhenttraining erneut ihre individuellen Spezialdistanzen laufen. Dabei verbesserten alle Athleten ihre persönlichen Bestzeiten.

Bei den unter *Kapitel 5.3* im direkten Vergleich von LHTL und LHTH durchgeführten Studien zeigte sich in den Ergebnissen, dass sich beide Höhenttrainingsgruppen auf hämatologischer Ebene physiologisch an die Höhe anpassen konnten. Dabei kam es bei beiden Studien zu einem Anstieg der Hämoglobing Gesamtmasse bzw. -konzentration

sowie zur Zunahme des Erythrozytenvolumens als auch des Hämatokritwertes. Obwohl die Sauerstofftransportkapazität bei Levine et al., 1997, durch einen in beiden Gruppen ähnlichen Anstieg der Hämoglobing Gesamtmasse verbessert werden konnte und sich somit auch die $VO_2\text{max}$ bei beiden Gruppen signifikant erhöhte, konnte nur die LHTL – Gruppe im anschließenden Time Trial nach dem Höhenttraining ihre Zeiten verbessern. Der einzige ausschlaggebende Unterschied für dieses Ergebnis scheint laut Levine et al., 1997, in der Trainingshöhe der beiden Gruppen zu liegen (weitere Hintergründe und Erklärungen folgen in *Kapitel 6.3*). Christoulas et al., 2011, zog zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit neben den Blutwerten ausschließlich die $VO_2\text{max}$ heran. Dabei verbesserten in der LHTH – Gruppe ausschließlich die Männer ihre Werte, während beide Geschlechter dieses in der LHTL – Gruppe taten.

Zusammenfassend haben die Ergebnisse der Studien gezeigt, dass beide Konzepte des Höhenttrainings physiologische Anpassungsprozesse bei den Athleten suggerieren, was zu der Annahme führt, dass die Ausdauerleistungsfähigkeit durch vorangegangenes Höhenttraining anschließend in Tallage positiv beeinflusst werden kann. Dabei ist hervorzuheben, dass besonders die Ergebnisse der LHTL – Studien verdeutlichen, dass vor allem dieses Konzept zur Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit führt. Insgesamt wird für alle Studien die Nullhypothese $H(0)$ verworfen und die Alternativhypothese $H(1)$ bestätigt.

Die Gründe für den zuvor aufgezeigten Ergebnisausgang werden nun in den folgenden Teilkapiteln näher betrachtet.

6.2. Einflussfaktoren auf die Verbesserung der Leistungsfähigkeit nach der Höhe

In *Kapitel 2* wurden u.a. die Akklimation, die physiologischen Anpassungsprozesse in der Höhe und die Relevanz von Höhenttraining im Ausdauersport näher erläutert. Höhenttraining bedingt durch die Abnahme der Sauerstoffsättigung in der Höhe bereits nach wenigen Stunden eine Zunahme der EPO-Konzentration. Im ersten Schritt werden zunächst vermehrt Retikulozyten, die Vorläuferzellen der Erythrozyten, neugebildet. Die gesteigerte Neubildung von Retikulozyten und ein gesteigerter Hämatokritwert sind schließlich der Grund für ein erhöhtes Erythrozytenvolumen und eine erhöhte Hämoglobing Gesamtmasse (vgl. Wehrlin, 2005, S. 69). Dabei fungiert der geringe Sauerstoffgehalt in der Umgebungsluft, der mit zunehmender Höhe abnimmt, als effektivster Schritt, die Erythropoese zu steigern und somit zur Zunahme der

Hämoglobing Gesamtmasse und des Erythrozytenvolumens zu führen. Diese beiden Faktoren sind schließlich ausschlaggebend für die Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit. Der Anstieg des Hämatokritwertes, der in vier von acht Studien auftrat, ist neben der Vermehrung der Erythrozytenmasse u.a. auch durch eine Abnahme des Plasmavolumens zu erklären (vgl. Friedemann, 2000, S. 420). Aufgrund der gesteigerten Hämatokritwerte und der Zunahme der Erythrozytenzahl ergibt sich ein größeres MCV, was schließlich auch eine Verbesserung der Sauerstofftransportkapazität gewährleistet (siehe *Kapitel 2.1.3.1*) und somit eine Verbesserung der VO_2max bedingt (vgl. Schmidt, 1999, S. 346). Dies wird in zwei Studien quantitativ bestätigt. In einigen der Studien wurden neben der Hämoglobing Gesamtmasse und des Erythrozytenvolumens auch die EPO-Konzentration und die Retikulozytenanzahl in der Höhe untersucht. Folgend konnte in diesen Studien die Zunahme von EPO als Zeichen einer gesteigerten Erythropoese bereits nach wenigen Stunden und darauf folgend die Steigerung der Retikulozyten nachgewiesen werden. Die Zunahme der Hämoglobing Gesamtmasse bzw. -konzentration und auch die des Erythrozytenvolumens als Reaktion auf die Höhe konnten schließlich in sieben untersuchten Studien (mit Ausnahme von Park et al., 2019), sowohl in den LHTH als auch in den LH TL – Studien, bestätigt werden.

Alle Studien mit Ausnahme von zweien (Park et al., 2019 und Brugniaux et.al., 2005) absolvierten das „live high“ ausschließlich zwischen 1500 m - 2500 m, was der Definition nach als mittlere Höhe beschrieben wird. Bei allen in dieser Höhe durchgeführten Studien konnten physiologische Anpassungsprozesse nachgewiesen werden. Somit kann in allen Studien das Grundziel des Höhentrainings bestätigt werden: Anhand der Höhe konnte die Leistungssteigerung der Athleten durch eine gesteigerte Erythropoese herbeigeführt werden. Laut Schobersberger, 2017, führt die Zunahme der Erythrozytenmasse und daraus resultierenden Zunahme der Hämoglobing Gesamtmasse bzw. -konzentration zu einer Verbesserung des arteriellen Sauerstoffgehaltes. Dadurch nimmt die O_2 -Versorgung des Gewebes zu, wodurch schlussendlich die VO_2max verbessert werden kann. Die Zunahme der VO_2max in anschließender Tallage kann in allen LH TL – Studien und einer LHTH – Studie bei den Männern bestätigt werden. In allen Studien, in der die Athleten ihre VO_2max verbesserten, verbesserten sich mitunter auch die Time Trials nach erfolgreichem Absolvieren des Höhentrainings. Der Zusammenhang zwischen gesteigerter Erythropoese und Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage konnte in sieben von acht Studien nachgewiesen werden. Bei Park et al., 2019, konnte bei über zwölf Stunden in 3000 m Höhe dieser Zusammenhang von hämatologischen Anpassungsprozessen und Verbesserung der Leistungsfähigkeit nicht nachgewiesen werden. Während es zu keinen hämatologischen Veränderungen kam, verbesserte sich die Leistungsfähigkeit der Athleten dennoch (siehe *Abbildung 5: Time Trial nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019* und *Abbildung 6: Einfluss von Höhentrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit*

VO₂max nach Park et al., 2019, Eigene Darstellung nach Park et al., 2019). Erklärbar sind diese fehlenden hämatologischen Anpassungsprozesse bei gleichzeitiger Verbesserung der VO₂max und damit der Time Trial, dass das Erythrozytenvolumen und die Erythrozytenmasse, welche repräsentativ für die Erythropoese sind, nicht gemessen worden sind (vgl. Park et al., 2019, S. 433). Bruginaux et al., 2005, kombinierte das „live high“ in seiner Studie mit mittlerer (sechs Tage) und großer Höhe (12 Tage). Trotz der längeren Verweildauer auf großer Höhe zeigten die Athleten neben den für die mittlere Höhe beschriebenen Anpassungsprozessen auch eine Steigerung der Leistungsfähigkeit in Form von der VO₂max. Diese Kombination aus mittlerer und großer Höhe zeigt auf, dass eine Verweildauer auf über 3000 m Höhe für einige Tage den gewünschten Höhentrainingsseffekt ebenfalls herbeiführt.

Mit zunehmender Aufenthaltsdauer in der Höhe kommt es zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit infolge der oben beschriebenen verbesserten Akklimatisationsreaktionen (vgl. Friedemann, 2000, S. 421). Daraus ergibt sich eine Empfehlung zur optimalen Dauer von Höhentrainings. Für das LHTH – Konzept empfiehlt sich ein Aufenthalt von drei bis vier Wochen auf 1800 – 2500 m (vgl. Schobersberger, 2017, S. 523). Die in dieser Arbeit untersuchten LHTH – Studien erfüllen diese Empfehlung und bestätigen, dass in diesem Zeitraum die gewünschten hämatologischen Anpassungsprozesse zur Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit erreicht worden sind. Eine Aufenthaltsdauer von vier Wochen ist laut Literatur zielführend für das LHTL – Höhentrainingskonzept. Dabei sollte dieses auf 2200 – 2500 m durchgeführt werden bzw. sollte eine optimale Hypoxiedauer von max. 20-22 h am Tag und min. 12 h am Tag gegeben sein (vgl. Schobersberger, 2017, S. 523). Die in dieser Arbeit untersuchten LHTL – Studien verbrachten das „live high“ z.T. innerhalb von drei Wochen, mitunter aber auch vier Wochen auf circa 2500 m. Nur die Athleten in der Studie von Christoulas et al., 2011, lebten auf 1550 m Höhe und somit unter der offiziellen Empfehlung. Die Studiendauer von Bruginaux et al., 2005, betrug knapp weniger als drei Wochen. Doch auch die Ergebnisse dieser beiden sowie die der anderen LHTL – Studien (ausgenommen Park et al., 2019) wiesen aufgrund der gesteigerten Erythropoese eine Zunahme der Hämoglobingesamtmasse und des Erythrozytenvolumens auf. Somit zeigt sich in diesen Studien, dass auch entgegen der Empfehlung u.a. circa drei Wochen und eine Höhe von 1550 m ausreichen, um zur Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu führen.

Wehrlin, 2005, definiert in dem „*norwegischen Modell*“ den optimalen Zeitraum für eine gesteigerte Leistung innerhalb der ersten zwei Tage nach Rückkehr aus der Höhe oder innerhalb von 16-24 Tage nach dem Höhentrainings (siehe *Abbildung 1: Phasen des „norwegischen Modells“*, Eigene Darstellung nach Wehrlin, 2005, S. 72). Ausschließlich Park et al., 2019, und Garvican-Lewis et al., 2015, und Christoulos et al., 2011, führten ihre

Ausdauerleistungsfähigkeitstest und Blutprobenentnahmen direkt innerhalb der ersten zwei Tage oder 16-24 Tage nach Rückkehr aus der Höhe durch, was nach dem „*norwegischen Modell*“ als ein geeigneter Zeitraum mit erhöhter Leistungsfähigkeit gilt und sich somit für eine Teilnahme an einem Wettkampf eignet. Anhand der gemessenen Blutparameter sowie der durchgeführten Leistungstest wird diese Annahme unterstützt, da alle untersuchten Athleten der Interventionsgruppen sowohl gesteigerte Hämoglobinwerte und eine verbesserte $VO_2\text{max}$ aufwiesen als auch ihre Time Trials verbessern konnten. Bruginaux et al., 2005, und Levine et al., 2011, führten ihre Leistungsfähigkeitstests zweimal nach der Rückkehr durch. Zum einen wurde am dritten bzw. siebten Tag eine erste Leistungsüberprüfung durchgeführt, zum anderen wurden am 15. bzw. 14. und 21. Tag nach Höhenexposition diese erneut absolviert und evaluiert. Dabei ergaben beide Studien, dass die Leistungsfähigkeit in den ersten Tests gestiegen war. Dies widerspricht den Empfehlungen des Modells und verdeutlicht, dass die Gültigkeit dieses Modells unter Einschränkungen der individuellen Voraussetzungen betrachtet werden muss. In der zweiten Testphase wiesen die Sportler der Interventionsgruppe, die laut Definition im Zeitraum der Wettkampfphase stattfand, weiterhin eine verbesserte Leistungsfähigkeit auf. Hier werden die Angaben des Modells zur Erreichung von Höchstleistungen in diesem Zeitraum bestätigt. Entgegen der Empfehlungen des „*norwegischen Modells*“ absolvierten Park et al., 2019, Wehrlin et al., 2006, und Sharma et al., 2018, die Analysen und Leistungstests ausschließlich im Zeitfenster der „*period of poor performance*“ (siehe *Abbildung 1: Phasen des „norwegischen Modells“, Eigene Darstellung nach Wehrlin, 2005, S. 72*), in welcher laut dem Modell nicht der Zeitpunkt für die höchste Leistungsfähigkeit besteht (vgl. Wehrlin, 2005, S. 72). Nichtsdestotrotz beweisen die Ergebnisse der Studien, dass auch in diesem Zeitraum die $VO_2\text{max}$ deutlich erhöht ist, somit auch verbesserte Time Trials in dieser Periode möglich sind. In keiner der Studien konnte eine verminderte Hämoglobinmasse unmittelbar nach der Rückkehr vom Höhengaufenthalt nachgewiesen werden. Somit lässt sich auch erklären, dass die Steigerung der Leistungsfähigkeit auch in der „*period of poor performance*“ möglich war. Eine Leistungssteigerung im Flachland scheint auch außerhalb der empfohlenen Zeitangaben möglich zu sein, wenn es nicht zu einer Abnahme der Hämoglobingestamtmasse und der damit verbundenen $VO_2\text{max}$ kommt.

Bei Höhengaufenthalt wird zwischen Respondern und Non-Respondern unterschieden. Wie unter *Kapitel 2.1.2* aufgezeigt, sind die Anpassungsprozesse sehr individuell, so auch bei Sportlern. Sind die Dauer und die adäquate Höhe, wie sie in diesem Kapitel definiert wird, als Voraussetzungen gegeben, so können Akklimatisationsprozesse stattfinden. Reagieren Athleten tatsächlich in der Höhe mit einer Zunahme der Gesamthämoglobinmasse und damit einhergehend einer Zunahme der $VO_2\text{max}$, spricht man von Respondern (vgl. Burtscher, 2010, S. 159). Es wird von Non-Respondern gesprochen, Einfluss von Höhengtrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

wenn aufgrund von Höhenexposition keine Blutneubildung oder verminderte Reaktion in der Höhe nachgewiesen werden können. Dabei bleibt beispielsweise die Zunahme der Gesamthämoglobinmasse aus (vgl. Burtscher, 2010, S. 157). Die Ursachen dieses Phänomens sind größtenteils noch ungeklärt. Erklärbar wäre eine verminderte Erythropoese u.a. durch einen Eisenspeichermangel (vgl. Burtscher, 2010, S. 2010). Die Athleten der hier untersuchten Studien bekamen Eisen supplementiert. Die Ergebnisse der Studien bestätigen, dass das Auftreten von Non-Respondern durch Eisengabe in der Höhe vermieden werden kann. Sieben der acht Studien zeigen eine Zunahme der Hämoglobingesamtmasse und damit z.T. einhergehend eine Zunahme der $VO_2\text{max}$. Schließlich kann bei den Studienteilnehmern von Respondern gesprochen werden. Diese Differenzierung gilt es allerdings bei Höhenttraining nicht zu vernachlässigen.

Sowohl bei den LHTL als auch den LHTH – Studien zeigten sich hämatologische Anpassungsprozesse, die zu einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit führten. Nichtsdestotrotz sind zwischen den beiden Konzepten unterschiedliche Deutlichkeiten in der Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit erkennbar. Daher werden im Folgenden die Vor- und Nachteile beider Höhenttrainingskonzepte gegenübergestellt.

6.3. Vergleich der Höhenttrainingskonzepte LHTH und LHTL

In den LHTH – Studien konnte zwar jeweils die Zunahme der Hämoglobingesamtmasse durch eine hypoxieinduzierte-Erythropoese und somit eine Zunahme der Sauerstoffkapazität nachgewiesen werden, dennoch blieb in den meisten LHTH – Studien eine entsprechende und deutliche Leistungsverbesserung im Vergleich zu den LHTL – Studien aus. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Reduktion der Trainingsintensität mit zunehmender Höhe. Dies wird auch in diversen Quellen wie bspw. Friedemann, 2000, oder Küpper, 2010, aufgeführt. In der Literatur wird von einer Abnahme der Leistungsfähigkeit mit zunehmender Höhe gesprochen. Ab einer Höhe von 1500 m kommt es je 100 m Höhenzunahme zu einer 1 %-igen Abnahme der max. Sauerstoffaufnahme (vgl. Friedemann, 2000, S. 421), somit reduziert sich die maximale aerobe Leistungsfähigkeit ab 1500 m. Ab dieser Höhe verringert sich somit die max. O_2 -Aufnahme. Üblicherweise geht mit der Zunahme der Hämoglobingesamtmasse, welche durch eine hypoxievermittelte-Erythropoese stimuliert wird, eine größere O_2 -Kapazität einher. Die reduzierte Trainingsintensität ist das größte Problem des klassischen LHTH – Höhenttrainings, bei welchem sowohl über 1500 m gelebt als auch trainiert wird. Aufgrund des Trainings auf circa 2000 m kann die nötige Intensität, mit welcher mechanische Reize an der Muskulatur der Sportler gesetzt werden, nicht gewährleistet werden. Somit zeigen die vorliegenden

LHTH – Studien zwar alle eine Zunahme der Hämoglobingestaltmasse, dennoch bleibt eine deutliche Leistungsverbesserung im Vergleich zu den LHTL – Studien aus.

Das LHTL – Trainingskonzept nutzt hingegen die Vorteile des „live high“. Durch dieses können die unter *Kapitel 2.1.2 und 2.1.4* genannten Akklimatisationsprozesse in Hypoxie stattfinden. Durch das „train low“ in Normoxie kann die hohe Trainingsintensität erhalten bleiben, was sich schließlich sehr positiv auf und zu einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit in der Tallage führt. Außerdem werden die notwendigen mechanischen Reize im Muskel durch die hohe Trainingsintensität gesetzt. Dies konnte in allen sowohl einzelnen LHTL als auch den Vergleichs LHTL – Studien gezeigt werden.

Die hier untersuchten Studien, deren Ergebnisse und deren Erklärungen unterliegen weiteren Limitationen, welche im folgenden Kapitel aufgezeigt werden.

6.4. Limitationen

In den hier untersuchten Studien partizipieren Athleten auf hohem Leistungsniveau. Nichtsdestotrotz sind die Trainingszustände der einzelnen Athleten zu Beginn der Studien aufgrund von individueller Trainingssteuerung unterschiedlich. Damit sind durch Höhenttraining unterschiedlich stark ausgeprägte Leistungssprünge möglich. Dies macht eine Vergleichbarkeit der absoluten Werte zwischen den Studien schwierig. Dies wird auch dadurch deutlich, dass neben Athleten der Weltspitze auch College-Läufer in Studien teilnehmen. Diese weisen unterschiedliche Leistungsniveaus auf und können demnach unterschiedlich auf Höhenttraining reagieren.

Außerdem sind die Trainingspläne im Höhenttraining nicht über alle Studien hinweg standardisiert. Daraus resultiert eine abweichende Trainingsintensität, was den Vergleich von absoluten Werten zwischen den Studien erschwert.

Des Weiteren haben nicht alle Studien Kontrollgruppen in Tallage, sondern lediglich Kontrollwerte von vor und nach dem Höhenttraining der Athleten erfasst. Dies limitiert die Aussagefähigkeit bezüglich der Ursache der Ausdauerleistungssteigerung. Zum einen können die Athleten allein durch das Training selbst profitieren oder ausschließlich durch die Höhenexposition oder durch das Höhenttrainingskonzept im Gesamten. Dies ist in den Studien ohne Kontrollgruppe nicht nachvollziehbar.

7. Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen von Höhentrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit in Tallage unter Betrachtung der physiologischen Anpassungsreaktionen zu untersuchen. Hierzu wurden zunächst die theoretischen Grundlagen von Höhentraining erläutert und deren Effekte auf den menschlichen Organismus betrachtet. Darauf aufbauend wurden die beiden Höhentrainingskonzepte LHTH und LHTL im Fokus auf diese untersucht. Durch eine systematische Literaturrecherche inklusive der Anwendung von CASP Checklisten wurden die dafür relevanten Studien identifiziert. Deren Ergebnisse wurden systematisch aufbereitet, analysiert und diskutiert. Zusammenfassend haben die Studien gezeigt, dass sich Höhentraining im Allgemeinen verbessernd auf die Ausdauerleistungsfähigkeit auswirkt. Wie abschließend in *Kapitel 6.2* und *6.3* verdeutlicht werden konnte, eignet sich speziell das „living high – training low“ Konzept zur Verbesserung dieser in Tallage. Durch das „live high“ finden in den beiden Höhentrainingskonzepten aufgrund von Hypoxie die beschriebenen physiologischen Anpassungsprozesse statt. Das „train low“ ermöglicht außerdem das Aufrechterhalten einer hohen Trainingsintensität. Dies ist der Schlüssel und dominierende Faktor gegenüber dem „train high“, weswegen im Konzept „living high – training low“ stärker ausgeprägte Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit im Vergleich zum „living high – training high“ nachgewiesen wurden.

Aufbauend auf dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung der Wirkung von Höhentrainingskonzepten auf die Ausdauerleistungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Geschlecht als weiterer Schritt möglich. Außerdem ist die Untersuchung zielführend, inwiefern Höhentraining bei Hobby-Ausdauersportlern ebenfalls die gewünschten Ausdauerleistungssteigerungen erzielt, um die Allgemeingültigkeit dieser durch Höhentraining bei allen Leistungsgruppen empfehlen zu können.

Für Ausdauerathleten empfiehlt es sich auf Grundlage der hier erarbeiteten Ergebnisse vor Wettkämpfen wie Weltmeisterschaften oder Olympischen Spielen etc. Höhentraining nach dem Konzept LHTL zu verankern.

8. Literaturverzeichnis

- Amboss.** 2020. Erythrozyten. [Webpage]. Retrieved from [<https://www.amboss.com/de/wissen/Erythrozyten/>] (Zugriff am 20.06.2021).
- Bley, C., Centgraf, M., Cieslik, A.** (2015). Blut und Immunsystem. In: *I care Anatomie, Physiologie*. 1. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- BMW Berlin – Marathon.** 2021. Weltrekorde. [Webpage]. Retrieved from [<https://www.bmw-berlin-marathon.com/impressionen/statistik-und-geschichte/zahlen-und-rekorde/>] (Zugriff am 20. Juni 2021).
- Brugniaux, J. V., Schmitt, L., Robach, P., Nicolet, G., Fouillot, P.** 2005. 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.
- Burtscher, M.** 2010. Höhenttraining. In T. Küpper, K. Ebel, U. Gieseler (Eds.), *Moderne Berg- und Höhenmedizin* (p. 155 – 162). Stuttgart: Genter Verlag.
- Cambridge Dictionary.** 2014. Time Trial. [Webpage]. Retrieved from [<https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/time-trial?q=Time+trial+>] (Zugriff am 20. Juni, 2021).
- CASP UK.** 2021. CASP Checklists. [Webpage]. Retrieved from [<https://casp-uk.net/casp-tools-checklists/>] (Zugriff am 10. Mai 2021).
- Christoulas, K., Karamouzis, M., Mandroukas, K.** 2011. „Living high – training low“ vs. „living high – training high“: erythropoietic responses and performance of adolescent cross – country skiers. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 51 (1), 74 – 81.
- Faude O., Donath L.** 2019. Ausdauer und Ausdauertraining im Sport. In A. Güllich, M. Krüger (Eds.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (p. 2 – 14). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag GmbH. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4_47-1
- Faulhaber M., Wille M.** 2015. Intermittierende Hypoxie: Höhenttraining und Präaklimatisation. In F. Berghold, H. Brugger (Eds.), *Alpin- und Höhenmedizin* (p. 355 – 362). Wien: Springer Verlag.
- Friedmann, B., Bärtsch P.** 1997. Höhenttraining: Sinn, Unsinn, Trends. *Der Orthopäde*. 26 (11) (p. 987—992). doi: <https://doi.org/10.1007/PL00003353>.
- Friedemann, B.** 2000. Entwicklungen im Höhenttraining: Trends und Fragen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 51(12) (418—423).
- Garvican – Lewis, L. A., Halliday, I., Abbiss, C. R., Saunders, P. U., Gore, C. J.** 2015. Altitude Exposure at 1800 m Increases Haemoglobin Mass in Distance Runners. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14 (2), 413 – 417.

- Gatterer, F., Faulhaber, M.** 2019. Höhenttraining. In F. Berghold, H. Brugger (Eds.), *Alpin- und Höhenmedizin* (p. 423 – 431). Wien: Springer Verlag.
- Hollmann, W., Strüder, H. K.** 2009. Ausdauer. In W. Hollmann, H. K. Strüder (Eds.), *Sportmedizin – Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin* (p. 267 – 460). 5. Aufl. Stuttgart: Schattauer GmbH.
- 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 (1), 102 – 112.
- Marées, H.** 2003. Körperliche Leistungsfähigkeit in der Höhe. In H. Marées. (Ed.), *Sportphysiologie* (p. 479 – 602). 9. Aufl. Köln: Verlag SPORT und BUCH Strauß.
- Mees, K.** 2005. Höhenanpassung. München: Bruckmann Verlag GmbH.
- Menche, N.** 2012. Das Blut. In N. Menche (Ed.), *Biologie Anatomie Physiologie*. (p. 189 – 204). 7. Aufl. München: Elsevier GmbH.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., und Altman, D. G.** 2009. The PRISMA Statement. [Webpage]. Retrieved from [<http://www.prisma-statement.org/documents/PRISMA%20German%20Statement.pdf>] (Zugriff am 03. Mai 2021).
- Park, H., Park, W., Lim, K.** 2019. Living High – Training Low for 21 Days Enhances Exercise Economy, Hemodynamic Function, and Exercise Performance of Competitive Runners. *Journal of Sports Science and Medicine*, 18 (3), 427 – 437.
- Pollard, A.J. & Murdoch, D.R.** (1997). *The high altitude medicine handbook*. Oxon: Radcliffe Medical Pr.
- Prommer, N., Schmidt, W.** 2009. Hämoglobinmenge und Sport. In *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 60 (9) (293 – 294). doi: https://www.germanjournal-sportsmedicine.com/fileadmin/content/archiv2009/heft09/standard_prommer_gf.pdf (Zugriff am 20. Mai 2021).
- Schmidt, W.** 1999. Die Bedeutung des Blutvolumens für den Ausdauersportler. In *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 50 (11+12) (p. 341—349). doi: https://www.germanjournalsportsmedicine.com/fileadmin/content/archiv1999/Heft11/1999_11-12_TRAINING%20BLUTVOLUMEN.pdf.
- Schobersberger, W., Schobersberger, B.** 2017. Mittlere Höhenlagen – Höhenanpassung und Höhenttraining. In M. Wonisch, P. Hofmann (Eds.), *Kompendium der Sportmedizin* (p. 513 – 524). doi: 10.1007/978-3-211-99716-1_33.
- Sharma, A. P., Saunders, P. U., Garvican – Lewis, L. A., Périard, J. D., Clark, B.** 2018. Training Quantification and Periodization during Live High Train High at 2100 M in Elite Runners: An Observational Cohort Case Study. *Journal of Sports Science and Medicine*, 17 (4). 607 – 616.

- Spring, H., Dvorak, J., Dvorak, V., et al.** 2008. Theoretische Grundlagen. In H. Spring, J. Dvorak (Eds.), *Therapie und Praxis der Trainingstherapie: Beweglichkeit, Kraft, Ausdauer, Koordination* (p. 5 – 84 ff). 3. Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Spomedial.** 2009. Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max). [Webpage]. Retrieved from [http://vmrz0100.vm.ruhr-uni-bochum.de/spomedial/content/e866/e2442/e3862/e4009/e4019/index_ger.html] (Zugriff am 22.06.2021).
- 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 (3), 1113 – 1120.
- Wehrlin, J.P.** 2005. „Live high – train low“: Ein erfolgreiches Höhentrainingsparadigma zur Leistungssteigerung bei Eliteausdauerathleten. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*. 53 (2) (68–75).
- Wehrlin, J. P., Zuest, P., Hallén, J., Marti, B.** 2006. Live high – train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 100 (6), 1938 – 1945.
- West, J.** 2013. Hematology. In J. West (Ed.), *High altitude medicine and physiology* (p. 121 – 136). 5. Aufl. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis group.
- West, J.** 2013. Athletes and altitude. In J. West (Ed.), *High altitude medicine and physiology* (p. 417 – 425). 5. Aufl. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis group.