

# **Auswirkungen hypobarer Hypoxie auf die Reaktionsfähigkeit im Alter**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Hohen Medizinischen Fakultät  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
Bonn

vorgelegt von  
Knut Beitzel  
aus  
Karlsruhe  
2006

Angefertigt mit der Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Burkhard Weisser  
2. Gutachter: Prof. Dr. med. Dieter Swandulla

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Januar 2006

Aus: Medizinische Poliklinik der Universität Bonn  
Direktor: Prof. Dr. med. Hans Vetter

Publikation: Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB  
Bonn ([http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss\\_online](http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online)) elektronisch publi-  
ziert.

In Dankbarkeit meinen Eltern gewidmet.



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7
<b>2</b>	<b>Betrachtung des Themas in der bisher vorliegenden Literatur</b> .....	10
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und theoretische Grundlagen</b> .....	12
<b>3.1</b>	<b>Bedeutsame physiologische und psychomotorische Anpassungsprozesse unter den Bedingungen der hypobaren Hypoxie</b> .....	12
3.1.1	<i>Physikalische Grundlagen der Höhe</i> .....	12
3.1.2	<i>Einteilung der Höhenstufen</i> .....	15
3.1.3	<i>Spezielle physiologische Auswirkungen der Höhenbelastung</i> .....	15
3.1.4	<i>Auswirkungen der Höhe auf die körperliche Leistungsfähigkeit</i> .....	23
3.1.5	<i>Auswirkungen der Höhenbelastung auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit</i> .....	24
<b>3.2</b>	<b>Bedeutsame physiologische und psychomotorische Anpassungsprozesse im Altersverlauf</b> .....	26
3.2.1	<i>Allgemeine Vorbemerkungen zum Altern</i> .....	26
3.2.2	<i>Spezielle physiologische Auswirkungen des Alterungsprozesses</i> .....	27
3.2.3	<i>Auswirkungen des Alterungsprozesses auf die körperliche Leistungsfähigkeit</i> .....	29
3.2.4	<i>Auswirkungen des Alterungsprozesses auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit</i> .....	30
<b>4</b>	<b>Untersuchungsziele und Arbeitshypothesen</b> .....	32
<b>5</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	34
<b>5.1</b>	<b>Untersuchungsgut</b> .....	34
<b>5.2</b>	<b>Untersuchungsgang</b> .....	36
<b>5.3</b>	<b>Untersuchungsverfahren</b> .....	38
5.3.1	<i>Wiener Determinationstest</i> .....	38
5.3.2	<i>Belastungstest</i> .....	40
5.3.3	<i>Messung der Sauerstoffsättigung</i> .....	40
5.3.4	<i>Messung der Herzfrequenz</i> .....	40
<b>5.4</b>	<b>Untersuchungsmaterial</b> .....	41
<b>5.5</b>	<b>Statistische Methoden</b> .....	42

---

---

<b>6</b>	<b>Darstellung der Untersuchungsergebnisse</b> .....	43
<b>6.1</b>	<b>Darstellung der physiologischen Parameter</b> .....	44
6.1.1	<i>Darstellung der Änderung der Herzfrequenz</i> .....	44
6.1.2	<i>Darstellung der Änderung der Sauerstoffsättigung</i> .....	46
<b>6.2</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse der Determinationstests</b> .....	48
6.2.1	<i>Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse der Interventionsgruppe</i> .....	48
6.2.2	<i>Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse der Kontrollgruppe</i> .....	51
6.2.3	<i>Vergleich der Ergebnisse des ersten und dritten Tests der Interventionsgruppe</i> .....	54
6.2.4	<i>Vergleich der Ergebnisse des zweiten und vierten Tests der Interventionsgruppe</i> .....	57
6.2.5	<i>Vergleich der Ergebnisse des ersten und dritten Tests der Kontroll- gruppe</i> .....	60
6.2.6	<i>Vergleich der Ergebnisse des zweiten und vierten Tests der Kontroll- gruppe</i> .....	63
6.2.7	<i>Darstellung der Reaktionszeiten der Interventions- und Kontrollgruppe</i> .....	66
<b>7</b>	<b>Diskussion</b> .....	68
<b>7.1</b>	<b>Diskussion des Probandengutes</b> .....	68
<b>7.2</b>	<b>Diskussion der Untersuchungsmaterialien</b> .....	69
<b>7.3</b>	<b>Diskussion der Untersuchungsmethodik</b> .....	69
7.3.1	<i>Untersuchungsgang</i> .....	69
7.3.2	<i>Untersuchungsverfahren</i> .....	69
<b>7.4</b>	<b>Diskussion der Änderung der physiologischen Parameter</b> .....	70
<b>7.5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse der Wahlreaktionstests</b> .....	72
<b>7.6</b>	<b>Fazit</b> .....	76
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	78
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	80
	<b>Anhang</b> .....	85

---

## 1 Einleitung

Alpine Sportarten, wie Skilaufen, Bergwandern, Bergsteigen und andere körperliche Betätigungen, erfreuen sich heutzutage zunehmend größerer Beliebtheit. Mehr und mehr Menschen suchen in der Bewegung im alpinen Gelände eine Alternative zu ihrem ansonsten körperlich eher inaktiven Alltag. Wenige Freizeitbeschäftigungen verbinden das Erleben der Natur so eindrucksvoll mit der Möglichkeit, sich körperlich und gesundheitlich gewinnbringend zu betätigen. Diesen Wert der alpinen Sportarten erkennen junge aber insbesondere auch mehr und mehr ältere Menschen.

So verbringen pro Jahr schätzungsweise 40 Millionen Touristen ihren Urlaub in den europäischen Alpen. Von diesen sind 60 % über 40 Jahre alt, 15 % sogar älter als 60 Jahre (BURTSCHER ET AL. 2000).

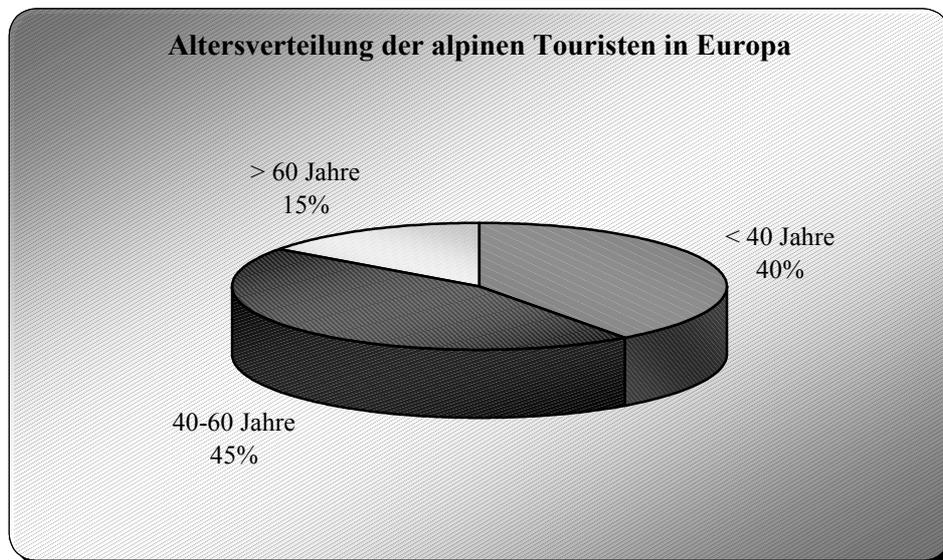


Abbildung 1: Altersverteilung der Alpin-Touristen in Europa (nach BURTSCHER ET AL., 2000)

Bei dieser großen Nachfrage und all den positiven Aspekten des Sports im alpinen Gelände darf man dennoch nicht übersehen, dass speziell dort besondere Risiken und Gefahren auftreten. Schon 1881 klassifizierte der Wiener Arzt Emil Zsigmondy diese laut BERGHOLD (1988) in „objektive“ und „subjektive Gefahren“. Hierbei fasst der Begriff „objektive Gefahren“ Ereignisse wie Schlechtwetter, Steinschlag, Lawinenabgang etc. und der Begriff „subjektive Gefahren“ Fehler im Denken und Handeln des Bergsportlers zusammen.

BERGHOLD (1988) trennt sich jedoch von einem unreflektierten Verständnis dieser Aufteilung, indem er feststellt: „Nicht der Berg ist gefährlich, sondern das unbedachte Verhalten des Menschen, wenn er sich am Berg aufhält. [...] Der entscheidende Risikofaktor in den Bergen ist also immer wieder der Mensch selbst.“

Um dieses Verständnis umzusetzen und sich im alpinen Gelände, aber auch auf den gesicherten Skipisten richtig verhalten zu können, müssen dem alpinen Touristen und Bergsportler Informationen an die Hand gegeben werden, die es ihm ermöglichen, sein Können und dessen Grenzen in der Höhe richtig einzuschätzen.

Schließlich verunfallten im Jahr 2003 nach Angaben des Deutschen Alpenvereins (DAV) in einem Zeitungsbericht der FRANKFURTER-ALLGEMEINEN-ZEITUNG (2004) von den 700 000 Mitgliedern des DAVs 930 und damit 50 % mehr als im Jahr zuvor. Obwohl die gesicherten Skipisten weniger alpine Gefahren aufweisen, sind auch diese Zahlen beachtlich. Denn nach Statistiken der Auswertungsstelle für Skiunfälle der ARAG Sportversicherung (ASU SKI, 2004) verunglückten 60 000 der etwa 4 Millionen aktiven deutschen Skifahrer in der Saison 2002/2003. Bei 52 000 war eine ambulante Versorgung ausreichend, etwa 8000 mussten stationär versorgt werden (mittlerer Krankenhausaufenthalt: 8,7 Tage). Weiterhin liegen 38 % der Verletzungen im Bereich der unteren Extremität und dort im Besonderen im Bereich des Kniegelenkes (HENKE ET AL., 2000). Solche Verletzungen ziehen zusätzlich häufig eine lange Berufsunfähigkeit nach sich und stellen demnach einen großen volkswirtschaftlichen Kostenfaktor dar.

Ursächlich für das alpine Unfallgeschehen zeigen sich zumeist Stürze. Laut KRIEGER (2000) kam es bei 64 % aller Bergsportnotfälle zu solchen. In den Disziplinen Pistenski fahren, Skitouren und Bergsteigen wird ein Großteil der Stürze (mit je 91 %, 88 % und 86 %) durch koordinative Mängel, wie Stolpern, Ausrutschen, Fehltritt, Verkanten der Ski etc. verursacht.

Anhand dieser Unfallursachen zeigt sich, wie wichtig es für den einzelnen Bergsportler ist, unter zeitlichem Druck schnelle und gleichzeitig korrekte Entscheidungen zu treffen. Oft müssen solche wichtige Entscheidungsprozesse in Momenten ablaufen, in denen der Sportler körperlich erschöpft (z. B. beim Bergwandern, Bergsteigen) oder viele Entscheidungen kurz hintereinander treffen muss (z. B. viel Publikumsverkehr auf Skipisten). Zusätzlich laufen diese Prozesse unter Bedingungen des verminderten Sauerstoffangebotes in der Höhe ab.

Auch wenn mittlerweile viele Untersuchungen über die physiologischen Auswirkungen der Höhenbelastung durchgeführt wurden, ist der Fragestellung der Höhenauswirkungen auf die Wahlreaktionsfähigkeit des Menschen erst wenig Bedeutung geschenkt worden. Zur Frage nach den Auswirkungen von körperlicher Aktivität in der Höhe, insbesondere auf die Wahlreaktionsfähigkeit älterer Personen, existieren bisher noch keine wissenschaftlichen Daten.

---

Im Hinblick auf die schon vorher beschriebene hohe Zahl älterer Bergtouristen, soll in der hier vorliegenden Arbeit der Frage nach den Auswirkungen eines Sauerstoffmangels auf die Wahlreaktionsfähigkeit von Senioren nachgegangen werden. Somit könnte ein Beitrag zur Primärprävention von Unfällen und Verletzungen im alpinen Sport geleistet werden.

Im folgenden Kapitel der theoretischen Grundlagen wird ein Überblick über die bisher vorliegende Literatur gegeben und der aktuelle Wissensstand über die für diese Arbeit relevanten Themen zusammengefasst dargestellt. Es schließt sich die Präsentation der Untersuchungsziele, des Untersuchungsverlaufs, der Untersuchungsmaterialien und der Ergebnisse an. Zuletzt werden die Ergebnisse kritisch diskutiert und mit den bisher vorliegenden wissenschaftlichen Forschungsergebnissen verglichen.

---

## 2 Betrachtung des Themas in der bisher vorliegenden Literatur

Bisher beschäftigten sich erst wenige Autoren mit den Auswirkungen einer Höhenbelastung und der damit verbundenen Hypoxie auf die Reaktions- und speziell die Wahlreaktionsfähigkeit. Ein Großteil dieser Untersuchungen wurde unter dem Blickwinkel der zivilen und militärischen Luftfahrt in den Vereinigten Staaten von Amerika durchgeführt. Einige andere Autoren untersuchten die Auswirkungen sehr großer Höhen auf die psychomotorischen Fähigkeiten alpiner Profibergersteiger. Fast alle wiesen außerdem ein durchweg junges Probandengut auf.

Die Ergebnisse der Untersuchungen fallen recht unterschiedlich aus, und bis heute können noch keine abschließenden Aussagen über die Reaktionsfähigkeit, insbesondere von Senioren in großen Höhen, getätigt werden.

O'CARROLL & MACLEOD (1997) untersuchten an professionellen Rugbyspielern in England die Auswirkungen mittlerer Höhe (1600 m über Meereshöhe [N.N.]<sup>1</sup>) auf deren Wahlreaktionsfähigkeit. Es konnte bei diesen hoch trainierten Athleten kein Einfluss der Hypoxie auf die Wahlreaktion festgestellt werden.

Dahingegen zeigten FOWLER & TAYLOR (1987) eine Verlangsamung sowohl der Reaktions- als auch der Bewegungszeit an 14 Probanden (Alter: 20-24 Jahre). Sie ließen die Probanden ein Gasgemisch einatmen, durch dessen Sauerstoffminderung eine Höhe von 4700 m simuliert wurde. FOWLER konnte zusätzlich zusammen mit WHITE (1982) an vier Probanden (Alter: 26-35 Jahre) nachweisen, dass eine simulierte Höhe von 6700 m einen verlangsamen Einfluss auf die Reaktionszeit aufweist und die Fehlerrate von Entscheidungsprozessen leicht erhöht.

Auch RAMSEY & DAYTON (1970) wiesen zu Beginn der 70er Jahre einen Zusammenhang zwischen Hypoxie und einer Verlängerung der Reaktionszeit nach. Hierbei atmeten 30 junge Probanden ein hypoxisches Gasgemisch ein, wodurch ein durch Autoabgase erzeugter Sauerstoffmangel simuliert werden sollte.

Ebenfalls stellten NOBLE ET AL. (1993) eine leichte Erhöhung der Reaktionszeit an zwölf, dem Durchschnitt entsprechenden, Testpersonen fest, nachdem sie diese ein Gasgemisch atmen ließen, und somit eine Sauerstoffsättigung ( $S_aO_2$ ) von 78 % erzielten.

Unter realen Bedingungen wurden 1988 durch MACINTOSH ET AL. in zwei Hochgebirgsexpeditionen psychomotorische Tests an 20 Alpinisten durchgeführt. In diesen Untersuchungen auf 5000 m und 4700 m konnte jeweils eine Zunahme der Reaktions- und Wahlreaktionszeit festgestellt werden, es konnte jedoch

---

<sup>1</sup> Höhen über N.N. werden im Folgenden nur noch durch Angaben in Metern gekennzeichnet.

nicht abschließend geklärt werden, welchen Einfluss die bei einigen Probanden diagnostizierte akute Bergkrankheit (acute mountain sickness [AMS]) auf diese Ergebnisse hatte.

Im Rahmen einer Expedition auf den Mount Denali in Alaska stellten KRAMER ET AL. (1993) bei 40 Probanden eine Verschlechterung und Verlangsamung in psychomotorischen Tests im Vergleich zu gewohnten Höhenbedingungen fest.

Durch LI ET AL. (2000) konnte an 18 Probanden eine verminderte psychomotorische Leistungsfähigkeit und eine verlängerte Wahlreaktionszeit in simulierten Höhen von 3600 m und 4400 m festgestellt werden. Die Probanden wurden bei diesen Untersuchungen in einer Druckkammer nach einer Stunde simuliertem Höhengaufenthalt getestet.

Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen ermittelten KELMAN ET AL. (1969) unter Höhenbedingungen sogar eine leichte Verbesserung von psychomotorischen Funktionen.

Dieser Überblick zeigt die unterschiedlichen Aussagen und Ergebnisse der bisher absolvierten und für das Thema der Arbeit bedeutsamen Untersuchungen. So gut wie alle dieser Untersuchungen wurden mit einem sehr jungen und sportlichen Probandengut durchgeführt. Gleichzeitig wurden die Höhenbedingungen in vielen Experimenten nur durch Druckkammern oder Gasgemische simuliert, so dass diese Aussagen nicht völlig kritiklos auf die realen Umgebungsbedingungen eines älteren Alpentouristen übertragen werden können.

---

### 3 Stand der Forschung und theoretische Grundlagen

#### 3.1 Bedeutsame physiologische und psychomotorische Anpassungsprozesse unter den Bedingungen der hypobaren Hypoxie

Durch einen Höhengenaufenthalt wird der menschliche Organismus in den Zustand einer Hypoxie versetzt. Hierunter versteht man eine ungenügende Versorgung der Körperzellen mit Sauerstoff ( $O_2$ ) (KACIREK, 2002). Da die Ursache dieser Mangelversorgung in einem verminderten Umgebungsdruck und einem daraus resultierenden verminderten Partialdruck des Sauerstoffes im arteriellen Blut ( $P_aO_2$ ) liegt, wird diese Form der Hypoxie auch als *hypobare Hypoxie* bezeichnet. Dieser Abschnitt stellt nun eine Auswahl der wichtigsten Auswirkungen, welche durch einen Aufenthalt in der Höhe und der somit hervorgerufenen hypobaren Hypoxie auf den menschlichen Organismus entstehen, zusammengefasst dar.

##### 3.1.1 Physikalische Grundlagen der Höhe

Die Veränderungen der Umgebungsbedingungen sind ursächlich für die Belastungen, welche durch den Einfluss der Höhe auf den Menschen entstehen. Im Folgenden werden die relevanten physikalischen Grundlagen aufgezeigt.

Mit zunehmender Höhe ändern sich nach DEETJEN (1981) praktisch alle Komponenten der Atmosphäre:

- Abnahme des *Luftdrucks*,
- Abnahme des *inspiratorischen Sauerstoffpartialdrucks* ( $P_iO_2$ ),
- Abnahme der *Luftdichte*,
- Abnahme des *Wasserdampfdrucks*,
- Abnahme der *Temperatur*,
- Zunahme der *UV- und ionisierenden Strahlung*.

Der *Luftdruck* nimmt mit zunehmender Höhe kontinuierlich ab. Da Luft aus Gasen besteht und diese komprimierbar sind, fällt der Luftdruck allerdings nicht linear. Vergleicht man die in der Tabelle 1 angegebenen Werte, so wird deutlich, dass der Luftdruck auf 5000 m etwa nur noch die Hälfte und auf einer Höhe von 8500 m nur noch ein Drittel des Luftdrucks auf N.N. beträgt. Zu beachten ist dabei, dass der Luftdruck zusätzlich von der Temperatur abhängt (die Standardatmosphäre nimmt eine Temperaturabnahme von 6,5 °C pro 1000 m Höhengewinn an) und daher von den klimatischen Umgebungsbedingungen (Jahreszeit, Breitengrad). Somit darf Tabelle 1 nur der orientierenden Anschauung dienen (DREXEL, 1981).

---

Tabelle 1: Standardatmosphärentabelle (nach ELTERMANN, 1964)

Höhe [m]	Luftdruck [mmHg]	PO <sub>2</sub> [mmHg]	Temperatur [°C]	Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
0	760,0	159,2	15	1,225
1000	674,1	141,2	8,5	1,112
2000	596,3	124,9	2	1,007
3000	526,0	110,2	-4,49	0,909
4000	462,5	96,9	-10,94	0,819
5000	405,4	84,9	-17,47	0,736
6000	354,2	74,2	-23,69	0,66
7000	308,3	64,6	-30,45	0,59
8000	267,4	56,0	-36,94	0,526
9000	231,0	48,4	-43,42	0,467

PO<sub>2</sub> = Sauerstoffpartialdruck; mmHg = Millimeter Quecksilbersäule; °C = Grad Celsius;

kg = Kilogramm; m<sup>3</sup> = Kubikmeter; m = Meter

Die Zusammensetzung der Luft bleibt im Gegensatz zum Luftdruck bis in eine Höhe von 100 km konstant. Jedoch nimmt der Partialdruck aller in der Luft enthaltenen Gase (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Edelgase) proportional zur Abnahme des Luftdrucks ab. Besonders bedeutungsvoll ist dies in Bezug auf den *inspiratorischen Sauerstoffpartialdruck* (P<sub>i</sub>O<sub>2</sub>), der in Höhen von 2000 m schon 20 % niedriger ist, als auf N.N. (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>). Dessen Auswirkungen auf den alveolaren und arteriellen PO<sub>2</sub> werden in Abschnitt 3.1.3 noch ausführlicher dargelegt.

Parallel zur Verminderung des Luftdrucks nimmt ebenfalls die *Luftdichte* mit zunehmender Höhe ab. Dies äußert sich allerdings eher in einem verminderten Luftwiderstand, der bei Sportdisziplinen wie Radfahren und Eisschnelllauf von Bedeutung ist. Auf die in der Literatur diskutierten, positiven Auswirkungen auf das Strömungsverhalten der Luft während der Atemtätigkeit (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>) soll hier aufgrund der wohl geringen Relevanz nicht näher eingegangen werden.

Ebenso wie der Luftdruck und die Luftdichte fällt der *Wasserdampfdruck* und somit die Feuchtigkeit rasch mit steigender Höhe. Auf Höhen von 2500 m ist der Wasserdampfdruck im Mittel auf weniger als die Hälfte des Wertes von N.N. gesunken. Der Verlust des Wasserdampfdrucks erzeugt erhöhte Flüssigkeitsverluste sowohl über den Respirationstrakt (perspiratio insensibilis) als auch über die Haut (perspiratio sensibilis), infolgedessen beeinflusst er den Wasserhaushalt des Körpers. In moderaten Höhen (bis

3000 m) scheinen diese Flüssigkeitsverluste jedoch nur eine sehr geringe Änderung des Gesamtkörperwassers zu bewirken (GUNGA ET AL., 2000). Zu beachten ist, dass auch der Wasserdampfdruck wiederum von Temperatur und Barometerdruck abhängt und damit von den gegebenen Witterungsverhältnissen und der Jahreszeit stark beeinflusst wird.

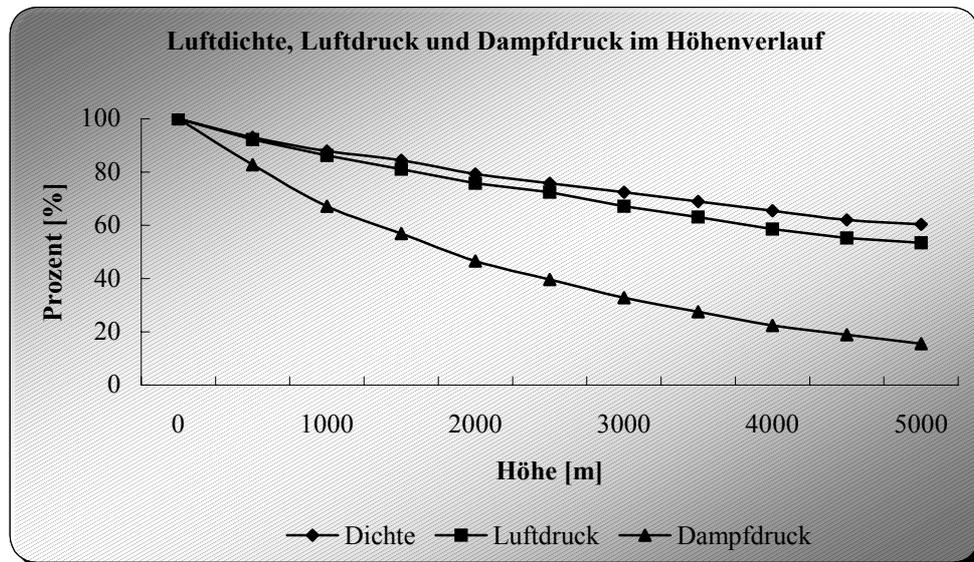


Abbildung 2: Luftdichte, Luftdruck und Dampfdruck im Höhenverlauf (nach HOLL-MANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>)

*m = Meter; % = Prozent*

Die Abnahme der *Temperatur* wird, wie bereits vorher beschrieben, im Mittel mit 6,5 °C pro 1000 m Höhengewinn angegeben. In den vorherigen Abschnitten wurde bereits auf deren vielfältige Auswirkungen auf die übrigen physikalischen Größen eingegangen. Je nach Wetterlage (z. B. eine Inversions-Wetterlage, bei der die Temperaturschichtung der Atmosphäre verändert ist) und Jahreszeit schwankt dieser Mittelwert jedoch erheblich (DEETJEN, 1981).

Die Zunahme der *atmosphärischen Strahlung* in der Höhe (18 % pro 1000 m Höhengewinn für UVB-Licht, 9 % für UVA-Licht) wird auf einen verkürzten Weg der Strahlen durch die Atmosphäre zurückgeführt (WEBER ET AL., 2000). Des Weiteren erhöhen Reflexionen der Strahlung von Eis und Schnee deren Intensität.

### 3.1.2 Einteilung der Höhenstufen

Sofern eine langsame Anpassung an die Höhenlage stattfindet, kann man bei Gesunden vier Höhenstufen nach typischen physiologischen Reaktionsunterschieden definieren (BERGHOLD & SCHAFFERT, 2001<sup>5</sup>):

- *indifferente Höhen:* 0-1500 m (keine Anpassung nötig),
- *mittlere Höhen:* 1500-2500 m (eine Sofortanpassung genügt),
- *große Höhen:* 2500-5300 m (eine Sofortanpassung reicht nicht aus, eine Akklimatisation ist erforderlich),
- *extreme Höhen:* 5300-8848 m (Akklimatisation nicht mehr möglich, wohl aber Atemanpassung, daher nur Kurzaufenthalt möglich).

Eine weitere Definition nach POLLARD & MURDOCH (1998) benennt fünf Höhenstufen: Hierbei wird die „große Höhe“ nochmals in die Stufen „große Höhe“ (2500-3500 m) und „sehr große Höhe“ (3500-5800 m) unterteilt. Danach folgt die „extreme Höhe“ (ab 5800 m). Die Übergänge zwischen den einzelnen Höhenstufen sollten allerdings nicht als starr angesehen werden. Sie beziehen sich auf gesunde Personen und können je nach Alter, Gesundheitszustand, individueller Akklimatisation und Disposition variieren. Daher dienen sie lediglich der orientierenden Anschauung (SCHMIDT & THEWS, 1997<sup>27</sup>).

Die in dieser Arbeit untersuchten Höhenlagen von 3100 m fallen somit unter den Begriff: „große Höhen“.

### 3.1.3 Spezielle physiologische Auswirkungen der Höhenbelastung

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben, sinkt mit zunehmender Höhe der  $P_iO_2$  proportional zum Luftdruck. Auf die daraus folgende hypobare Hypoxie reagiert der menschliche Körper im Sinne einer Anpassung (*Akklimatisation*), da ansonsten eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Organismus nicht mehr gewährleistet werden könnte.

Die wichtigsten Mechanismen der *Akklimatisation* sollen hier dargestellt werden. Laut BERGHOLD (2002) ist die *Akklimatisation* „jener physiologische Prozess, der bei Exposition an die Höhe stattfindet, um die Sauerstoffversorgung der Gewebe trotz vermindertem atmosphärischen Sauerstoffpartialdruck aufrecht zu erhalten.“

Grundsätzlich hängt nach MAIRBÄURL (2000) die Versorgung des Organismus von mehreren Faktoren ab, dem  $P_iO_2$ , dem Ausmaß der Ventilation und somit dem alveolären Sauerstoffpartialdruck ( $P_AO_2$ ), dem Gasaustausch (Diffusion) und der Durchblutung (Perfusion) der Lunge und somit dem  $P_aO_2$ . Im Blut wirken sich der Hämoglobingehalt und die Anzahl der Erythrozyten auf die  $O_2$ -Versorgung aus. Das Herz-Kreislaufsystem bewirkt schließlich die Verteilung des  $O_2$  zu den einzelnen Organen. Schließlich hängt im Gewebe die Versorgung von der Dichte der Blutkapillaren und der Gewebedurchblutung ab. Zuletzt

---

bestimmen auf zellulärer Ebene der Besatz mit Myoglobin, Mitochondrien und O<sub>2</sub>-verbrauchenden Enzymen sowie der Energiebedarf der Zelle die Ausnützung des O<sub>2</sub>-Angebotes. Anpassungen an die Hypoxie können auf all diesen Ebenen stattfinden. Sie variieren mit der Höhe, der Zeit der Exposition und können sich interindividuell unterscheiden (MAIRBÄURL, 2000).

Der zeitliche Ablauf dieser Anpassungsvorgänge lässt sich in die Phasen *Sofortanpassung* (bei akuter Höhenexposition) und *dauerhafte Anpassung* (bei chronischer Höhenexposition) unterteilen (BERGHOLD & SCHAFFERT, 2001<sup>5</sup>).

### **Sofortanpassung**

Bei akuter Exposition an die Höhe (z. B. während einer Seilbahnauffahrt) wird die beeinträchtigte O<sub>2</sub>-Versorgung hauptsächlich durch eine Regulation der Ventilation und des Herz-Kreislauf-Systems kompensiert (GÜNTHER ET AL., 1981). Bis in Höhen von 3000 m gelten diese Sofortanpassungen als ausreichend (BÄRTSCH, 2000).

#### *Respiratorisches System*

Der wahrscheinlich schnellste Anpassungsmechanismus ist die Steigerung des Atemzugvolumens und der Atemfrequenz und damit die Erhöhung des Atemminutenvolumens (Hypoxic ventilatory response [HVR]) (WEIL ET AL., 1970). Ausgelöst wird die HVR sehr wahrscheinlich durch die Stimulation der Chemorezeptoren des Glomeris carotici aufgrund des erniedrigten P<sub>a</sub>O<sub>2</sub> und des dadurch erhöhten Sympathikotonusses (RICHALET ET AL., 1988). Die individuell unterschiedliche Empfindlichkeit der Chemorezeptoren bedingt „responder“ und „weak responder“ (MAIRBÄURL, 2000). Somit variiert diese Anpassung interindividuell sehr stark, so dass z. B. bei gut trainierten Ausdauerathleten eine zeitlich veränderte Anpassung beobachtet wird.

Der positive Effekt dieser Anpassung ist ein Anstieg des P<sub>A</sub>O<sub>2</sub>, des P<sub>a</sub>O<sub>2</sub> und der S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> bei gleichzeitiger Abnahme des alveolären und arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks (P<sub>A</sub>CO<sub>2</sub> und P<sub>a</sub>CO<sub>2</sub>) aufgrund der Hyperventilation. Dies ist in den Abbildungen 3 und 4 über den Verlauf von drei Tagen gut erkennbar.

---

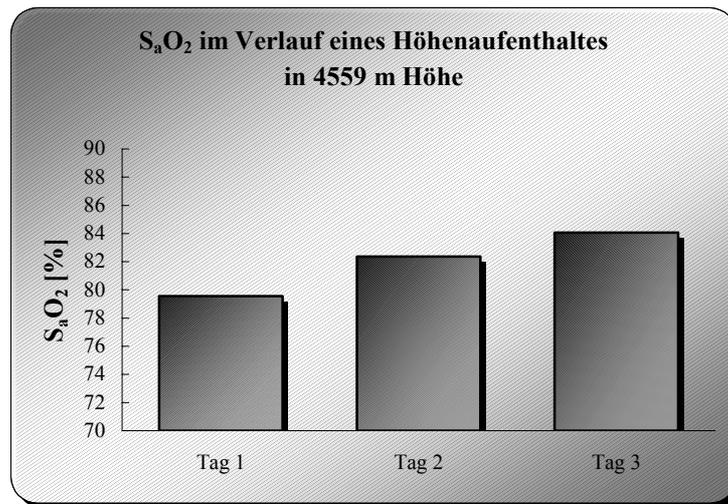


Abbildung 3: S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> im Verlauf eines Aufenthalts in 4559 m Höhe (nach BÄRTSCH, 2000)

S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> = arterielle Sauerstoffsättigung; % = Prozent

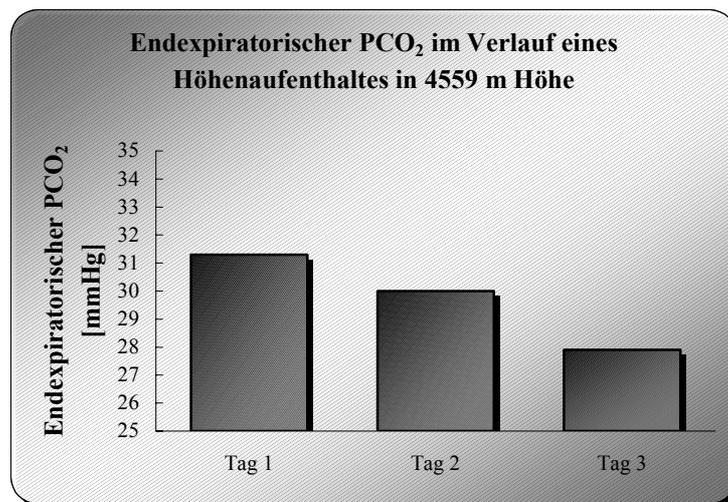


Abbildung 4: Endexpiratorischer PCO<sub>2</sub> im Verlauf eines Aufenthalts in 4559 m Höhe (nach BÄRTSCH, 2000)

PCO<sub>2</sub> = Kohlendioxidpartialdruck; mmHg = Millimeter Quecksilbersäule

Es resultiert aus der höhenbedingten Hyperventilation eine respiratorische Alkalose. Diese kann grundsätzlich durch eine renale Bikarbonat-Ausscheidung kompensiert werden. Solch eine Kompensation ist in mittleren Höhen nach 24 Stunden abgeschlossen, in großen und extremen Höhen reicht die renale Kompensation jedoch nicht aus, so dass die respiratorische Alkalose dort nicht vollständig kompensiert werden kann (BÄRTSCH, 2000; MAIRBÄURL, 2000).

Die vorher beschriebenen Änderungen des  $\text{PCO}_2$ , des pH-Wertes des Blutes (Alkalose) und zusätzlich die Änderungen des erythrozytären Stoffwechselmetaboliten 2,3-Diphosphoglycerates (2,3-DPG) während des Höhengaufenthaltes nehmen Einfluss auf die Sauerstoff-Bindungs-fähigkeit ( $\text{O}_2$ -Affinität) des Hämoglobins (SCHEID, 1996). So führen der erniedrigte  $\text{PCO}_2$  und die Höhenalkalose zu einer Erhöhung der  $\text{O}_2$ -Affinität und begünstigen so die  $\text{O}_2$ -Aufnahme in der Lunge. In der Peripherie fördern hingegen der erhöhte  $\text{PCO}_2$ , die Azidose des Blutes, die niedrige Temperatur und das vermehrt anfallende 2,3-DPG die Abgabe des  $\text{O}_2$  an das Gewebe. In mittleren Höhen ist die  $\text{O}_2$ -Affinität durch das vermehrte 2,3-DPG und den normalen pH-Wert des Blutes geringfügig vermindert. In großen Höhen gleichen sich die Effekte von Höhenalkalose und 2,3-DPG aus, wohingegen die  $\text{O}_2$ -Affinität des Hämoglobins in extremen Höhen aufgrund der ausgeprägten Höhenalkalose deutlich erhöht ist (BERGHOLD, 2000; MAIRBÄURL, 2000).

Eine weitere Auswirkung der akuten Höhenexposition zeigt sich in einer Linksverschiebung der Laktatleistungskurve und einer somit verminderten Leistungsfähigkeit. Die maximal erreichbare Laktatkonzentration bleibt jedoch im Vergleich zu geringeren Höhen gleich. Somit liegt der Blutlaktatwert bei gleicher Belastung höher als auf N.N. (FRIEDMANN, 2000).

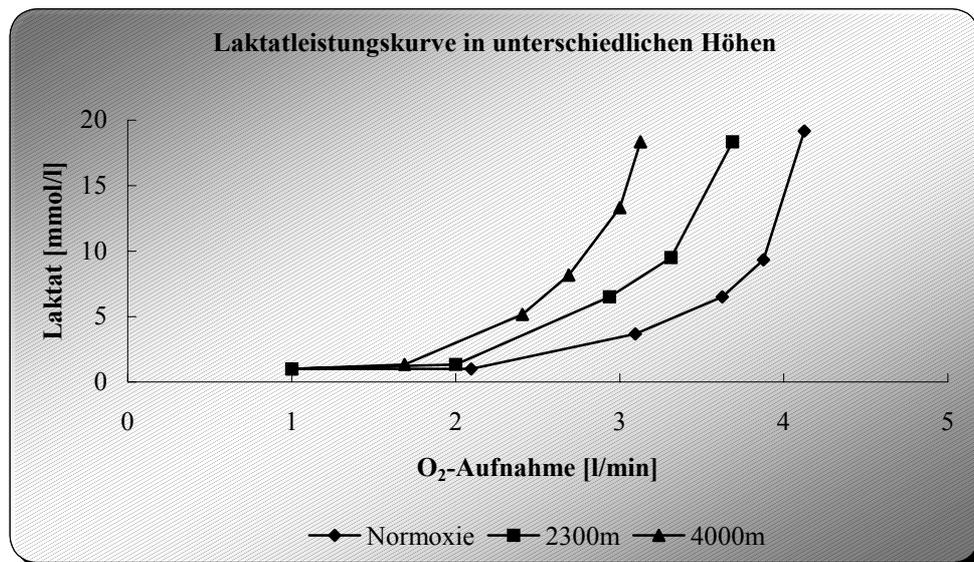


Abbildung 5: Laktatleistungskurve in unterschiedlichen Höhen (nach FRIEDMANN & BÄRTSCH, 1997)

*l/min = Liter pro Minute; mmol/l = Millimol pro Liter*

### *Herz-Kreislauf-System*

Der durch die Hypoxie gesteigerte Sympathikotonus führt zu einer sofortigen Erhöhung der Herzfrequenz (sowohl in Ruhe als auch unter Belastung) und damit zu einer Steigerung des Herzminutenvolumens (HMV) (VOGEL & HARRIS, 1967). Ätiologisch ist diese Frequenzerhöhung zusätzlich eine Reaktion auf eine hypoxisch bedingte Abnahme des peripheren Gefäßwiderstandes. Nach einer zwei- bis dreiwöchigen Akklimatisationszeit normalisieren sich dann Schlagvolumen und HMV wieder (BERGHOLD, 2000; KLAUSEN, 1966).

In akuter Hypoxie werden laut MAIERBÄURL (2000) in mittleren Höhen keine wesentliche Änderung des systemischen Blutdrucks beobachtet, in großen und extremen Höhen ist sowohl der systolische, als auch der diastolische Blutdruck erhöht. Dies ist auf das schon zuvor beschriebene Wechselspiel zwischen Erhöhung des HMV und der Verminderung des peripheren Gefäßwiderstandes zurückzuführen, wobei die für den Blutdruck relevanten, mittelgroßen Widerstandsarterien durch die gesteigerte sympathische Aktivität kontrahieren.

### **Dauerhafte Anpassung**

In persistierender Hypoxie werden weitere Anpassungsvorgänge ausgelöst, um eine Verbesserung des Sauerstoffgehaltes des Blutes und der Gewebsoxygenierung zu erwirken. Auch diese Akklimatisationsvorgänge wirken sich auf verschiedenen Ebenen des Körpers aus, beispielsweise auf das respiratorische System, den O<sub>2</sub>-Transport im Blut, das Herz-Kreislauf-System und das zelluläre System.

### *Respiratorisches System*

Die im Sinne der Sofortanpassung einsetzende HVR steigt während des Aufenthaltes in der Höhe in den ersten ein bis zwei Wochen weiter an. Dies wird nach neueren Erkenntnissen auf die Zunahme der Empfindlichkeit der Chemorezeptoren im Glomeris caroticum auf Hypoxämie zurückgeführt (BÄRTSCH, 2000). Dem durch die renale Bikarbonatausscheidung gesteigerten Atemtrieb wird hingegen nur eine geringere Bedeutung für die weitere Steigerung der HVR zugeschrieben. Ohne diese, durch längere Akklimatisation gesteigerte HVR wäre z. B. eine Besteigung des Mount Everest ohne zusätzlichen Sauerstoff nicht möglich. So registrierten WEST ET AL. (1983) bei Chris Pizzo im Gipfelbereich des Mount Everest eine Atemfrequenz von 86 +/- 2,8 Atemzügen pro Minute mit einem Atemzugvolumen von 1,26 Litern. Auch nach Rückkehr in Tallagen bleibt die erhöhte Atemantwort weiterhin bis zu einer Woche bestehen (MAIRBÄURL, 2000).

---

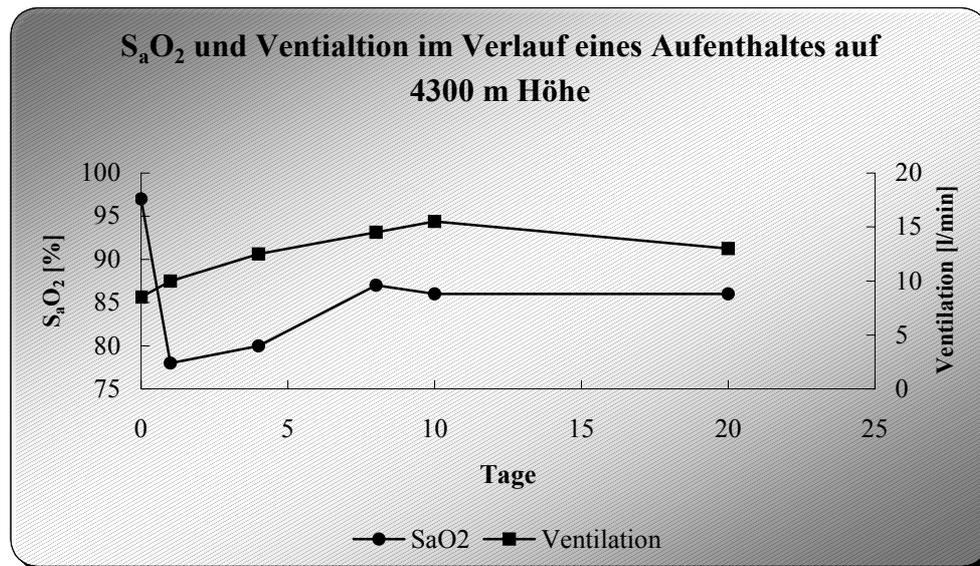


Abbildung 6: S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> und Ventilation im Verlauf eines Aufenthaltes auf 4300 m Höhe  
(nach MAIRBÄURL, 2000)

S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> = arterielle Sauerstoffsättigung; % = Prozent; l/min = Liter pro Minute

Aufgrund des renalen Bikarbonatverlustes vermindert sich die Pufferkapazität im Blut und in den Zellen. Dies führt schon bei submaximaler körperlicher Belastung zu einer schnelleren Ansäuerung des Blutes. Es kommt jedoch zu einer Gegenregulation dieses Effektes, hervorgerufen durch die Erhöhung des Hämoglobingehaltes des Blutes und damit der intrazellulären Pufferkapazität (MAIRBÄURL, 2000).

Die bei der akuten Höhenexposition nach links verschobene Laktatkurve verlagert sich im Verlauf der andauernden Höhenanpassung wieder nach rechts, erreicht ihre Ausgangslage jedoch nicht wieder. Sie verläuft nun zwischen der unter akuter Höhenexposition registrierten und der auf N.N. aufgezeichneten Kurve. Dies wird auch als das „Laktatparadoxon“ bezeichnet (FRIEDMANN, 2000).

Dauerhafte Anpassungen finden zusätzlich im Lungenkreislauf statt. So nimmt die alveolo-arterielle Sauerstoffdifferenz bei Gesunden mit zunehmender Höhe ab, hervorgerufen durch eine Verbesserung des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses der Lunge (V/Q-Verhältnis) (DEETJEN, 1994<sup>2</sup>). Dies wird auf einen pulmonalen Hochdruck zurückgeführt, welcher die schwerkraftbedingte unterschiedliche Blutverteilung verbessert und so in Folge auch das V/Q-Verhältnis positiv verändert. Zusätzlich reduziert die zunehmende Hyperventilation das Shuntvolumen der Lungen (FISCHER, 2000).

All diese Änderungen der Lungenfunktion bewirken den in Abbildung 7 erkennbaren verminderten Abfall des P<sub>a</sub>O<sub>2</sub> gegenüber dem durch einen Höhengewinn verursachten deutlichen Abfall des P<sub>i</sub>O<sub>2</sub>.

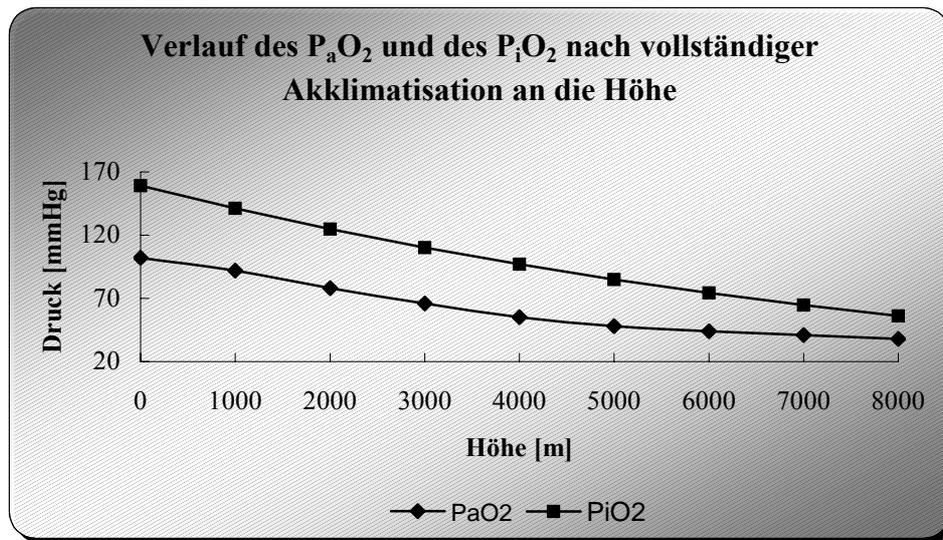


Abbildung 7: Verlauf des  $P_aO_2$  und des  $P_iO_2$  nach vollständiger Akklimation an die Höhe (nach BERGHOLD & SCHAFFERT, 2001<sup>5</sup> und ELTERMANN, 1964)

$P_aO_2$  = arterieller Sauerstoffpartialdruck;  $P_iO_2$  = inspiratorischer Sauerstoffpartialdruck; mmHg = Millimeter Quecksilbersäule; m = Meter

#### *O<sub>2</sub>-Transport im Blut*

Der größte Teil des O<sub>2</sub> liegt im Blut an das Hämoglobinmolekül gebunden vor. Daher begrenzen die Gesamtkörpermenge an Hämoglobin (O<sub>2</sub>-Transportkapazität) und die O<sub>2</sub>-Affinität des Hämoglobins (Hb-O<sub>2</sub>-Affinität) den O<sub>2</sub>-Transport im Blut. Die O<sub>2</sub>-Affinität des Hämoglobins wird in der Höhe wesentlich durch die Faktoren pH, PCO<sub>2</sub> und 2,3-DPG beeinflusst. Die Höhenalkalose und Hypokapnie bewirken eine Erhöhung der Affinität. Dies wirkt sich positiv auf die O<sub>2</sub>-Bindung in der Lunge aus. Azidose, Hyperkapnie, Temperatursteigerung in der Peripherie und Erhöhung des 2,3-DPG hingegen bewirken eine leichtere O<sub>2</sub>-Abgabe. Je nach Höhe und Aufenthaltsdauer ändern sich diese, die Hb-O<sub>2</sub>-Affinität beeinflussenden Faktoren (BÄRTSCH, 2000).

In mittleren Höhenlagen ist die Hb-O<sub>2</sub>-Affinität durch einen Anstieg des 2,3-DPGs bei physiologischem pH-Wert des Blutes geringfügig vermindert (DEETJEN, 1994<sup>2</sup>). In extremen Höhen werden die Effekte des 2,3-DPGs durch die zunehmende, nicht mehr kompensierbare Höhenalkalose aufgehoben. In Höhen von 4000 m sind diese beiden Effekte ausgewogen, so dass das Hämoglobin eine ähnliche Affinität zum Sauerstoff besitzt, wie auf N.N. (MAIRBÄURL, 2000). Laut BÄRTSCH (2000) ist jedoch der Veränderung der O<sub>2</sub>-Affinität des Hämoglobins für die Akklimation im Vergleich zu anderen Mechanismen eine insgesamt eher geringe Bedeutung zuzuschreiben.

Längerer Aufenthalt in großen Höhen führt zu einer Erhöhung der O<sub>2</sub>-Transportkapazität. Dies wird auf eine Abnahme des Plasmavolumens und eine Steigerung der Erythropoese zurückgeführt. BÄRTSCH (2000) beschreibt die höhenbedingte Zunahme der Diurese (Höhendiurese) als eine der Hauptursachen für die Abnahme des Plasmavolumens. Durch einen konsekutiv erhöhten Hämatokrit führt sie zu einer Steigerung der pro Volumeneinheit Blut transportierten Menge an Sauerstoff. Dieser Effekt wurde bisher jedoch erst unter kontrollierten Laborbedingungen nachgewiesen. Ein entsprechend eindeutiger Nachweis in Feldstudien steht noch aus (BÄRTSCH, 2000). In Bezug auf den Hämatokritwert des Blutes konnten in mittleren Höhen bisher keine signifikanten Änderungen gefunden werden. So scheint die Abnahme des Plasmavolumens auf diesen Höhen keine bedeutende Rolle zu spielen. In einer Höhe von 4500 m wurde jedoch ein Volumenverlust von 10 % innerhalb von 24 Stunden beschrieben, der sich im weiteren Verlauf des Aufenthaltes und mit steigender Höhe noch vergrößert (MAIRBÄURL, 2000).

Eine Steigerung des Gesamthämoglobins in mittleren Höhen wird derzeit widersprüchlich diskutiert. Erst im Verlauf von Wochen konnten Anstiege der Hämoglobinkonzentration festgestellt werden. Sehr wohl ist aber ein Anstieg der Retikulozytenzahl als Parameter für die gesteigerte Erythropoese schon in mittleren Höhen nachweisbar, der sich mit zunehmender Höhe deutlich ausprägt. Jedoch erst bei mehrwöchigen Aufenthalten in großen Höhen steigen Hämatokrit und Hämoglobingehalt langsam an (FRIEDMANN & BÄRTSCH, 1997; MAIRBÄURL, 2000).

### *Herz-Kreislauf-System*

Wie bereits beschrieben, ist das HMV bei akuter Hypoxie sowohl in Ruhe als auch unter submaximaler Belastung um ca. 20 % erhöht. Das maximal erreichbare HMV ist allerdings erniedrigt. Dies wirkt sich verringern auf die maximale Leistungsfähigkeit in der Höhe aus. Mit zunehmender Dauer des Höhengaufenthaltes kommt es zu einer Abnahme des HMV in Ruhe und unter submaximaler Belastung. Das maximal erreichbare HMV bleibt weiterhin vermindert. Ein Teil der HMV-Änderung wird auf die Änderung der Herzfrequenz zurückgeführt. Diese nimmt bei längerem Höhengaufenthalt im submaximalen und maximalen Belastungsbereich ab (MAIRBÄURL, 2000). Die Ruheherzfrequenz sinkt wieder und kann in mittleren Höhen schließlich die gleichen Werte wie auf N.N. erreichen. MAIRBÄURL (2000) interpretiert diese Verminderung des HMV und der Herzfrequenz als „kardioprotektiven Mechanismus zum Schutz vor übermäßiger Belastung in Hypoxie“ („cardiac-sparing-effect“). Die wahrscheinlichste Ursache ist eine Herabregulierung der  $\beta$ -Rezeptoren des Herzens aufgrund der erhöhten Katecholaminspiegel unter Hypoxiebedingungen (BERGHOLD, 2000).

In der ersten Akklimatisationsphase resultiert aufgrund des verminderten Gefäßwiderstandes zunächst eine geringe Blutdrucksenkung. Mit zunehmender Akklimatisation sinkt das HMV und der periphere Gefäßwiderstand steigt mit der besseren O<sub>2</sub>-Versorgung des Gewebes wieder an. Folglich steigt der systemische

---

Blutdruck wieder an. BERGHOLD (2002) erklärt hieraus das unterschiedliche Blutdruckverhalten in verschiedenen Höhenlagen. In Höhen bis 4600 m kommt es vorerst zu keiner systemischen Blutdruckänderung. In extremen Höhen (> 5300 m), in denen keine ausreichende  $S_aO_2$  mehr hergestellt werden kann, steigt der Blutdruck ebenfalls nicht an.

### *Zelluläres System*

Hier wird von BERGHOLD (2002) die hypoxievermittelte Kapillarvermehrung als möglicher morphologischer Adaptationsmechanismus diskutiert. Da langandauernde Hypoxiebedingungen zu einer Muskelatrophie und Abnahme des Muskelquerschnitts bei gleicher Kapillaranzahl führen, steigt die Kapillarisation des Gewebes relativ gesehen an. Weiterhin werden vielfache Anpassungsmechanismen auf zellulärer Ebene diskutiert, auf die hier allerdings aus Umfangsgründen nicht weiter eingegangen werden kann.

#### *3.1.4 Auswirkungen der Höhe auf die Leistungsfähigkeit*

Trotz all dieser Anpassungsmechanismen kann der reduzierte  $P_iO_2$  in Höhen über 2000 m nicht mehr vollkommen kompensiert werden und es resultiert hieraus ein Abfall der körperlichen Leistungsfähigkeit. Dieser beträgt schätzungsweise 1 % der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ) pro 100 m Höhengewinn über 1500 m (BÄRTSCH, 2000). Bei hoch trainierten Ausdauersportlern ist der Leistungsabfall bereits ab einer Höhe von 1000 m zu beobachten.

In Versuchen mit hypoxischen Gasgemischen zeigte HOLLMANN, dass sich die  $VO_{2max}$  bei 15 Vol.%  $O_2$  in der Inspirationsluft (entspricht 2200-2400 m) um 8-12 % verringert. Bei einem Gasgemisch mit 12 Vol.%  $O_2$  (entspricht 4000 m) nahm die maximale Leistungsfähigkeit um 20-25 % ab (konstante Belastung von einer Dauer über drei Minuten) (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>).

HOLLMANN & HETTINGER (2000<sup>4</sup>) geben unter Bedingungen der mittleren und großen Höhe die Diffusionskapazität der Lunge als begrenzenden Faktor für die Ausdauerleistungsfähigkeit an. Ursächlich hierfür seien der verminderte  $O_2$ -Partialdruck und die entsprechend verminderte  $O_2$ -Aufsättigung des Blutes bei der Lungenpassage. Auf N.N. hingegen gälten das HZV und die arterio-venöse Sauerstoffdifferenz als hauptsächlich begrenzende Faktoren der Ausdauerleistungsfähigkeit. Mit zunehmender Aufenthaltsdauer in der Höhe steigt die  $VO_{2max}$  wieder leicht an, erreicht aber nicht die unter N.N. ermittelten Ausgangswerte.

---

### 3.1.5 Auswirkungen der Höhe auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Höhe auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit des Menschen dargestellt. Hierzu wird zuvor ein Überblick über die in diesem Zusammenhang verwendeten Begriffe gegeben.

Die *Reaktionsfähigkeit* wird generell dem Komplex der koordinativen Fähigkeiten zugeordnet (MARTIN ET AL., 2001). Sie wird meistens durch die Angabe der Reaktionszeit bestimmt, jedoch müssen zur Bestimmung der komplexen Reaktionsleistung zusätzlich noch weitere Parameter (z. B. die richtigen und falschen Antworten etc.) ermittelt werden.

Nach KRÜGER (1982) kann die Reaktionszeit als zeitlicher Abstand zwischen einem Signal und einer als Antwort auf dieses Signal erfolgenden Bewegung oder Handlung beschrieben werden. HOLLMANN & HETTINGER (2000<sup>4</sup>) geben für die Mindestmaße der Reaktionszeit für Berührungsreize 0,09-0,18 Sekunden, für akustische Signale 0,12-0,27 Sekunden und für optische Signale 0,15-0,2 Sekunden an. Die Reaktionszeit lässt sich jedoch trainieren und zeigt recht große interindividuelle Unterschiede. Des Weiteren kann die Reaktionszeit verkürzt werden, indem der Versuchsperson ein „Vor-Start-Signal“ gegeben wird. Hierdurch kann die Reaktionsleistung schon vorweggenommen (antizipiert) und folglich die benötigte Zeit verkürzt werden.

Grundsätzlich wird die Reaktionszeit in eine Entscheidungs- und eine Bewegungszeit untergliedert (SCHMIDT, 1988). Da eine Reaktionsleistung das Zusammenspiel unterschiedlicher Sinnesleistungen und Organe des Menschen fordert, setzt sie sich aus mehreren Elementen zusammen.

KRÜGER (1982) unterteilt die Reaktionszeit in folgende Elemente:

- Auftreten eines Reizes im Analysator,
- Übersetzung des Reizes durch das Sinnesorgan in Nervenimpulse,
- Übermittlung des Nervenimpulses an das Zentralnervensystem,
- Identifikation des Signals,
- Antwortauswahl,
- Übermittlung der Antwort vom Gehirn zu den Effektoren,
- Muskelinnervation.

Weiterhin lässt sich eine *Einfachreaktion* (es erfolgt nur *eine* Antwort auf nur *ein* Signal) und eine *Wahlreaktion* (auch komplexe Reaktion – *unterschiedliche* Antworten auf *unterschiedliche* Reize sind möglich) unterscheiden.

---

Es können auf die Wahlreaktion viele Bedingungen der Einfachreaktion übertragen werden. Betrachtet man diese genauer, so zeigt sich allerdings, dass die zentralen Auswahlprozesse eine weitaus größere Bedeutung erlangen als bei der Einfachreaktion. Somit verlängert sich die Reaktionszeit bei Auswahlreaktionen in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Wahlmöglichkeiten (KRÜGER, 1982). Für eine einfache Wahlreaktionsaufgabe (zwei Antwortmöglichkeiten auf einen Reiz) geben HOLLMANN & HETTINGER (2000<sup>4</sup>) eine Verlängerung der Reaktionszeit um etwa 0,1 Sekunden an. Bei weiteren Auswahlmöglichkeiten steigt die Reaktionszeit jedoch nicht linear an, sondern verhält sich am ehesten nach der in Gleichung 1 dargestellten und von HICK (1952) gefundenen Beziehung.

$$t_r = k \log_2 (n + 1)$$

*Gleichung 1: Hicksche Gleichung (nach HICK, 1952)*

*$t_r$  = mittlere Auswahlreaktionszeit;  $k$  = Konstante der einfachen Reaktionszeit;*

*$n$  = Anzahl der Wahlmöglichkeiten*

Auch unter körperlicher Belastung verändert sich die Reaktionszeit. So zeigte SZMODIS (1977) an 61 Sportlern, dass sich die Reaktionszeit auf akustische Reize mit zunehmender Belastungsstufe verlängert und bei maximaler Belastung am größten ist. Bei gut trainierten Ausdauersportlern trat dieser Effekt jedoch in geringerem Maße auf. Ähnliche Ergebnisse erzielte auch BRISSWALTER (1998).

Da körperliche Belastung eine nachweisliche Auswirkung auf die Reaktionszeit hat, sollte auch unter den Bedingungen der durch einen Höhengewinn hervorgerufenen Hypoxie eine Veränderung der Reaktionszeit erwartet werden. Bisher konnten hierzu nur widersprüchliche Aussagen getätigt werden. Dies wurde bereits in Kapitel 2 aufgezeigt.

Prinzipiell werden unter hypoxischen Bedingungen eine herabgesetzte Koordination und verminderte psychomotorische Fähigkeiten beschrieben (KACIREK, 2002). RAMSEY & DAYTON (1970) zeigten bei Autofahrern eine verlängerte Reaktionszeit unter den Bedingungen einer durch Atmung eines Gasgemisches erzeugten Hypoxie. Solch eine Verlangsamung der Reaktionszeiten konnte auch von KOBRIK & DUSEK (1970) nachgewiesen werden. Durch einen Aufenthalt in mittleren Höhen wurden jedoch von PAUL & FRASER (1994) und O'CARROLL & MACLEOD (1997) keine Auswirkungen auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit festgestellt.

Insgesamt zeigen diese unterschiedlichen Aussagen, dass bisher noch kein Konsens gefunden wurde, der die Auswirkungen der Hypoxie auf die psychomotorischen Fähigkeiten und hier im Speziellen auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit abschließend darstellt. Es kann aber wohl davon ausgegangen

---

werden, dass die Hypoxie einen Einfluss auf die Informationsverarbeitungsfähigkeit des Menschen nimmt und somit auch die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit beeinflusst (FOWLER & TAYLOR, 1987).

### **3.2 Bedeutsame physiologische und psychomotorische Anpassungsprozesse im Altersverlauf**

Bereits in der Einleitung wurde beschrieben, dass schätzungsweise 15 % aller Touristen im alpinen Raum über 60 Jahre alt sind. Die über 40-Jährigen machen sogar schon 60 % dieser Personen aus (BURTSCHER ET AL., 2000). Macht man sich zusätzlich die zukünftige demoskopische Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland bewusst, so zeigt dies, welche aktuelle Bedeutung die Abnahme der Leistungsfähigkeit im Alter in Bezug auf die Risikofaktoren und Unfallzahlen in der Höhe hat.

Beide Faktoren (Höhe und Alter) können die Leistungsfähigkeit des Menschen stark beeinflussen. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Auswirkungen des Alterungsprozesses auf den menschlichen Organismus dargestellt werden.

#### *3.2.1 Allgemeine Vorbemerkungen zum Alter*

Das Altern findet in unterschiedlichem Ausmaß und Tempo auf allen Organisationsstufen des Lebens statt. So kann man *chronologisches* (kalendarisches), *biologisches* (funktionales) und *psychosoziales* (subjektives) Alter unterscheiden (METKER ET AL., 1994). Üblicherweise wird das chronologische Alter genutzt, um Personen in altersbezogene Gruppen einzuteilen. Dies ist einfach zu ermitteln, kann jedoch nicht die vielfältigen Aspekte des Alterns ausreichend erfassen. Somit wurden unterschiedliche Konzepte des Alterungsprozesses entwickelt. Dementsprechend versucht das Konzept des funktionalen Alterns, die unterschiedlichen, altersabhängigen Verluste in den einzelnen Funktionsbereichen zu erfassen und hierdurch einen Altersbegriff zu definieren (SALTHOUSE, 1986). Aufgrund der großen Bandbreite der biologischen Systeme und ihrer Subsysteme scheint es jedoch schwierig durch das Modell des funktionalen Alterns einen zusammenfassenden Altersbegriff herzuleiten. Auch das Defizit-Modell des Alterns, welches den Alterungsprozess im wesentlichen durch Verluste der physischen und kognitiven Leistungsfähigkeit und andere Abbauprozesse definiert (FISCHER, 1991), lässt sich heute in dieser Form aufgrund der bekannten interindividuellen Unterschiede des Alterungsprozesses nicht mehr aufrecht erhalten. Da sich der Prozess des Alterns in einigen Bereichen durch regelmäßiges Üben und Training aufhalten lässt, entwickelte sich das Disuse-Modell (KAUSLER, 1991). Altern wird hierbei nicht als zeitlich determinierter Abbauprozess gesehen, sondern kann durch regelmäßigen Gebrauch physischer, psychischer und sozialer Funktionen aufgehalten werden. Ein weiteres Modell entwickelte OLBRICHT (1987) mit sei-

---

nem Kompetenz-Modell. Hiernach spiegelt das Verhalten im Alter die Anforderungen an die Person und ihre Ressourcen wider. Somit wird das Altern durch situative und personenspezifische Faktoren bestimmt.

Dieser Überblick zeigt einige der z. Zt. verfügbaren Theorien des Alterns auf. Bis heute kann hingegen keine dieser Theorien allein den vielgestaltigen Prozess des Alterns ausreichend definieren. Somit muss man wohl das Altern durch eine Kombination mehrerer Faktoren und Modelle beschreiben (WEISSER & OKONEK, 2003).

### *3.2.2 Spezielle physiologische Auswirkungen des Alterungsprozesses*

Der Beginn des Alterungsprozesses im Sinne eines Funktionsverlustes wird mit dem 30. Lebensjahr angegeben. Zu diesem Zeitpunkt liegt das Funktionsniveau des Organismus bei seinem Optimum (WEISSER & OKONEK, 2003).

Die folgenden Abschnitte sollen nun die grundlegendsten Auswirkungen des Alterns auf die Bereiche des respiratorischen und des Herz-Kreislauf-Systems aufzeigen.

#### *Respiratorisches System*

Die Lunge unterliegt im Alterungsprozess vielen unterschiedlichen Funktionsverlusten. Besonders sind der Elastizitätsverlust des knöchernen Thorax und der Lunge, die Verminderung der Anzahl der Alveolen und die Dezimierung der Lungenkapillaren hervorzuheben. Hierdurch sinkt die Vitalkapazität bei gleichzeitig steigendem Residualvolumen. Das maximal erreichbare Atemminutenvolumen (AMV) fällt in Folge etwa parallel zum Altersverlauf. Bei einer zusätzlichen, gleichzeitigen Verschlechterung des V/Q-Verhältnisses und einer Abnahme der Diffusionskapazität sinkt der  $P_aO_2$  schließlich noch weiter (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>).

HOLLMANN & HETTINGER (2000<sup>4</sup>) diskutieren als Ursache des verminderten AMV zusätzlich eine limitierende Rolle seitens physiologischer Altersveränderungen in den Luftwegen und einer relativen Hypoventilation, hervorgerufen durch eine erhöhte  $CO_2$ -Sensibilitätsschwelle.

#### *Herz-Kreislauf-System*

Mit zunehmender Lebensdauer nimmt auch das maximal erreichbare HZV ab. Dies ist sowohl durch eine Verminderung der maximal erreichbaren Herzfrequenz, als auch durch eine Abnahme des Schlagvolumens begründet. Die Reduktion des Schlagvolumens wird auf eine verringerte Kontraktilität und Elastizität des Herzmuskels zurückgeführt (WEISSER & OKONEK, 2003). Über die Gründe für die in Abbildung 8 dargestellte Abnahme der maximalen Herzfrequenz im Altersverlauf gibt es unterschiedliche Theorien.

---

Eine von LÖLLGEN (2000<sup>3</sup>) aufgezeigte Ursache liegt in der Annahme, eine Herabregelung der  $\beta$ -Rezeptoren würde zu einem verminderten Ansprechen des Herzens auf Katecholamine führen. Wichtig ist jedoch, dass die Abnahme der maximalen Herzfrequenz interindividuell sehr unterschiedlich ausfällt (WEISSER & OKONEK, 2003).

Zusätzlich zur maximal erreichbaren Herzfrequenz nimmt die submaximale Herzfrequenz mit dem Alter ab. Unter Belastungsbedingungen resultiert daraus ein insgesamt langsames Ansteigen der Herzfrequenzkurve mit einem früher erreichten Maximum (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>).

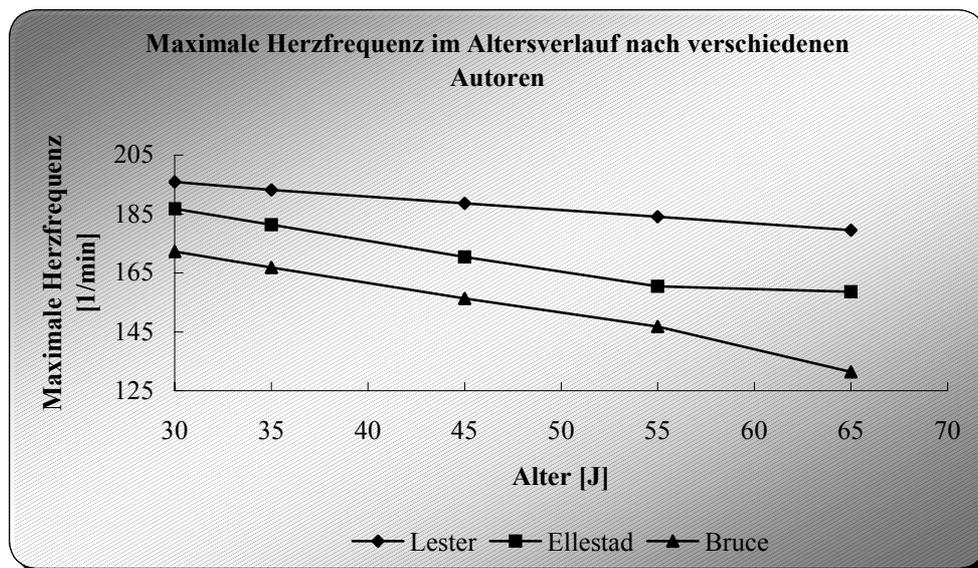


Abbildung 8: Maximale Herzfrequenz im Altersverlauf nach verschiedenen Autoren (nach HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>)

1/min = pro Minute; J = Jahre

Für den systolischen Blutdruck gilt, dass er kontinuierlich mit dem Lebensalter ansteigt. Für den diastolischen Blutdruck hingegen, dass er bis zum 50sten Lebensjahr ansteigt und dann, hauptsächlich aufgrund des Elastizitätsverlustes der Aorta (verminderte Windkesselfunktion), leicht abnimmt. Hieraus resultiert eine Zunahme der Blutdruckamplitude mit fortschreitendem Alter (WEISSER & OKONEK, 2003).

### 3.2.3 Auswirkungen des Alterungsprozesses auf die körperliche Leistungsfähigkeit

Die Veränderungen der Organfunktionen führen mit zunehmendem Alter zu einer stetigen Abnahme der  $VO_{2max}$  (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>). Zwischen dem 20sten und dem 60sten Lebensjahr beträgt diese Abnahme bei Männern etwa 25-30 % des Ausgangswertes. Dies ist in Abbildung 9 deutlich zu erkennen. Besonders hervorzuheben ist, dass sich sportliche Inaktivität weitaus stärker auf die Leistungsfähigkeit auswirkt, als das Alter allein. So wiesen laut HOLLMANN & HETTINGER (2000<sup>4</sup>) CASCH ET AL. einen Verlust der  $VO_{2max}$  bei sportlich Aktiven von 5 % und bei sportlich Inaktiven von 19 % pro Dekade nach (zwischen dem 43sten bis 71sten Lebensjahr). ROGERS ET AL. fanden in ihren Untersuchungen Verluste von 12 % für Untrainierte und von 5,5 % für Trainierte pro Dekade.

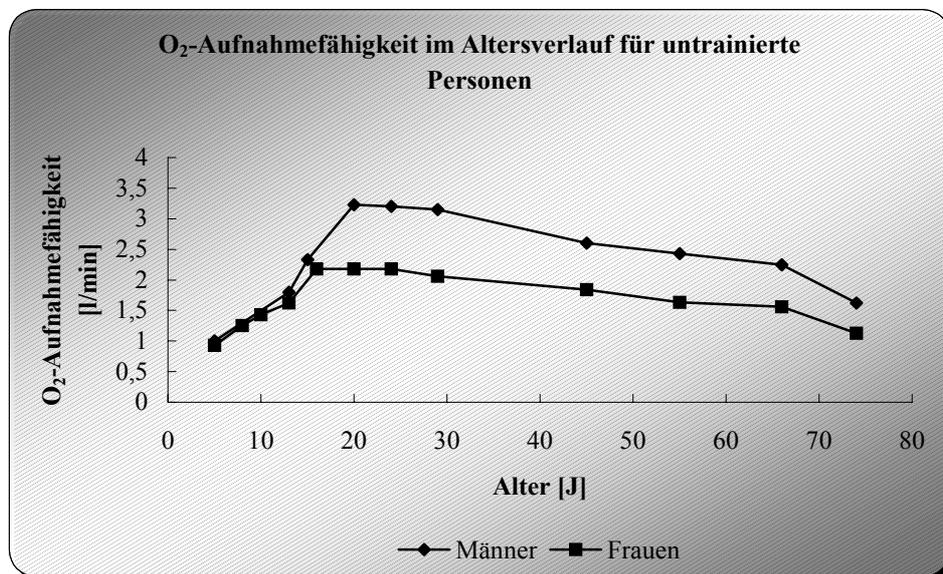


Abbildung 9: O<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit im Altersverlauf für untrainierte Personen (nach Rost, 2002)

l/min = Liter pro Minute; J = Jahre

Belastungsbegrenzend wirken sich sowohl die Veränderungen am respiratorischen System, als auch die Erniedrigung des HZV aus. Auf gegebenen, submaximalen Belastungsstufen bleibt die O<sub>2</sub>-Aufnahme unabhängig vom Alter. Hier kann das verminderte HZV noch durch eine vergrößerte arterio-venöse O<sub>2</sub>-Differenz ausgeglichen werden, die maximal mögliche arterio-venöse O<sub>2</sub>-Differenz verringert sich jedoch. Dadurch bleibt während ergometrischer Belastungen die Herzfrequenz bei gegebenen Belastungsstufen vom Alterungsprozess unbeeinflusst (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>).

Beobachtungen des Laktatverhaltens unter Belastung zeigten eine Erhöhung der Laktatkonzentration bei gegebener Belastungsstufe im Verlauf des Lebens. Die maximal erreichbaren Laktatwerte scheinen sich jedoch im Laufe des Lebens nicht zu verändern (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>).

### 3.2.4 Auswirkungen des Alterungsprozesses auf die Reaktions- und Wahlreaktionsfähigkeit

In zahlreichen Studien wird eine Abnahme der Reaktionsfähigkeit und damit auch der Wahlreaktionsfähigkeit im Verlauf des Alterns beschrieben (so z. B.: KAY, 1954; RIKLI & BUSCH 1986; VERCRUYSEN, 1992). Der Verlauf des Abbaus dieser Fähigkeiten ist aus den Abbildungen 10 und 11 deutlich erkennbar.

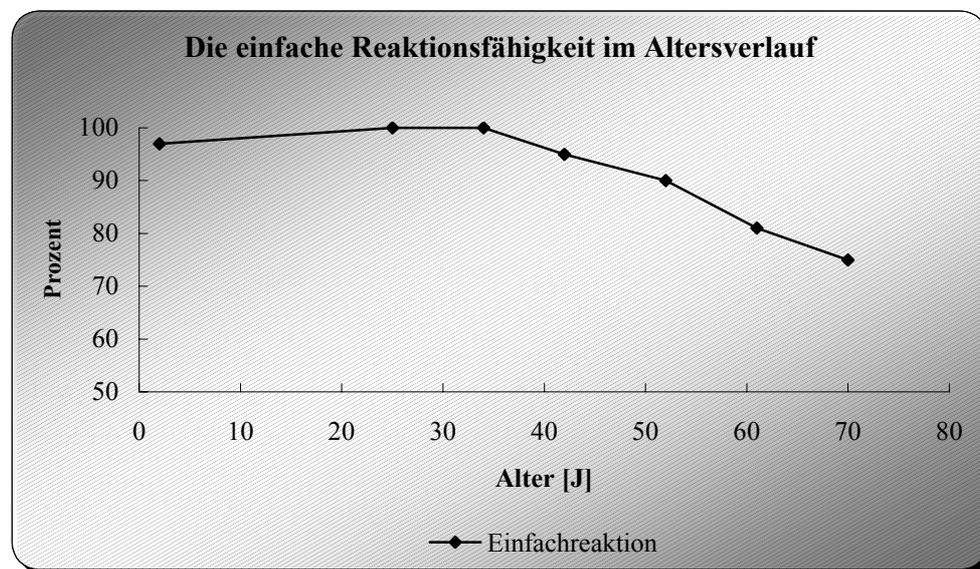


Abbildung 10: Die einfache Reaktionsfähigkeit im Altersverlauf (nach SEIB, 1990)

*J = Jahre*

Die zeitlich verlängerten Reaktionsleistungen werden vor allem mit einem erhöhten Zeitbedarf im prämotorischen (informationsverarbeitenden) Anteil des Reaktionsprozesses und weniger im motorischen (bewegungsausführenden) begründet. Hierbei spielen alterungsbedingte Verlangsamungen der Informationsverarbeitungsprozesse sowohl in den Sinnesorganen, als auch im Zentralnervensystem eine Rolle. Diese scheinen auf Verlangsamungen der zentralnervösen Prozesse bei älteren Personen zurückzuführen zu sein. Es bestehen jedoch große Unterschiede, je nach der Art, Dichte und Komplexität der Reizdarbietung, sowie der Faktoren Intelligenz, Gesundheit, Sozialstatus und Geschlecht der untersuchten Person (PÖTHING ET AL., 1983 zitiert nach SCHALLER, 2003).

Da ein Abfall der reaktiven Leistungsfähigkeit insbesondere mit der Komplexität der Aufgabe, den Anforderungen an Lernen und Gedächtnis und der Zahl der Reaktionsalternativen zusammenhängt, zeigen sich altersbedingte Abfälle gerade für Mehrfachwahlreaktionen (METKER ET AL., 1994).

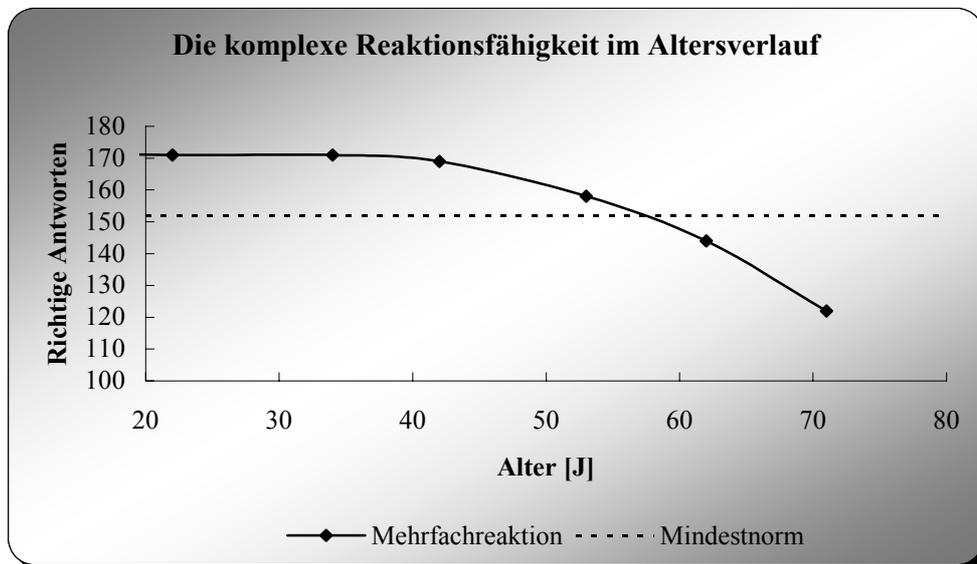


Abbildung 11: Die komplexe Reaktionsfähigkeit im Altersverlauf (nach SEIB, 1990 nach SCHALLER, 2003)

*J = Jahre*

Gerade für den Abbau der Reaktionsfähigkeit im Altersprozess zeigen sich dagegen interindividuell enorme Unterschiede. Diese sind auf den großen Einfluss des Übens und Trainierens auf die Reaktionsfähigkeit zurückzuführen. So wurden z. B. bei 60- bis 70jährigen Läufern und Tennisspielern bessere Reaktionszeiten gefunden als bei 20- bis 30jährigen Nichtsportlern (SPIRDUSO & CLIFFORD, 1978).

## 4 Untersuchungsziele und Arbeitshypothesen

In den vorausgegangenen Kapiteln wurde beschrieben, dass die Höhe und das Alter Einfluss auf die physische und psychomotorische Leistungsfähigkeit des Menschen nehmen. Physiologische Parameter wie Herzfrequenz,  $S_aO_2$  und Laktatkonzentration verhalten sich unter den Bedingungen der Höhenexposition anders als unter N.N. Diese Veränderungen der physiologischen Parameter wirken sich auch auf die psychomotorischen Fähigkeiten des Menschen aus.

Um die Auswirkungen der, durch den Höhengaufenthalt ausgelösten, hypobaren Hypoxie auf die Wahlreaktionsfähigkeit des Menschen untersuchen zu können, absolvierten zwölf Probanden im Seniorenalter auf 3100 m und 57 m mehrere computergestützte Wahlreaktionstests mit Hilfe des Wiener Testsystems. Auf jeder Höhenstufe wurde jeweils ein Test vor und nach einer definierten Belastung durchgeführt und gleichzeitig die physiologischen Parameter Herzfrequenz und  $S_aO_2$  bestimmt. Diese Ergebnisse wurden mit denen einer Kontrollgruppe, welche keinen Höhengaufenthalt und Belastungstests absolviert hatte, verglichen.

Im Einzelnen stellen sich die Ziele diese Arbeit wie folgt dar:

1. Untersuchung der Änderung der Wahlreaktionsfähigkeit im Alter im Zustand einer hypobaren Hypoxie, hervorgerufen durch einen Höhengaufenthalt auf 3100 m, zu derjenigen unter Normoxie auf 57 m.
  2. Untersuchung der, durch einen Höhengaufenthalt auf 3100 m hervorgerufenen, Änderung der physiologischen Parameter Herzfrequenz und  $S_aO_2$  im Alter im Vergleich zu 57 m.
  3. Untersuchung der Änderung der Wahlreaktionsfähigkeit im Alter vor und nach einer Belastung durch einen Stepp-Test auf 3100 m im Vergleich zu 57 m.
  4. Untersuchung der Änderung der physiologischen Parameter Herzfrequenz und  $S_aO_2$  im Alter vor und nach einer Belastung durch einen Stepp-Test auf 3100 m im Vergleich zu 57 m.
-

In Bezug auf die Untersuchungsziele und die Ermittlung der Ergebnisse sollen für die Interventionsgruppe schließlich folgende Arbeitshypothesen geprüft werden:

- **H1<sub>a1</sub>**: Die Probanden zeigen auf 3100 m weniger richtige Reaktionen als auf 57 m.
- **H1<sub>a2</sub>**: Die Probanden zeigen auf 3100 m mehr falsche Reaktionen als auf 57 m.
- **H1<sub>a3</sub>**: Die Probanden lassen auf 3100 m mehr Reaktionen aus als auf 57 m.
- **H1<sub>b1</sub>**: Die Herzfrequenz ist auf 3100 m höher als auf 57 m.
- **H1<sub>b2</sub>**: Die S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> ist auf 3100 m niedriger als auf 57 m.
- **H1<sub>c1</sub>**: Die Probanden zeigen nach einem Belastungstest auf 3100 m weniger richtige Reaktionen als auf 57 m.
- **H1<sub>c2</sub>**: Die Probanden zeigen nach einem Belastungstest auf 3100 m mehr falsche Reaktionen als auf 57 m.
- **H1<sub>c3</sub>**: Die Probanden lassen nach einem Belastungstest auf 3100 m mehr Reaktionen aus als auf 57 m.
- **H1<sub>d1</sub>**: Die Herzfrequenz steigt nach einem Belastungstest auf 3100 m höher als auf 57 m.
- **H1<sub>d2</sub>**: Die S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> fällt nach einem Belastungstest auf 3100 m tiefer als auf 57 m.

In der Kontrollgruppe sollen folgende Arbeitshypothesen geprüft werden:

- **H0<sub>a1</sub>**: Die Anzahl der richtigen Reaktionen der Probanden entspricht am ersten Testtag denen des zweiten Testtages.
  - **H0<sub>a2</sub>**: Die Anzahl der falschen Reaktionen der Probanden entspricht am ersten Testtag denen des zweiten Testtages.
  - **H0<sub>a3</sub>**: Die Anzahl der ausgelassenen Reaktionen der Probanden entspricht am ersten Testtag denen des zweiten Testtages.
  - **H0<sub>b1</sub>**: Die Herzfrequenz ist am ersten Testtag gleich hoch wie am zweiten Testtag.
  - **H0<sub>b2</sub>**: Die S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> ist am ersten Testtag gleich hoch wie am zweiten Testtag.
-

## **5 Material und Methoden**

Im folgenden Kapitel werden die in dieser Arbeit verwendeten Untersuchungsmaterialien und Methoden erläutert. Zu Beginn wird das Untersuchungsgut dargestellt. Darauf folgt die Vorstellung des Untersuchungsganges und der Untersuchungsverfahren. Schließlich werden noch die verwendeten Untersuchungsmaterialien und die statistischen Methoden dargestellt.

### **5.1 Untersuchungsgut**

Für die Untersuchung konnten insgesamt 24 Probanden gewonnen werden. Von diesen nahmen 14 an einem zweiwöchigen Skikurs im Rahmen des Seniorensportprogramms des Instituts für Sportwissenschaft und Sport der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn teil. Der Skikurs fand im März 2004 in Saas Almagell (Schweiz) statt. Diese 14 Teilnehmer bildeten die Interventionsgruppe.

Die Kontrollgruppe setzte sich aus zehn Probanden zusammen, die Mitarbeiter oder Teilnehmer an Seniorensportkursen am Institut für Sportwissenschaft und Sport waren. Sie hielten sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen in Bonn auf und waren keinen Höhenänderungen ausgesetzt.

Alle Teilnehmer waren nach eigenen Angaben gesund und stellten sich freiwillig für die durchgeführten Untersuchungen zur Verfügung. Sie wurden in einem ausführlichen Gespräch über die Untersuchungsziele, den Untersuchungsgang und potentielle Risiken aufgeklärt. Der gesamte Untersuchungsablauf wurde schließlich im Einklang mit den Grundlagen der 1983 revidierten Deklaration des Weltärztebundes von Helsinki durchgeführt.

Die Interventionsgruppe bestand aus 14 Probanden, acht weiblichen und sechs männlichen. Das Durchschnittsalter der Gruppe lag bei 64 Jahren. Sie können als für ihre Altersklasse überdurchschnittlich sportlich aktiv eingestuft werden, da sie regelmäßig entweder am Seniorensport der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn oder anderen Vereinssportangeboten teilnehmen. Während der Untersuchungen mussten eine Probandin krankheitsbedingt und eine Probandin aufgrund der Einnahme von Medikamenten, welche die Reaktionsfähigkeit beeinflussen, ausscheiden. Somit ergab sich für die Interventionsgruppe die in Tabelle 2 dargestellte Zusammensetzung.

---

Tabelle 2: Anthropometrische Daten der Interventionsgruppe mit Mittelwert und Standardabweichung

Proband	Alter [J]	Gewicht [kg]	Größe [cm]	Geschlecht
1	77	75	170	♂
2	63	66	168	♂
3	50	68	163	♀
4	73	94	192	♂
5	72	88	169	♂
6	76	72	160	♀
7	66	57	158	♀
8	60	98	184	♂
9	61	53	156	♀
10	57	64	162	♀
11	60	80	176	♂
12	54	65	165	♀
$x \pm s$	$64 \pm 8,8$	$73,3 \pm 14,2$	$168,4 \pm 10,8$	6 ♀ / 6 ♂

*J = Jahre; kg = Kilogramm; cm = Zentimeter; ♂ = männlich; ♀ = weiblich; x = Mittelwert; s = Standardabweichung*

Die Kontrollgruppe wurde von zehn Probanden gebildet. Sie bestand zur einen Hälfte aus männlichen, zur anderen aus weiblichen Teilnehmern. Auch diese Probanden können als sportlich aktiv angesehen werden, da sie größtenteils auch am Seniorensport-Angebot der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn teilnehmen. Das Durchschnittsalter der Kontrollgruppe lag bei 64,4 Jahren. Die Zusammensetzung und die anthropometrischen Daten der Kontrollgruppe können der Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Anthropometrische Daten der Kontrollgruppe mit Mittelwert und Standardabweichung

Proband	Alter [J]	Gewicht [kg]	Größe [cm]	Geschlecht
13	61	68	163	♀
14	62	78	179	♂
15	62	72	173	♂
16	62	75	175	♀
17	59	75	176	♂
18	57	62	167	♀
19	48	58	165	♀
20	81	80	185	♂
21	80	71	165	♂
22	72	80	182	♀
$x \pm s$	$64,4 \pm 10,3$	$71,9 \pm 7,4$	$173 \pm 7,7$	5 ♀ / 5 ♂

*J = Jahre; kg = Kilogramm; cm = Zentimeter; ♂ = männlich; ♀ = weiblich; x = Mittelwert; s = Standardabweichung*

## 5.2 Untersuchungsgang

Die Studie fand im März und April 2004 in Saas Grund (Schweiz) und in Bonn (Bundesrepublik Deutschland) statt. Jeder Proband absolvierte an zwei Testtagen jeweils zwei Determinationstests des Wiener Testsystems. Die Teilnehmer der Interventionsgruppe bewältigten zwischen den beiden Determinationstests jeweils einen einminütigen Belastungstest (Stepp-Test).

### *Erster Testtag*

Der erste Testtag sollte die Leistungsfähigkeit der Probanden unter den Bedingungen eines Höhengaufenthaltes aufzeigen und erfolgte für die Interventionsgruppe in zwei Räumen der Bergstation Hohsaas (Saas Grund). Die Station liegt auf einer Höhe von 3100 m. Einer der Räume wurde zum Empfang der Probanden genutzt und gab ihnen gleichzeitig die Möglichkeit 20 Minuten vor dem Testablauf zu ruhen. Im zweiten Raum konnten daher die Untersuchungen ohne Störungen durch Publikumsverkehr durchgeführt werden. Zum Zeitpunkt des ersten Untersuchungstages befanden sich die Probanden bereits zehn Tage im Skiurlaub. Somit wurde ihnen die Möglichkeit gegeben, sich vorher an die Höhe zu gewöhnen.

Die Testbatterie setzte sich aus einem vierminütigen Determinationstest, einer anschließenden einminütigen Belastung durch den Stepp-Test und einem weiteren vierminütigen Determinationstest zusammen. Jedem ersten Determinationstest eines Untersuchungstages lief eine automatisierte Einweisungs- und Probephase voraus.

Die Kontrollgruppe absolvierte ihren ersten Testtag am Institut für Sportwissenschaft und Sport in Bonn (57 m). Hier setzte sich die Testbatterie aus zwei Determinationstests zusammen. Die Kontrollgruppe wurde keinem Belastungstest zwischen den beiden Determinationstests unterzogen, stattdessen ruhte sie zwischen den beiden Tests für 1 ½ Minuten. Auch hier lief jedem ersten Determinationstest eines Untersuchungstages eine automatisierte Einweisungs- und Probephase voraus.

### Zweiter Testtag

Der zweite Testtag sollte die Leistungsfähigkeit der Testteilnehmer unter ihren gewohnten Höhenbedingungen darstellen. Er fand für die Interventionsgruppe ein bis zwei Wochen nach dem ersten Testtag am Institut für Sportwissenschaft und Sport in Bonn statt. Somit wurden mögliche positive oder negative Auswirkungen des Höhenaufenthaltes auf das Testergebnis vermieden. Die Probanden führten die gleiche Untersuchungsbatterie wie am ersten Testtag unter gleichen Bedingungen durch.

Die Teilnehmer der Kontrollgruppe absolvierten den zweiten Testtag wie die der Interventionsgruppe zwei bis drei Wochen nach dem ersten Test. Auch hier waren die Abläufe der beiden Untersuchungstage identisch.

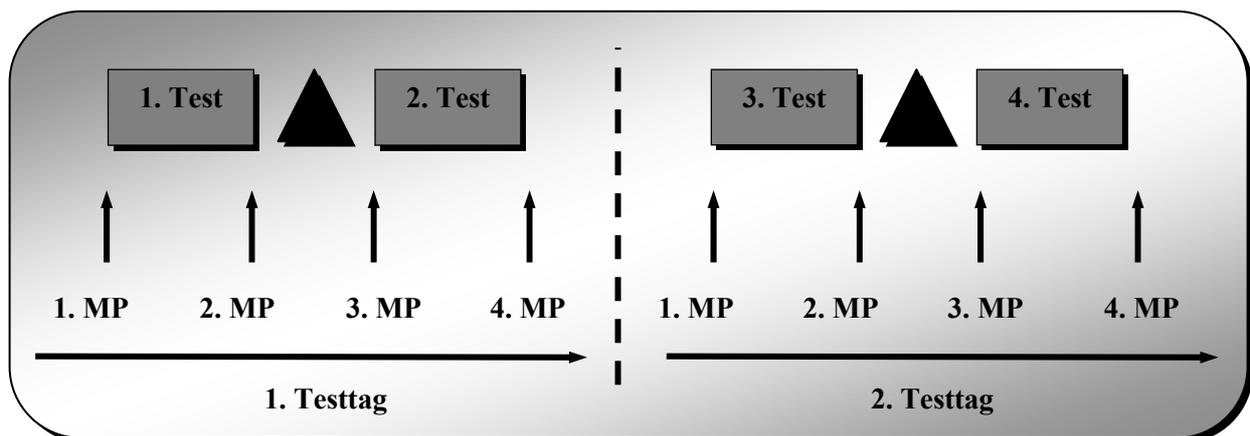


Abbildung 12: Darstellung des Untersuchungsablaufs

▲ = Stepp-Test für die Interventionsgruppe, 1 ½ Minuten Ruhe für die Kontrollgruppe; MP = Messzeitpunkte der Herzfrequenz- und  $S_aO_2$ -Messung

Alle Messtermine fanden jeweils zwischen acht und 18 Uhr mitteleuropäischer Zeit unter gleichen Raumbedingungen statt (Raumtemperatur: 18-21 °C, Luftfeuchtigkeit: 45-60 %). Es wurde darauf geachtet, dass die Messtermine eines Probanden an jeweils vergleichbaren Tageszeiten lagen und jeder Proband vor dem Testdurchlauf 20 Minuten körperlich ruhte.

### **5.3 Untersuchungsverfahren**

#### *5.3.1 Wiener Determinationstest*

Um die Wahlreaktionsfähigkeit der Probanden evaluieren zu können, sollte auf eine bereits in der Wissenschaft etablierte Methode zurückgegriffen werden. Dies trifft sowohl für das Wiener Testsystem als auch den Wiener Determinationstest zu. Der in dieser Arbeit verwendete Wiener Determinationstest (Unterform: S1 kurz) ist als ein Mehrfachreiz-Reaktionstest ausgelegt, anhand dessen Ergebnisse sich Rückschlüsse auf die reaktive Belastbarkeit eines Probanden ziehen lassen. Der Test setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Zum einen werden fünf optische Reize in den Farben Weiß, Gelb, Rot, Grün und Blau auf zehn Feldern dargeboten. Den fünf Farben entspricht je eine farblich markierte Taste auf dem Eingabepanel. Zusätzlich gibt es zwei akustische Signale, die ihr Äquivalent in einer grauen und einer schwarzen Taste auf dem Eingabepanel finden und entsprechend zugeordnet werden müssen. Zwei weiße Lichter, rechts und links unten im Bildschirm angeordnet, repräsentieren die Fußpedale. In der Testdurchführung müssen diese Reize verarbeitet und auf dem Eingabepanel und den zwei Fußtasten korrekt und unter Zeitdruck beantwortet werden. Die Darbietung der Reize erfolgt dabei in einer für den Probanden unbekanntem Reihenfolge und in zeitlich variablen Abständen (KUBITZKI, 1994).

Nach NEUWIRTH & BENESCH (2004) erfordert der Test folgende kognitive Teilleistungen:

- Farb- und Ton-Diskrimination,
- Zuordnung der Merkmale Reizkonfiguration und Bedienungselement,
- Auswahl der geforderten Reaktion nach Zuordnungsregeln.

Die Belastung ergibt sich dabei aus den schnell und kontinuierlich hintereinander geforderten Reaktionen auf unterschiedliche Reize. Daher entsteht die Schwierigkeit für den Probanden, laut NEUWIRTH & BENESCH (2004), hauptsächlich durch die zwei Variablen:

- Geschwindigkeit der Reizdarbietung,
- Anzahl der möglichen Reize.

Die verschiedenen Testformen können in drei unterschiedlichen Reizdarbietungsformen (Modus Reaktion, Aktion und Adaptiv) durchgeführt werden. In dieser Untersuchung wurde die Testform Adaptiv gewählt.

---

Hierbei steuert das Antwortverhalten des Probanden die Darbietungsgeschwindigkeit der Reize. Aus den jeweils acht vorherigen Reaktionszeiten wird die entsprechende Reizdarbietungsdauer ermittelt. „Bei dieser Form der Reizdarbietung bewegt sich der Proband immer an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit.“ (NEUWIRTH & BENESCH, 2004)

Eine Testdurchführung setzt sich aus einer Instruktions-, einer Übungs- und einer Testphase zusammen. Während der Instruktionsphase wird der Proband über ein automatisches Programm schrittweise mit den Reizen und Bedienungselementen vertraut gemacht. In der Übungsphase werden dann Reizkombinationen zur Gewöhnung angeboten. Daran schließt sich die vierminütige Testphase an, in deren Verlauf alle Reize dargeboten werden. Bei der zweiten Testdurchführung eines jeden Untersuchungstages wurde auf die Testinstruktion und Übungsphase verzichtet, so dass der Proband direkt mit der Testdurchführung begann.

Für das hier verwendete Testverfahren (S1) ergeben sich schließlich die in Tabelle 4 aufgeführten Haupttestvariablen.

*Tabelle 4: Haupttestvariablen (nach NEUWIRTH & BENESCH, 2004)*

<b>Variable</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Richtige Reaktionen</b>	<i>Reizadäquate Reaktionen (zeitgerechte und verspätete)</i>
<b>Falsche Reaktionen</b>	<i>Jede nicht reizadäquate Reaktion</i>
<b>Ausgelassene Reaktionen</b>	<i>Keine Reaktion innerhalb der Darbietungszeit und später</i>

Zusätzlich zu den Haupttestvariablen sollen ergänzend noch die in Tabelle 5 aufgeführten Nebentestvariablen in den Ergebnissen aufgeführt werden. Da die Reaktionszeit in dem in dieser Arbeit verwendeten Untertestverfahren (S1) jeweils individuell an die Leistungsfähigkeit der Probanden angepasst wird, gelten diese Variablen für das Testergebnis als nicht aussagekräftig. Sie ermöglichen jedoch einen vergleichenden Überblick über die absolvierten Tests der Probanden.

*Tabelle 5: Nebentestvariablen*

<b>Variable</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Median der Reaktionszeit</b>	<i>Median der für die Antworten benötigten Zeit</i>
<b>Dargebotene Reize</b>	<i>Anzahl der Reize, die den Probanden dargeboten wurden</i>

### 5.3.2 *Belastungstest*

Für die Interventionsgruppe wurde ein modifizierter Harvard-Stepp-Test als Belastungstest angewandt. Die Probanden bestiegen einen Stepper der Firma Reebok 30mal innerhalb einer Minute. Dabei gab der Testleiter einen Rhythmus vor, so dass jeder Teilnehmer den Test in gleichbleibendem Tempo durchführen konnte. Der Stepper war bei allen Tests auf die mittlere Höheneinstellung von 20,3 cm eingestellt.

### 5.3.3 *Messung der Sauerstoffsättigung*

Mittels eines Gerätes der Firma Nellcor Puritan Bennett wurden die  $S_aO_2$ -Werte ermittelt. Die Messung erfolgte jeweils vor und nach den Determinationstests am Ringfinger der linken Hand (nähere Angaben zum Messverfahren folgen in Tabelle 6). Während des Stepp-Tests wurde die  $S_aO_2$  kontinuierlich aufgezeichnet, um Überlastungen der Probanden zu vermeiden.

### 5.3.4 *Messung der Herzfrequenz*

Die Herzfrequenzmessung wurde gleichzeitig zur Messung der  $S_aO_2$  durchgeführt. Auch hierzu wurde das Pulsoxymeter der Firma Nellcor Puritan Bennett verwendet. Die Messzeitpunkte lagen parallel zu denen der  $S_aO_2$ -Messung.

---

## 5.4 Untersuchungsmaterial

Table 6: Untersuchungsmaterial (enthält Abbildungen 13, 14 und 15)

<b>Determinationstest:</b> Wiener Testsystem der Firma Schuhfried	
<p>Der Wiener Determinationstest ist ein komplexer Mehrfachreiz-Reaktionstest. Hierbei muss sowohl auf Farbreize, als auch auf akustische Signale unter Zeitdruck reagiert werden. Auf einem Computerbildschirm werden zehn unterschiedliche Farbreize in zwei Reihen angezeigt. Zusätzlich werden zwei weitere Reize im linken und rechten unteren Bildschirm und über einen Kopfhörer zwei Töne dargeboten. Der Proband reagiert auf den entsprechenden Reiz, indem er auf dem Universalpanel die farblich zugeordneten Tasten drückt. Den Tönen sind je eine Taste für den hohen und eine für den tiefen Ton zugeordnet. Mit zwei Fußpedalen werden die beiden Reize im linken und rechten unteren Bildschirm beantwortet. Zur zeitkorrekten Darstellung der Reize wird ein Röhrenbildschirm mit 17 Zoll Bilddiagonalen mit der vom Hersteller geforderten optimalen BildschirmEinstellung verwandt. Über einen Laptop konnte der Testleiter das Programm steuern. Die Systemeinstellungen wurden den Herstellerangaben folgend vorgenommen.</p>	
<b>Pulsoxymeter:</b> Nellcor Puritan Bennett	
<p>Die <math>S_aO_2</math> und die Herzfrequenz werden photometrisch über die unterschiedliche Absorption von oxygeniertem und reduziertem Hämoglobin bei verschiedenen Wellenlängen des emittierten Lichts gemessen. Die Werte der <math>S_aO_2</math> und Herzfrequenz können direkt auf dem Gerätedisplay abgelesen werden.</p>	
<b>Stepper:</b> Reebok	
<p>Der Aerobic-Stepper ist auf drei unterschiedliche Höhen einstellbar (15,2 cm, 20,3 cm und 25,4 cm). Die gummierte Oberfläche ermöglicht einen rutschfesten Stand.</p>	

## 5.5 Statistische Methoden

Die in den Untersuchungen ermittelten Daten wurden mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS (Version 10.0) der Firma Microsoft berechnet und ausgewertet. Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung berechnet (BÜHL & ZÖFEL, 2000<sup>7</sup>).

Zur Überprüfung der Untersuchungshypothesen wurden Methoden der Inferenzstatistik genutzt. Dabei fand der Wilcoxon Rangsummentest als ein parameterfreies Testverfahren für zwei verbundene Stichproben zur Überprüfung der Hypothese, dass beide Stichproben dieselbe Verteilung haben, Verwendung. Er wichtet die Differenzen zwischen zwei gepaarten Variablen und bildet daraus Rangfolgen, auf denen die statistische Auswertung beruht (HEINECKE ET AL., 1992).

$$r_w = n_1(n_1 + n_2 + 1) - W_{n_1, n_2, \alpha}$$

*Gleichung 2: Wilcoxon Rangsummentest (nach HEINECKE ET AL., 1992)*

$r_w$  = Wilcox Rangsummentest (empirisch);  $n_1$  = Anzahl der Elemente in Gruppe 1;

$n_2$  = Anzahl der Elemente in Vergleichsgruppe;  $W_{n_1, n_2, \alpha}$  = Kritischer Wert des

Wilcoxon Rangsummen-Test (Tabellenwert)

Zeigt sich im Wilcoxon Rangsummentest  $r_w < \sum$  Ränge der Aktion, so ist die Nullhypothese zu verwerfen und die Aktion ist als signifikant zu betrachten. Ist hingegen  $r_w \geq \sum$  Ränge der Aktion, so ist die Nullhypothese nicht zu verwerfen und die Aktion folglich nicht signifikant (HEINECKE ET AL., 1992).

In der vorliegenden Arbeit wurde bezüglich des Datenmaterials ein Konfidenzintervall von 95 % definiert. Entsprechend liegt die Sicherheitswahrscheinlichkeit bei 95 % und die Irrtumswahrscheinlichkeit (p) bei 5 %. Es gelten für diese Untersuchung schließlich die in Tabelle 7 dargestellten Signifikanzgrenzen.

*Tabelle 7: Grenzen der Signifikanzbereiche*

Irrtumswahrscheinlichkeit	Bedeutung	Symbol
$p > 0,050$	nicht signifikant	
$p \leq 0,050$	signifikant	*
$p \leq 0,010$	sehr signifikant	**
$p \leq 0,001$	hochsignifikant	***

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit

## 6 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Im folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt werden. Im Rahmen der deskriptiven Statistik werden dabei Mittelwerte und Standardabweichungen präsentiert und ergänzend durch die analytische Statistik auf Signifikanzen überprüft und dargestellt.

Das Kapitel beginnt mit der Darstellung der physiologischen Veränderungen der Probanden, im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der Determinationstests miteinander verglichen. Hierzu werden erst die Gesamtergebnisse der Untersuchungstage und schließlich die Resultate der einzelnen Determinationstests gezeigt. Die Ergebnisse der Interventionsgruppe werden jeweils zuerst präsentiert, darauf folgen die Ergebnisse der Kontrollgruppe.

Der Untersuchungsang und die jeweiligen Messzeitpunkte sind der Übersicht halber nochmals in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Untersuchungsgang und Messzeitpunkte

Untersuchungsgang	Interventionsgruppe	Kontrollgruppe
<b>1. Testtag</b>	<i>3100 m ü. N.N.</i>	<i>57 m ü. N.N.</i>
	<i>1. Messpunkt</i>	<i>1. Messpunkt</i>
	<b>1. Determinationstest</b>	<b>1. Determinationstest</b>
	<i>2. Messpunkt</i>	<i>2. Messpunkt</i>
	<b>Stepp-Test</b>	<i>Pause</i>
	<i>3. Messpunkt</i>	<i>3. Messpunkt</i>
	<b>2. Determinationstest</b>	<b>2. Determinationstest</b>
	<i>4. Messpunkt</i>	<i>4. Messpunkt</i>
<b>2. Testtag</b>	<i>57 m ü. N.N.</i>	<i>57 m ü. N.N.</i>
	<i>1. Messpunkt</i>	<i>1. Messpunkt</i>
	<b>3. Determinationstest</b>	<b>3. Determinationstest</b>
	<i>2. Messpunkt</i>	<i>2. Messpunkt</i>
	<b>Stepp-Test</b>	<i>Pause</i>
	<i>3. Messpunkt</i>	<i>3. Messpunkt</i>
	<b>4. Determinationstest</b>	<b>4. Determinationstest</b>
	<i>4. Messpunkt</i>	<i>4. Messpunkt</i>

## 6.1 Darstellung der physiologischen Parameter

### 6.1.1 Darstellung der Änderung der Herzfrequenz

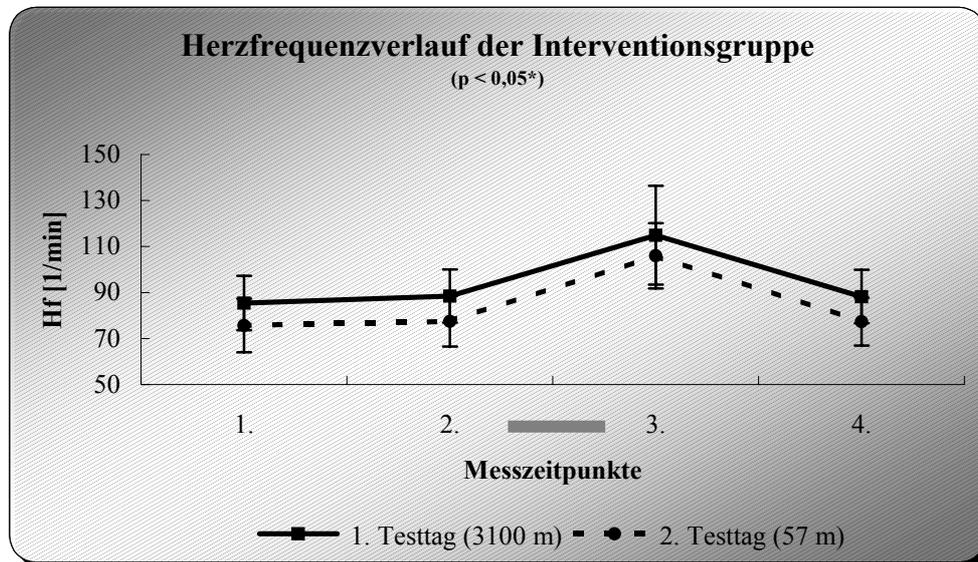


Abbildung 16: Herzfrequenzverlauf der Interventionsgruppe mit Standardabweichung  
Hf [1/min] = Herzfrequenz [pro Minute]; ■ = Stepp-Test

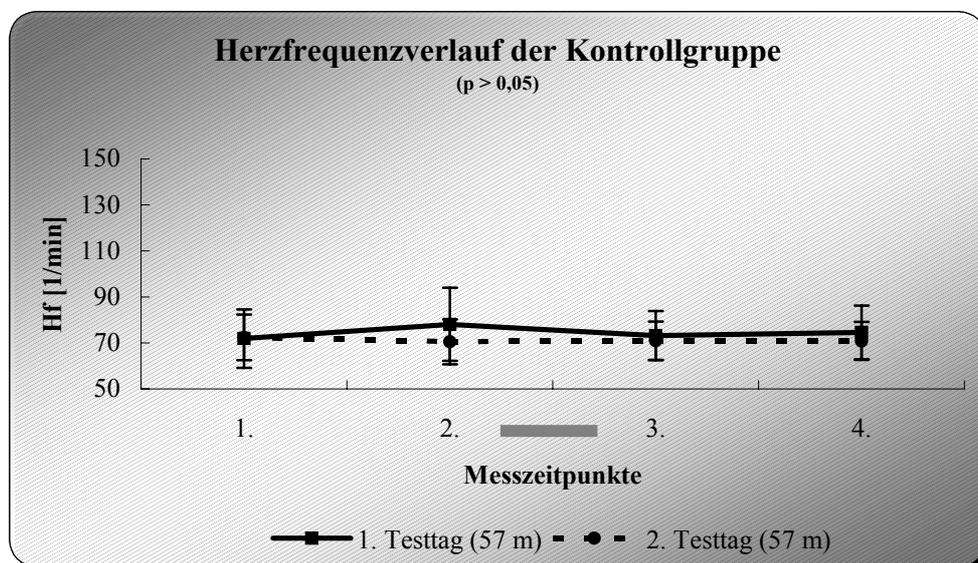


Abbildung 17: Herzfrequenzverlauf der Kontrollgruppe mit Standardabweichung  
Hf [1/min] = Herzfrequenz [pro Minute]; ■ = Pause

### *Interventionsgruppe*

In der Interventionsgruppe ergab sich für die erste Messung am ersten Testtag (3100 m) ein mittlerer Wert für die Herzfrequenz von  $85,4 \pm 11,8 \text{ min}^{-1}$  und  $88,5 \pm 11,5 \text{ min}^{-1}$  für die zweite Messung. Nach der Belastung war die Herzfrequenz auf  $114,9 \pm 21,4 \text{ min}^{-1}$  (dritter Messpunkt) erhöht und fiel am Ende des zweiten Tests wieder auf  $88,2 \pm 11,6 \text{ min}^{-1}$  ab (vierter Messpunkt).

Am zweiten Testtag auf 57 m lag der Eingangswert der Herzfrequenz bei  $75,7 \pm 11,7 \text{ min}^{-1}$ , bei der zweiten Messung bei  $77,5 \pm 10,9 \text{ min}^{-1}$  und nach der Belastung bei  $106 \pm 14,2 \text{ min}^{-1}$  (dritte Messung). Am Ende des letzten Determinationstests wurde die Herzfrequenz mit  $77,4 \pm 10,4 \text{ min}^{-1}$  (vierter Messpunkt) festgestellt.

Zwischen dem ersten und dem zweiten Testtag ergaben sich für die Interventionsgruppe signifikante und sehr signifikante Unterschiede der Herzfrequenzen. Die Werte der ersten Messzeitpunkte unterschieden sich sehr signifikant ( $p = 0,008^{**}$ ). Die übrigen Messzeitpunkte zeigten einen signifikanten Unterschied auf (zweiter Messpunkt:  $p = 0,013^{*}$ ; dritter Messpunkt:  $p = 0,045^{*}$ ; vierter Messpunkt:  $p = 0,012^{*}$ ).

### *Kontrollgruppe*

Die Kontrollgruppe hatte am ersten Testtag (57 m) in Ruhe einen mittleren Herzfrequenzwert von  $71,9 \pm 12,7 \text{ min}^{-1}$ . Bei der zweiten Messung lag dieser bei  $78,1 \pm 15,9 \text{ min}^{-1}$ , dann bei  $73,2 \pm 10,7 \text{ min}^{-1}$  (dritte Messung) und schließlich bei  $74,6 \pm 11,7 \text{ min}^{-1}$  (vierte Messung).

Am zweiten Testtag (57 m) wurde die Eingangsherzfrequenz (erste Messung) im Mittel mit  $72,4 \pm 10 \text{ min}^{-1}$  bestimmt, in der zweiten Messung mit  $70,5 \pm 9,8 \text{ min}^{-1}$ , der dritten mit  $71 \pm 8,4 \text{ min}^{-1}$  und in der Abschlussmessung (vierte) mit  $70,9 \pm 8,2 \text{ min}^{-1}$ .

In der Kontrollgruppe zeigten sich im Vergleich des ersten mit dem zweiten Testtages keine signifikanten Unterschiede.

---

## 6.1.2 Darstellung der Änderungen der Sauerstoffsättigung

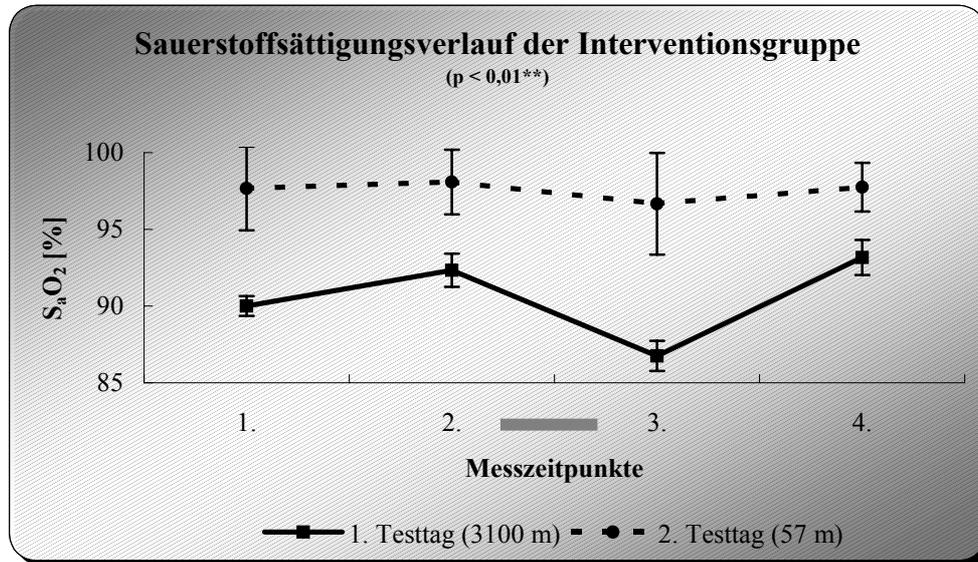


Abbildung 18: Sauerstoffsättigungsverlauf der Interventionsgruppe mit Standardabweichung

$S_aO_2$  [%] = arterielle Sauerstoffsättigung [in Prozent]; ■ = Stepp-Test

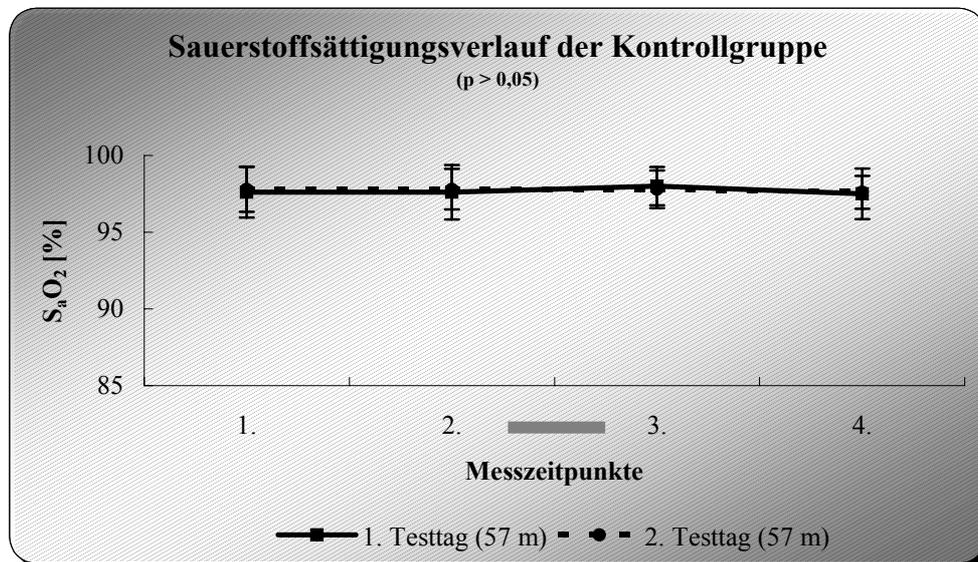


Abbildung 19: Sauerstoffsättigungsverlauf der Kontrollgruppe mit Standardabweichung

$S_aO_2$  [%] = arterielle Sauerstoffsättigung [in Prozent]; ■ = Pause

### *Interventionsgruppe*

Die Probanden der Interventionsgruppe hatten im Mittel bei der ersten Messung auf 3100 m eine  $S_aO_2$  von  $90 \pm 0,7$  %. In der zweiten Messung stieg diese auf  $92 \pm 1,1$  % und fiel nach dem Belastungstest (dritter Messpunkt) auf  $86,7 \pm 1$  % ab. Zum vierten und damit letzten Messzeitpunkt war die  $S_aO_2$  wieder auf  $93 \pm 1,1$  % gestiegen.

Auf 57 m wurden die Werte der  $S_aO_2$  in der Interventionsgruppe zum ersten Messzeitpunkt mit  $97,7 \pm 2,7$  % bestimmt. Zum zweiten Messzeitpunkt stiegen die Werte im Mittel auf  $98 \pm 2,1$  % und fielen nach der Belastung (dritter Messpunkt) auf  $96,7 \pm 3,3$  % ab. Der Mittelwert der letzten Messung (vierter Messpunkt) lag schließlich bei  $97,8 \pm 1,6$  %.

Beim Vergleich dieser Werte ergaben sich in der Interferenzstatistik für jeden Messzeitpunkt sehr signifikante Werte (erster Messpunkt:  $p = 0,002^{**}$ ; zweiter Messpunkt:  $p = 0,002^{**}$ ; dritter Messpunkt:  $p = 0,002^{**}$ ; vierter Messpunkt:  $p = 0,002^{**}$ ).

### *Kontrollgruppe*

Eine  $S_aO_2$  von  $97,6 \pm 1,7$  % wurde im Mittel bei der ersten Messung am ersten Testtag bestimmt. Bei der zweiten Messung lag sie bei  $97,6 \pm 1,8$  % und stieg zur dritten Messung auf  $98 \pm 1,3$  %. In der vierten und letzten Messung ergab sich eine mittlere  $S_aO_2$  von  $97,5 \pm 1,7$  %.

Am zweiten Testtag änderten sich die Werte im Vergleich zum ersten Testtag kaum. In der ersten Messung lagen sie bei  $97,8 \pm 1,5$  %, in der zweiten Messung bei  $97,8 \pm 1,3$  % und in der dritten bei  $97,8 \pm 1,2$  %. Der Wert der vierten Messung lag schließlich bei  $97,6 \pm 1,1$  %.

Es ergaben sich auch für die Werte der  $S_aO_2$  im Vergleich der beiden Testtage keine signifikanten Unterschiede.

---

## 6.2 Darstellung der Ergebnisse der Determinationstests

### 6.2.1 Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse der Interventionsgruppe

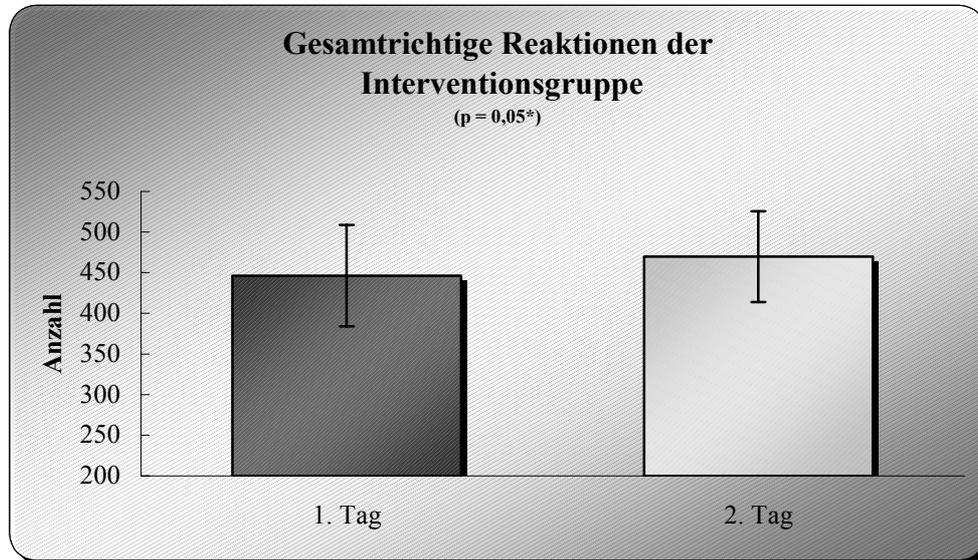


Abbildung 20: Gesamtrichtige Reaktionen der Interventionsgruppe mit Standardabweichung

1. Tag = 3100 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.;

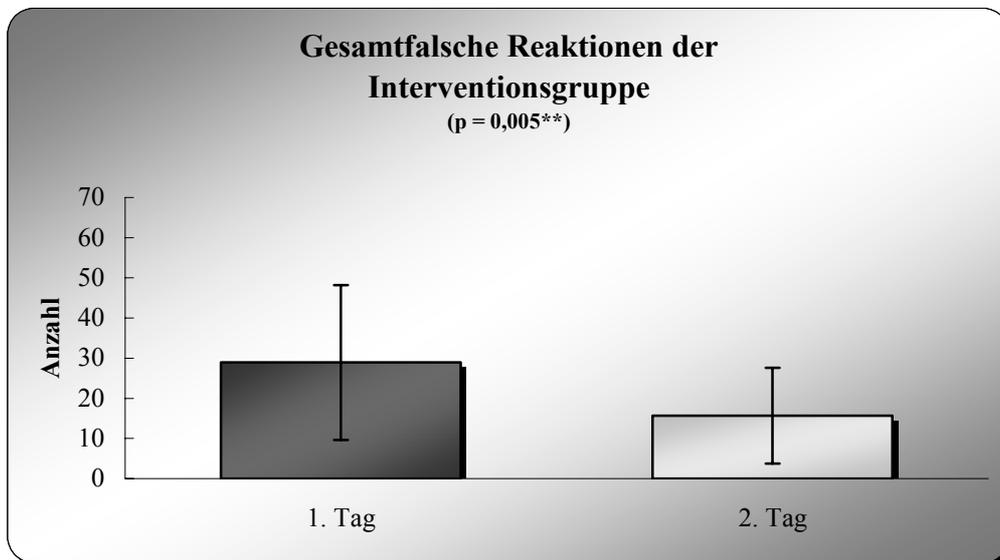


Abbildung 21: Gesamtfalsche Reaktionen der Interventionsgruppe mit Standardabweichung

1. Tag = 3100 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

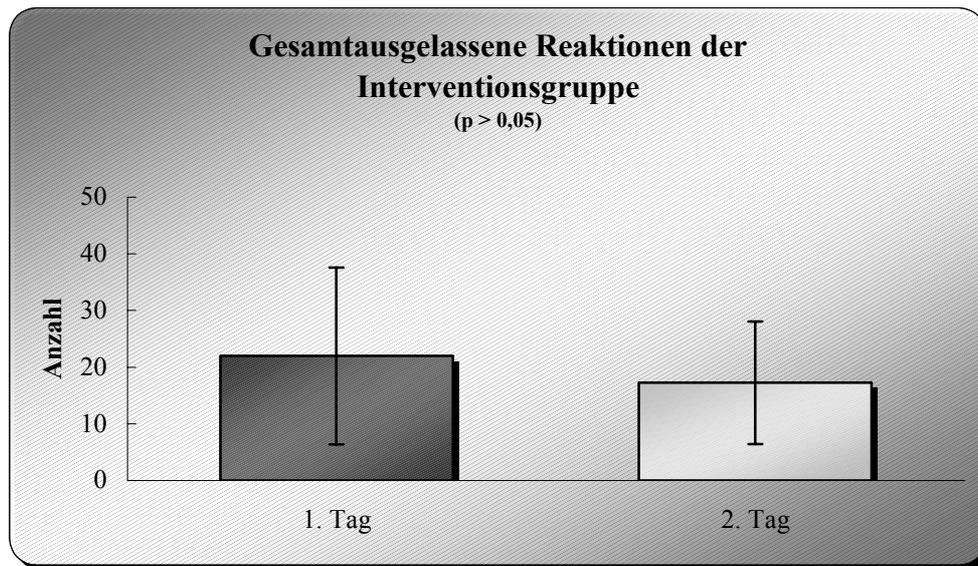


Abbildung 22: Gesamtausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe mit Standardabweichung

1. Tag = 3100 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

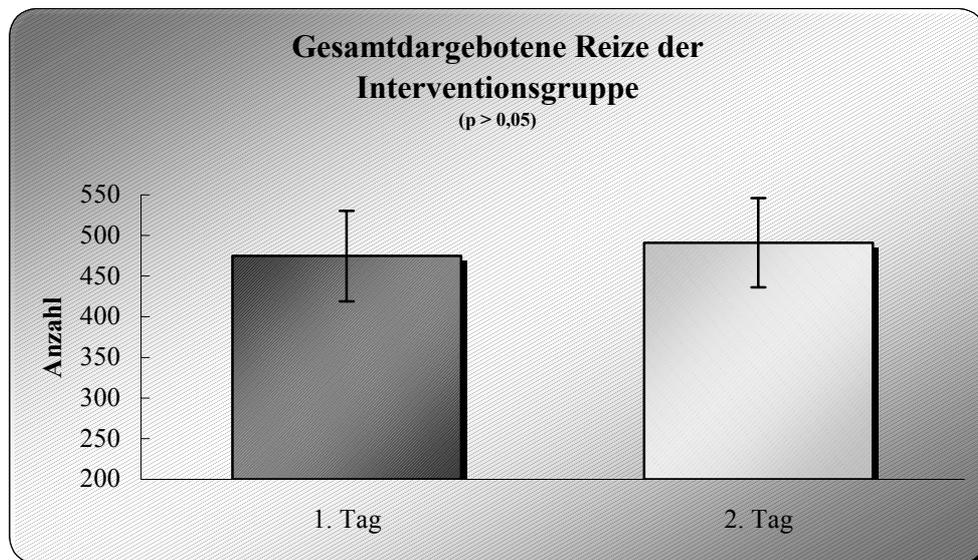


Abbildung 23: Gesamtdargebotene Reize der Interventionsgruppe mit Standardabweichung

1. Tag = 3100 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

*Gesamtrichtige Reaktionen der Interventionsgruppe*

Am ersten Testtag (3100 m) reagierten die Probanden in beiden Determinationstests insgesamt  $446,3 \pm 62,2$  mal richtig. Am zweiten Testtag in 57 m reagierten sie  $474,8 \pm 55,7$  mal richtig.

Somit konnten die Probanden am ersten Testtag  $93,8 \pm 4,6$  % der dargebotenen Reize richtig beantworten, am zweiten Testtag waren dies  $95,5 \pm 2,8$  %.

Die beiden Ergebnisse unterschieden sich signifikant ( $p = 0,05^*$ ).

*Gesamtfalsche Reaktionen der Interventionsgruppe*

Auf 3100 m antworteten die Probanden der Interventionsgruppe in beiden Determinationstests insgesamt  $28,9 \pm 19,3$  mal falsch. Auf 57 m sank dieser Wert auf  $15,7 \pm 11,9$  Falschreaktionen. Im prozentualen Verhältnis zu den dargebotenen Reizen haben die Probanden der Interventionsgruppe somit am ersten Versuchstag  $6,28 \pm 4,48$  %, am zweiten jedoch lediglich  $3,29 \pm 2,68$  % der Reize falsch beantwortet.

Für den Vergleich der absoluten Werte ergab sich ein sehr signifikanter Unterschied ( $p = 0,007^{**}$ ). Ebenso ergab sich für die im prozentualen Verhältnis der gesamtfalschen Reaktionen zu den gesamtangebotenen Reizen ein sehr signifikanter Unterschied ( $p = 0,005^{**}$ ).

*Gesamtausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe*

Die Teilnehmer der Interventionsgruppe konnten in der Höhe auf  $22 \pm 15,6$  Reize nicht reagieren. Auf einer Höhe von 57 m wurden  $17,3 \pm 10,8$  Antworten ausgelassen. Es wurden somit auf 3100 m  $4,73 \pm 3,29$  % der dargebotenen Reize ausgelassen, auf 57 m waren dies  $3,6 \pm 2,37$  % der dargebotenen Reize.

Es ließen sich für die „gesamtausgelassenen Reaktionen“ keine signifikanten Unterschiede zeigen.

*Gesamtdargebotene Reize der Interventionsgruppe*

Am ersten Testtag wurden den Teilnehmern der Interventionsgruppe im Durchschnitt insgesamt  $474,75 \pm 55,7$  Reize präsentiert, am zweiten Testtag waren dies  $491,17 \pm 54,85$  Reize.

Für die Anzahl der dargebotenen Reize ließ sich kein signifikanter Unterschied nachweisen.

---

## 6.2.2 Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse der Kontrollgruppe

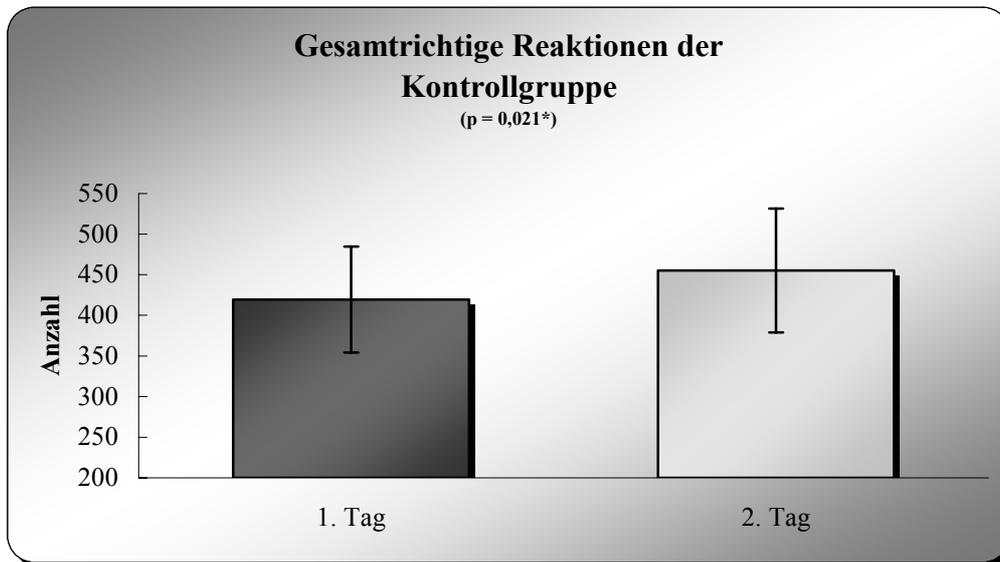


Abbildung 24: Gesamtrichtige Reaktionen der Kontrollgruppe mit Standardabweichung  
1. Tag = 57 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

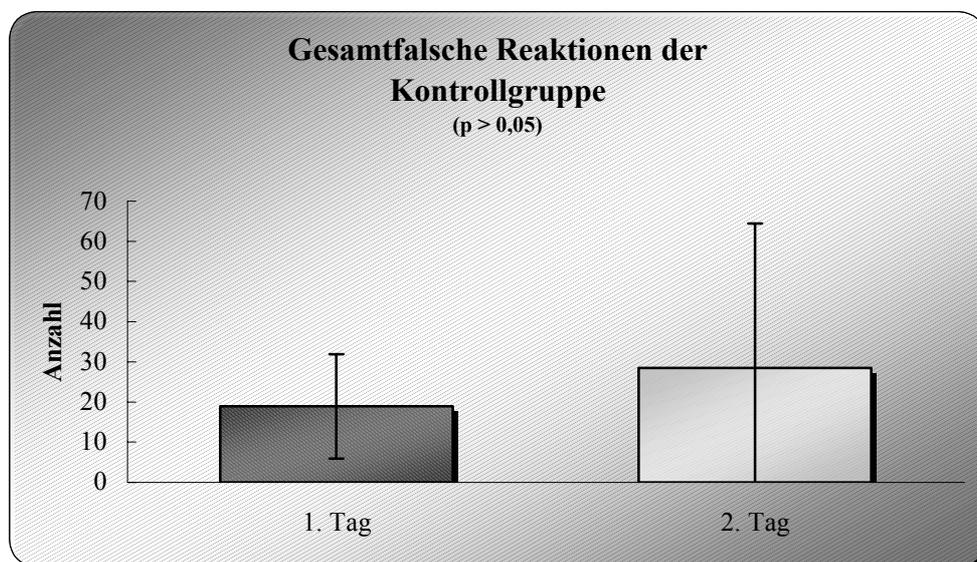


Abbildung 25: Gesamtfalsche Reaktionen der Kontrollgruppe mit Standardabweichung  
1. Tag = 57 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

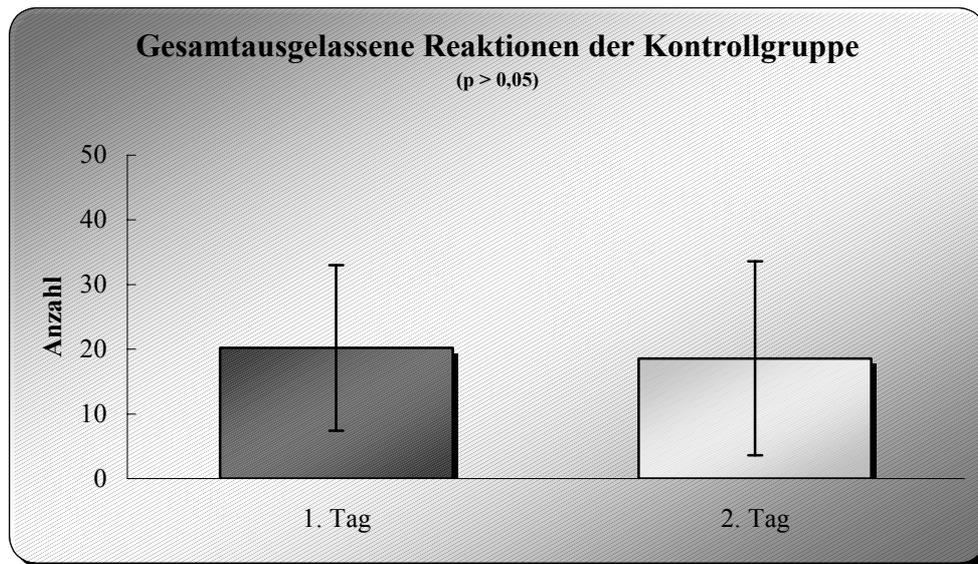


Abbildung 26: Gesamtausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe mit Standardabweichung

1. Tag = 57 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

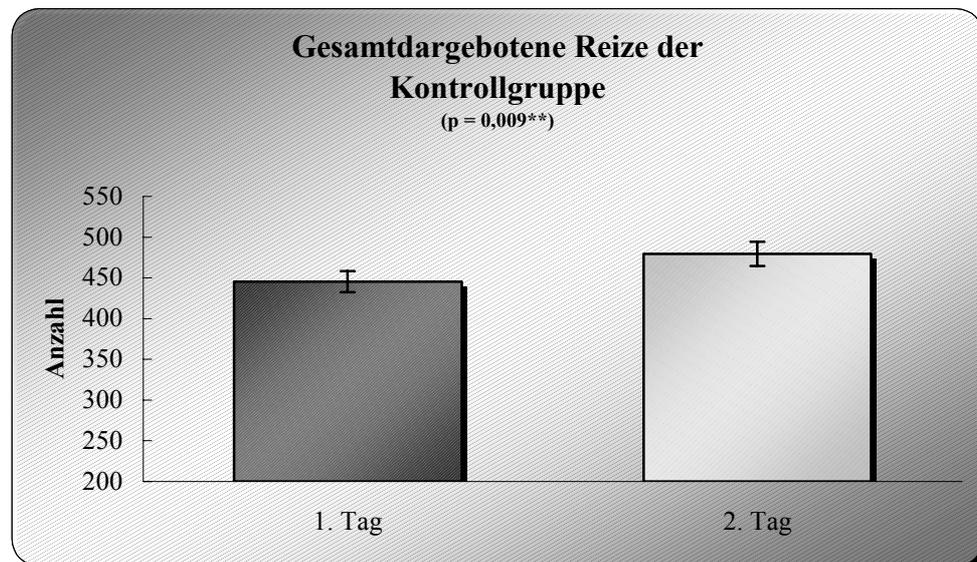


Abbildung 27: Gesamtdargebotene Reize der Kontrollgruppe mit Standardabweichung

1. Tag = 57 m über N.N.; 2. Tag = 57 m über N.N.

*Gesamtrichtige Reaktionen der Kontrollgruppe*

Die Kontrollgruppe beantwortete am ersten Testtag insgesamt  $419,4 \pm 65,3$  Reize korrekt. Am zweiten Testtag erreichte sie  $455,4 \pm 76,3$  richtige Antworten. Von den dargebotenen Reizen konnte die Kontrollgruppe somit am ersten Testtag  $94 \pm 3,79$  % richtig beantworten, am zweiten waren dies  $94,7 \pm 4,69$  %.

Hier ließ sich ein signifikanter Unterschied feststellen ( $p = 0,021$  \*).

*Gesamtfalsche Reaktionen der Kontrollgruppe*

Die Gesamtzahl der falschen Antworten wurde am ersten Testtag mit  $18,9 \pm 13$  bestimmt. Sie ergab sich am zweiten Testtag mit  $28,5 \pm 35,9$ . Somit ergab sich ein prozentuales Verhältnis zu den dargebotenen Reizen von  $4,19 \pm 2,89$  % und  $6,87 \pm 10,6$  %.

Für die gesamtfalschen Reaktionen und auch deren Verhältnis zu den dargebotenen Reizen ließ sich bei der Kontrollgruppe kein signifikanter Unterschied nachweisen.

*Gesamtausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe*

Es wurden von der Kontrollgruppe am ersten Testtag insgesamt  $20,2 \pm 12,8$  Reize nicht beantwortet. Die Zahl der nicht beantworteten Reize betrug am zweiten Testtag  $18,6 \pm 15$ . Die Kontrollgruppe ließ am ersten Testtag  $4,7 \pm 3,19$  % der dargebotenen Reize aus, am zweiten Testtag waren dies  $4,17 \pm 3,74$  %.

Auch hier ließen sich keine signifikanten Unterschiede nachweisen.

*Gesamtdargestellte Reize der Kontrollgruppe*

$445,4 \pm 61,9$  Reize wurden der Kontrollgruppe am ersten Testtag präsentiert. Am zweiten Testtag stieg die Anzahl auf  $479,4 \pm 67,46$  Reize.

Hierbei ließ sich ein sehr signifikanter Unterschied ( $p = 0,009$  \*\*) nachweisen.

---

### 6.2.3 Vergleich der Ergebnisse des ersten und dritten Tests der Interventionsgruppe

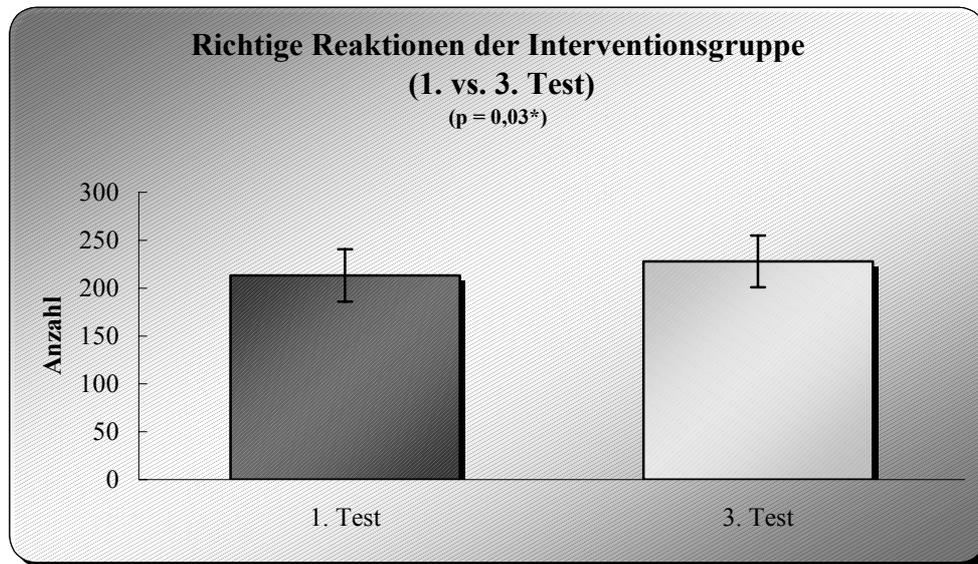


Abbildung 28: Richtige Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 3100 m über N.N.; 3. Test = 57 m über N.N.

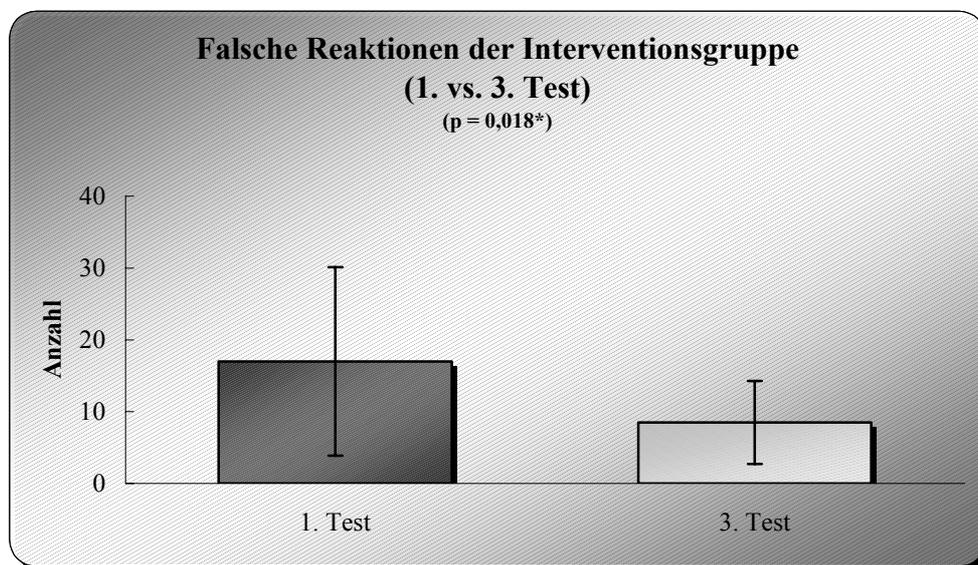


Abbildung 29: Falsche Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 3100 m über N.N.; 3. Test = 57 m über N.N.

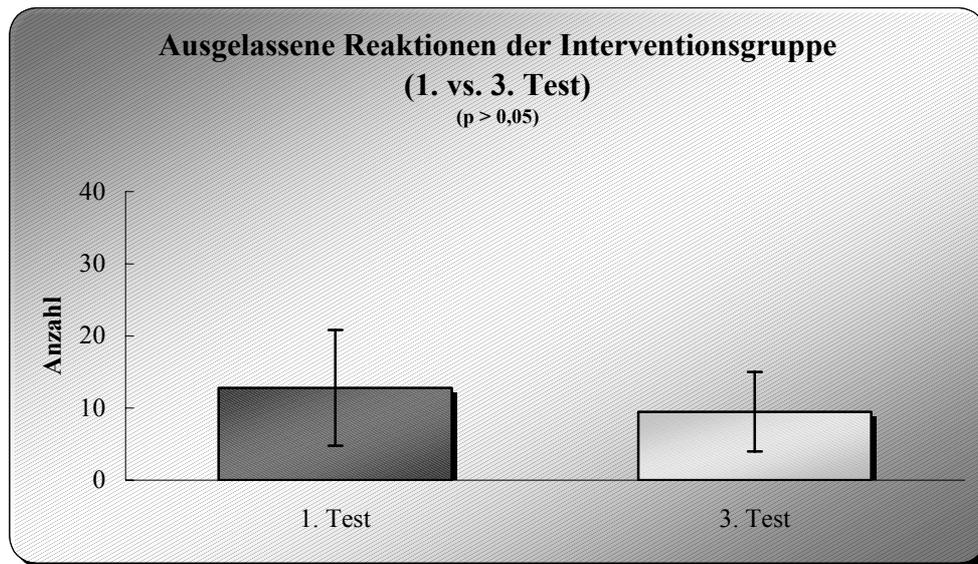


Abbildung 30: Ausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 3100 m über N.N.; 3. Test = 57 m über N.N.

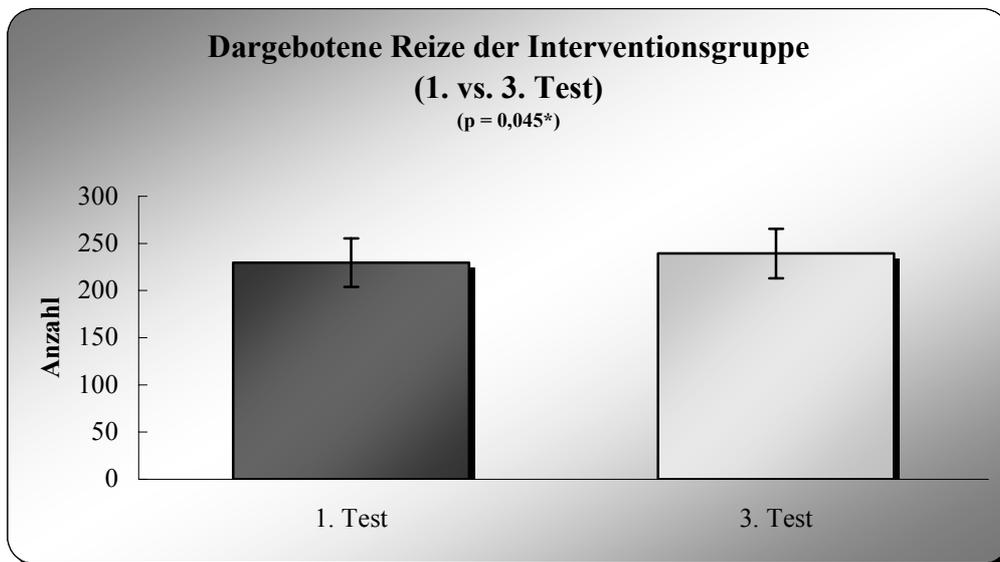


Abbildung 31: Dargebotene Reize der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 3100 m über N.N.; 3. Test = 57 m über N.N.

*Richtige Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test)*

Bei der Durchführung des ersten Determinationstests auf 3100 m erzielten die Probanden im Mittel  $213,3 \pm 27,4$  richtige Reaktionen. Auf 57 m erreichen sie beim dritten Test  $227,08 \pm 27$  richtige Antworten.

Die Werte dieser Tests unterschieden sich signifikant ( $p = 0,03^*$ ).

*Falsche Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test)*

Durchschnittlich  $17 \pm 13,11$  falsche Antworten wurden beim ersten Test in 3100 m gegeben. Am zweiten Testtag fiel dieser Wert auf  $8,5 \pm 5,8$  falsche Antworten beim dritten Test.

Durch die Interferenzstatistik ließ sich ein signifikanter Unterschied nachweisen ( $p = 0,018^*$ ).

*Ausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test)*

Die Probanden ließen beim ersten Determinationstest auf 3100 m im Mittel  $12,8 \pm 8$  Antworten aus. Auf einer Höhe von 57 m ließen sie im dritten Determinationstest  $9,5 \pm 5,5$  Reize unbeantwortet.

Hierbei ergab sich kein signifikanter Unterschied.

*Dargebotene Reize der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test)*

Im ersten Test (3100 m) wurden  $229,67 \pm 25,66$  Reize von den Probanden bearbeitet. Im dritten Test auf 57 m waren es  $239,25 \pm 26,28$  Reize, die dargestellt wurden.

Die Anzahl der dargestellten Reize unterschied sich signifikant ( $p = 0,045^*$ ) zwischen dem ersten und dem dritten Test der Interventionsgruppe.

---

## 6.2.4 Vergleich der Ergebnisse des zweiten und vierten Tests der Interventionsgruppe

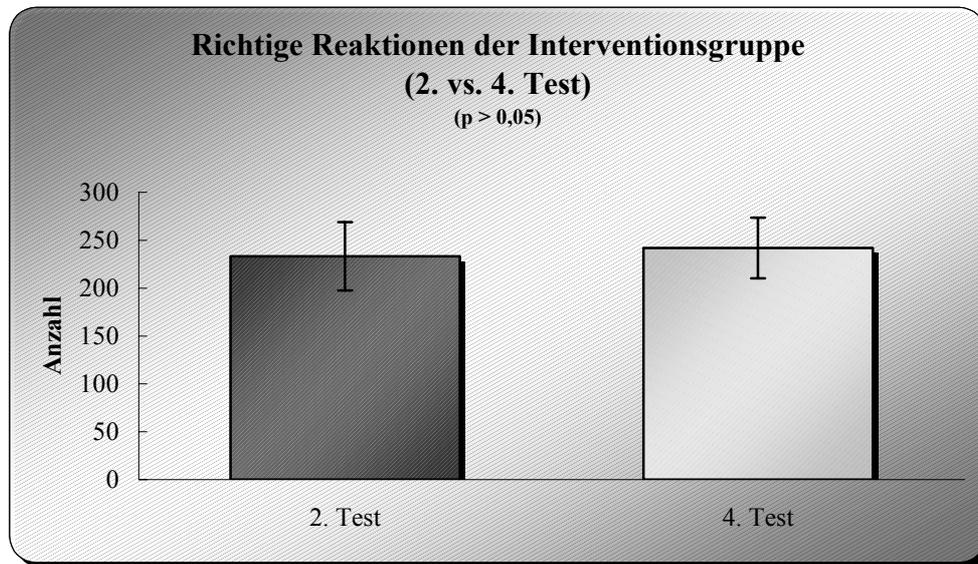


Abbildung 32: Richtige Reaktionen der Interventionsgruppe (2. Test vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 3100 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

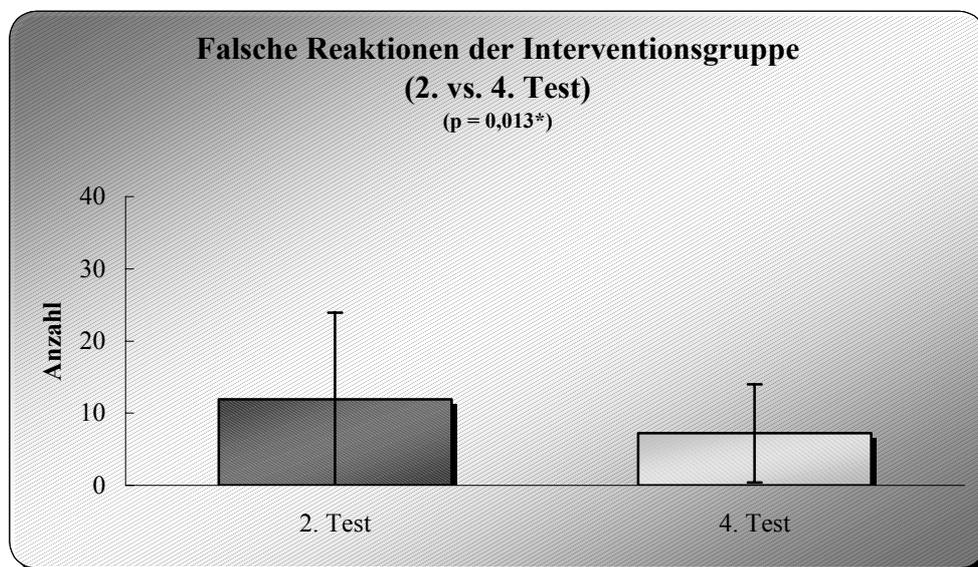


Abbildung 33: Falsche Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 3100 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

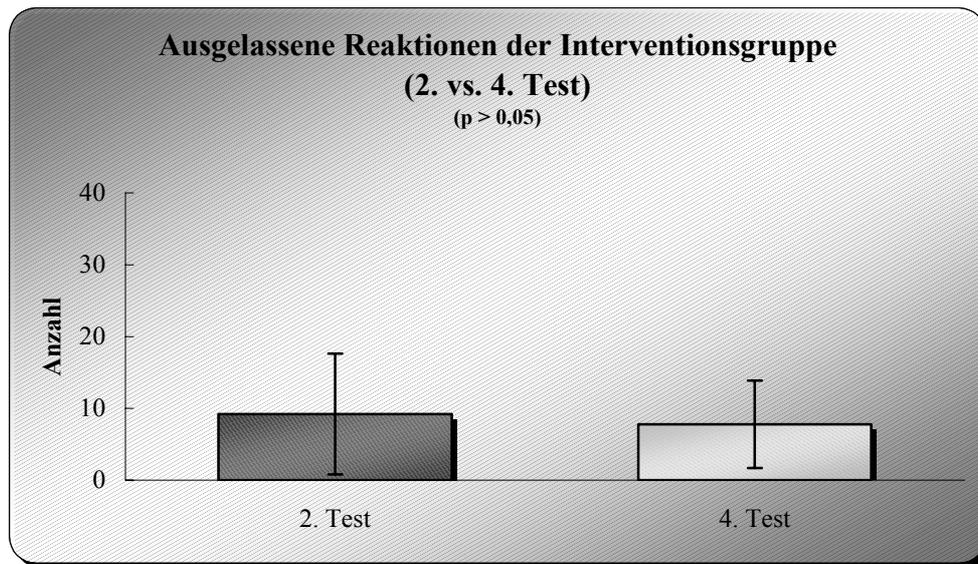


Abbildung 34: Ausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 3100 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

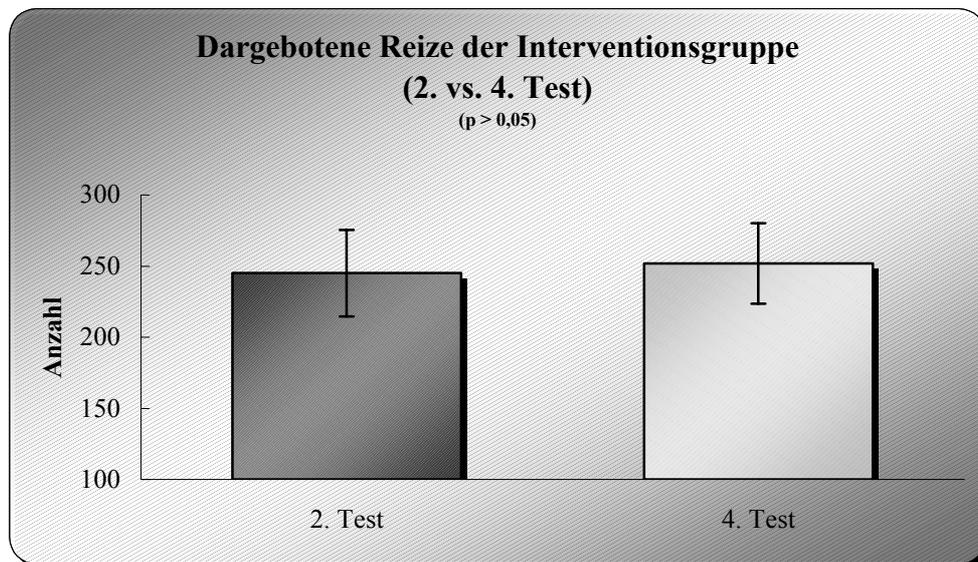


Abbildung 35: Dargebotene Reize der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 3100 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

*Richtige Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test)*

Nach der Belastung (zweiter Test) erreichten die Probanden am ersten Testtag  $233,1 \pm 35,7$  richtige Antworten. Im vierten Determinationstest (57 m) wurden von den Probanden  $242 \pm 31,6$  richtige Antworten erzielt.

Diese Ergebnisse unterschieden sich nicht signifikant.

*Falsche Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test)*

Im zweiten Determinationstest auf 3100 m reagierten die Teilnehmer  $11,9 \pm 12$  mal falsch. Auf der Höhe von 57 m wurden nur  $7,2 \pm 6,8$  falsche Reaktionen festgestellt (vierter Test).

Die Werte der falschen Reaktionen unterschieden sich signifikant. ( $p = 0,013^*$ )

*Ausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test)*

$9,2 \pm 8,4$  Reize wurden im zweiten Test auf 3100 m nicht beantwortet. Beim vierten Determinationstest auf 57 m waren dies  $7,8 \pm 6,1$  Reize.

Für die ausgelassenen Werte ließen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen.

*Dargebotene Reize der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test)*

Im zweiten Test wurden  $245,08 \pm 30,45$  Reize dargeboten. Im vierten Test wurden den Probanden schließlich  $251,92 \pm 28,29$  Reize präsentiert.

Es ließ sich kein signifikanter Unterschied nachweisen.

---

## 6.2.5 Vergleich der Ergebnisse des ersten und dritten Tests der Kontrollgruppe

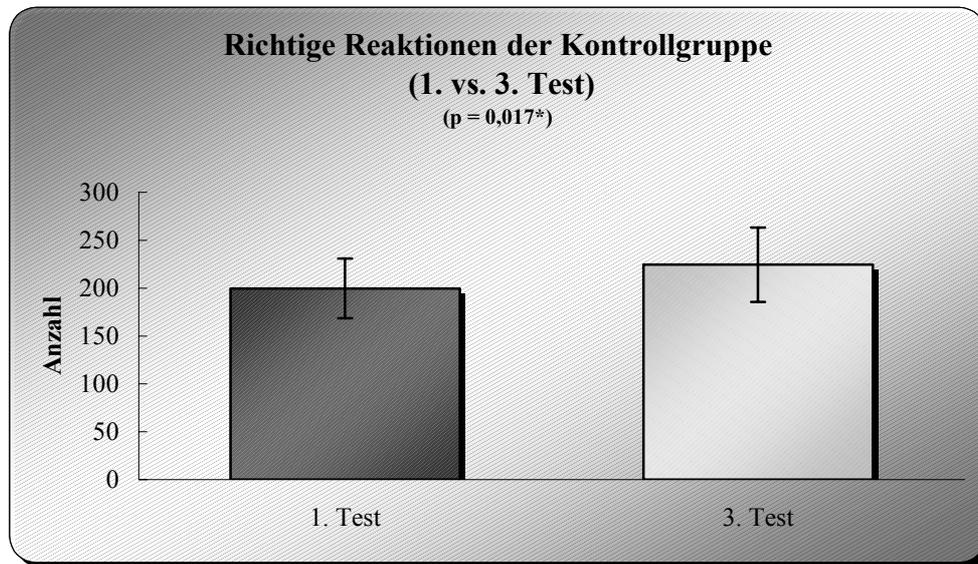


Abbildung 36: Richtige Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 57 m über N.N.; 2. Test = 57 m über N.N.

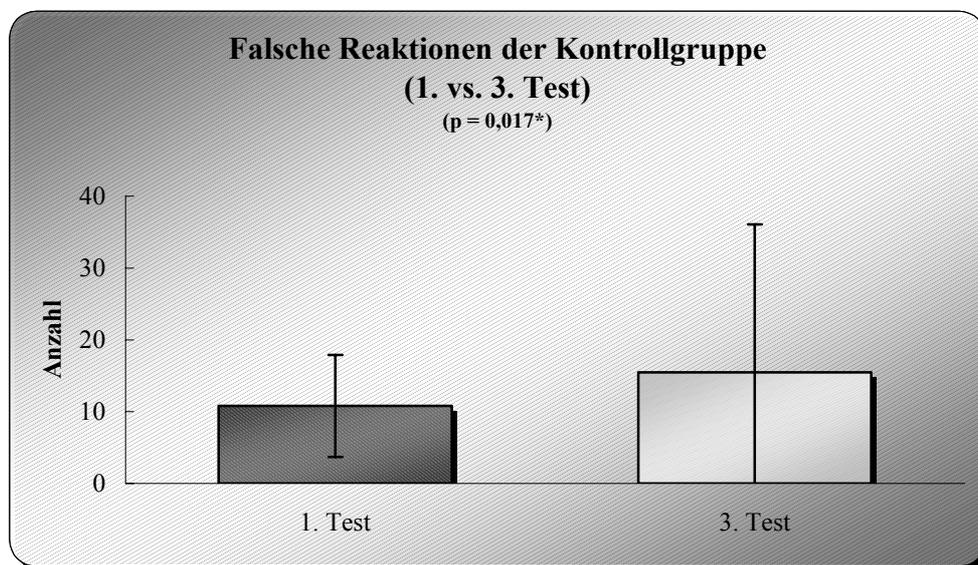


Abbildung 37: Falsche Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 57 m über N.N.; 2. Test = 57 m über N.N.

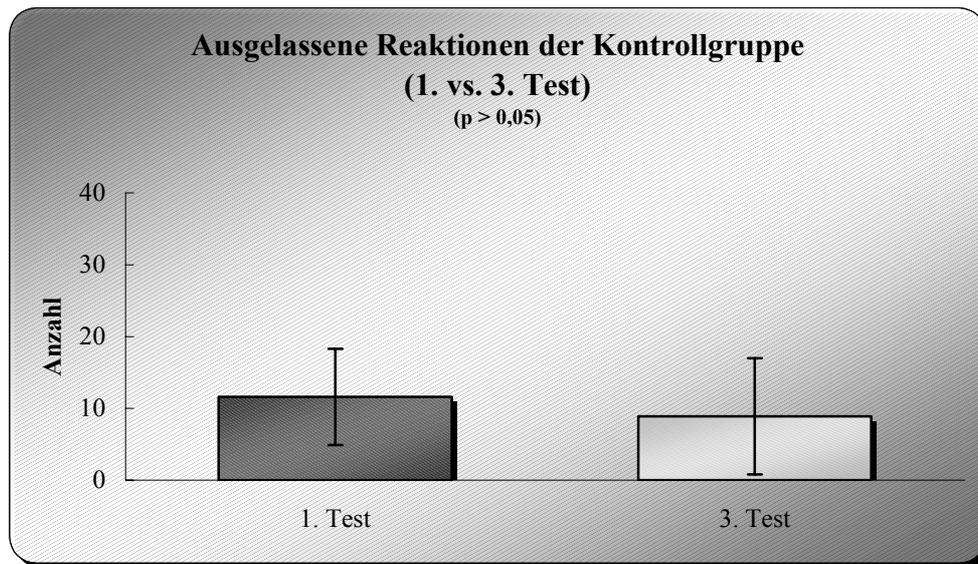


Abbildung 38: Ausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 57 m über N.N.; 2. Test = 57 m über N.N.

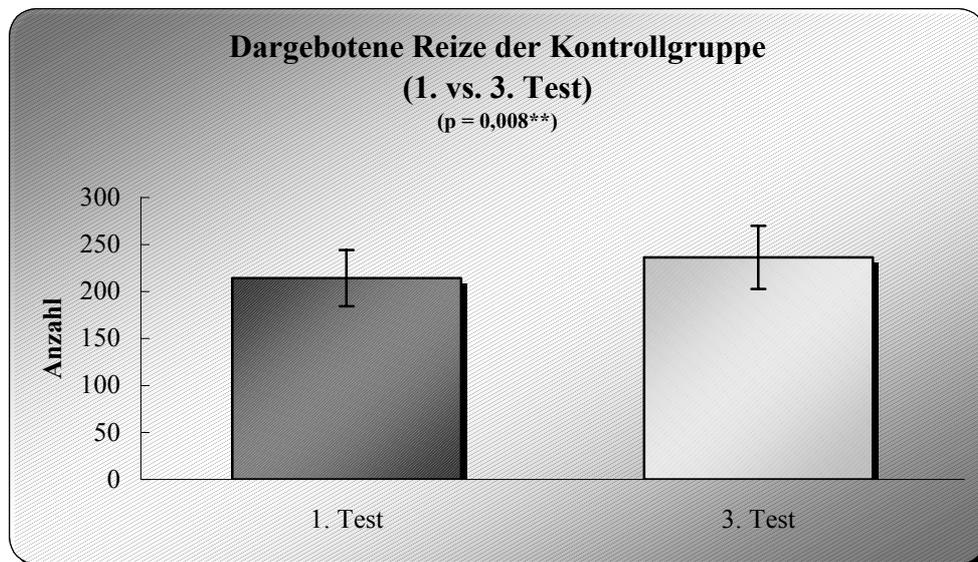


Abbildung 39: Dargebotene Reize der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung

1. Test = 57 m über N.N.; 2. Test = 57 m über N.N.

*Richtige Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test)*

Die Teilnehmer der Kontrollgruppe reagierten im ersten Test des ersten Testtages  $199,7 \pm 31,3$ mal richtig. Am zweiten Testtag erhöhte sich dieser Wert auf  $224,5 \pm 38,8$  richtige Reaktionen (dritter Test).

Diese Werte unterschieden sich signifikant ( $p = 0,017^*$ ).

*Falsche Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test)*

Falsch reagierten die Teilnehmer beim ersten Test  $10,8 \pm 7,1$ mal. Am zweiten Testtag (dritter Test) reagierten sie  $15,5 \pm 20,6$ mal falsch.

Hier ließ sich eine signifikante Verschlechterung feststellen ( $p = 0,017^*$ ).

*Ausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test)*

Von den dargebotenen Reizen ließen die Probanden im ersten Test  $11,6 \pm 6,7$  aus und beantworteten diese nicht. Am zweiten Testtag wurden im Mittel  $8,9 \pm 8,1$  Reize nicht beantwortet (dritter Test).

Hierbei ließ sich kein signifikanter Unterschied finden.

*Dargebotene Reize der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test)*

Die Kontrollgruppe konnte im ersten Test  $214,30 \pm 29,96$  Reize bearbeiten. Im dritten Test waren es  $236,50 \pm 33,62$  Reize.

Hier ließ sich ein sehr signifikanter Unterschied ( $p = 0,008^{**}$ ) nachweisen.

---

### 6.2.6 Vergleich der Ergebnisse des zweiten und vierten Tests der Kontrollgruppe

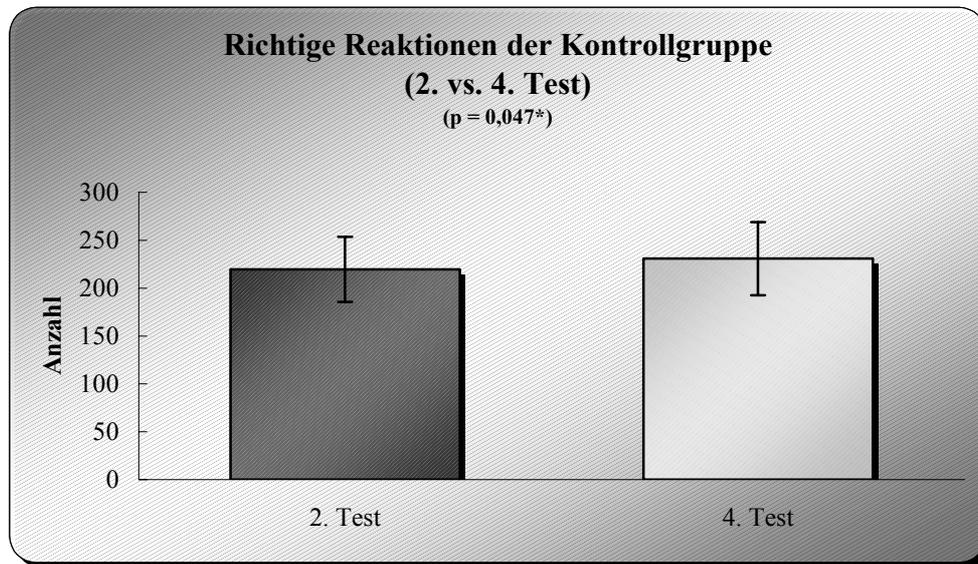


Abbildung 40: Richtige Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 57 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

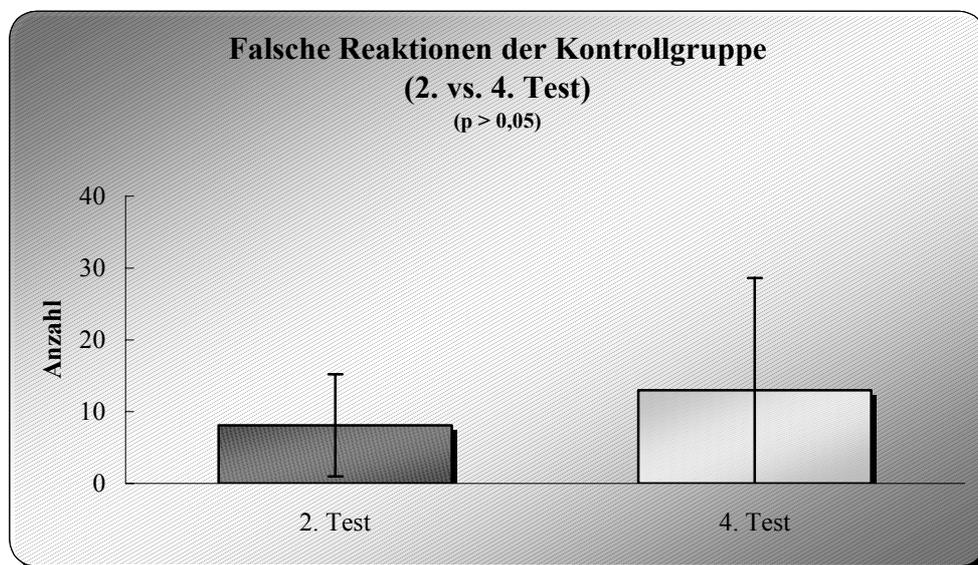


Abbildung 41: Falsche Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 57 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

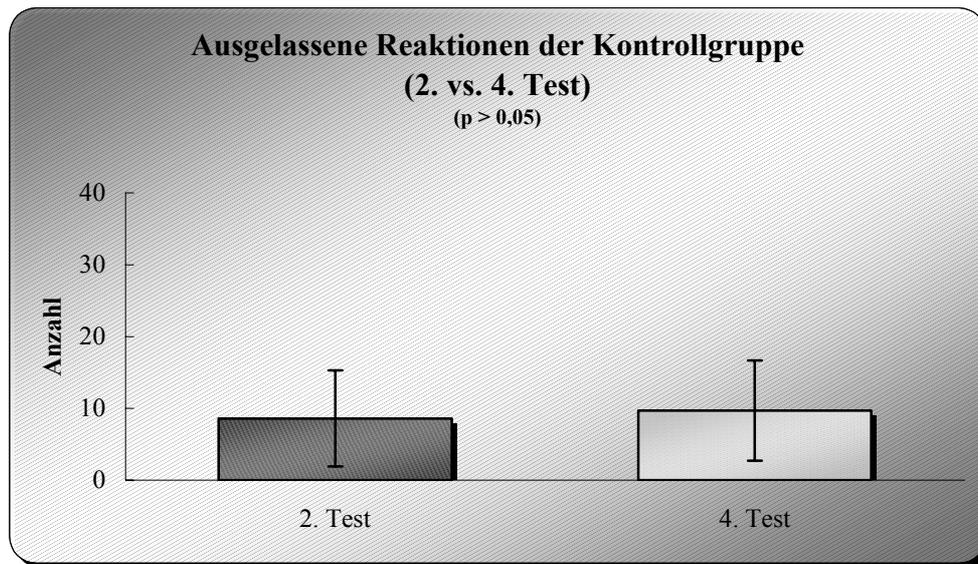


Abbildung 42: Ausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 57 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

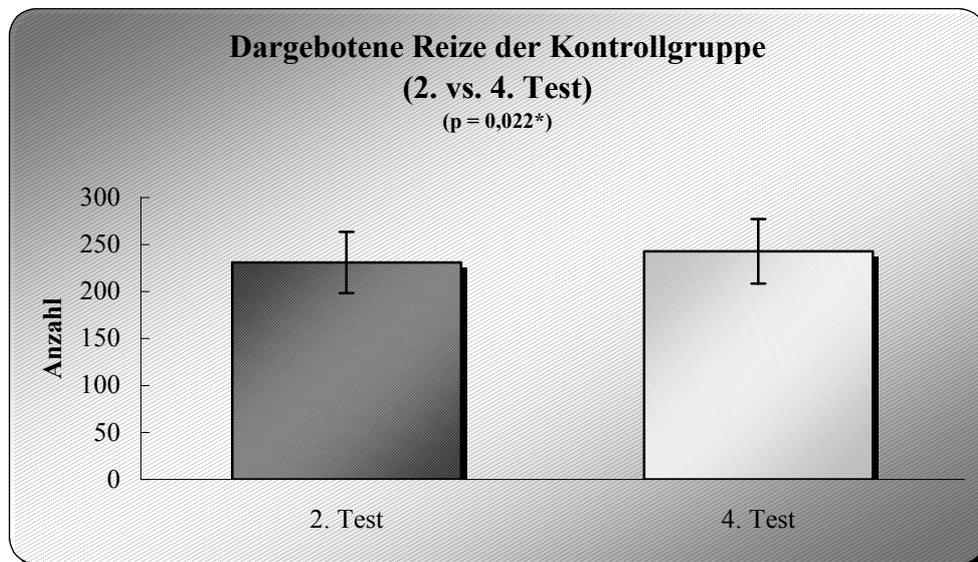


Abbildung 43: Dargebotene Reize der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung

2. Test = 57 m über N.N.; 4. Test = 57 m über N.N.

*Richtige Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test)*

Von den Teilnehmern der Kontrollgruppe konnten im zweiten Determinationstest  $219,7 \pm 34,8$  Reize korrekt beantwortet werden. Am zweiten Testtag konnten sie im vierten Test  $230,9 \pm 38,2$  Reize richtig beantworten.

Auch hierbei zeigte sich ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,047^*$ ).

*Falsche Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test)*

Im zweiten Determinationstest machten die Probanden  $8,1 \pm 7,1$  Fehler. Im vierten Test stieg dieser Wert auf  $13 \pm 15,6$  falsche Reaktionen an.

Es ließ sich jedoch kein signifikanter Unterschied anhand der Interferenzstatistik zeigen.

*Ausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test)*

Unbeantwortete Reize wurden beim zweiten Test in der Kontrollgruppe  $8,6 \pm 6,7$  festgestellt. Im vierten Test stieg diese Zahl gering auf  $9,7 \pm 7$  ausgelassene Reaktionen an.

Es war kein signifikanter Unterschied festzustellen.

*Dargebotene Reize der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test)*

Im zweiten Test wurden von den Probanden  $231,1 \pm 32,73$  Reize bearbeitet werden. Im vierten wurden  $242,4 \pm 34,31$  Reize bearbeitet.

Auch hier ließ sich ein signifikanter Unterschied von  $p = 0,022^*$  nachweisen.

---

## 6.2.7 Darstellung der Reaktionszeiten der Interventions- und Kontrollgruppe

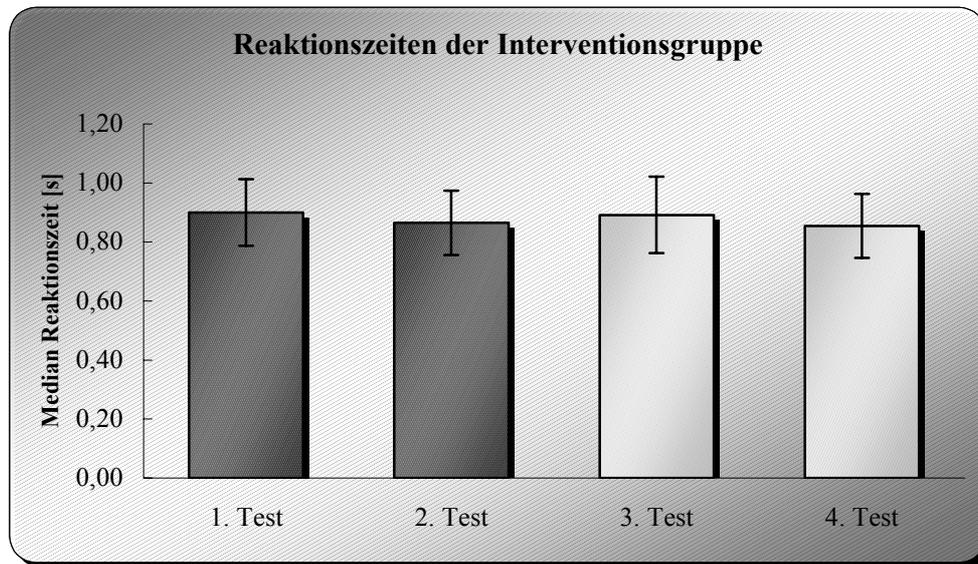


Abbildung 44: Reaktionszeiten der Interventionsgruppe mit Standardabweichung  
1. Test und 2. Test = 3100 m über N.N.; 3. Test und 4. Test = 57 m über N.N.;  
s = Sekunden

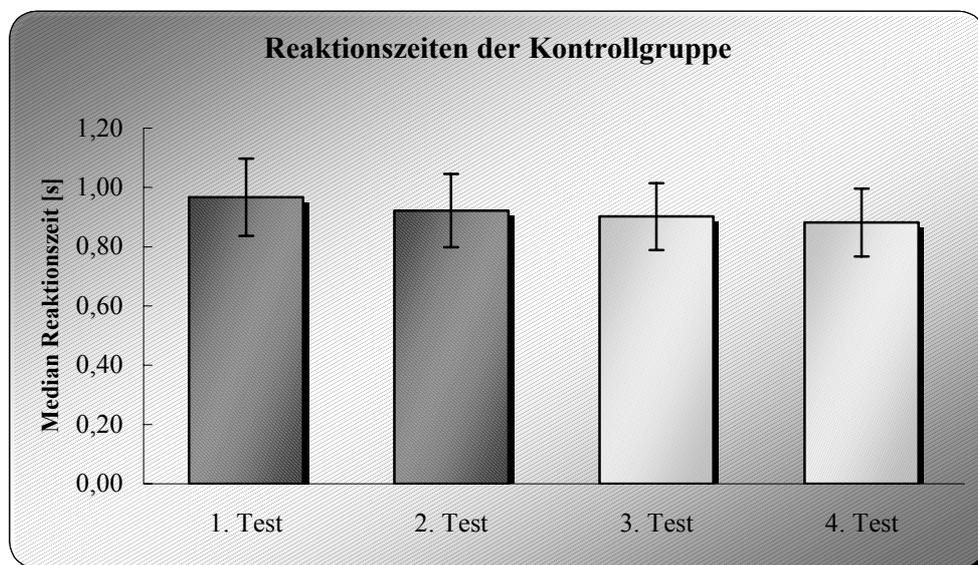


Abbildung 45: Reaktionszeiten der Kontrollgruppe mit Standardabweichung  
1. Test und 2. Test = 57 m über N.N.; 3. Test und 4. Test = 57 m über N.N.;  
s = Sekunden

*Reaktionszeiten der Interventionsgruppe*

Die Probanden der Interventionsgruppe zeigten beim ersten Test (erster Testtag) im Mittel einen Median der Reaktionszeit von  $0,9 \pm 0,11$  Sekunden. Dieser verringerte sich im zweiten Test (erster Testtag) auf  $0,86 \pm 0,11$  Sekunden. Im dritten Test (zweiter Testtag) stieg die Mittlere Reaktionszeit wieder auf  $0,89 \pm 0,13$  Sekunden. Im vierten (zweiter Testtag) fiel sie wieder auf  $0,85 \pm 0,11$  Sekunden.

*Reaktionszeiten der Kontrollgruppe*

In der Kontrollgruppe wiesen die Probanden im ersten Test (erster Testtag) eine Reaktionszeit von  $0,96 \pm 0,13$  Sekunden auf. Diese fiel zum zweiten Test (erster Testtag) auf  $0,92 \pm 0,12$  Sekunden. Am zweiten Testtag zeigten die Probanden im dritten Test eine Reaktionszeit von  $0,90 \pm 0,11$  Sekunden, die sich im vierten Test (zweiter Testtag) auf  $0,88 \pm 0,11$  Sekunden verkürzte.

---

## 7 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die durch einen Höhengaufenthalt hervorgerufenen Änderungen der Wahlreaktionsfähigkeit von Senioren zu untersuchen. Hierzu wurden Senioren während eines Skitages einem computerisierten Wahlreaktionstest (Wiener Determinationstest) auf einer Höhe von 3100 m unterzogen. Der Test wurde jeweils vor und nach einer definierten Belastung in Form eines modifizierten Harvard Stepp-Tests absolviert. Anschließend führten die Probanden die gleiche Untersuchung nochmals unter ihren gewohnten Höhenbedingungen (57 m) durch. Um Aussagen über die Lern- und Trainingseffekte treffen zu können, absolvierte zusätzlich eine Kontrollgruppe den gesamten Versuchsablauf, jedoch ohne Höhengaufenthalt und ohne Belastungstests.

Nachfolgend werden die in diesen Untersuchungen herausgearbeiteten Ergebnisse im Hinblick auf ihre Gültigkeit überprüft, um schließlich im Vergleich zu bisher vorliegenden Forschungsergebnissen diskutiert zu werden. Auswertung und Diskussion orientieren sich an der bereits zuvor verwandten Reihenfolge der Ergebnisdarstellung. Zuvor werden mögliche Störeinflüsse erörtert, die durch die Wahl des Probandengutes, des Untersuchungsmaterials und der angewendeten Messmethoden entstanden sein könnten.

### 7.1 Diskussion des Probandengutes

Die in der Auswertung berücksichtigte Interventionsgruppe bestand aus sechs weiblichen und sechs männlichen Senioren mit einem mittleren Alter von 64 Jahren. Die Zusammenstellung der Gruppe ergab sich aus der Teilnahme der Probanden an einem Skikurs, welcher im Rahmen des Studienganges Alterssport von der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn angeboten wurde. Die Senioren nehmen auch im übrigen Jahresverlauf am Sportprogramm der Universität Bonn teil und können daher im Hinblick auf den repräsentativen Durchschnitt ihrer Altersklasse als sportlich sehr aktiv angesehen werden. Schon in der Einleitung wurde auf den großen Einfluss der sportlichen Aktivität auf die physische und psychomotorische Leistungsfähigkeit im Alter hingewiesen (WEISSER & OKONEK, 2003; SCHALLER, 2003). Somit können die hier vorgestellten Ergebnisse nicht unkritisch auf alle Personen dieses Alters übertragen werden. In Bezug auf die „älteren Alpentouristen“, welche in den Zielen dieser Arbeit besondere Beachtung finden, sollte diese Gruppenzusammensetzung jedoch recht zutreffend sein.

Die Kontrollgruppe setzte sich aus fünf weiblichen und fünf männlichen Senioren im mittleren Alter von 64,4 Jahren zusammen. Diese Gruppe entsprach im Hinblick auf die sportlichen Aktivitäten in etwa der Interventionsgruppe. Somit waren auch die Teilnehmer der Kontrollgruppe sportlich sehr aktiv und können ebenfalls unter den bereits oben genannten Punkten als recht zutreffend zur Gruppe der „älteren Alpentouristen“ gezählt werden.

---

Zusätzlich ist es gerade für die Durchführung anspruchsvoller psychologischer Testverfahren nötig, bei allen Testdurchführungen gleich hoch motivierte Probanden zur Verfügung zu haben. In dieser Arbeit wurde zwar kein Verfahren zur Messung der Motivation der Probanden angewandt, jedoch kann aus den Beobachtungen der Versuchsleiter geschlossen werden, dass alle Probanden bei jedem Testdurchlauf versuchten, ein ihren Möglichkeiten entsprechend bestes Ergebnis zu erreichen.

## **7.2 Diskussion der Untersuchungsmaterialien**

Die in dieser Studie eingesetzten Untersuchungsmaterialien haben sich im klinischen und sportmedizinischen Alltag bewährt und als Standard etabliert. Die Herstellerangaben in Bezug auf Einsatzbereich und Handhabung wurden erfüllt. Daher sollten Unterschiede der Testergebnisse in Bezug auf die Handhabung der Untersuchungsmaterialien weitestgehend ausgeschlossen sein.

## **7.3 Diskussion der Untersuchungsmethodik**

### *7.3.1 Untersuchungsgang*

Um einen wirksamen Reiz durch die Höhenbelastung zu setzen, wurde eine Höhe von 3100 m für die Untersuchungen gewählt. Diese Höhe fällt bereits unter den Begriff „große Höhe“ und es konnte bei den Probanden eine ausreichende Hypoxie ( $S_aO_2 = 86-93\%$ ) beobachtet werden. Mit der gewählten Höhe über N.N. erfasst man die maximalen Höhenlagen der meisten alpinen Wintersportgebiete und zugleich höhere Aufenthaltsorte, in denen sich die Masse des Alpentourismus abspielt (BERGHOLD, 1987).

Da der Untersuchungstermin erst in der zweiten Woche des Urlaubsaufenthaltes der Probanden lag, konnte den Teilnehmern genügend Zeit gegeben werden, um sich bereits in den Tagen zuvor langsam an die Höhe zu akklimatisieren.

Der Termin des zweiten Testtages wurde zwei bis drei Wochen nach dem Urlaubsaufenthalt gelegt. Somit wurden Einflüsse durch die vorherige Höhenbelastung auf das Testergebnis unter gewohnten „normalen“ Höhenbedingungen ausgeschlossen. In der Kontrollgruppe lag der zweite Testtag in einem entsprechenden Zeitraum nach dem ersten, um einen vergleichbaren Versuchsablauf zu gewährleisten.

### *7.3.2 Untersuchungsverfahren*

Mit Hilfe des Wiener Determinationstests konnte das Mehrfachwahlreaktionsverhalten der Probanden gemessen werden. Hieraus lassen sich laut KUBITZKI (1994) Schlüsse auf die kognitive Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit im Sinne einer reaktiven Belastbarkeit ziehen. Durch die computergestützte Durchführung der Tests konnten sehr objektive Testbedingungen arrangiert werden. Sämtliche erhobenen

---

Daten des Determinationstests wurden durch das Computerprogramm selbständig registriert und aufgezeichnet. Alle Probanden kamen gut mit der Handhabung des Eingabepanels und der Reizdarbietung über den Bildschirm zurecht und es konnten keine Probleme in der Durchführung der Tests beobachtet werden. Somit galten für jeden Testteilnehmer die gleichen objektiven Bedingungen. In Bezug auf die Zuverlässigkeit des Testverfahrens wird durch den Hersteller eine innere Konsistenz der Hauptvariablen von  $r = 0,98$  und  $r = 0,99$  angegeben (NEUWIRTH & BENESCH, 2004).

Ein Trainings- oder Lerneffekt der Probanden, hervorgerufen durch das mehrmalige Absolvieren der Tests, konnte nicht ausgeschlossen werden. Daher führte die Kontrollgruppe gleich viele Determinationstests in gleichen Zeitabständen wie die Interventionsgruppe durch. Infolgedessen müssten etwaige Lerneffekte in beiden Gruppen gleich zum tragen kommen. Da die Ergebnisse im Vergleich der beiden Gruppen interpretiert werden, sollten sich diese Effekte gegenseitig aufheben.

Im Sinne der Standardisierbarkeit wurden die Untersuchungen in geschlossenen Räumen durchgeführt. So wurden störende Umwelteinflüsse (Geräusche, Publikumsverkehr etc.) weitgehend vermieden. Entsprechend konnten auch die Auswirkungen der äußeren Witterungseinflüsse (Kälte, Wind, schlechte Sicht etc.) nicht in den Untersuchungen berücksichtigt werden. Da die alpinen Sportarten meist im Freien betrieben werden, wäre es sicherlich interessant, auch die Auswirkungen dieser Umweltbedingungen auf die psychomotorische Leistungsfähigkeit zu untersuchen.

## **7.4 Diskussion der Änderung der physiologischen Parameter**

### *Herzfrequenz*

Gemäß der bisher veröffentlichten Literatur war zu erwarten, dass die Herzfrequenzwerte der Probanden auf 3100 m höher sein müssten, als auf 57 m (HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>; MAIERBÄURL, 2000; RICHALET ET AL., 1990). Dies konnte auch in den hier vorliegenden Ergebnissen gezeigt werden. Die Werte der ersten Messung auf 3100 m unterschieden sich sehr signifikant ( $p = 0,008^{**}$ ) zu denen der ersten Messung auf 57 m. Bei den restlichen Messungen stellten sich die Unterschiede als signifikant heraus (zweiter Messpunkt:  $p = 0,013^*$ ; dritter Messpunkt:  $p = 0,045^*$ ; vierter Messpunkt:  $p = 0,012^*$ ). Dieser Anstieg der Herzfrequenz liegt am durch die Hypoxie erhöhten Sympathikotonus und dem entsprechend erhöhten HMV (MAIERBÄURL, 2000; BÄRTSCH, 2000).

Nach der Belastung durch den Stepp-Test zeigten die Probanden der Interventionsgruppe sowohl in der Höhe von 3100 m, als auch auf 57 m einen ähnlichen Herzfrequenzanstieg. Auf 3100 m stieg die mittlere Herzfrequenz der Interventionsgruppe von  $88,5 \text{ min}^{-1}$  auf  $114,9 \text{ min}^{-1}$ . In 57 m Höhe stieg sie hingegen von  $77,5 \text{ min}^{-1}$  auf  $106 \text{ min}^{-1}$ . Somit erreichten die Probanden unter Höhenbedingungen die absolut gesehen höhere Herzfrequenz. Sowohl nach dem Stepp-Test auf 3100 m, als auch nach dem Stepp-Test auf

---

57 m, stellt sich dieser Herzfrequenzanstieg als sehr signifikant dar (3100 m:  $p = 0,003^{**}$ ; 57 m:  $p = 0,002^{**}$ ).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Interventionsgruppe, können für die Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede der Herzfrequenzwerte im Vergleich der beiden Untersuchungstage nachgewiesen werden. Dies war ebenfalls zu erwarten, da schließlich keine Höhenbelastung und keine Belastung durch einen Stepp-Test stattfanden. Folglich werden die für die Interventionsgruppe gestellten Hypothesen  $H1_{b1}$  und  $H1_{d1}$ , wie auch  $H0_{b1}$  für die Kontrollgruppe, nicht verworfen und damit angenommen.

### $S_aO_2$

Für den Vergleich der Messwerte der  $S_aO_2$  des ersten und zweiten Untersuchungstages traten für die Interventionsgruppe zu jedem Messzeitpunkt sehr signifikante Unterschiede auf ( $p = 0,002^{**}$ ). Ein solcher Abfall der  $S_aO_2$  und die daraus resultierende Hypoxie wurden ebenso, wie die Steigerung der Herzfrequenz bereits in der bisher vorliegenden Literatur beschrieben (BERGHOLD & SCHAFFERT 2001<sup>5</sup>; BURTSCHER ET AL., 2000; HOLLMANN & HETTINGER, 2000<sup>4</sup>). Er resultiert aus dem unter hypobarer Hypoxie verminderten  $P_iO_2$  und dem entsprechend erniedrigten  $P_aO_2$ . Somit kann das für den  $O_2$ -Transport hauptverantwortliche Hämoglobin nicht mehr vollständig mit Sauerstoff gesättigt werden.

Im Mittel fielen die Werte der  $S_aO_2$  auf 3100 m auf 93 % bei der letzten Messung und bis auf 86,7 % nach der Belastung. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass die  $S_aO_2$  bei einzelnen Versuchspersonen nach der Belastung bis auf Werte von 77 % fiel (diese Versuchspersonen gingen jedoch aus zuvor beschriebenen Gründen [s. Kap. 5] in die Auswertung nicht mit ein). Nach der Normdefinition der  $S_aO_2$  durch RINNINGER (1999) von 95-97 % befanden sich folglich die Probanden der Interventionsgruppe während ihres Aufenthaltes auf 3100 m in einem hypoxämischen Zustand. Am zweiten Untersuchungstag auf 57 m zeigten sich alle Messungen der Interventionsgruppe wieder im Normbereich. Nach der Belastung durch den Stepp-Test konnte jedoch an beiden Versuchstagen ein sehr signifikanter Abfall der  $S_aO_2$  beobachtet werden (3100 m:  $p = 0,003^{**}$ ; 57 m:  $p = 0,004^{**}$ ). Auf 57 m fiel die  $S_aO_2$  allerdings nur bis auf 96,7 % und blieb somit im vorher bereits definierten Normbereich.

Da bei der Kontrollgruppe keinerlei Unterschiede zwischen den Versuchstagen ermittelt wurden und sich die Mittelwerte der  $S_aO_2$  im Bereich der Norm befanden, werden in Bezug auf die  $S_aO_2$  die Hypothesen  $H1_{b2}$  und  $H1_{d2}$  der Interventionsgruppe und  $H0_{b2}$  der Kontrollgruppe nicht verworfen und damit angenommen.

Zusammengefasst zeigen diese Werte, dass es gelang, die Interventionsgruppe durch die Höhenbelastung in einen Zustand der hypobaren Hypoxie zu versetzen. Somit können die Versuchsergebnisse der Wahlreaktionstests gemäß den Untersuchungszielen interpretiert werden.

## 7.5 Diskussion der Ergebnisse der Wahlreaktionstests

Durch die mit Hilfe des Wiener Determinationstestverfahrens durchgeführten Wahlreaktionstests konnte die reaktive Belastbarkeit der Probanden ermittelt werden. In dem verwendeten Subtest S1 (adaptiv kurz) des Wiener Determinationstest ergeben sich nach NEUWIRTH & BENESCH (2004) drei Hauptvariablen, nach denen die Aussagen des Testverfahrens getroffen werden können. Diese Variablen sind *richtige Reaktionen*, *falsche Reaktionen* und *ausgelassene Reaktionen*. Da die Darbietungszeit der Reize an die durchschnittliche Bearbeitungszeit des Probanden angepasst wurde, ist es nicht sinnvoll, die Reaktionen weitergehend in zeitgerechte und verspätete Reaktionen aufzuteilen. Zusätzlich wurden in dieser Arbeit jedoch die Nebenvariablen *Median der Reaktionszeit* und *dargebotene Reize* zur besseren Darstellung der Ergebnisse berücksichtigt.

Die Hauptvariable richtige Reaktionen stellt die bedeutendste Variable dar und zeigt die Leistungsfähigkeit der Probanden auf, bei Reaktionsketten unter erheblicher Belastung rasch und adäquat zu reagieren. Durch die Hauptvariable falsche Reaktionen wird die Tendenz zur Verwechslung angezeigt. Sie entsteht durch die Unfähigkeit der Probanden die korrekte Reaktion von konkurrierenden, irrelevanten Reaktionen abzuschirmen. Somit steht die Variable falsche Reaktionen nach NEUWIRTH & BENESCH (2004) „in enger Beziehung zur Aufmerksamkeitsfunktion [...] Eine hohe Zahl falscher Reaktionen spricht deshalb für eine Beeinträchtigung der Aufmerksamkeitsfunktion.“ Die Hauptvariable ausgelassene Reaktionen wird schließlich als Hinweis für die Resignationstendenzen des Probanden gesehen. Mit Hilfe der hier weitergehend verwandten Nebenvariable Median der Reaktionszeit lässt sich die Geschwindigkeit ermitteln, mit der auf den jeweiligen Reiz geantwortet wurde. Hierbei ist zu beachten, dass der Subtest S1 seine Reizdarbietungsgeschwindigkeit an die Bearbeitungsgeschwindigkeit des Probanden anpasst. Somit lassen sich aus dieser Nebenvariablen nur ergänzende Informationen gewinnen. Dies gilt auch für die Nebenvariable dargebotene Reize. Sie korreliert eng mit der Nebenvariablen Median der Reaktionszeit, da die Dauer einer Testdurchführung mit vier Minuten zeitlich begrenzt ist.

### *Richtige Reaktionen*

Betrachtet man die zusammengefassten Ergebnisse der Untersuchungstage, so stellt man fest, dass sowohl die Interventionsgruppe als auch die Kontrollgruppe am zweiten Untersuchungstag mehr richtige Reaktionen tätigte. Diese Ergebnisse stellten sich in beiden Gruppen als signifikant heraus (Interventionsgruppe:  $p = 0,05^*$ ; Kontrollgruppe:  $p = 0,021^*$ ). Dies ist am ehesten darauf zurückzuführen, dass die Probanden beider Gruppen einen gewissen Lerneffekt in der Handhabung des Testverfahrens zeigten.

---

So ergibt sich bei Betrachtung der einzelnen Tests, dass zwischen fast allen einzelnen Determinationstests eine kontinuierliche Verbesserung der Anzahl der richtig geleisteten Antworten feststellbar ist. In Bezug auf die Interventionsgruppe kann daher die Hypothese  $H_{I_{al}}$  gehalten werden, für die Kontrollgruppe muss die Hypothese  $H_{O_{al}}$  jedoch verworfen werden.

Betrachtet man die richtigen Reaktionen der Interventionsgruppe vor und nach der Belastung durch den Stepp-Test, so zeigt sich sowohl in der Höhe als auch auf 57 m im zweiten Testdurchgang eine sehr signifikante Verbesserung des Ergebnisses (3100 m:  $p = 0,003^{**}$ ; 57 m:  $p = 0,005^{**}$ ). Auch hierbei scheint sich der bereits oben beschriebene Trainingseffekt einzustellen. Da bei der Kontrollgruppe nur am ersten Tag die zu erwartenden signifikant häufigeren richtigen Reaktionen ( $p = 0,008^{**}$ ) und am zweiten Versuchstag nicht signifikant sondern nur geringfügig mehr richtige Reaktionen beobachtet wurden, könnte durch die körperliche Belastung der Interventionsgruppe neben dem Trainings- und Lerneffekt auch eine Steigerung des zentralnervösen Erregungszustandes aufgetreten sein. Hierdurch könnte das Aktivitäts- und Aufmerksamkeitsniveau im Sinne des umgekehrt U-förmigen Aktivitätsniveau nach BUDINGER & HAHN (1990) gehoben und somit die psychomotorische Leistungsfähigkeit gesteigert worden sein. Dieses Modell geht davon aus, dass eine gewisse Aktivierung vorhanden sein muss, um optimale Leistung zu erzielen. Besteht jedoch eine zu große Aktivierung, lässt die Leistungsfähigkeit wieder nach. Anhand der vorliegenden Ergebnisse lässt sich hierzu jedoch keine endgültige Aussage tätigen, da die Kontrollgruppe in der vorliegenden Untersuchung keinem Belastungstest unterzogen wurde. Für die Interventionsgruppe muss jedenfalls die Hypothese  $H_{I_{cl}}$  verworfen werden, da die Probanden im zweiten Determinationstest trotz der vorhergehenden Belastung mehr richtige Reaktionen zeigten.

#### *Falsche Reaktionen*

Für die, die Aufmerksamkeitsfunktion im Besonderen darstellenden falschen Reaktionen, zeigt sich in den Ergebnissen, dass die Probanden der Interventionsgruppe am ersten Untersuchungstag (3100 m) deutlich mehr Reize falsch beantworteten als am zweiten. Dieser Unterschied erwies sich in der statistischen Auswertung als sehr signifikant ( $p = 0,007^{**}$ ). Im Gegensatz zur Interventionsgruppe reagierte die Kontrollgruppe am zweiten Untersuchungstag insgesamt häufiger falsch als am ersten. Hier lassen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede nachweisen. Auch im Vergleich der einzelnen Tests mit den, ihnen am zweiten Versuchstag entsprechenden, spiegeln sich diese Ergebnisse wieder. Um die falschen Reaktionen im Verhältnis zu den richtig gegebenen Antworten betrachten zu können, wurden des Weiteren die prozentualen Verhältnisse der gesamt-falschen zu den gesamt-dargebotenen Reizen bestimmt. Auch hierbei zeigte sich ein sehr signifikanter Unterschied in den Ergebnissen der Interventionsgruppe ( $p = 0,005^{**}$ ). In der Kontrollgruppe wurde kein signifikanter Unterschied nachgewiesen. Somit kann sich die erhöhte Zahl der falschen Reaktionen nicht durch einen Anstieg der Zahl der bearbeiteten Reize ergeben haben. Folg-

---

lich zeigen diese Ergebnisse, dass die Interventionsgruppe in den Höhentests signifikant häufiger falsch reagierte als auf 57 m. Dies sollte nicht auf einen durch die Versuchsanordnung bedingten Lerneffekt zurückzuführen sein, da diese Ergebnisse nicht in der Kontrollgruppe zu beobachten waren. Daher ist davon auszugehen, dass ein durch einen Höhengenaufenthalt vermindertes O<sub>2</sub>-Angebot zu einer Erhöhung der Fehlerzahl bei reaktiven Belastungsaufgaben führt. Eine Begründung könnte in einem durch O<sub>2</sub>-Mangel verlangsamt ablaufendem zentralnervösen Informationsverarbeitungsprozess und einer resultierenden Handlungsüberforderung liegen. Diese Informationsverarbeitungsprozesse zeigen sich bei älteren Personen schon durch die Altersveränderungen allein verlangsamt (PÖTHING ET AL., 1983 zitiert nach SCHALLER, 2003). Ein O<sub>2</sub>-Mangel würde diese altersbedingte Verlangsamung entsprechend noch verstärken.

Somit bestätigen sich aufgrund dieser hier gefundenen Ergebnisse sowohl die Hypothese  $HI_{a2}$  in Bezug auf die Interventionsgruppe, als auch  $HO_{a2}$  in Bezug auf die Kontrollgruppe. In der Literatur beschrieben bereits FOWLER & WHITE (1982) und SHEPARD (1956) bei einem jüngeren Probandengut eine Häufung falscher Antworten in einem Wahlreaktionstest unter hypoxischen Bedingungen. Somit können deren Ergebnisse in Bezug auf ältere Probanden hier bestätigt werden.

Der Belastungstest der Interventionsgruppe zeigte sowohl auf 3100 m, als auch auf 57 m, keinen signifikanten Einfluss auf die falschen Reaktionen. An beiden Versuchstagen bearbeiteten die Probanden jedoch im der Belastung folgenden Determinationstest geringfügig weniger Antworten. Als Erklärung sollten hierfür wohl die bereits vorher beschriebenen Erklärungsmodelle dienen. Die Hypothese  $HI_{e2}$  muss jedoch auch hier verworfen werden.

#### *Ausgelassene Reaktionen*

In beiden Gruppen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede auf Ebene der ausgelassenen Reaktionen. Daher ist davon auszugehen, dass die Resignationstendenzen der Probanden zu allen Untersuchungszeitpunkten ähnlich ausgeprägt waren und nicht weiter durch die Höhenbelastung beeinflusst wurden. Die Hypothese  $HI_{a3}$  wird demnach verworfen,  $HO_{a3}$  kann jedoch gehalten werden.

Nach der Belastung durch den Stepp-Test konnte in der Interventionsgruppe nur am ersten Testtag auf 3100 m ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,037^*$ ) bei dieser Variable beobachtet werden. Am zweiten Testtag konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den ausgelassenen Reaktionen vor und nach der Belastung nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse ähneln denen der Kontrollgruppe, die auch am ersten Testtag einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,045^*$ ) in den ausgelassenen Reaktionen darbot. Somit zeigen sich die Ergebnisse der Interventions- und der Kontrollgruppe vergleichbar. Hypothese  $HI_{e3}$  muss entsprechend ebenfalls verworfen werden.

---

*Dargestellte Reize und Median der Reaktionszeit*

Der Median der Reaktionszeit sank in der Interventionsgruppe vom ersten zum zweiten Determinationstest des ersten Testtages (3100 m) sehr signifikant ( $p = 0,003^{**}$ ). Am zweiten Testtag (57 m) sank die Reaktionszeit ebenfalls sehr signifikant vom dritten zum vierten Determinationstest ( $p = 0,002^{**}$ ), jedoch waren die Reaktionszeiten der Determinationstests des zweiten Testtages fast so groß, wie die des ersten Testtages. Somit findet sich keine eindeutige Tendenz einer Verkürzung der Reaktionszeit von Test zu Test. Hingegen lässt sich bei der Kontrollgruppe eine kontinuierliche Verkürzung der Reaktionszeit im Verlaufe der Testverfahren feststellen. Beachtenswert ist ebenfalls, dass die Kontrollgruppe erst am zweiten Testtag den Bereich der Reaktionszeiten erreicht, den die Interventionsgruppe an beiden Versuchstagen aufweist. Die Ergebnisse der Kontrollgruppe ließen sich schließlich mit einem kontinuierlichen Lern- und Gewöhnungsprozess erklären. Hierbei kommt der Proband mit jedem Testdurchlauf besser mit dem Testverfahren zurecht und entwickelt Strategien zu dessen schnellerer Durchführung. In der Interventionsgruppe könnte die schnelle Bearbeitung des Tests auf ein höheres zentralnervöses Aktivitätsniveau in der Höhe zurückzuführen sein. Hierbei wäre der Körper durch den Höhengedächtnis in einen Zustand der zentralnervösen Erregung versetzt, durch den die Reaktionszeit und Bearbeitungsgeschwindigkeit der Probanden beschleunigt würden. Dies würde wiederum den unter „normalen“ Bedingungen zu erwartenden Lerneffekt überdecken.

Fasst man die Ergebnisse der durchgeführten Determinationstests zusammen, so lässt sich feststellen, dass ältere Probanden im Zustand einer durch Höhenbelastung herbeigeführten hypobaren Hypoxie in einen höheren zentralnervösen Erregungszustand versetzt werden. Gleichzeitig treffen sie während eines Wahlreaktionstests in hypobarer Hypoxie signifikant mehr falsche Entscheidung als in Normoxie. Diese Ergebnisse können nur schwer mit der vorliegenden Literatur verglichen werden, da ein solcher Versuchsablauf, unter besonderer Berücksichtigung des hohen Alters der Testpersonen, bisher nicht durchgeführt wurde. Es widerspricht den Untersuchungen von O'CARROLL & MACLEOD (1997), die in ihren Untersuchungen keinen Einfluss mittlerer Höhe (1600 m) auf die einfache Wahlreaktionsfähigkeit gefunden haben. Sie führten ihre Untersuchungen allerdings mit jungen, professionellen Rugbyspielern durch. Die Untersuchungen von FOWLER & TAYLOR (1987), FOWLER & WHITE (1982), RAMSEY & DAYTON (1970), NOBLE ET AL. (1993) und MACINTOSH ET AL. (1988) können dahingegen teilweise unterstützt werden, dass ein Höhengedächtnis Auswirkungen auf die psychomotorische Leistungsfähigkeit des Menschen hat. Hier sind besonders die Ergebnisse von FOWLER & WHITE (1982) hervorzuheben, die in ihren Ergebnissen auch ein vermehrtes Auftreten von Fehlreaktionen beschreiben. In der hier vorliegenden Untersuchung konnte keine Verlängerung der Reaktionszeit unter hypoxischen Bedingungen festgestellt werden. Jedoch ist mit dem hier verwendeten Testverfahren eine Aussage über die Reaktionszeit nur ansatzweise zu tätigen. Somit sollte die hier gezeigte Häufung an falschen Reaktionen als Indiz eines gestörten Informationsprozesses

---

ses unter hypoxischen Bedingungen gedeutet werden. Trotz allem muss bei einem Vergleich der hier vorgestellten Ergebnisse mit den bereits veröffentlichten Ergebnissen beachtet werden, dass sich die hier vorliegende Arbeit sowohl durch das teilnehmende Probandengut als auch die gewählten Testverfahren von den Arbeiten anderer Autoren unterscheidet.

## 7.6 Fazit

In Bezug auf die Zielsetzung dieser Arbeit lässt sich, trotz des kleinen Probandenkollektivs von insgesamt 22 Personen, feststellen, dass ein Höhengaufenthalt in 3100 m zusätzlich zu den bekannten Auswirkungen auf die Physiologie auch negative Wirkungen auf die Psychomotorik insbesondere des älteren Menschen hat. Ältere Alpinsportler tendieren in zeitbegrenzten, schnell hintereinander ablaufenden Entscheidungsprozessen eher dazu, falsche Entscheidungen zu treffen, als sie es unter „Normalbedingungen“ täten. Somit laufen sie z. B. in den bereits in der Einleitung genannten sturzfördernden Situationen Gefahr, durch falsche Entscheidungen und Reaktionen eine Kollision mit anderen Schneesportlern auf einer Skipiste zu verursachen. Oder sie können z. B. auf ein „Verkanten“ der Ski nicht mehr korrekt und zeitgerecht reagieren. Ähnliches gilt auch für andere Alpinsportler, die z. B. auf einem Schneefeld oder in einem Geröllhang ausrutschen, bei denen die in diesem Moment geforderten Entscheidungsprozesse gestört sind. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass neben den Auswirkungen der Hypoxie auch die körperliche Belastung und Erschöpfung negative Auswirkungen auf die psychomotorischen Funktionen haben können.

Insbesondere auf der Skipiste werden dem älteren Alpinsportler reaktive Entscheidungsprozesse abverlangt, die denen des Straßenverkehrs gleichen. Hierauf lässt sich das Modell von MICHON übertragen, der die Entscheidungsprozesse in drei Ebenen gliedert: *strategische*, *taktische* und *operationale Ebene* (zitiert nach PFAFFEROTH, 1994). Danach würden auf der strategischen Ebene Entscheidungen stattfinden, wie z. B. die Wahl des geeigneten Skigebietes, der Tageszeit oder der Piste. Auf der taktischen Ebene läuft die Interaktion mit den anderen auf der Skipiste agierenden Personen ab. Schließlich werden auf der operationalen Ebene unbewusste Handlungen wie das Halten der Fahrspur und Ausgleich von Unebenheiten und unerwarteten Geländeformen durchgeführt.

In den Ergebnissen dieser Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Alpinsportler gerade auf der operationalen Ebene mit Fähigkeitseinschränkungen rechnen muss. Somit müssen schon auf den beiden zuvor ablaufenden Ebenen präventiv Entscheidungen getroffen werden. Zum Beispiel sollte eine Tageszeit mit guten Schneebedingungen gewählt werden, um harte oder vereiste Pisten zu vermeiden. Ebenso zeigen sich stark aufgeweichte Pisten als nicht vorteilhaft für den älteren Skifahrer. Gleichzeitig sollte das Skigebiet nicht zu anspruchsvolle Pisten, sondern eher breite, gut übersichtliche und präparierte Skipisten bieten. Weitere Sicherheit kann durch eine angepasste Geschwindigkeit und Nutzen guter Sichtbedingungen er-

---

reicht werden. Dies lässt sich neben dem Skifahren natürlich auch auf sämtliche andere alpine Sportarten übertragen.

Der erfahrene, ältere Skiläufer und Alpinsportler trifft solche Entscheidungen in gewissem Maße automatisch, jedoch sollte sich vor allem der unerfahrene Seniorensportler diese Lösungsstrategien immer wieder vor Augen führen und sich entsprechend verhalten. Werden schließlich solche und die weiterhin bekannten Empfehlungen von den älteren Alpinsportlern beachtet und im übrigen Jahresverlauf an der Erhaltung konditioneller und kognitiver Funktionen gearbeitet, müsste sich ein großer Teil der alpinen Unfälle vermeiden lassen. Entsprechend sollte ein genussvolles und sicheres Erleben des reichhaltigen Bergsportangebots sowohl im Winter wie im Sommer auch für Ältere mit nur einigen wenigen Einschränkungen möglich sein.

---

## 8 Zusammenfassung

Ziel der hier vorliegenden Arbeit war es, die Auswirkungen einer, durch einen Höhengaufenthalt hervorgerufenen, hypobaren Hypoxie auf die Wahlreaktionsfähigkeit älterer Menschen zu untersuchen. Da bereits heute etwa 60 % der Alpentouristen älter als 40 Jahre sind, wurde in den Untersuchungen speziell die Gruppe der Älteren berücksichtigt. Bisher wurden noch keine Untersuchungen der Wahlreaktionsfähigkeit von Senioren unter den Bedingungen der hypobaren Hypoxie durchgeführt. Daher soll mit diesem Beitrag eine bessere Primärprävention und ein besseres Verständnis des Unfallgeschehens im alpinen Sport, insbesondere von Älteren, ermöglicht werden.

Als Testpersonen konnten insgesamt 22 ältere Personen (elf Männer und elf Frauen) gewonnen werden. Zwölf Personen bildeten die Interventionsgruppe (durchschnittliches Alter: 64 Jahre), zehn Personen gehörten der Kontrollgruppe an (durchschnittliches Alter: 64,4 Jahre). Jede Untersuchungsgruppe bestand je zur Hälfte aus männlichen und weiblichen Personen.

Beide Gruppen führten an zwei Untersuchungstagen jeweils zwei computergesteuerte Determinationstests (S1, kurz) des Wiener Testsystems durch. Die Interventionsgruppe absolvierte den ersten Testtag in 3100 m über N.N. im Rahmen eines zweiwöchigen Skiurlaubes. Der zweite Testtag fand zwei bis drei Wochen später unter den für die Testpersonen gewohnten Höhenbedingungen (57 m über N.N.) statt. Der erste Test eines jeweiligen Testtages wurde von dieser Gruppe unter Ruhebedingungen durchgeführt, vor dem zweiten Test wurden sie durch einen einminütigen Stepp-Test belastet. Die Tests der Kontrollgruppe liefen im Unterschied zur Interventionsgruppe an beiden Testtagen unter gewohnten Umgebungsbedingungen (57 m über N.N.) und ohne eine Belastung durch einen Stepp-Test ab. Zusätzlich wurden bei beiden Gruppen an allen Testtagen die physiologischen Parameter Herzfrequenz und Sauerstoffsättigung zu vier definierten Messzeitpunkten bestimmt.

In den Ergebnissen konnte für die Herzfrequenzwerte der Interventionsgruppe ein, durch den Aufenthalt in 3100 m Höhe hervorgerufener, signifikant höherer Wert ( $p \leq 0,05^*$ ) nachgewiesen werden. Für die Sauerstoffsättigung zeigten sich die Verminderung sogar als sehr signifikant ( $p \leq 0,01^{**}$ ). Da im Gegensatz zur Interventionsgruppe die Kontrollgruppe keiner Höhenbelastung ausgesetzt war, wurden dort erwartungsgemäß auch keine Unterschiede bezüglich der physiologischen Parameter zwischen den Untersuchungstagen festgestellt.

Die Resultate der Determinationstests zeigten in der Interventionsgruppe am zweiten Testtag (57 m über N.N.) signifikant ( $p \leq 0,05^*$ ) mehr „richtige Reaktionen“ als am ersten Testtag in 3100 m über N.N. Die Kontrollgruppe wies ebenfalls eine solche Verbesserung vom ersten zum zweiten Testtag auf. Daher sollte diese Verbesserung der Testleistung in Bezug auf die „richtigen Reaktionen“ auf einen Lern- bzw. Trai-

---

ningseffekt der Testteilnehmer zurückzuführen sein. Sie kamen trotz gleicher Versuchsbedingungen mit dem Testverfahren am zweiten Testtag besser zurecht und konnten auf bereits gesammelte Erfahrungen im Umgang mit dem System zurückgreifen. Somit wurde wahrscheinlich eine etwaige, durch die hypobare Hypoxie hervorgerufene, Beeinflussung der psychomotorischen Fähigkeiten der Probanden der Interventionsgruppe durch einen Lerneffekt überlagert. Für die Testvariable der „falschen Reaktionen“ konnte jedoch im Gegensatz dazu gezeigt werden, dass die Teilnehmer der Interventionsgruppe am ersten Testtag auf 3100 m über N.N. sehr signifikant ( $p \leq 0,01^{**}$ ) mehr falsche Reaktionen zeigten als am zweiten Testtag auf 57 m über N.N. Im Gegensatz hierzu reagierten die Teilnehmer der Kontrollgruppe am zweiten Testtag insgesamt häufiger falsch als am ersten. Hier ließen sich jedoch keine signifikanten Zusammenhänge nachweisen. Somit ist das Ergebnis der Interventionsgruppe nicht auf einen Lerneffekt zurückzuführen und es kann gefolgert werden, dass bei älteren Menschen eine, durch einen Höhengaufenthalt hervorgerufene, hypobare Hypoxie zu mehr falschen Reaktionen in einem komplexen Wahlreaktionstest führt. Für die Testvariable der „ausgelassenen Reaktionen“ konnten in beiden Probandengruppen keine signifikanten Unterschiede evaluiert werden. Zusätzlich zeigte die Belastung der Teilnehmer der Interventionsgruppe durch den einminütigen Stepp-Test keine nachweisbaren Auswirkungen auf das Testergebnis.

Schließlich kann trotz des kleinen Probandenguts aus diesen Untersuchungen gefolgert werden, dass eine durch einen Höhengaufenthalt ausgelöste hypobare Hypoxie einen negativen Einfluss auf die psychomotorische Leistungsfähigkeit (hier: komplexe Wahlreaktionsfähigkeit) speziell von Älteren nimmt. Sie tendieren in Stresssituationen in der Höhe eher zu falschen Entscheidungen, als unter gewohnten Umgebungsbedingungen. Somit könnten sie in komplexen Situationen einem erhöhten Unfallrisiko ausgesetzt sein. Daher sollte besonders im Bereich des Alpensports mit Älteren auf geeignete Gelände- und Materialbedingungen geachtet werden. Des Weiteren sollten eine körperliche Überbeanspruchung vermieden und gute Rahmenbedingungen für das Sporttreiben geschaffen werden. Beachten ältere Alpensportler und deren Begleiter solche und andere Empfehlungen und arbeiten zusätzlich im übrigen Jahresverlauf an der Erhaltung konditioneller und kognitiver Funktionen, müssten sich die Unfallrisiken deutlich reduzieren lassen.

---

## 9 Literaturverzeichnis

- 1 **ASU SKI.** Unfallanalyse der Saison 2003/2004. ARAG Sportversicherung. 2004. In: [www.ski-online.de](http://www.ski-online.de) (Stand vom 4.10.2004)
  - 2 **BÄRTSCH P.** Höhenanpassung. Dtsch Z Sportmed 2000; 51 (4):139-140
  - 3 **BERGHOLD F & SCHAFFERT W.** Handbuch der Trekking- und Expeditionsmedizin. DAV Summit Club, München 2001<sup>5</sup>
  - 4 **BERGHOLD F.** Bergmedizin heute: Ratgeber für gesundes Wandern und Bergsteigen. Verlag Bruckmann, München 1987
  - 5 **BERGHOLD F.** Physiologie der Höhenanpassung. 2002. In: <http://www.brandner-optik-schmuck.de/files/sportoptik/physiologiederhöhenanpassung.pdf> (Stand vom 9. August 2004)
  - 6 **BERGHOLD F.** Schnelladaptation und Gesundheitsrisiken beim Seilbahnfahren in mittleren und großen Höhen. In: **SCHOBERSBERGER W ET AL.** Jahrbuch 2000. Österreichische Gesellschaft für Alpin- und Höhenmedizin 2000: 139-150
  - 7 **BERGHOLD F.** Sicheres Bergsteigen: alpine Unfälle – wie man sie vermeidet. Verlag Bruckmann, München 1988
  - 8 **BRISSWALTER J.** Selective effects of physical exercise on choice reaction processes. Percept Mot Skills 1998; 87: 175-185
  - 9 **BUDINGER H & HAHN E.** Bedingungen des sportlichen Wettkampfes. Hofmann, Schorndorf 1990
  - 10 **BÜHL A & ZÖFEL P.** SPSS Version 10.0 – Einführung in die Datenanalyse unter Windows. Addison Wesley Verlag, München 2000<sup>7</sup>
  - 11 **BURTSCHER M, BACHMANN O, HATZL T, HOTTER B, LIKAR R, PHILADELPHY M, NACHBAUER W.** Physiologische Belastungsreaktionen älterer Menschen beim Bergwandern. In: **SCHOBERSBERGER W ET AL.** Jahrbuch 2000. Österreichische Gesellschaft für Alpin- und Höhenmedizin 2000: 151-163
  - 12 **DEETJEN P.** Atmung und Säure-Basen-Haushalt. In: **DEETJEN P, SPECKMANN E-J.** Physiologie. Urban & Schwarzenberger, Schwarzenberg 1994<sup>2</sup>
  - 13 **DEETJEN P.** Einleitung: Höhenphysiologie. In: **DEETJEN P, HUMPELER E.** Medizinische Aspekte der Höhe. S: 1-4. Thieme Verlag, Stuttgart – New York 1981
  - 14 **DREXEL H.** Bioklimatologie der Höhe. In: **DEETJEN P, HUMPELER E.** Medizinische Aspekte der Höhe. S: 4-14. Thieme Verlag, Stuttgart – New York 1981
  - 15 **ELTERMANN L.** Atmospheric Attenuation Model 1964 in the ultraviolet visible and infrared regions for altitude to 50k. US Enviromental research paper 1964
-

- 16 **FISCHER I.** Psychologische Alternstheorien. In: **OSWALD WD, HERRMANN WM, KANOWSKI S, LEHR UM, THOMAE H (Hrsg).** Gerontologie, Kohlhammer, Stuttgart 1991
  - 17 **FISCHER R.** Höhengaufenthalt bei Lungenkrankheiten. Dtsch Z Sportmed 2000; 51 (12): 412-417
  - 18 **FOWLER B & TAYLOR M.** The effects of hypoxia on reaction time and movement time components of a perceptual-motor task. Ergonomics 1987; 30: 1475-1485
  - 19 **FOWLER B & WHITE P.** The effects of hypoxia on serial response time. Ergonomics 1982; 25: 189-201
  - 20 **FRANKFURTER-ALLGEMEINE-ZEITUNG.** Zahl der Bergunfälle stark gestiegen. Frankfurt am Main, Ausgabe Nr. 160 vom 21.7.2004
  - 21 **FRIEDMANN B & BÄRTSCH P.** Höhenttraining: Sinn, Unsinn, Trends. Orthopäde 1997; 26: 987-992
  - 22 **FRIEDMANN B.** Entwicklungen im Höhenttraining: Trends und Fragen. Dtsch Z Sportmed 2000; 51 (12): 418-423
  - 23 **GUNGA HC, KIRSCH K, BOLDT LE, KORALEWSKI E, JOHANNES B, RÖCKER L, YABAN B, BEHN C, FRIES D, HUMPELER E, SCHOBERSBERGER W.** AMAS 2000 – Körperzusammensetzung und Ödembildung bei moderater Höhenexposition – die Bedeutung des Interstitiums als Volumenspeicher beim Menschen. In: **SCHOBERSBERGER W ET AL.** Jahrbuch 2000. Österreichische Gesellschaft für Alpin- und Höhenmedizin 2000: 53-70
  - 24 **GÜNTHER M, JUNGMANN H, KLASSEN B.** Einfluss des akuten Höhenwechsels bis 3000 m auf Kreislauf- und Lungenfunktion. In: **DEETJEN P, HUMPELER E.** Medizinische Aspekte der Höhe. S: 103-109. Thieme Verlag, Stuttgart – New York 1981
  - 25 **HEINECKE A, HULTSCH E, REPGES R.** Medizinische Biometrie. Springerverlag, Berlin, Heidelberg, New York 1992
  - 26 **HENKE T, GLÄSER H, HECK H.** Sportverletzungen in Deutschland. In: **ALT W, SCHAFF P, SCHUMANN H.** Neue Wege zur Unfallverhütung im Sport. Verlag Sport und Buch Strauß, Köln 2000
  - 27 **HICK WE.** On the rate of gain of information. J Exp Psychol 1952, 4: 11-26
  - 28 **HOLLMANN W & HETTINGER T.** Sportmedizin – Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Schattauer, Stuttgart 2000<sup>4</sup>
  - 29 **KACIREK J.** Sauerstoffmangel. In: **PONGARTZ H. (Hrsg).** Kompendium der Flugmedizin. Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe 2002
  - 30 **KAUSLER DH.** Experimental psychology, cognition and human aging. Springer Verlag, New York 1991
  - 31 **KAY H.** The effect of position in a display upon problem solving. Quart. Journal of Experimental Psychology 1954; 6: 155-169
-

- 32 **KELMAN GR, CROW TJ, BURSILL AE.** Effects of mild hypoxia on mental performance assessed by a test of selective attention. *Aerosp Med* 1969; 40: 301-303
- 33 **KLAUSEN K.** Cardiac output in man at rest and working during and after acclimatization to 3800 m. *J Appl Physiol* 1966; 47: 670-676
- 34 **KOBRİK JL & DUSEK ER.** Effects of hypoxia on voluntary response time to peripherally located visually stimuli. *J Appl Physiol* 1970; 29 (4): 444-448
- 35 **KRAMER A, COYNE J, STRAYER.** Cognitive Function at High Altitude. *Hum Factors* 1993; 35: 329-344
- 36 **KRIEGER S.** Eine Analyse der Bergsportnotfälle als Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit im Bergsport. Unveröffentlichte Dissertation an der Technischen Universität München, München 2000
- 37 **KRÜGER A.** Die Reaktionszeit des Sportlers. Ein Überblick über ausgewählte Forschungsergebnisse. In: *Informationen zum Training – Die Reaktionszeit des Sportlers.* 1982
- 38 **KUBITZKI J.** Die visuelle Wahrnehmung in der Fahreignungsdiagnostik: teststatistische Überprüfung einer parallelen Bilderserie zum Trachistoskopischen Auffassungsversuch (TAVT). Waxmann, Münster – New York 1994
- 39 **LI XY, WU XY, FU C, SHEN XF, YANG CB, WU YH.** Effects of acute exposure to mild or moderate hypoxia on human psychomotor performance and visual-reaction time. *Space Med Eng (Beijing)* 2000; 13 (4): 235-239
- 40 **LÖLLGEN H.** Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik. Verlag der CIBA-Zeitschriften, Wehr-Baden 2000<sup>3</sup>
- 41 **MACINTOSH JH, THOMAS DJ, OLIVE JE, CHESNER IM, KNIGHT RJE.** The effect of altitude on tests of reaction time and alertness. *Aviat Space Environ Med* 1988; 59: 246-8
- 42 **MAIRBÄURL H.** Höhenakklimatisation. *Dtsch Z Sportmed* 2000; 51 (12): 390-394
- 43 **MARTIN D, CARL K, LEHNERTZ K.** Handbuch der Trainingslehre. Hofmann Verlag, Schorndorf 2001
- 44 **METKER T, GELAU C, TRÄNKLE U.** Altersbedingte kognitive Veränderungen. In: **TRÄNKLE U (Hsg).** Autofahren im Alter. Mensch-Fahrzeug –Umwelt. TÜV Rheinland/ Deutscher Psychologenverlag, Köln/ Bonn 1994: 99-120
- 45 **NEUWIRTH W & BENESCH M.** Wiener Determinationstest. Dr. Gernot Schuhfried Ges. m.b.H., Mödling 2004
- 46 **NOBLE J, JONES JG, DAVIS EJ.** Cognitive Function during Moderate Hypoxaemia. *Anaesth Intensive Care* 1993; 21: 180-184
-

- 
- 47 **O'CARROL RE & MACLEOD D.** Moderate altitude has no effect on choice reaction time in international rugby players. *Br J Sports Med* 1997; 31: 151-2
  - 48 **OLBRICHT E.** Kompetenz im Alter. *Z Gerontol*, 1987; (20): 319-330
  - 49 **PAUL MA & FRASER WD.** Performance during mild acute hypoxia. *Aviat Space Environ Med* 1994; 65: 891-899
  - 50 **PFAFFENROTH I.** Mobilitätsbedürfnisse und Unfallverwicklung älterer Autofahrer/innen. In: **TRÄNKLE U (Hsg).** Autofahren im Alter. Mensch-Fahrzeug –Umwelt. TÜV Rheinland/ Deutscher Psychologenverlag, Köln/ Bonn 1994
  - 51 **POLLARD & MURDOCH.** Praktische Berg- und Trekkingmedizin. Ullstein Medical, Wiesbaden 1998
  - 52 **PÖTHING D, RIES W, ROTH N, PÖGELT B, KUCHER A, PANKAU H, WINIECKI P.** Experimentelle Untersuchungen zum psychologischen Grundtempo im Altersgang. *Med Sport* 1983; 25: 73-77
  - 53 **RAMSEY J & DAYTON MS.** Oxygen Reduction and Reaction Time in Hypoxic and Normal Drivers. *Arch Environ Health* 1970; 20: 597-601
  - 54 **RICHALET JP, COATES G, REMMERS JE.** The heart and adrenergic system in hypoxia. In: **DEKKER BC.** Hypoxia: The Adaptions., Philadelphia PA 1990: 231-240
  - 55 **RICHALET JP, MEHDIQUI H, RATHAT C, VIGNON P, KEROMES A, HERRY JP, SABATIER C, TANCHE M, LHOSTE F.** Acute hypoxia decreases cardiac response to catecholamines in exercising humans. *Int J Sports Med* 1988; 9: 157-162
  - 56 **RIKLI R & BUSCH S.** Motor performance of women as a function of age and physical activity level. *J Gerontol* 1986; 41: 645-649
  - 57 **RINNINGER F.** Referenzbereiche klinisch wichtiger Laborparameter. In: *Thiemes Innere Medizin.* Thieme, Stuttgart – New York 1999: 2175-2179
  - 58 **ROST R.** Sport- und Bewegungstherapie bei Inneren Krankheiten. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 2002
  - 59 **SALTHOUSE TA.** Functional Age. In: **BIRREN JE, ROBINSON PK, LIVINGSTON JE.** Age, health & employment. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1986
  - 60 **SCHALLER H-J.** Bewegungskoordination im Alter. In: **DENK H, PACHE D, SCHALLER HJ.** Handbuch Alterssport. Verlag Hofmann, Schorndorf 2003: 199-242
  - 61 **SCHEID P.** Atmung. In: **KLINKE R, SILBERNAGEL S.** Lehrbuch der Physiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart – New York 1996: 213-268
  - 62 **SCHMIDT RA.** Motor control and learning. Human Kinetics Publishers, Champaign 1988
  - 63 **SCHMIDT RF & THEWS G.** Physiologie des Menschen. Springer Verlag, Berlin 1997<sup>27</sup>
-

- 64 **SEIB H.** Erkenntnisse der Unfallursachenforschung zur altersbedingten Leistungsminderung der älteren Verkehrsteilnehmer, ihr Unfallrisiko und die rechtlichen Konsequenzen. *Z Gerontol* 1990; 23 (2): 86-96
- 65 **SHEPARD R.** Physiological changes and psychomotor performance during acute hypoxia. *J of Appl Physiol* 1956; 9: 343-351
- 66 **SPIRDUSO WW & CLIFFORD P.** Replication of age and physical activity effects on reaction and movement time. *J Gerontol* 1978; 33: 26-30
- 67 **SZMODIS I.** Exercise Effects on the Time of Reactions to auditory stimuli. *Eur J Appl Physiol* 1977; 37: 39
- 68 **VERCRUYSEN M.** Slowing of behavior with age. In: **KASTENBAUM R. (Ed.)** Encyclopedia of Adult Development. Orynx Press, Phoenix 1992: 457-467
- 69 **VOGEL J & HARRIS C.** Cardiopulmonary responses of resting man during early exposure to high altitude. *Journal of Applied Physiology* 1967; 22: 1124-1129
- 70 **WEBER F, MITTERMAYR M, PLÖRER A.** Hautschäden durch Sonnenlicht in der Höhe und vorbeugende Maßnahmen. In: **SCHOBERSBERGER W ET AL.** Jahrbuch 2000. Österreichische Gesellschaft für Alpin- und Höhenmedizin 2000: 249-258
- 71 **WEIL JV, BYRNE-QUINN E, SODAL IE, FRIESEN WO, UNDERHILL B, FILLEY GF.** Hypoxic ventilatory drive in normal men. *J Clin Invest* 1970; 49: 1061-1072
- 72 **WEISSER B & OKONEK C.** Biologisch-medizinische Grundlagen des Alterssports. In: **DENK H, PACHE D, SCHALLER HJ.** Handbuch Alterssport. Verlag Hofmann, Schorndorf 2003: 97-143
- 73 **WEST JB, BOYER SJ, GRABER DJ, HACKETT PH, MARET KH, MILLEDGE JS, PETERS JR, PIZZO CJ, SAMAJA M, SARNQUIST FH, SCHOENE RB, WINSLOW RM.** Maximal exercise at extreme altitudes on Mount Everest. *J Appl Physiol* 1983; 55: 688-698
-

## Tabellen-, Abbildungs- und Gleichungsverzeichnis

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Standardatmosphärentabelle (nach ELTERMANN, 1964) .....	13
Tabelle 2:	Anthropometrische Daten der Interventionsgruppe mit Mittelwert und Standardabweichung.....	35
Tabelle 3:	Anthropometrische Daten der Kontrollgruppe mit Mittelwert und Standardabweichung.....	36
Tabelle 4:	Haupttestvariablen (nach NEUWIRTH & BENESCH, 2004).....	39
Tabelle 5:	Nebentestvariablen .....	39
Tabelle 6:	Untersuchungsmaterial .....	41
Tabelle 7:	Grenzen der Signifikanzbereiche.....	42
Tabelle 8:	Untersuchungsgang und Messzeitpunkte.....	43

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Altersverteilung der Alpin-Touristen in Europa (nach BURTSCHER ET AL., 2000) .....	7
Abbildung 2:	Luftdichte, Luftdruck und Dampfdruck im Höhenverlauf (nach HOLLMANN & HETTINGER, 2000 <sup>4</sup> ).....	14
Abbildung 3:	S <sub>a</sub> O <sub>2</sub> im Verlauf eines Aufenthalts in 4559 m Höhe (nach BÄRTSCH, 2000) .....	17
Abbildung 4:	Endexpiratorischer PCO <sub>2</sub> im Verlauf eines Aufenthalts in 4559 m Höhe (nach BÄRTSCH, 2000) .....	17
Abbildung 5:	Laktatleistungskurve in unterschiedlichen Höhen (nach FRIEDMANN & BÄRTSCH, 1997) .....	18
Abbildung 6:	S <sub>a</sub> O <sub>2</sub> und Ventilation im Verlauf eines Aufenthaltes auf 4300 m Höhe (nach MAIRBÄURL, 2000).....	20
Abbildung 7:	Verlauf des P <sub>a</sub> O <sub>2</sub> und des P <sub>i</sub> O <sub>2</sub> nach vollständiger Akklimatisation an die Höhe (nach BERGHOLD & SCHAFFERT, 2001 <sup>5</sup> und ELTERMANN, 1964) .....	21
Abbildung 8:	Maximale Herzfrequenz im Altersverlauf nach verschiedenen Autoren (nach HOLLMANN & HETTINGER, 2000 <sup>4</sup> ).....	28
Abbildung 9:	O <sub>2</sub> -Aufnahmefähigkeit im Altersverlauf für untrainierte Personen (nach ROST, 2002).....	29
Abbildung 10:	Die einfache Reaktionsfähigkeit im Altersverlauf (nach SEIB, 1990) .....	30
Abbildung 11:	Die komplexe Reaktionsfähigkeit im Altersverlauf (SEIB, 1990 nach SCHALLER, 2003).....	31
Abbildung 12:	Darstellung des Untersuchungsgangs .....	37
Abbildung 13:	Wiener Testsystem.....	41
Abbildung 14:	Pulsoxymeter: Nellcor Puritan Bennett .....	41

---

Abbildung 15: Stepper: Reebok.....	41
Abbildung 16: Herzfrequenzverlauf der Interventionsgruppe mit Standardabweichung .....	44
Abbildung 17: Herzfrequenzverlauf der Kontrollgruppe mit Standardabweichung.....	44
Abbildung 18: Sauerstoffsättigungsverlauf der Interventionsgruppe mit Standardabweichung.....	46
Abbildung 19: Sauerstoffsättigungsverlauf der Kontrollgruppe mit Standardabweichung.....	46
Abbildung 20: Gesamtrichtige Reaktionen der Interventionsgruppe mit Standardabweichung.....	48
Abbildung 21: Gesamtfalsche Reaktionen der Interventionsgruppe mit Standardabweichung.....	48
Abbildung 22: Gesamtausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe mit Standardabweichung .....	49
Abbildung 23: Gesamtdargebotene Reize der Interventionsgruppe mit Standardabweichung.....	49
Abbildung 24: Gesamtrichtige Reaktionen der Kontrollgruppe mit Standardabweichung .....	51
Abbildung 25: Gesamtfalsche Reaktionen der Kontrollgruppe mit Standardabweichung .....	51
Abbildung 26: Gesamtausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe mit Standardabweichung .....	52
Abbildung 27: Gesamtdargebotene Reize der Kontrollgruppe mit Standardabweichung .....	52
Abbildung 28: Richtige Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung..	54
Abbildung 29: Falsche Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung ...	54
Abbildung 30: Ausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabw. ....	55
Abbildung 31: Dargebotene Reize der Interventionsgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung....	55
Abbildung 32: Richtige Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung..	57
Abbildung 33: Falsche Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung ...	57
Abbildung 34: Ausgelassene Reaktionen der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabw. ....	58
Abbildung 35: Dargebotene Reize der Interventionsgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung....	58
Abbildung 36: Richtige Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung .....	60
Abbildung 37: Falsche Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung .....	60
Abbildung 38: Ausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung .	61
Abbildung 39: Dargebotene Reize der Kontrollgruppe (1. vs. 3. Test) mit Standardabweichung .....	61
Abbildung 40: Richtige Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung .....	63
Abbildung 41: Falsche Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung .....	63
Abbildung 42: Ausgelassene Reaktionen der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung .	64
Abbildung 43: Dargebotene Reize der Kontrollgruppe (2. vs. 4. Test) mit Standardabweichung .....	64
Abbildung 44: Reaktionszeiten der Interventionsgruppe mit Standardabweichung.....	66
Abbildung 45: Reaktionszeiten der Kontrollgruppe mit Standardabweichung .....	66
 <i>Gleichungsverzeichnis</i>	
Gleichung 1: Hicksche Gleichung (nach HICK, 1952) .....	25
Gleichung 2: Wilcoxon Rangsummentest (nach HEINECKE ET AL., 1992).....	42

---