

Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

FB 05, Institut für Sportwissenschaften

Trainingswissenschaftliches Praktikum SS2007

Prof. Dr. Angela Ballreich

PD Dr. Dr. Dr. Christoph Raschka

Höhenakklimatisation

Reaktionen auf Hypoxie bei kurzfristigem und längerem Aufenthalt in mittleren Höhen von 1750 bis 3300m ü. NN.

Tag der Abgabe: 04.06.2012

vorgelegt von: Lars Kirchner, 4.Semester
Christoph Walther, L3, 4.Semester

Inhalt

<u>1</u>	<u>Problemstellung</u>	<u>3</u>
1.1	Begriffsbestimmung	4
1.1.1	Herzfrequenz	4
1.1.2	Sauerstoffsättigung	5
1.2	Darstellung problemrelevanter Untersuchungen	5
<u>2</u>	<u>Untersuchungsmethodik</u>	<u>9</u>
2.1	Merkmalsstichprobe	9
2.2	Personenstichprobe	9
2.3	Messmethodik und Messinstrumentarium	9
2.4	Untersuchungsverlauf	11
<u>3</u>	<u>Ergebnisse</u>	<u>14</u>
3.1	Deskriptive Ergebnisse	14
3.2	Analytische Ergebnisse	18
3.2.1	Darstellung	18
3.2.2	Interpretation	21
<u>4</u>	<u>Ausblick und Diskussion</u>	<u>24</u>
<u>5</u>	<u>Zusammenfassung</u>	<u>26</u>
<u>6</u>	<u>Literatur</u>	<u>28</u>
<u>7</u>	<u>Tabellenverzeichnis</u>	<u>29</u>
<u>8</u>	<u>Abbildungsverzeichnis</u>	<u>30</u>
<u>9</u>	<u>Anhang</u>	<u>31</u>

1 Problemstellung

Die Begeisterung vieler Urlauber am alpinen bis hochalpinen Freizeitgeschehen nimmt ständig zu. Dabei betätigt man sich überwiegend sportlich. Mountainbiking, Ski fahren, Snowboarden, Wandern, Touren gehen, Nordic Walking ist nur eine Auswahl an populären Sportarten, die oft in Höhen bis zu 3000m betrieben werden.

Die Alpen gelten als weltweit größter Tourismusraum überhaupt, wobei vor allem die leichte Erreichbarkeit größerer Höhen durch Bergbahnen und Straßen eine Attraktion darstellt. Alpenweit werden täglich im Schnitt 150 000 Personen in kurzer Zeit mit Seilbahnen in beträchtliche Höhen gebracht. Dabei befinden sich 68 österreichische Bergstationen über 2500m Meereshöhe (vgl. Berghold, 2004, S. 39).

All diese Besucher setzen sich damit den Einflüssen mittlerer Höhen aus, die definitionsgemäß zwischen 1500 und 2500m ü. NN angesiedelt sind (vgl. Berghold, 2004, S. 40).

Wer sich einmal in größeren Höhen aufgehalten hat wird schnell bemerkt haben, dass bereits geringe körperliche Anstrengung mit einer erhöhten Atem- und Pulsfrequenz einhergeht und diese als anstrengender als im Flachland empfunden wird. Dieser Leistungsverlust wird ab einer Höhe von 1500m über dem Meeresspiegel messbar (vgl. Bärtsch, 2000, S. 139).

Bärtsch (2000, S. 139) beschreibt jedoch, dass sich diese Erscheinungen schon noch einem Aufenthalt von mehreren Tagen bis Wochen relativieren und wir diese Leistungseinschränkung nicht mehr bemerken. Erst dadurch ist der Mensch in der Lage, durch einen langsamen Anstieg in Höhen bis 8000m vorzudringen.

Wir wollen uns daher mit dem *kurz- und mittelfristigen Anpassungserscheinungen des Organismus bei einem Aufenthalt in mittleren Höhen* befassen.

Durch den höhenbedingt niedrigen Sauerstoffpartialdruck (pO_2) ist der Körper einer Gewebshypoxie ausgesetzt, die dazu führt, dass die Herzfrequenz ansteigt. Das heißt, dass bei zunehmender Höhe eine akute Höhenanpassung stattfinden muss (vgl. de Marées, 2003, S. 584).

Wir formulieren folgende Untersuchungshypothesen:

Hypothese 1: Bei akut ansteigender Höhe sinkt die Sauerstoffsättigung des Blutes.

Hypothese 2: Die Herzfrequenz bei Ruhe steigt mit akut zunehmender Höhe.

Bei längeren Aufenthalten nehmen wir eine Anpassung des Organismus an den Sauerstoffmangel in der Atemluft an. Nach einer anfänglich niedrigen Sauerstoffsättigung des Blutes gehen wir daher davon aus, dass diese auf Grund von Anpassung über einen längeren Zeitraum wieder ansteigt und die Herzfrequenz sinkt.

Hypothese 3: Der Sauerstoffgehalt des Blutes steigt über die Dauer eines längeren Aufenthaltes in der konstanten Höhe (1750m ü. NN).

Hypothese 4: Der Ruhepuls sinkt über die Dauer eines längeren Aufenthaltes in der konstanten Höhe (1750m ü. NN).

Ziel der Untersuchung ist es zu zeigen, dass neben den akuten Erscheinungen in mittleren Höhen sowohl eine Anpassung der Sauerstoffsättigung als auch der Herzfrequenz bereits nach 12 Tagen eintritt.

1.1 Begriffsbestimmung

Gegenstand der Untersuchung sind die Sauerstoffsättigung des Blutes, die Herzfrequenz unter Sauerstoffmangel und die Höhe über dem Meeresspiegel.

1.1.1 Herzfrequenz

Bei der Herzfrequenz (HF) handelt es sich um die rhythmischen Kontraktionen, die vom Herzen pro Minute ausgeführt werden. Der Sinusknoten sendet dabei 60-90 Aktionspotenziale pro Minute an die Vorhof- und Kammermuskulatur, die dadurch kontrahiert. In Ruhe sind dies beim Erwachsenen etwa 60-90 Kontraktionen pro Minute. Die Herzfrequenz kann sich bei Anstrengung mehr als verdreifachen und bei Ruhe durch mehrjähriges Training halbiert werden (vgl. de Marées, 2003, S. 250).

Die Herzfrequenz ist abhängig von Geschlecht, Trainingszustand, Lebensalter, vegetativen Faktoren und der Körpertemperatur (vgl. Fröhlich, 2005, S. 31). Die Herzfrequenz des Kindes ist im Allgemeinen höher als die des Erwachsenen (vgl. de Marées 2003, 496). Die Herzfrequenz in Ruhe ist bei Frauen höher als bei Männern (de Marées, 2003, S. 523).

Der Herzschlagrhythmus wird durch die Herznerven reguliert. Dabei verlangsamt der Parasympathikus die Herzfrequenz; der Sympathikus beschleunigt das Schlagen des Herzens (de Marées, 2003, S. 249).

1.1.2 Sauerstoffsättigung

Die Sauerstoffsättigung (SO_2) ist definiert als Menge des mit Sauerstoff beladenen Hämoglobins im Verhältnis zum Gesamthämoglobin (Formel 1). Dabei besteht das Gesamthämoglobin aus Hämoglobin und aus geringen Teilen von Carboxyhämoglobin und Methämoglobin (vgl. Gnamm, 2004, S. 31).

Formel 1 Berechnung der SO_2 über das Teilverhältnis von sauerstoffbeladenem und -armem Hämoglobin.

$$(1) \quad SO_2 = \frac{[O_2 - Hb]}{[O_2 - Hb] + [Hb]}$$

Wenn das gesamte Hämoglobin mit Sauerstoff gesättigt ist, dann weist das Blut eine 100% Sauerstoffsättigung auf. Der prozentuale Sauerstoffanteil beträgt bei dem normalen im arteriellen Blut vorhandenen Sauerstoffpartialdruck von ca. 100mmHg fast 100% (ca. 97%) (vgl. de Marées, 2003, S. 331).

1.2 Darstellung problemrelevanter Untersuchungen

Bei einem Höhenanstieg sinkt der Sauerstoffpartialdruck der Luft proportional zum Luftdruck. Dadurch entsteht für den Organismus ein Sauerstoffmangel (Hypoxie). Wie schwerwiegend diese Hypoxie ist, hängt von der Höhe ab. Der O_2 -Gehalt der Alveolarluft ist durch das Mischen mit Wasserdampf und CO_2 aus dem Stoffwechsel geringer als der O_2 -Gehalt der eingeatmeten Luft. Durch den Höhenanstieg wird diese Differenz geringer. Dieser Effekt wird noch durch den Hyperventilationseffekt verstärkt, da auf Grund des niedrigen arteriellen pO_2 das Atemminutenvolumen stark ansteigt (vgl. de Marées, 2003, S. 584, Mairböurl, 2000, S. 390).

Aufgrund des höhenbedingt niedrigen Sauerstoffpartialdruck sinkt die Sauerstoffsättigung des Blutes nach de Marées (2003, S. 586) auf 4000m Höhe bereits auf 70% gegenüber ca. 100% auf Meereshöhe. Dieser Effekt ist nach Mairböurl (2000, S. 392) bis in Höhen von etwa 4500m wegen des S-förmigen Verlaufs der O_2 -Bindungskurve relativ gering. Abbildung 1 zeigt diesen Verlauf der akuten Veränderung des Sauerstoffgehaltes in Abhängigkeit zum alveolären Sauerstoffpartialdruck. In mittleren Höhen gilt die Faustregel pro 100m über 1500m ca. 1% weniger an maximaler Sauerstoffaufnahme (vgl. Bärtsch, 2000, S. 139).

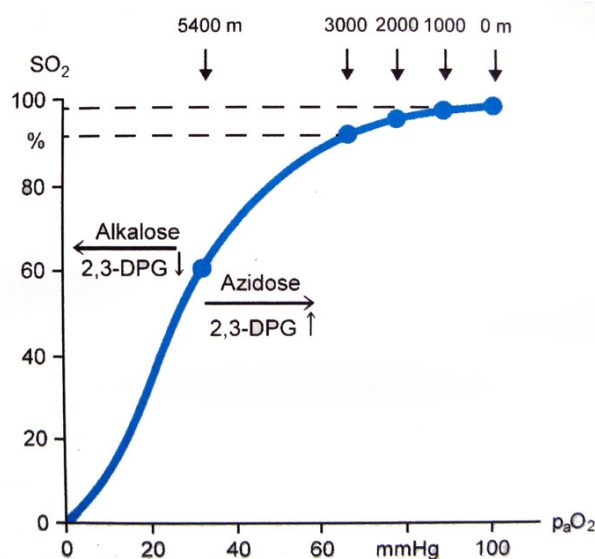


Abbildung 1 Sauerstoffsättigung des Blutes (SO_2) in Abhängigkeit vom alveolären Sauerstoffpartialdruck (de Marées, 2003, S. 586).

Damit müssten in unseren Höhen bis 3300m bei akuter Höhenexposition bereits Unterschiede in der SO_2 des Blutes messbar sein.

Durch die gesteigerte Atmung bei Sauerstoffmangel wird vermehrt CO_2 abgeatmet. Es kommt zur respiratorischen Alkalose, d.h. der PH-Wert des Blutes sinkt. Dies bewirkt eine Linksverschiebung der O_2 -Bindungskurve (siehe Abb. 1) Nach de Marées (2003, S. 587) kann dieser Effekt bei längeren Höhengaufenthalten bis 3000m jedoch durch die Ausscheidung von Bikarbonat kompensiert werden. Dies kann in Höhen um 2000m schon nach 24 Stunden abgeschlossen sein (Mairbäuerl, 2000, S. 391).

Kurzfristig innerhalb weniger Stunden nach der akuten Höhenexposition ist die O_2 -Abgabefähigkeit des Hämoglobins jedoch durch einen schnellen Anstieg des erythrozytären 2,3-DPG verbessert, was eine kurzfristige Rechtsverschiebung der O_2 -Bindungskurve (siehe Abb. 1) bewirkt (vgl. Berghold, 2004, S. 39).

Die gesteigerte Atmung mangels O_2 -Sättigung des arteriellen Blutes (SaO_2) bewirkt außerdem eine Steigerung des Herzminutenvolumens und damit der Herzfrequenz. Die Herzfrequenz steigt bei akutem Höheneinfluss umso stärker, je geringer die Sauerstoffsättigung des arteriellen Blutes ist (vgl. Mairbäuerl, 2000, S. 391, de Marées, 2003, S. 588, Fuchs & Reiss, 1990, S. 33).

Nach Berbalk (1984 zitiert nach Fuchs & Reiss, 1990, S. 33) steigt die Herzfrequenz in Ruhe bereits bei einem Anstieg von Meereshöhe auf 2500m um 5-10 Schläge an.

Bei akutem O₂-Mangel gibt es demnach zusammenfassend folgende Anpassungserscheinungen, die bereits in mittleren Höhen zu beobachten sind.

- › Absinken der SO₂ des Blutes.
- › Steigerung des Atemminutenvolumens.
- › Steigerung des Herzminutenvolumens resultierend aus einer ansteigenden Herzfrequenz.
- › Abnahme des Plasmavolumens (de Marées, 2003, S. 589).

Bei längerem (chronischen) O₂-Mangel kommt es zu einer weiteren Steigerung des Atemminutenvolumens. Nach de Marées (2003, S. 589) geschieht dies etwa bis zum 8. Tag. Bärtsch (2000, S. 139) sieht diese Steigerung bis zu zwei Wochen andauern, in der die SaO₂ um bis zu 10% zunimmt (auf 4500m). Jedoch vollzieht sich ein Großteil dieses Prozesses in den ersten drei Tagen des Höhengaufenthaltes. Bis zu 4,4% (Mittelwerte ± STD, N=12, p<0,001) beträgt die Steigerung in den ersten drei Tagen auf 4559m (Bärtsch, 2000, S. 140).

In Abbildung 2 wird dieser Verlauf zur Verdeutlichung graphisch dargestellt.

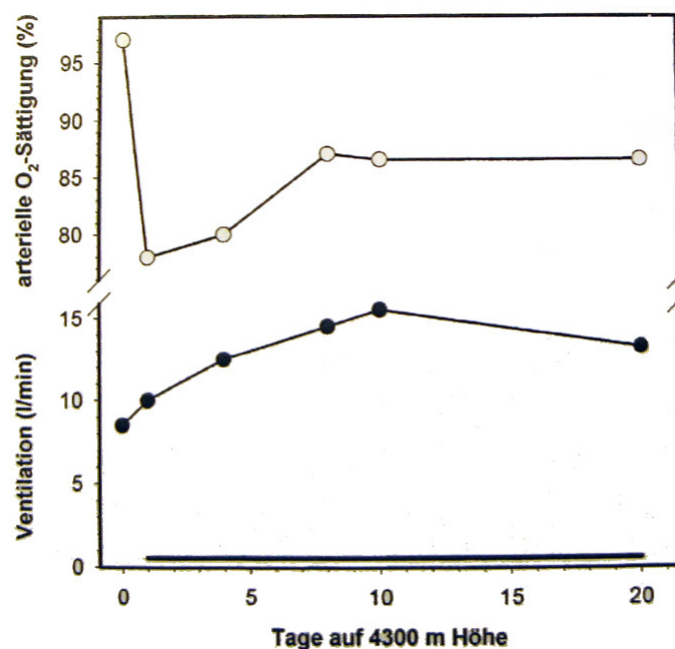


Abbildung 2 Veränderung des Atemminutenvolumens und der SaO₂ während eines Höhengaufenthaltes. Die Ruheatmung wird gesteigert, wodurch sowohl der alveoläre PO₂ also auch die SaO₂ ansteigt (Bender et al., 1989 zitiert nach Mairbäurl, 2000, S. 391).

Bei akuter Hypoxie steigt das Atemminutenvolumen. Bei längerer Dauer dieser Situation sinkt dieses jedoch wieder ab, teilweise sogar unter den Ausgangswert auf Meereshöhe (vgl. de Marées, 2003, S. 591). Dies ist auf eine höhere Blutvis-

kosität auf Grund des sinkenden Plasmavolumens (siehe oben akute Anpassungserscheinungen) und der Erhöhung der Erythrozytenzahl pro Volumeneinheit Blut zurück zu schließen (vgl. de Marées, 2003, S. 591, Mairböurl, 2000, S. 391). Nach Bärtsch (2000, S. 140) hängt die Sauerstoffkapazität des Blutes jedoch von der Hämoglobinkonzentration ab, die während eines Höhenstrainings (Höhenaufenthalts) von einer Dauer von 2-3 Wochen nicht relevant steigt. Nach ca. 2 Wochen lässt sich laut Bärtsch ein signifikanter Anstieg der Erythrozyten bzw. des Hämoglobins nachweisen.

Auf diesen Anstieg der Hämoglobinkonzentration lässt sich laut de Marées (2003, S. 596) der Wiederanstieg der maximalen Sauerstoffaufnahme zurückführen. Die Sauerstoffkapazität des Blutes steigt daher trotz niedrigen arteriellen und alveolären pO_2 wieder an.

Daraus schließen wir folgende Anpassungserscheinungen bei chronischer Hypoxie.

- › Erhöhung des Atemminutenvolumens und damit Anstieg der SO_2 des Blutes.
- › Erhöhung der Erythrozytenanzahl und damit des Hämatokritwertes, damit ein Senken der Herzfrequenz.
- › Erhöhte Sauerstoffkapazität des Blutes auf Grund einer erhöhten Hämoglobinkonzentration.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Merkmalsstichprobe

Folgende Messeinheiten wurden zur Untersuchung und Aufnahme der Messwerte verwendet:

- › Herzfrequenz in Schlägen pro Minuten (bpm)
- › Sauerstoffsättigung in Prozent
- › Die Höhe wurde mit dem kartographischen Programm „Vinschgau Karten Kompass“ ermittelt. Alle in der Arbeit angegebenen Höhendaten sind in Meter über Normalnull (m ü. NN) angegeben

2.2 Personenstichprobe

Die Messwerte wurden an 23 freiwillig teilnehmenden Probanden ermittelt. Hierbei handelt es sich um 16 männliche und 6 weibliche Personen, welche sich zu einer jungen Gruppe mit einem Altersschnitt von rund 25 Jahren zusammensetzt. Relevante Daten bezüglich der Körperhöhe, des Gewichts und des BMI sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Probanden sind ehemalige oder noch immatrikulierte Studierende des Fachbereichs Psychologie und Sportwissenschaften, die zum Teil schon über Erfahrungen am Berg verfügen.

Tabelle 1 Deskriptive Daten der Probanden für Alter, Körperhöhe, Gewicht und BMI.

	Alter in Jahren	Gewicht in kg	Körperhöhe in cm	BMI in kg/m ²
N	17	22	22	22
Mittelwert	25,2	75,5	177,2	23,9
Std.Abweichung	± 3,9	± 13,3	± 9,0	± 2,3
Minimum	22	53,9	159,4	19,1
Maximum	36	114,5	200	28,6

2.3 Messmethodik und Messinstrumentarium

Für die Aufnahme der Werte wurden 2 Gerätschaften verwendet. Zum einen ein Pulsoxymeter für die Messung der Sauerstoffsättigung und zum anderen eine Pulsuhr zum Messen der Herzfrequenz.

Für die Messung der Sauerstoffsättigung wurde der Pulsoxymeter der Firma „Nellcor Puritan Bennett“ mit der Modellbezeichnung „NPB-40“ verwendet. Dieser wurde uns von der Universität zur Verfügung gestellt.

Das Gerät arbeitet auf Grundlage der Absorptionsspektroskopie, basiert also auf der physikalischen Eigenschaft der wellenlängenabhängigen Absorption von Licht (Gnam, 2004, S. 15).

Bei der Messung wird der untersuchten Person ein Clip an das Ohrläppchen geheftet. Dieses weist zwei Seiten auf. Die eine strahlt Infrarotlicht mit einer Wellenlänge von 660nm und 940nm aus. Auf der anderen befindet sich ein Sensor, der das ankommende Licht misst. Um den Wert der Sättigung zu erhalten, wird nun folgende Eigenschaft ausgenutzt: Je nach Sättigung weist das Blut einen dunkleren oder helleren Farbton auf, der das Licht unterschiedlich stark absorbiert. Je nach Sättigung des Bluts mit roten Blutkörpern wird mehr oder weniger Strahlung absorbiert. Anhand der noch beim Sensor ankommenden Strahlung wird der Anteil des Sauerstoffes im Blut berechnet.

Die Pulsoxymetrie erlaubt eine schnelle, nichtinvasive und genaue Messung der Sauerstoffsättigung, also des prozentualen Anteils des mit Sauerstoff beladenen Hämoglobins im peripheren arteriellen Blut (vgl. Gnam, 2004, S. 15).

Bei der Messung zur Sauerstoffsättigung können folgende Messfehler auftreten:

Ein grundlegendes Problem der Messung besteht darin, dass nicht nur die beiden zu untersuchenden Spezies, also unbeladenes und mit Sauerstoff beladenes Hämoglobin, sondern vor allem auch die Haut, das Gewebe und die Knochen Licht im eingesetzten Spektralbereich absorbieren. Desweiteren absorbiert nicht nur das zu untersuchende arterielle, sondern auch das venöse Blut. Auch zusätzliches am Detektor einfallendes Umgebungslicht könnte die Messung verfälschen. (Gnam, 2004, S. 17)

Des Weiteren war auch bei den Messungen ein schnelles Springen zwischen den Werten erkennbar, sofern es spürbar kälter wurde. Die Kälte führt zu einer verminderten Durchblutung des Ohrläppchens. Dies stützt sich auch mit der Aussage von Thurnheer (2004, S. 1222), wonach die Durchblutung sich durch Aufwärmen oder Massage verbessern lässt und bei schlechter Perfusion Fingersensoren weniger störungsanfällig als Ohrsensoren sind.

Der Herzfrequenzmesser stammt von der Firma „Polar“ und wurde uns ebenfalls vom Institut für Sportwissenschaften zur Verfügung gestellt. Er setzt sich aus

dem Armbandempfänger und dem Polar Sender (Brustgurt) zusammen. Die Datenübertragung funktioniert wie folgt: „Elektroden auf der Rückseite des Senders messen über die Aktionsspannung Ihrer Haut EKG-genau Ihre Herzfrequenz. Der Sender übermittelt diese per Funk an Ihren Armbandempfänger“ (Polar, 2006, S. 8).

Folgende Faktoren stellen eine mögliche Fehlerquelle bei der Messung der Herzfrequenz dar. Die Pulsuhren hatten keine Codierung. Hierdurch kam es zu einer Störung der Uhren untereinander, wenn die Empfänger und Sender verschiedener Probanden zu nah beisammen waren. Dies wurde jedoch gleich von Anfang an bemerkt und konnte somit größtenteils vermieden oder gar ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus wurde nicht immer die eigentlich vorgeschriebene Position eingehalten. Anstatt zu liegen haben die Probanden einige Mal auch gesessen. Ein leichtes Bewegen führte ebenfalls zu leichten Schwankungen der Werte, wie bei Beobachtungen oder Selbstexperimenten durch uns festgestellt werden konnte. Insgesamt kam es hierdurch zu minimalen Veränderungen der Werte, die das Ergebnis jedoch nicht extrem beeinflussen, sondern lediglich die Exaktheit des eigentlichen Zustands minimal veränderten.

Messfehler können zusätzlich in Erscheinung treten, wenn beispielsweise, entgegen wie beschrieben, vergessen wurde Wasser auf den Kontakt aufzutragen, wodurch die Leitfähigkeit herabgesetzt ist und die Messwerte niedriger ausfallen als gewünscht. Des Weiteren beobachteten wir während der Messungen, dass kleinste Anstrengungen wie das Bewegen des Körpers aus der liegenden Ruheposition heraus oder gar simples Sprechen die Herzfrequenz erhöhten.

2.4 Untersuchungsverlauf

Die Untersuchungen wurden allgemein unter zwei Bedingungen durchgeführt. Als erster Standort lässt sich das Hotel Watles in Prämajur auf 1750 Metern Höhe benennen. Als zweiter Standort sind verschiedene Zwischenstationen während der Wanderungen zu nennen. Hierbei sind wiederum mehrerer Höhenstufen zu differenzieren (vgl. Tabelle 2). Neben der Variable Ort spielte bei den Messungen auch die Zeit eine Rolle. Sowohl für die Sauerstoffsättigung als auch die Herzfrequenz begann die Untersuchungen und die Aufnahme der Messdaten am Dienstag den 18.09.2007 (welcher im Folgenden als „Tag 0“ deklariert wird) und endeten nach einer Woche am 25.09.2007 (Tag 6). Diese Zeitspanne war gegeben, da die Einführung in die Messinstrumente erst zu diesem Tag möglich war

und die Gerätschaften aus organisatorischen Gründen nach sieben Tagen wieder abgegeben werden mussten. Während der Messtage war der Rhythmus zwischen körperlicher Beanspruchung und Entspannung relativ ausgeglichen und nicht durch nennenswerte Störeinflüsse beeinträchtigt.

Für die Sauerstoffsättigung liegen acht verschiedene Werte vor (vgl. Tabelle 2). Hierbei wurde an 5 verschiedenen Tagen und auf sechs verschiedenen Höhen gemessen. Die Werte wurden im Hotel während der allgemeinen Untersuchungen der Probanden festgestellt. In der Regel in stehender, vereinzelt aber auch in sitzender Position. Dies geschah meist nebenbei zwischen oder parallel zu anderen Messungen. Während der Wanderung war die stehende Variante die vorwiegende. Meist wurde den Testpersonen kurz nach Erreichen des Messpunktes der Clip ans Ohr geheftet, um den Wert zu erhalten. D.h. kurz nach der Anstrengung des Anstieges.

Tabelle 2 Zeitpunkte für die Sauerstoffmessung mit dazugehörigen Höhenangaben in Metern ü. NN.

Tag mit Datum	Höhe in Metern ü. NN
T0 – 18.09.2007	1750
T1 – 19.09.2007	2500
T2 – 20.09.2007	2070
T2 - 20.09.2007	2528
T2 - 20.09.2007	2970
T3 – 21.09.2007	Keine Messung
T4 – 22.09.2007	1750
T5 – 23.09.2007	Keine Messung
T6 – 24.09.2007	1750
T6 – 24.09.2007	3370

Für die Herzfrequenz haben wir vier relevante Datensätze (vgl. Tabelle 3). Drei geben jeweils den Ruhepuls auf 1750 Metern, sprich unserem Ausgangsquartier dem Hotel Watles wieder. Ein weiterer wurde zum Vergleich für die Auswirkung bei akuter Höhenveränderung aufgenommen.

Die Herzfrequenz wurde mittels der Pulsuhr gemessen. Dafür wurden die Elektroden am Sender leicht mit Wasser eingestrichen, um die Leitfähigkeit zu erhöhen. Dann bekamen die Probanden eine ruhige Ecke zugewiesen in der sie sich

für knapp fünf Minuten hinlegen sollten, bis die Frequenz sich stabil einpegelt. Dieser Wert wurde dann eigenständig oder durch uns abgelesen und in die entsprechenden Tabellen aufgenommen. Im Hotel Watles legten sich die Probanden auf die Sitzreihen des Speisesaals. Während der Wanderung wurden die Messwerte einige Minuten nach Erreichen der Probanden beim Messpunkt aufgenommen, um sie so zum Ruhepuls zu bringen und eine Verzerrung zu vermeiden. Zusätzlich sollten sie sich auch hier nach Möglichkeit auf einen Stein oder ähnliches hinlegen und den Puls auf ein Niveau bringen.

Tabelle 3 Zeitpunkte für die Herzfrequenzmessung in Ruhe mit dazugehörigen Höhenangaben in Metern ü. NN.

Tag mit Datum	Höhe in Metern ü. NN
T0 - 18.09.2007	1750
T4 - 22.09.2007	1750
T6 - 24.09.2007	1750
T6 - 24.09.2007	2730

3 Ergebnisse

Die statistischen Analysen wurden mit SPSS™ 12.0 und Microsoft® Office Excel™ durchgeführt. Zur Überprüfung der Daten kamen neben den allgemeinen deskriptiven Verfahren wie Mittelwert und Standardabweichung, T-Tests für verbundene Stichproben, einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA), post-hoc-Tests für Einzelvergleiche sowie der Levene-Test zur Anwendung. Das Signifikanzniveau betrug $p = 0,05$. Die graphischen Darstellungen wurden mit dem Programm Microsoft® Office Excel™ erstellt.

3.1 Deskriptive Ergebnisse

Der folgende Abschnitt stellt die deskriptiven Ergebnisse dar und soll ihre Inhalte und Erscheinungsbilder kurz erläutern und interpretieren.

Tabelle 4 Deskriptive Statistik für die Herzfrequenz über einen mittleren Zeitraum auf 1750 Metern Höhe.

	T0 HFruhe1 1750m	T4 HFruhe1 1750m	T6 HFruhe1 1750m
N	22	15	17
Mittelwert	72	66	65
Std.Abweichung	12	7	9
Minimum	55	53	46
Maximum	109	77	77

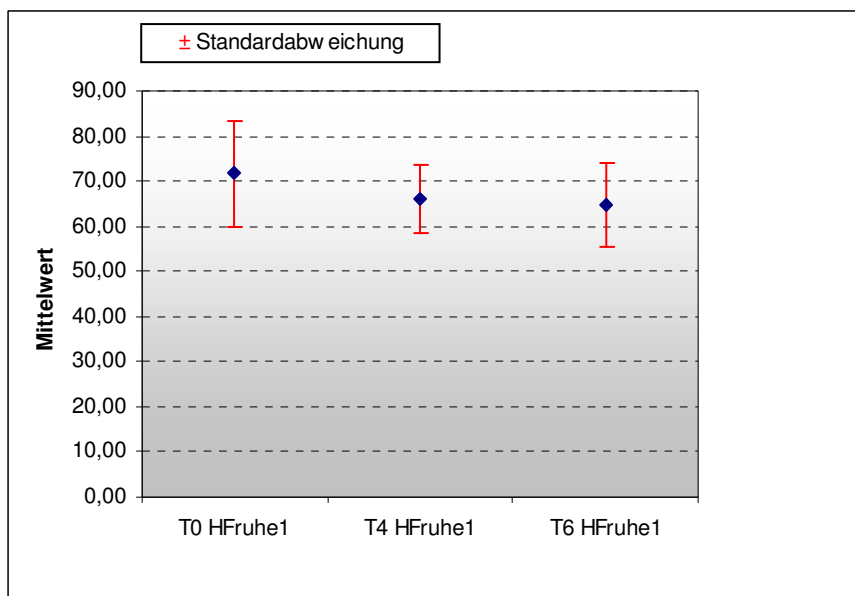


Abbildung 3 Herzfrequenz in Schlägen pro Minute auf einer Höhe von 1750m gemessen an drei verschiedenen Tagen.

Wie Abbildung 3 zeigt, sinkt der Mittelwert der Ruheherzfrequenz gemessen auf 1750m Höhe über einen Zeitraum von 7 Tagen. Während der Ruhepuls am Tag 0 im Mittel 72 Schläge pro Minute beträgt, sind es am fünften Tag nur noch 66 Schläge pro Minute. Dies ist nahezu deckungsgleich mit der Messung vom siebten Tag, wo er im Mittel 65 Schläge pro Minute aufweist (vgl. Tabelle 4). Hier tritt demzufolge eine Einregelung auf.

Tabelle 5 Deskriptive Statistik für die Ruheherzfrequenz über einen mittleren Zeitraum auf unterschiedlichen Höhen an einem Tag.

	T6 HFruhe1 1750m	T6 HFruhe2 2730m
gültige Fälle	17	12
Mittelwert	65	82
Std.Abweichung	9	11
Minimum	46	63
Maximum	77	102

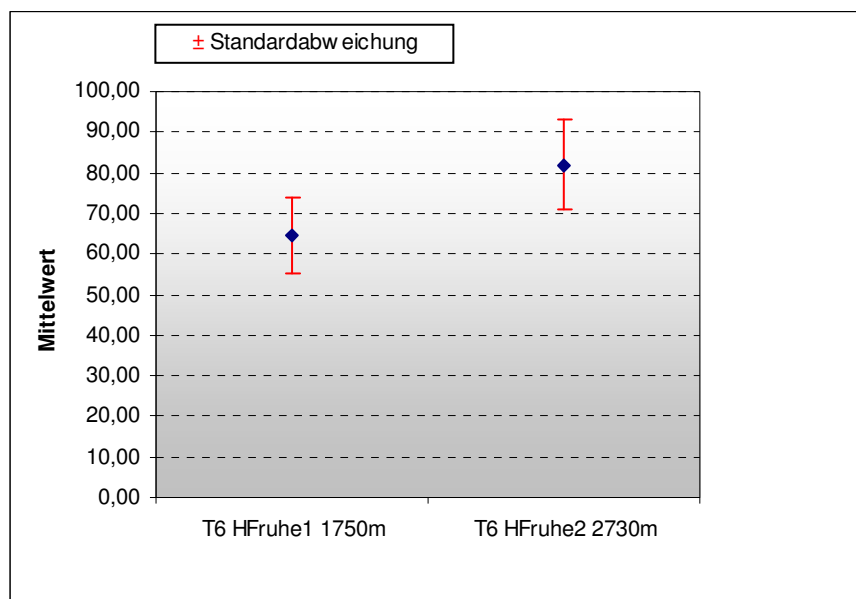


Abbildung 4 Darstellung der Mittelwerte bezüglich der Ruheherzfrequenz an einem Tag auf unterschiedlicher Höhe.

Tabelle 6 Deskriptive Statistik für die Messung der Sauerstoffsättigung auf einer Höhe von 1700 Metern.

	T0 1700m SO ₂	T4 1700m SO ₂	T6 1700m SO ₂
N	22	15	13
Mittelwert	97,5	97,6	97,5
Std.Abweichung	1,4	1,1	0,9
Minimum	93	96	96
Maximum	99	99	99

Tabelle 5 und Abbildung 4 stellen die Herzfrequenz bei Ruhe bei einer akuten Höhenveränderung dar. Es wird sichtbar, dass der Mittelwert bei einer Höhendifferenz von knapp 1000m einer Verschiebung von 17 Schlägen pro Minute unterliegt. Die Standardabweichung verändert sich dagegen nur marginal.

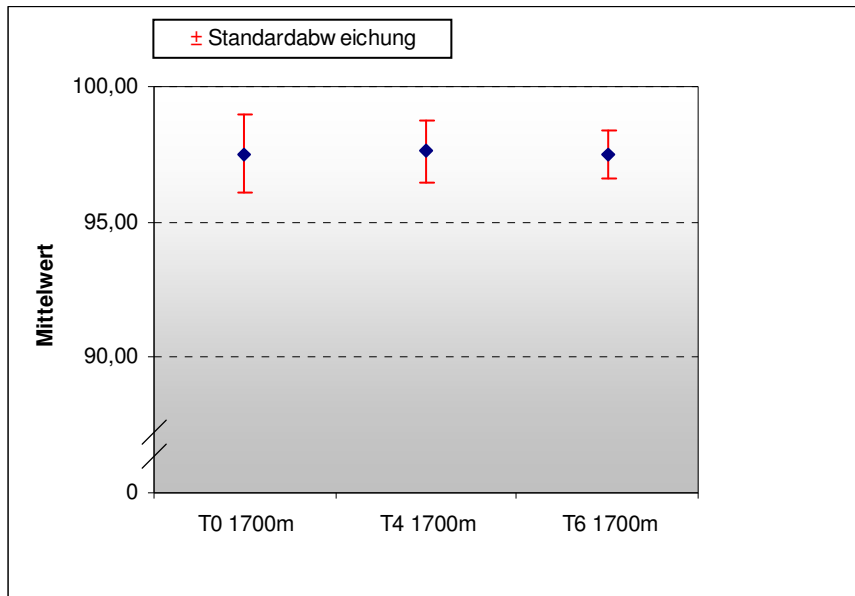


Abbildung 5 Sauerstoffsättigung auf einer Höhe von 1700m gemessen über einen mittleren Zeitraum von sieben Tagen.

Um die Hypothese 4 zu untersuchen verglichen wir die Mittelwerte der Messungen der Sauerstoffsättigung von Tag 0, Tag 4 und Tag 6 jeweils auf 1700m Höhe. Dabei ist auffällig, dass die Mittelwerte über die Zeitspanne von 7 Tagen mit einem Wert von 97,5% Sättigung nahezu identisch sind und nur am zweiten Messtag um 0,1% abweichen. Dies entspricht nahezu dem Normalwert auf Meereshöhe. Dagegen sinkt die Standardabweichung von anfänglich 1,4 Prozentpunkten am ersten Tag über den zweiten Messtag mit 1,1 Prozentpunkten bis auf einen Wert von 0,9 Prozentpunkte am letzten Tag der Messung (vgl. Tabelle 6). Im Praktikumsbericht von Hartig et al. (S.9) wurde ein SO_2 -Wert von 97,0% auf 1750m gemessen. In Frankfurt ein SO_2 -Wert von 99,75%.

Tabelle 7 Deskriptive Statistik bezüglich der Sauerstoffsättigung auf verschiedenen Höhen in Metern.

	T0 1700m	T2 2070m	T1 2500m	T2 2528m	T2 2970m	T6 3300m
gültige Fälle	22	17	21	22	9	11
Mittelwert	97,5	96,6	94,3	94,7	91,2	88,8
Std.Abweichung	1,4	1,4	2,0	2,1	2,5	2,7
Minimum	93	93	90	89	87	82
Maximum	99	99	98	97	94	92

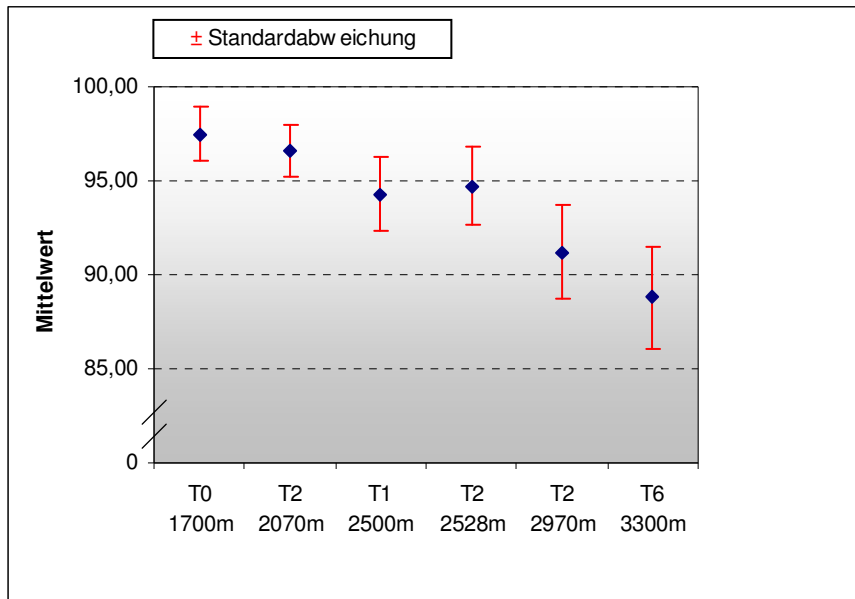


Abbildung 6 Sauerstoffsättigung auf verschiedenen Messhöhen (gepaart) über einen mittleren Zeitraum.

Abbildung 6 stellt graphisch die Messergebnisse zur Hypothese 1 dar, die Veränderung des Sauerstoffgehalts im Blut mit zunehmender Höhe. Insgesamt lässt sich ein über die Werte hinweg abfallender Wert für die Sättigung ablesen. Dieser weist bei der Ausgangshöhe von 1750 Metern eine Sättigung von rund 97,5 Prozent auf. Bei 3300 Metern, was nicht ganz der doppelten Höhe entspricht, ist ein um fast 10 Prozentpunkte gesunkener Wert feststellbar. Im Gegensatz zum abfallenden Trend des Mittelwerts ist bei der Standardabweichung eine zunehmend größere Streuung erkennbar, welche auf 1750 Metern nur 1,4 und auf 3300 Metern bereits 2,7 Prozentpunkte beträgt. Die größere Streuung auf 3300 Metern im Vergleich zu 1750 Metern resultiert aus der individuellen Reaktion des Körpers auf die Höhe.

Wegen unterschiedlicher Leistungsprofile und Interessen, kam es im Laufe der Tage zu einer Dezimierung der zur Verfügung stehenden Probanden. Das kam vor allem bei Messungen in höheren Höhen zum Ausdruck.

3.2 Analytische Ergebnisse

3.2.1 Darstellung

Zuerst testen wir die Daten der Sauerstoffsättigungswerte mit einem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung, um anschließend die Mittelwerte anhand eines T-Tests vergleichen zu können.

Tabelle 8 Testergebnisse der SO₂-Daten auf Normalverteilung durch einen Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest.

	T0 H1750 SO ₂	T1 H2500 SO ₂	T2 H2070 SO ₂	T2 H2528 SO ₂	T2 H2970 SO ₂	T4 H1750 SO ₂	T6 H1750 SO ₂	T6 H3370 SO ₂
N	22	21	17	22	9	15	13	11
Asymptotische Signifikanz (2- seitig)	,204	,300	,403	,177	,339	,120	,149	,311

Die Datenreihen zeigen alle keine Signifikanz auf, das heißt die Daten unterscheiden sich nicht signifikant von der Normalverteilung, daher nehmen wir an, dass diese normalverteilt sind.

Um Hypothese 1 zu überprüfen, nehmen wir die Nullhypothese an, dass kein Unterschied zwischen den Werten der SO₂ innerhalb eines Tages, gemessen in unterschiedlichen Höhen, besteht. Dafür verwenden wir einen T-Test für verbundene Stichproben, wobei wir die jeweiligen Paare vergleichen.

Tabelle 9 T-Werte, Freiheitsgrade und p-Werte bei zweiseitigem T-Test auf Mittelwertsunterschiede der SO₂ in verschiedenen Höhen.

		T	df	Sig. (2-seitig)
Paaren 1	T6 H1750 SO ₂ - T6 H3370 SO ₂	9,976	10	,000
Paaren 2	T2 H2070 SO ₂ - T2 H2528 SO ₂	3,090	16	,007
Paaren 3	T2 H2070 SO ₂ - T2 H2970 SO ₂	4,397	8	,002
Paaren 4	T2 H2528 SO ₂ - T2 H2970 SO ₂	3,976	8	,004

Das Ergebnis in Tabelle 9 zeigt signifikante Unterschiede bei allen verglichenen Mittelwerten.

Wir wenden außerdem eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) an, um unsere Ergebnisse zu überprüfen. Hierbei testen wir, ob signifikante Unterschiede in den SO₂-Werten in unterschiedlichen Höhen bestehen.

Tabelle 10 ANOVA-Ergebnisse der SO₂ auf verschiedenen Höhen.

	df	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	4	49,030	,000
Innerhalb der Gruppen	75		
Gesamt	79		

Es besteht ein hochsignifikanter Unterschied (siehe Tabelle 10) innerhalb der SO₂-Werten in unterschiedlichen Höhen. Um diesen auf bestimmte Messhöhen zurückzuführen, wenden wir einen Levene-Test auf Varianzhomogenität an.

Tabelle 11 Test auf Homogenität der Varianzen der SO₂ auf verschiedenen Höhen.

Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
2,265	4	75	,070

Tabelle 12 Testergebnis der Mehrfachvergleiche mittels Tamhane-Test. Die unabhängige Variable ist die Höhe, die abhängige die Sauerstoffsättigung des Blutes.

	(I) Höhe	(J) Höhe	Höhendifferenz in m	Signifikanz
Tamhane	1750	2070	320	,412
		2500	750	,000
		2970	1220	,000
		3370	1620	,000
	2070	1750	320	,412
		2500	430	,002
		2970	900	,001
		3370	1300	,000
	2500	1750	750	,000
		2070	430	,002
		2970	470	,068
		3370	870	,000
	2970	1750	1220	,000
		2070	900	,001
		2500	470	,068
		3370	400	,440
3370	1750	1620	,000	
	2070	1300	,000	
	2500	870	,000	
	2970	400	,440	

Die Hypothese, dass die Varianzen inhomogen sind, können wir auf Grund des Ergebnisses der Levene-Statistik nicht verwerfen (siehe Tabelle 11). Somit führen wir den Tamhane-Test bei inhomogenen Varianzen aus, um Mehrfachvergleiche durchzuführen.

Der Tamhane-Test zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werten gemessen auf 3370m und 2970m, 2970m und 2500m und denen auf 1750m und 2070m. Alle anderen Vergleichspaare unterscheiden sich hochsignifikant (siehe Tabelle 12).

Die Hypothese 3 wurde mit Hilfe eines T-Tests überprüft, der auf Grund der normalverteilten Daten anwendbar ist.

Tabelle 13 T-Werte, Freiheitsgrade und zweiseitige Signifikanz des T-Tests auf Unterschiede der SO₂ Mittelwerte zu verschiedenen Messzeitpunkten auf gleicher Höhe.

		T	df	Sig. (2-seitig)
Paaren 1	T0 H1750 SO ₂ - T4 H1750 SO ₂	1,160	14	,265
Paaren 2	T0 H1750 SO ₂ - T6 H1750 SO ₂	1,100	12	,293
Paaren 3	T4 H1750 SO ₂ - T6 H1750 SO ₂	,674	12	,513

Die p-Werte lassen keinen Rückschluss auf signifikante Unterschiede der Mittelwerte zu. Hypothese 3 kann daher nicht angenommen werden.

Das Untersuchungsmerkmal Herzfrequenz ist in Hypothese 2 und 4 enthalten. Wir testen die Messdaten zuerst auf Normalverteilung. Die Daten sind normalverteilt (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14 Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten der Ruheherzfrequenz.

	T0 HF Ruhe 1750m	T4 HF Ruhe 1750m	T6 HF Ruhe 1750m	T6 HF Ruhe 2730m
N	22	15	17	12
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,690	,797	,369	,971

Um zu untersuchen, ob ein Unterschied der Ruheherzfrequenz auf verschiedenen Höhen besteht, testen wir die Mittelwerte der HF Ruhe auf 1750m und der HF Ruhe auf 2730m (Tabelle 15) auf Unterschied. Es ergibt sich ein hoch signifikantes Ergebnis (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15 T-Test für verbundene Stichproben der Herzfrequenzmessung an einem Tag in verschiedenen Höhen.

	T	df	Sig. (2-seitig)
Paaren 1 T6 HF Ruhe 1750m – T6 HF Ruhe 2730m	-9,46	11	,000

Anhand eines T-Tests bei gepaarten Stichproben testen wir die letzte Hypothese (4).

Tabelle 16 T-Test für verbundene Stichproben der Herzfrequenzmessung über einen Zeitraum von drei Messzeitpunkten hinweg auf konstanter Höhe von 1750m.

	T	df	Sig. (2-seitig)
Paaren 1 T0 HF Ruhe 1750m - T4 HF Ruhe 1750m	2,049	14	,060
Paaren 2 T0 HF Ruhe 1750m - T6 HF Ruhe 1750m	3,237	16	,005
Paaren 3 T4 HF Ruhe 1750m - T6 HF Ruhe 1750m	,700	14	,495

Nur die Mittelwerte der Herzfrequenzmessungen an T0 und T6 unterschieden sich signifikant. Bei den anderen Vergleichen ist keine Tendenz zu erkennen.

Um etwas über eine Faustregel zur Ermittlung der SO_2 in mittleren Höhen zu erfahren, führen wir außerdem eine lineare Regression der Höhe auf die Variable Sauerstoffsättigung durch.

Tabelle 17 Ergebnis der linearen Regression von Höhe auf Sauerstoffsättigung.

	Koeffizient	T	P
Konstante	107,9	143,902	,000
X	-0,0052	-16,0842	,000

	N	R	R-Quadrat
normal	130	,818	,66899
korrigiert		,816	,66641

Die Koeffizienten sind statistisch hoch signifikant. Ein R^2 von 0,67 sagt aus, dass die Sauerstoffsättigung zu ca. 67% durch eine Veränderung des Luftdrucks bedingt ist.

3.2.2 Interpretation

Die Hypothesen über den Einfluss der akuten Höhenexposition auf die Merkmale Herzfrequenz und Sauerstoffsättigung des Blutes konnten mit hoher Signifikanz angenommen werden.

Der T-Test auf Unterschiede (Tabelle 9) innerhalb der Mittelwerte der SO_2 -Werte, gemessen in unterschiedlichen Höhen, zeigt bei paarweisen Vergleichen jeweils hohe Signifikanz. Da wir jedoch dabei einen kumulierten Fehler 1. Ordnung begehen, testeten wir diesen Zusammenhang auch per ANOVA. Auch hier zeigt sich ein hoch signifikanter Unterschied (Tabelle 10). Bei Mehrfachvergleichen mittels Tamhane-Test bei Varianzhomogenität konnten nur hochsignifikante Unterschiede zwischen einigen Werten festgestellt werden (siehe Tabelle 12). Der Fakt, dass andere Werte keine statistisch signifikanten Unterschiede aufweisen, könnte auf die geringe Höhendifferenz der Vergleichspaare zurückzuführen sein. In mittleren Höhen, wo die O_2 -Bindungskurve einen sehr flachen Verlauf (Abbildung 1) hat, würden sich bei geringen Höhenunterschieden die SO_2 -Werte nur gering unterscheiden. Jedoch können wir darauf schließen, dass die Sauerstoffsättigung im Blut bei akuter Höhenexposition sinkt.

Ob die Herzfrequenz im Durchschnitt bei akutem Aufenthalt in der Höhe steigt, konnten wir nur an Hand zweier Messwerte überprüfen. Wir verglichen dabei die Messerwerte von 1750 und 2730m. Hier konnte ein Unterschied der Mittelwerte von 17bpm (siehe Tabelle 5) gemessen werden, der hochsignifikant war (siehe Tabelle 15). Dieser Unterschied wird jedoch durch einen Unterschied im Messzeitpunkt verfälscht, da die Werte auf 1750m direkt nach dem Aufstehen gemessen wurden. Die Werte auf 2730m wurden zwar während einer Pause gemessen, trotzdem ist eine körperliche Belastung der Probanden kurz vor der Messung nicht auszuschließen. De Marées (2003, S. 588) lässt in seiner Grafik nur Rückschlüsse auf einem Anstieg von maximal 5-10bpm bei einem Höhenanstieg von 0 auf 3000m zu, was ein weiterer Hinweis auf die Verfälschung der Daten sein könnte. Anhand unserer Messungen sehen wir jedoch *Hypothese 2* als bestätigt an.

Hypothese 3 konnte nicht bestätigt werden. Die Mittelwerte der SO_2 -Werte unterscheiden sich auf konstanter Höhe nicht signifikant voneinander. Die meisten Probanden befanden sich zum ersten Messzeitpunkt T0 bereits 2-3 Tag auf der Höhe von 1750m. Die größte Anpassung der SO_2 auf Grund der Steigerung des Atemminutenvolumens vollzieht sich jedoch gerade in den ersten Tagen (Abschnitt 1.2), die in unserer Messreihe fehlen. Man könnte nun vermuten, dass sich die Hauptanpassung in der ersten Zeit vollzogen hat, wo aber keine Daten erhoben wurden.

Bei der Herzfrequenz konnte eine hohe Signifikanz zwischen den Werten T0 und T6 festgestellt werden. Die Messwerte der T4-Messung unterschieden sich nicht signifikant, wobei die Werte zum Zeitpunkt T6 sehr früh morgens, kurz nach dem Aufstehen gemessen wurden. Die anderen Messwerte wurden im Laufe des Tages erhoben. Wie in Abschnitt 1.1.1 erörtert, ist die Herzfrequenz von vegetativen Faktoren abhängig und daher auch vom Biorhythmus. Bärtsch (2000, S. 140) meint, dass es bis zu zwei Wochen dauert, um einen signifikanten Zuwachs der Erythrozyten nachzuweisen, was schließlich zu einer Reduktion der Herzfrequenz durch die Erhöhung der Sauerstoffkapazität des Blutes und des Hämatokritwertes führt. Es ist daher anzunehmen, dass die Herzfrequenz zum Messzeitpunkt T6 im Vergleich zu den anderen Messwerten eher unterschätzt wurde.

4 Ausblick und Diskussion

Die Untersuchung der Herzfrequenz bei Ruhe war schwierig durchzuführen, da die Bedingungen bei jeder Messung starken Schwankungen unterliegen. Die Messwerte sind daher einfließenden Störgrößen, wie Tageszeitpunkt, Temperatur und vorhergegangener körperlicher Belastung unterlegen und daher kaum aussagekräftig.

Der Abfall der SO_2 im Blut bei akuter Höhenexposition ist aus unseren Daten sehr gut zu erkennen. Der hypoxiebedingte Leistungsabfall wurde von uns auf den Wanderungen auf über 3000m (Tschengelser Hochwand, Piz Sesvenna) deutlich bemerkt. Einigen Studierenden wurde sogar schlecht und sie mussten rasch absteigen. Abbildung 7 zeigt unsere Messwerte in einem SO_2 -Luftdruck-Diagramm. Die Regression mit einem Polynom 3. Grades soll die Sauerstoffbindungskurve andeuten.

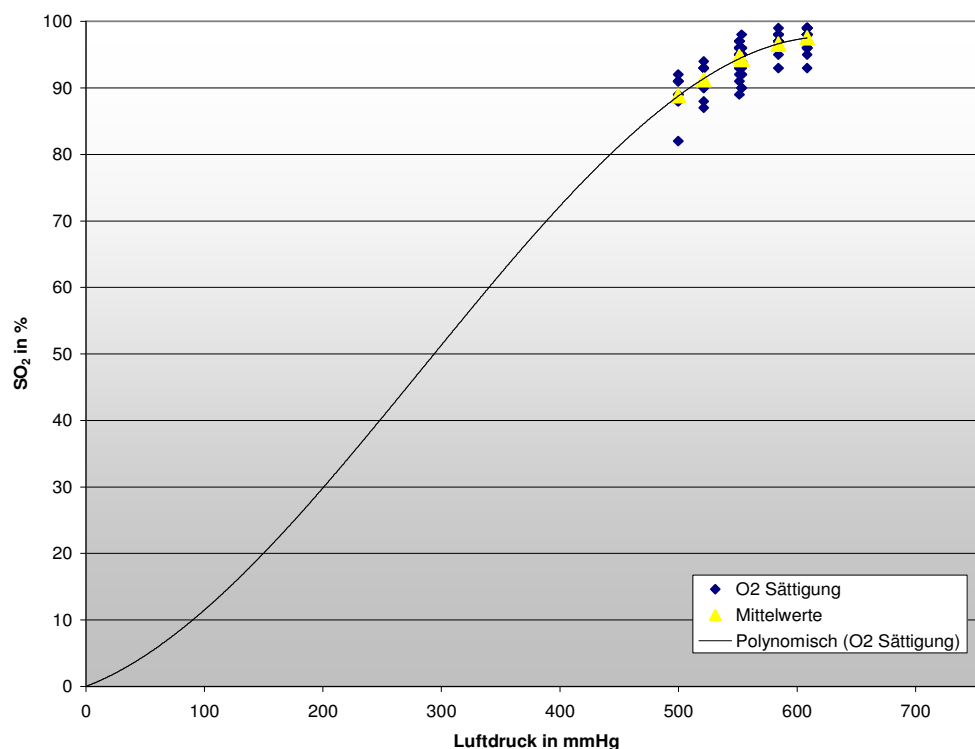


Abbildung 7 Darstellung der SO_2 -Werte und Mittelwerte als abhängige Variable zum Luftdruck ermittelt über die Barometrische Höhenformel¹ aufgrund der Höhe (Annahme Luftdruck_{Meereshöhe} = 760mmHg). Annäherung der O_2 -Bindungskurve über eine Regression mit einem Polynom 3. Grades durch den Nullpunkt.

Man sieht den deutlich rascheren Abfall der SO_2 -Werte mit sinkendem Luftdruck.

¹ $p_h = p_0 \cdot e^{(-0,127 \cdot H_h)}$ mit $e \approx 2,7183$ (De Marées, 2003, S. 579)

Die Kurve entspricht natürlich nicht der viel steileren O₂-Bindungskurve, ist jedoch eine Annäherung, wie die Entwicklung in noch größeren Höhen fortlaufen könnte.

Durch unsere lineare Annäherung können wir eine Faustformel für mittlere Höhen bis 3300m ü. NN. aufstellen, die es durch weitere Messungen zu bestätigen gilt.

Formel 2 Die SO₂ sinkt in mittleren Höhen bis 3300m bei einem Höhenanstieg von 1000m um ca. 5%.

$$(2) \quad \Delta SO_2 \approx -5,2 \cdot \frac{\Delta \text{Höhe}}{1000}$$

Trotz dieses doch sehr raschen Abfalls der SO₂ und der anderen Probleme, die mit einhergehen, wenn man sich der Höhe aussetzt, hat es beispielsweise auf dem Kitzsteinhorn (3029m) in 25 Jahren bei über 18 Mio. Beförderungen keinen einzigen nicht-traumatischen Tod gegeben, der in irgendeiner Form mit der Höhe in Verbindung gebracht werden konnte (vgl. Berghold, 2004, S. 41).

Die langfristigen Adaptationen an hypoxische Bedingungen konnten auf Grund von Messfehlern und Fehlern im Untersuchungsdesign nicht bestätigt werden. Auch könnte dafür die Aufenthaltsdauer in der Höhe zu kurz gewesen sein.

Rückblickend lässt sich sagen, dass die Datenaufnahme recht orientierungslos erfolgte. Es war bis zum Ende oftmals nicht klar, welches Untersuchungsziel explizit verfolgt werden sollte. Daher empfiehlt es sich als Folge dieser Feststellung in zukünftigen Untersuchungen vor der Aufnahme von Messwerten Hypothesen zu entwickeln. Auch wurde die Messung erst drei Tage nach Ankunft begonnen, so dass Anpassungserscheinungen der ersten drei Tage nicht gemessen werden konnten. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, wäre es von Vorteil, folgende Aspekte umzusetzen:

- › die Daten über die gesamte Zeitspanne aufnehmen
- › Daten gleich ab dem ersten Tag aufnehmen
- › Vergleichswerte in flacheren Regionen aufnehmen (z.B. Frankfurt)

Dies würde eine bessere Arbeitsweise ermöglichen und die Trennschärfe bei den untersuchten Werten erhöhen. Auch wäre ein Vergleich mit Daten auf niedrigeren Höhenlagen von Vorteil, da sie eine Einschätzung bezüglich der Gewichtung der Messwerte am Berg erlauben. Für weitere Untersuchungen wäre es interessant, die Faustformel aufzugreifen und deren Wertigkeit zu überprüfen.

5 Zusammenfassung

Immer mehr Menschen begeben sich in ihrer Freizeit in immer größere Höhen. In den Alpen kann man per Seilbahn in kurzer Zeit auf über 3000m transportiert werden. Dabei setzt man sich proportional zur Höhe einem immer geringeren Luftdruck aus. Der Sauerstoffpartialdruck sinkt. Der Körper des alpinen Freizeitsportlers ist diesem Stress über die Dauer seines Aufenthaltes hinweg schutzlos ausgesetzt. Er reagiert mit Anpassung, wie Erhöhung des Atemminutenvolumens und Schutzmechanismen, wie ein Herabsetzen der körperlichen Leistungsfähigkeit, um den Körper zu entlasten und nicht zu überfordern.

In dieser Untersuchung werden die Reaktionen auf Hypoxie bei kurzfristigem und längerem Aufenthalt in mittleren Höhen von 1750 bis 3300m ü. NN. untersucht. Dabei unterscheiden wir in Anpassungserscheinungen des Organismus auf akute und chronische Hypoxie durch Höhenexposition. Die Untersuchungsmerkmale sind die Herzfrequenz, die über Polar Herzfrequenzmesser ermittelt wurde, und die Sauerstoffsättigung (SO_2) des Blutes, die per Pulsoxymetrie am Ohrläppchen gemessen wurde. Es wurden Messwerte auf konstanter Höhe (1750m ü. NN.) und Werte auf verschiedenen Höhen bis 3300m ermittelt. Die Versuchsgruppe (N=17, Alter $25 \pm 3,9$ Jahre) bestand größtenteils aus Sportstudierenden. Die Sauerstoffsättigung wurde an fünf verschiedenen Tagen und auf sechs verschiedenen Höhen gemessen. Die Herzfrequenz bei Ruhe wurde an drei verschiedenen Tagen und auf zwei verschiedenen Höhen gemessen. Damit sollte sowohl die akute als auch langfristige Anpassung an die Höhe gezeigt werden.

Die Mittelwerte der Messungen wurden mittels T-Test und ANOVA auf signifikante Unterschiede überprüft. Dabei waren bei akuter Höhenanpassung ein starker Abfall der Blut- SO_2 ($-8,7\% SO_2$; $p < .01$), sowie ein starker Anstieg der Herzfrequenz ($+17bpm$; $p < .01$) zu beobachten. Der fast lineare Rückgang der SO_2 auf unseren Messhöhen, ließ es auf Grund der S-förmigen O_2 -Bindungskurve zu, die Abhängigkeit von Höhe ü.NN und SO_2 des Blutes linear zu approximieren. Dabei konnten wir eine Faustformel für mittlere Höhen bis 3300m aufstellen, die einen Rückgang der Blut- SO_2 von $5,2\%$ ($p < .01$; $R^2 = .668$) pro 1000 Höhenmeter schätzt.

Über sieben Tage hinweg konnte jedoch keine signifikante Erhöhung der SO_2 im Blut nachgewiesen werden. Schon der Anfangswert war mit $97,5\%$ fast Normalniveau. Dies könnte mit einem Fehler im Untersuchungsdesign (Erster Messwert am dritten Tag des Höhenaufenthaltes) erklärt werden, da nach Bärtsch (2000,

S. 140) die Hauptanpassung der SO_2 durch Atemminutenvolumenerhöhung bereits in den ersten Tagen eintritt. Die Herzfrequenz sank in sieben Tagen im Mittel um 7bpm ($p < .01$). Dies lässt jedoch auf Grund von massiven Störgrößen (Tageszeit, Temperatur, vegetative Größen, körperliche Belastung vor der Messung) bei der Messung der Ruheherzfrequenzen keine relevanten Rückschlüsse zu.

In Zukunft könnte es interessant sein, die Faustformel zu überprüfen und eine größere Höhenspanne zu integrieren. Die Herzfrequenzmessung muss mit höherer Genauigkeit im Hinblick auf Störgrößen durchgeführt werden, um aussagekräftig zu sein.

6 Literatur

- Bärtsch, Peter (2000). Höhenanpassung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 51 (4), 139-140.
- Berghold, Franz (2004). Schnelladaptation und Gesundheitsrisiken für Seilbahntouristen in ostalpinen Höhenlagen. *fdSnow - Fachzeitschrift für den Skisport*, 2004 (24), 39-41.
- De Marées, Horst (2003). *Sportphysiologie* (Korrigierter Nachdruck der 9., vollständig überarbeiteten und erweiterten Auflage). Köln: SPORTVERLAG Strauss.
- Fröhlich, Hanno (2005). *Die Herzfrequenz-Monitoring-Methode zur Bestimmung des Energieverbrauch in Felduntersuchungen – Evaluierung und Anwendung*. Unveröffentlichte Dissertation, Fakultät für Kulturwissenschaften Universität Bayreuth. Zugriff am 01.12.2007 unter http://www.sport.uni-bayreuth.de/sport4/froehlich_d/veroeffentlichungweb/dissendfassung.pdf.
- Fuchs, Ullrich und Manfred Reiss (1990). *Höhentraining*. Trainerbibliothek Bd. 27. Münster: Philippka Verlag.
- Gnamm, Christian (2004). *Physiologischer Sauerstofftransport, Pulsoxymetrie und Vergiftungen, die direkt die Atmung betreffen*. Zugriff am 02.12.2007 unter <http://www.uni-heidelberg.de/institute/fak12/AC/huttner/heinze/katja/seminar/sauerstofftransport.pdf>.
- Mairböurl, Heimo (2000). Höhenakklimatisation. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 51 (12), 390-394.
- Polar (Hrsg.) (2006). FITNESS Gebrauchsanleitung Polar FS1/FS2c/FS3c™. Zugriff am 02.12.2007 unter http://www.news.polar-deutschland.de/uploads/media/FS1_FS2c_FS3c.pdf.
- Thurnheer, Robert (2004). *Pulsoximetrie*. Schweiz Med Forum, 2004 (4), 1218-1223. Zugriff am 06.12.2007 unter http://www.medicalforum.ch/pdf/pdf_d/2004/2004-48/2004-48-394.PDF.
- Tyco Healthcare Group (Hrsg.) (2004). *NPB-40 Tragbares Pulsoximeter*. Zugriff am 01.12.2007 unter http://www.inspiration-medical.de/Nellcor_NPB-40_Prospekt.pdf.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Deskriptive Daten der Probanden für Alter, Körperhöhe, Gewicht und BMI.	9
Tabelle 2 Zeitpunkte für die Sauerstoffmessung mit dazugehörigen Höhenangaben in Metern ü. NN.	12
Tabelle 3 Zeitpunkte für die Herzfrequenzmessung in Ruhe mit dazugehörigen Höhenangaben in Metern ü. NN.	13
Tabelle 4 Deskriptive Statistik für die Herzfrequenz über einen mittleren Zeitraum auf 1750 Metern Höhe.	14
Tabelle 5 Deskriptive Statistik für die Ruheherzfrequenz über einen mittleren Zeitraum auf unterschiedlichen Höhen an einem Tag.	15
Tabelle 6 Deskriptive Statistik für die Messung der Sauerstoffsättigung auf einer Höhe von 1700 Metern.	15
Tabelle 7 Deskriptive Statistik bezüglich der Sauerstoffsättigung auf verschiedenen Höhen in Metern.	16
Tabelle 8 Testergebnisse der SO ₂ -Daten auf Normalverteilung durch einen Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest.	18
Tabelle 9 T-Werte, Freiheitsgrade und p-Werte bei zweiseitigem T-Test auf Mittelwertsunterschiede der SO ₂ in verschiedenen Höhen.	18
Tabelle 10 ANOVA-Ergebnisse der SO ₂ auf verschiedenen Höhen.	19
Tabelle 11 Test auf Homogenität der Varianzen der SO ₂ auf verschiedenen Höhen.	19
Tabelle 12 Testergebnis der Mehrfachvergleiche mittels Tamhane-Test. Die unabhängige Variable ist die Höhe, die abhängige die Sauerstoffsättigung des Blutes.	19
Tabelle 13 T-Werte, Freiheitsgrade und zweiseitige Signifikanz des T-Tests auf Unterschiede der SO ₂ Mittelwerte zu verschiedenen Messzeitpunkten auf gleicher Höhe.	20
Tabelle 14 Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten der Ruheherzfrequenz.	20
Tabelle 15 T-Test für verbundene Stichproben der Herzfrequenzmessung an einem Tag in verschiedenen Höhen.	21
Tabelle 16 T-Test für verbundene Stichproben der Herzfrequenzmessung über einen Zeitraum von drei Messzeitpunkten hinweg auf konstanter Höhe von 1750m.	21
Tabelle 17 Ergebnis der linearen Regression von Höhe auf Sauerstoffsättigung.	21

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Sauerstoffsättigung des Blutes (SO_2) in Abhängigkeit vom alveolären Sauerstoffpartialdruck (de Marées, 2003, S. 586).....	6
Abbildung 2 Veränderung des Atemminutenvolumens und der SaO_2 während eines Höhengaufenthaltes. Die Ruheatmung wird gesteigert, wodurch sowohl der alveoläre PO_2 also auch die SaO_2 ansteigt (Bender et al., 1989 zitiert nach Mairbäurl, 2000, S. 391).....	7
Abbildung 3 Herzfrequenz in Schlägen pro Minute auf einer Höhe von 1750m gemessen an drei verschiedenen Tagen.	14
Abbildung 4 Darstellung der Mittelwerte bezüglich der Ruheherzfrequenz an einem Tag auf unterschiedlicher Höhe.....	15
Abbildung 5 Sauerstoffsättigung auf einer Höhe von 1700m gemessen über einen mittleren Zeitraum von sieben Tagen.....	16
Abbildung 6 Sauerstoffsättigung auf verschiedenen Messhöhen (gepaart) über einen mittleren Zeitraum.....	17
Abbildung 7 Darstellung der SO_2 -Werte und Mittelwerte als abhängige Variable zum Luftdruck ermittelt über die Barometrische Höhenformel aufgrund der Höhe (Annahme Luftdruck _{Meereshöhe} =760mmHg). Annäherung der O_2 -Bindungskurve über eine Regression mit einem Polynom 3. Grades durch den Nullpunkt.	24

9 Anhang

Anthropometrische Daten der Versuchspersonen

	Alter (Jahre)	Geschlecht	Körperhöhe (m)	Gewicht (kg)
A1	24	M	186,8	84,1
A2	36	M	185,7	86,5
A3	26	M	173,5	70
A4	22	M	176,5	72
A5	23	M	181,1	86,9
A6	30	W	170,8	61
A7	24	M	188	75,4
A8	23	M	177,4	81,9
A9	23	W	173,3	60,3
A10	23	M	174,1	74,1
A11	23	M	189	92,9
A12	23	M	179,1	74,3
A13	24	W	166,2	58,1
A14	22	W	168,2	53,9
A15	23	M	173,3	75,6
A16	26	M	169,5	71,9
A17	k.A.	W	159,4	61,1
A18	k.A.	M	200	114,5
A19	k.A.	M	179,4	75,3
A20	k.A.	M	179,4	80,5
A21	k.A.	M	176,6	77,2
A22	32	W	170,3	74,3

Messwerte der Pulsoxymetrie (Sauerstoffsättigung in %)

	T0 1700m O ₂	T1 2500m O ₂	T2 2070m O ₂	T2 2528m O ₂	T2 2970 O ₂	T4 1700 O ₂	T6 1700 O ₂	T6 3300 O ₂
A1	98	94	97	95	93	98		
A2	98	90	97	93		97	97	
A3	99	94	97	94		98	97	88
A4	98	95	98	96	90	98	99	92
A5	97	94	96	92	93	98	99	88
A6	99	92	96	95		96		
A7	98	95	97	96	87	96	98	88
A8	99	95	96	97	94	99	98	91
A9	98	94	93	96	93	98	97	89
A10	99	95	98	91		99	97	88
A11	98	92	97	89		98	97	
A12	97	90	96	93	88	96	96	89
A13	97	96	95	96				
A14	98	96	96	95	93	99	97	91
A15	96	96	99	96	90	96	97	91
A16	97	95	96	97		98	98	82
A17	98	95		94				
A18	97			95				
A19	97	95		97				
A20	93	93		96				
A21	95	96		96				
A22	99	98	98	95				

Herzfrequenzmesswerte in bpm

	T0 HFruhe1 1750m	T4 HFruhe1 1750m	T6 HFruhe1 1750m	T6 HFruhe2 2730m
A1	70	61	68	
A2	79	63	72	
A3	60	54	46	67
A4	70	70	72	87
A5	69	70	77	102
A6	70	66	72	
A7	67	56	56	72
A8	74	68	61	78
A9	68	72	62	94
A10	73	72	62	79
A11	62	63	55	
A12	64	77	71	86
A13	57		52	82
A14	63	53	54	63
A15	80	74	72	88
A16	78	72	73	86
A17	82		74	
A18	89			
A19	72			
A20	68			
A21	109			
A22	55			