

Aus Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Ludwig-Maximilians-
Universität in München

Direktor: Prof. Dr. med. D. Nowak

**Moderner Brandschutz: Einfluss von normobarer Hypoxie
auf arbeitsmedizinisch relevante Aspekte der kognitiven
und psychomotorischen Leistungsfähigkeit**

Aus Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Ludwig-Maximilians-
Universität in München

Direktor: Prof. Dr. med. D. Nowak

**Moderner Brandschutz: Einfluss von normobarer Hypoxie
auf arbeitsmedizinisch relevante Aspekte der kognitiven
und psychomotorischen Leistungsfähigkeit**

Dissertation zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von Andreas Prechtl
aus München

2004

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität München

Berichterstatter: PD Dr. med. P. Angerer

Mitberichterstatter: Prof. Dr. C. Keller
Prof. Dr. T. Gilg

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. K. Peter

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2004

I. EINLEITUNG	1
1. Brandvermeidung durch Sauerstoffreduktion und arbeitsmedizinische Implikationen	1
2. Zusammenhang zwischen normobarer und hypobarer Hypoxie	3
3. Auswirkungen von vermindertem Sauerstoffpartialdruck in der Atemluft	3
4. Zusammenfassende Beschreibung der Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Hypoxie und mentaler Leistungsfähigkeit	9
5. Ziel und Fragestellung	11
II. METHODE	12
1. Kollektiv	12
1.1. Ein- und Ausschlusskriterien	12
1.2. Rekrutierung des Probandenkollektivs und Randomisierung	13
2. Versuche	13
2.1. Versuchsdesign	13
2.2. Versuchsaufbau	15
2.2.1. Vorsorgeuntersuchungen	15
2.2.2. Versuchsablauf	15
3. Messmethoden	17
3.1. Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Herzfrequenz und Ergometrie	17
3.1.1. Blutdruck, Herzfrequenz und periphere Sauerstoffsättigung	17
3.1.2. Ergometrie	17
3.2. Kognitive Leistungstests	17
3.2.1. Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar	17
3.2.2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test	18
3.2.3. Zahlen-Verbindungs-Test	19
3.2.4. Matrizen-Test	19
3.3. Psychomotorische Leistungstests (Wiener Testsystem)	19
3.3.1. Wiener Reaktionstest	19

3.3.2.	Wiener Determinationstest _____	20
4.	Auswertung _____	20
4.1.	Testauswertung _____	20
4.1.1.	Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar _____	20
4.1.2.	Aufmerksamkeits-Belastungs-Test _____	21
4.1.3.	Zahlen-Verbindungs-Test _____	21
4.1.4.	Matrizen-Test _____	21
4.1.5.	Reaktionstest _____	21
4.1.6.	Determinationstest _____	22
4.1.7.	Reaktionstest vor/nach Belastung _____	22
4.2.	Aufbereitung der Daten und Statistik _____	22
III.	ERGEBNISSE _____	24
1.	Kollektiv _____	24
1.1.	Rekrutierung, Randomisierung und vorzeitiger Studienabbruch _____	24
1.2.	Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck und Herzfrequenz _____	26
1.3.	Vergleich mit Normstichproben _____	26
2.	Einfluss der Sauerstoffkonzentration _____	27
2.1.	Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Herzfrequenz und Ergometrie _____	27
2.1.1.	Periphere Sauerstoffsättigung _____	27
2.1.2.	Blutdruck _____	28
2.1.3.	Herzfrequenz _____	29
2.1.4.	Ergometrie _____	29
2.2.	Kognitive Leistungstests _____	32
2.2.1.	Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar _____	32
2.2.2.	Aufmerksamkeits-Belastungs-Test _____	33
2.2.3.	Zahlenverbindungstest _____	35
2.2.4.	Matrizen-Test _____	36
2.2.5.	Reaktionstest _____	37
2.2.6.	Determinationstest _____	39
2.3.	Auswirkungen von körperlicher Belastung unter normobarer Hypoxie _____	40
2.3.1.	Reaktionszeit (gesamt) und Belastung _____	40
2.3.2.	Motorische Komponente _____	42

2.3.3. Determinationstest _____	42
3. Kognitive und psychomotorische Leistung in Abhängigkeit vom Alter _____	43
4. Lernverhalten _____	44
5. Verblindung _____	46
IV. Diskussion _____	47
1. Auswirkungen von körperlicher Belastung unter normobarer Hypoxie auf die Reaktionszeit _____	49
2. Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Herzfrequenz und Ergometrie _____	54
2.1. Periphere Sauerstoffsättigung _____	54
2.2. Blutdruck _____	55
2.3. Herzfrequenz _____	56
2.4. Ergometrie _____	56
3. Kognitive Leistungstests _____	58
3.1. Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar _____	58
3.2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test und Zahlen-Verbindungs-Test _____	60
3.3. Matrizen-Test _____	63
3.4. Reaktionstest und Determinationstest _____	65
4. Kognitive und psychomotorische Leistung in Abhängigkeit vom Alter _____	68
5. Lernverhalten _____	68
6. Schwächen/Grenzen der Arbeit _____	69
7. Stärken der Arbeit _____	70
8. Implikationen für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz _____	71
V. ZUSAMMENFASSUNG _____	73
VI. LITERATUR _____	75

I. Einleitung

1. Brandvermeidung durch Sauerstoffreduktion und arbeitsmedizinische Implikationen

Wenn neue Technologien Einzug in die Arbeitswelt halten, müssen deren Auswirkungen auf den arbeitenden Menschen überprüft werden. Eine arbeitsmedizinische Bewertung muss dringend wissenschaftlich basiert sein, da sich sonst Nachteile sowohl für Beschäftigte als auch für die Unternehmen ergeben können. Bewertet eine gesetzliche Regelung neue Techniken zu streng, besteht die Gefahr, dass eine neue, lebensrettende Technik an ihrer Verbreitung gehindert wird. Erfolgt die Bewertung zu großzügig, bestehen gesundheitliche Gefahren für die exponierten Beschäftigten.

Seit wenigen Jahren bedient sich eine moderne Brandschutztechnologie des partiellen Ersatzes von Sauerstoff durch Stickstoff in Räumen, in denen die Entstehung eines Brandes verhindert werden soll. Der Luftdruck bleibt dabei unverändert, so dass man in diesem Fall von normobarer Hypoxie spricht. In den geschützten Räumen arbeiten zeitweise Menschen.

Da bislang kaum Daten zu den Auswirkungen von normobarer Hypoxie auf die Gesundheit der exponierten Personen zur Verfügung stehen, wollten wir diese in einer Studie untersuchen, die experimentell die realen Arbeitsbedingungen und deren Anforderungen simuliert.

Die Brandvermeidungstechnologie für Räume, die besonders leicht entzündliche, wertvolle oder gegenüber Feuerschaden sensible Güter enthalten, wurde erstmals im Jahr 2000 in Deutschland installiert und findet seither rasante Verbreitung. Anfang 2004 waren bereits weit über 40 Anlagen in Betrieb. Durch Absenkung der Sauerstoffkonzentration von normalen 20,9 Vol.% in der Luft auf Werte unter 17 Vol.% wird das Entstehen eines Brandes verhindert. Wie weit die Sauerstoffkonzentration abgesenkt werden muss, hängt von der Art der zu schützenden Materialien ab. In der Regel reicht eine Sauerstoffreduktion bis auf 15 Vol.% aus. In speziellen Fällen ist aber eine Reduktion bis auf 13 Vol.% oder

darunter notwendig. Geschützte Bereiche sind z.B. Archive von Museen, Serverräume großer Unternehmen, Lager mit brennbaren Materialien (wie z.B. in der chemischen Industrie oder der Bekleidungsindustrie) oder militärische Anlagen (z.B. U-Boote). Im Gegensatz zu den konventionellen Brandschutzanlagen (z.B. Sprinkleranlagen) können hier keine Schäden oder Gefährdungen durch Rauchentwicklung oder Löschwasser entstehen. Natürlich werden nicht nur Brandschäden an Gebäuden und Einrichtungsgegenständen, sondern auch an Menschen verhindert. Die Technologie wird mittlerweile auch in mehreren anderen Ländern Europas angewandt.

Während für die Sauerstoffversorgung des Menschen der Sauerstoffpartialdruck von entscheidender Bedeutung ist (also der Gasdruck des Sauerstoffs in der Luft), ist für einen Verbrennungsvorgang mit offener Flamme das Mischungsverhältnis zwischen Sauerstoff und der restlichen Luft entscheidend (also der prozentuale Sauerstoffgehalt der Luft (Lambertsen, 1994)).

Die Brandschutzmaßnahme besteht nun darin, den Sauerstoff in gefährdeten Bereichen teilweise durch Stickstoff zu ersetzen. Dies geschieht mit Apparaturen, die Stickstoff aus der Luft anreichern und diesen so lange in den zu schützenden Raum einleiten, bis der gewünschte Sauerstoffgehalt erreicht ist.

Die geschützten Bereiche müssen in der Regel von Personen begangen werden können; teilweise ist auch ein längerer Aufenthalt in diesen Räumen notwendig. Die kurzfristigen sowie langfristigen Auswirkungen auf Gesundheit und körperliche sowie geistige Leistungsfähigkeit von Menschen, die in solchen sauerstoffreduzierten Atmosphären arbeiten, werden aus arbeitsmedizinischer Sicht mit zunehmender Verbreitung der Technologie immer bedeutsamer. Aspekte, die ferner zu berücksichtigen sind, sind beispielsweise die Dauer des Aufenthaltes in diesen Atmosphären und das Alter der Beschäftigten. Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang, dass individuelle Leistungsvoraussetzungen der künftig zu exponierenden Personen mit den tatsächlich zu erwartenden Belastungen am Arbeitsplatz unter Hypoxie verglichen werden. Leistungseinschränkungen müssen mit dem Blickwinkel auf die Hypoxie arbeitsmedizinisch bewertet werden (Belastungs-Beanspruchungs-Konzept, Valentin et al. 1970). Außerdem müssen eventuell vorbestehende Erkrankungen in Betracht gezogen werden.

Zur Minimierung möglicher Gesundheitsgefahren wurde vor erstem Betreten eines Raumes mit sauerstoffreduzierter Atmosphäre eine arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung vorgeschlagen (Angerer und Nowak 2003). Diese beinhaltet eine festgelegte, schrittweise ärztliche Untersuchung und definiert Kriterien, die zu der arbeitsmedizinischen Beurteilung „gesundheitlicher Bedenken“ gegen die Aufnahme von Tätigkeiten in solchen Räumen führen. Dies sind vor allem vorbestehende Krankheiten der Lunge, des Herz-Kreislauf-Systems, des Blutes und des Gehirns. Über die Vorsorgeuntersuchung hinaus muss darauf geachtet werden, ob es bei den Beschäftigten unter Exposition zu gesundheitlichen Beschwerden kommt.

2. Zusammenhang zwischen normobarer und hypobarer Hypoxie

Der überwiegende Teil der Forschungsliteratur, die sich mit der Auswirkung eines verminderten Sauerstoffpartialdrucks auf die geistige Leistungsfähigkeit beschäftigt, wurde unter den Bedingungen der hypobaren Hypoxie, also in der Höhe, durchgeführt. In diesem Fall ist zwar der Sauerstoffpartialdruck reduziert, aber auch der Luftdruck insgesamt. Die Auswirkungen auf den Körper des Menschen sind zwar ähnlich, aber nicht gleich denen bei normobarer Hypoxie, also sauerstoffreduzierter Atmosphäre bei normalem Luftdruck (Savourey et al., 2003).

Danach lassen sich Effekte unter normo- und hypobarer Hypoxie miteinander vergleichen, wobei es jedoch Hinweise gibt, dass manche Effekte unter hypobarer Hypoxie stärker ausgeprägt sind als bei normobarer Hypoxie.

3. Auswirkungen von vermindertem Sauerstoffpartialdruck in der Atemluft

Aus arbeitsmedizinischer Sicht ist es von Bedeutung, die Auswirkungen von Hypoxie auf die Physiologie (v.a. auf Atmung, Herz-Kreislaufsystem, Blut und Gehirn) zu kennen. Relevante Vorerkrankungen, besondere Lebensumstände und Auswirkungen von Hypoxie auf die Befindlichkeit sind in der Folge kurz zusammengestellt.

Herz/Kreislauf

Aufgrund der erhöhten Herzfrequenz bei gleichem systolischem Blutdruck steigt unter atmosphärischem Sauerstoffmangel die Herzarbeit (Produkt von Herzfrequenz und systolischem Blutdruck) und somit der myokardiale Sauerstoffverbrauch an (Ward et al., 2000; Morgan et al., 1990). Im Zusammenspiel mit dem zusätzlich herabgesetzten Sauerstoffpartialdruck kann es vor allem bei Patienten mit koronarer Herzerkrankung distal einer Stenose zu einem manifesten Sauerstoffmangel im Myokard und damit zu einer Angina-Pectoris-Symptomatik kommen. Diese Gefahr besteht auch bei Beschäftigten mit einer asymptomatischen und noch nicht diagnostizierten koronaren Herzkrankheit.

Langfristig ergeben sich in verschiedenen neueren Studien unter vermindertem Sauerstoffpartialdruck keine Hinweise auf eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes bei Patienten mit koronarer Herzerkrankung, die eine Auswurffraktion von durchschnittlich 40% aufweisen. Die körperliche Leistungsfähigkeit war im Vergleich zu der auf Meereshöhe jedoch eingeschränkt (Kleinman et al., 1998; Erdman et al. 1998).

Laut einer Studie über Patienten mit chronischer Herzinsuffizienz der Stadien NYHA I bis III können sich diese bei stabilem Verlauf unproblematisch in Höhen bis zu 3000 m begeben (entsprechend ca. 14,5% Sauerstoffkonzentration auf Meereshöhe). Mit dem vermehrten Auftreten von Rhythmusstörungen oder Arrhythmien ist dabei nicht zu rechnen, wohl aber mit einer Reduzierung der körperlichen Belastungsfähigkeit (Agostini et al., 2000). Bei einer Auswurffraktion von unter 30% sollte eine Höhe von 2000 m jedoch nicht mehr überschritten werden (Allemann et al., 1998).

Des Weiteren sind Vorbestehen und Schweregrad einer pulmonal-arteriellen Hypertonie von Bedeutung. Durch Hypoxie kommt es im Rahmen der physiologischen Anpassungsvorgänge (Euler-Liljestrand-Mechanismus) zu einer weiteren Erhöhung des Gefäßwiderstandes in der Lungenstrombahn, der unter Umständen in letzter Konsequenz zu einem Rechtsherzversagen beitragen kann (Ward et al., 2000).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass anhand der vorliegenden Studien bei Herzerkrankungen in klinisch stabilem Zustand kein erhöhtes Risiko für das Eintreten von gefährlichen Komplikationen zu bestehen scheint. Dennoch ist es nicht

auszuschließen, dass es in vereinzelt Fällen durch die Hypoxie zu Komplikationen wie z. B. Dekompensation einer vorbestehenden Herzinsuffizienz, Myokardischämien bei kritischen Stenosen oder Rechtsherzversagen kommen kann. Dies gilt auch für vom Beschäftigten nicht bemerkte, in Normoxie asymptotische Progredienz der jeweiligen Erkrankung. Um solche Fälle möglichst zu vermeiden, ist es wichtig, dass gerade Beschäftigte mit kardialen Grunderkrankungen vor Aufnahme ihrer Tätigkeit in sauerstoffreduzierten Atmosphären und in regelmäßigen Abständen während dieser Tätigkeit arbeitsmedizinisch untersucht und unter Umständen einem geeigneten Belastungstest unterzogen werden.

Lunge

Um den verminderten Sauerstoffpartialdruck auszugleichen, nimmt die alveoläre Ventilation zu – vermittelt durch eine hypoxiebedingte Steigerung des Atemtriebs. Die Affinität des Hämoglobins zu Sauerstoff nimmt gleichzeitig aufgrund der Linksverschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve – bei respiratorischer Alkalose – zu. Außerdem nimmt der Gefäßwiderstand im Lungenkreislauf durch eine Vasokonstriktion bei alveolärer Hypoxie zu (Schoene, 1999).

Bei Erkrankungen, die mit einer respiratorischen Insuffizienz einhergehen, besteht die Gefahr, dass sich Symptome durch Aufenthalte in sauerstoffreduzierten Atmosphären verstärken.

Personen mit chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) bewegen sich bei herabgesetzter Sauerstoffsättigung im steil abfallenden Teil der S-förmigen Sauerstoffdissoziationskurve, so dass sich schon bei geringen Änderungen des Sauerstoffpartialdrucks in der Atemluft gravierende Änderungen der Sauerstoffsättigung des Hämoglobins ergeben können. Kritische Sauerstoffpartialdrücke werden im Bereich von 7,3 kPa (55 mm Hg) erreicht, bei dem die Deutsche Gesellschaft für Pneumologie wie auch die American Thoracic Society die Einleitung einer Sauerstoff-Langzeittherapie empfehlen.

Deswegen ist diese Personengruppe durch Aufenthalte in Atmosphären mit vermindertem Sauerstoffgehalt besonders gefährdet, weil mit einem deutlichen Rückgang des Sauerstoffpartialdrucks im Blut zwischen Meereshöhe und 2440 m (Kabinendruck in kommerziellen Flugzeugen) bzw. 3050 m gerechnet werden muss. Richtlinien gehen davon aus, dass dieser während eines Fluges nicht unter 7,3 kPa (55 mm Hg) fallen sollte. Dieser Wert wurde in 2440 m bei mehr als 50% und auf

3050 m bei mehr als 80% der Probanden, die an einer COPD unterschiedlichen Schweregrades litten, unterschritten (Christensen et al., 2000). Dennoch waren alle Probanden frei von Beschwerden. Allerdings muss hierbei bedacht werden, dass sich die in diesem Zusammenhang untersuchten Probanden in Ruhe befanden und weder körperliche noch geistige Erwerbsarbeit verrichten mussten.

Insgesamt zeigt sich bei mehreren Studien ein Abfall des Sauerstoffpartialdrucks im Blut (Graham und Houston, 1978; Renzetti und Clement, 1966), der unter körperlicher Belastung noch stärker ausfällt als in Ruhe. Somit ist eine Exposition gegenüber Hypoxie von Beschäftigten, die an einer COPD leiden, kritisch zu betrachten. Von entscheidender Bedeutung ist der Sauerstoffpartialdruck des Blutes in Ruhe, die Sauerstoffkonzentration am Arbeitsplatz sowie die körperliche Belastung und der erwartete Sauerstoffpartialdruck im Blut am Arbeitsplatz.

Bei Asthma bronchiale ist im anfallsfreien Intervall nicht mit einer Exazerbation oder Progredienz durch Hypoxie zu rechnen (Fischer et al., 2000), eine Zunahme der bronchialen Hyperreagibilität ist nicht zu erwarten.

Bei Beschäftigten mit Lungenerkrankungen, wie z.B. interstitiellen Lungenerkrankungen oder zystischer Fibrose ist generell keine arbeitsmedizinische Einschränkung der Eignung zu Tätigkeiten in Hypoxie zu erwarten, wenn keine Verminderung des arteriellen PaO_2 (Sauerstoffpartialdruck) vorliegt. Aus diesem Grund sollte von Beschäftigten mit einer Lungenerkrankung in sauerstoffreduzierten Bereichen die Sauerstoffsättigung bei Normoxie bekannt sein. Wenn diese vermindert ist, müsste die Sauerstoffsättigung unter Arbeitsbedingungen gemessen und die entsprechenden Schlüsse aus den Ergebnissen gezogen werden.

ZNS

Hypoxämie führt zu einer zerebralen Vasodilatation und somit Mehrperfusion (Bergstrom, 1975), die jedoch teilweise durch die hypokapniebedingte Vasokonstriktion aufgehoben wird (Reeves et al., 1985).

Einige Studien geben Hinweise darauf, dass es bei Aufenthalten oberhalb von 7000 m zu Leistungseinschränkungen und zu morphologischen Veränderungen des Gehirns kommen kann (Regard et al., 1989), die in bildgebenden Verfahren nachgewiesen werden konnten. In einigen Untersuchungen fanden sich auch Hinweise auf eine verzögerte Erholung von bestimmten kognitiven oder psychomotorischen Leistungen nach Beendigung eines Höhengaufenthaltes in Höhen

von mehr als 8000 m (Abraini et al., 1998). Da diese Bedingungen im Brandschutz durch sauerstoffreduzierte Atmosphären nicht vorkommen, sind sie aus arbeitsmedizinischer Sichtweise in diesem Zusammenhang nicht von Belang.

Blut

Eine Steigerung der Erythropoese durch Erythropoetin wirkt sich erst nach Daueraufenthalt von mehreren Wochen unter Hypoxiebedingungen in einem gesteigerten Hämatokritwert aus. Schneller verläuft die Verschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve nach links durch einen erhöhten Blut-pH. Dieser ist durch eine respiratorische Alkalose bedingt und führt zu einer erhöhten Affinität des Hämoglobins zu Sauerstoff (Schoene, 1999).

Entscheidend für Gewebehypoxie ist die Menge an Sauerstoff, die durch das Blut an das Gewebe abgegeben werden kann. Diese Menge ist linear abhängig von der Sauerstofftransportkapazität von Hämoglobin und Plasma, dem Herzzeitvolumen und der Sauerstoffsättigung des Blutes (Habler und Messmer, 1997). Letztere wiederum hängt vom Sauerstoffpartialdruck der Atemluft ab. Die Sauerstofftransportkapazität ist bei jeder Art von Anämie herabgesetzt. Die kritische Grenze für die Versorgung des Gewebes ist sowohl abhängig vom Ausmaß der Anämie als auch des Sauerstoffpartialdrucks in der Atemluft. Eine kritische Menge wird bei einem gesunden Menschen unter Normoxie, der sich nicht im hypovolämischen Schock befindet, ab einem Hämoglobingehalt von 33 bis 40 g/l erreicht (Habler und Messmer, 1997).

Eine besondere Situation besteht bei der in Deutschland extrem seltenen Sichelzellanämie. Da sich bei dieser angeborenen Erkrankung die Erythrozyten aufgrund eines Hämoglobindefektes im deoxygenierten Blut zur Sichelzellform deformieren und dann durch die geringe Verformbarkeit Organinfarkte, vor allem der Milz, ausgelöst werden können (Herold, 2000), sollte arbeitsmedizinisch sichergestellt sein, dass homozygote Hb-S-Träger (bei diesen beträgt die Menge des defekten Hämoglobins 80%) nicht in sauerstoffreduzierten Atmosphären arbeiten.

Ältere Menschen und Hypoxie

Auswirkungen von sauerstoffreduzierten Atmosphären auf ältere Menschen sind von Bedeutung, weil bei diesen die Sauerstoffversorgung des Gewebes aufgrund von Alterungsprozessen ungünstiger ist als bei jüngeren. Zum einen gilt dies aufgrund von atherosklerotischen Veränderungen, zum anderen aufgrund einer Reduktion der

Ventilation durch verminderte Atemvolumina und verringerten Atemantrieb (Stamford, 1988).

Aus einer Untersuchung von 20 Probanden über 60 Jahren kann der Schluss gezogen werden, dass die physiologischen Anpassungsvorgänge bei älteren Menschen sehr ähnlich verlaufen wie die bei jüngeren (Levine et al., 1997). Nach einer Anpassungszeit von 5 Tagen unterschied sich vor allem noch der Widerstand im Lungenkreislauf von dem auf Meereshöhe, die meisten übrigen Parameter waren auf ein ähnliches Niveau wie auf Meereshöhe zurückgekehrt. Auch der relative Leistungsverlust in der Höhe war ähnlich dem von jüngeren Probanden in anderen Studien, wohl am ehesten bedingt durch die verringerte maximale Sauerstoffaufnahme.

Aus arbeitsmedizinischer Sicht besteht nach der derzeitigen Erkenntnis kein Hinweis auf die Notwendigkeit, gesunde, ältere Beschäftigte von der Arbeit in sauerstoffreduzierten Atmosphären generell auszuschließen. Allerdings muss bedacht werden, dass die im Vergleich zu jungen Menschen ohnehin reduzierte körperliche Belastungsfähigkeit durch Hypoxie noch weiter reduziert wird und Erkrankungen des kardiopulmonalen Systems (v.a. COPD mit erniedrigter SaO₂ oder koronare Herzerkrankung) oder Anämien häufiger auftreten.

Akute Höhenkrankheit/Befindlichkeit

Bei der akuten Höhenkrankheit handelt es sich um einen Symptomkomplex, bestehend aus einer charakteristischen Kombination unspezifischer Symptome, der normalerweise ab einem Aufenthalt von 6 Stunden beginnt. Ihr Maximum erreicht sie nach 30-40 Stunden und verläuft meist innerhalb von 3 Tagen selbstlimitierend. Diese können in Kopfschmerzen (häufigstes Symptom), Schwindel, Übelkeit, Appetitlosigkeit, Schlafschwierigkeiten, Müdigkeit, etc. (Hackett und Roach 2001) bestehen. Unter einer Höhe von 3000 m sind die Symptome selten, obwohl auch schon auf 2000 m Beschwerden bei 25% der Exponierten beschrieben worden sind (Banderet und Burse, 1991; Montgomery et al., 1989).

Eine Definition der „Lake Louise Consensus Group“ besagt, dass akute Höhenkrankheit bei Bestehen von Kopfschmerzen plus einem der folgenden Symptome vorliegt: Übelkeit/Erbrechen, Schlafstörungen, Schwindel oder Müdigkeit, wenn der Betroffene vor kurzer Zeit in eine Höhe von mindestens 2500 m aufgestiegen ist (Roach et al., 1993).

Die gefährlichsten, lebensgefährlichen Komplikationen sind das Höhenlungen- und das Höhenhirnödem. Diese können auftreten, wenn die entsprechenden Maßnahmen wie Abstieg von der Höhe nicht ergriffen werden. Sie können sich in Kopfschmerzen, Koordinationsstörungen und zunehmenden Bewusstseinsstörungen (Hirnödem) oder Dyspnoe, Zyanose, Husten, Tachykardie und Rasselgeräuschen über der Lunge (Höhenlungenödem) äußern.

4. Zusammenfassende Beschreibung der Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Hypoxie und mentaler Leistungsfähigkeit

Seit langem kontrovers diskutiert wird in der wissenschaftlichen Literatur die Frage, ob Hypoxie in der Höhe die geistige und psychomotorische Leistungsfähigkeit beeinflusst. Während ein Teil der Arbeiten keine Auswirkungen auf die kognitive und motorische Leistungsfähigkeit feststellen kann, kommt der andere Teil zu der Schlussfolgerung, dass sich verschiedene Aspekte (wie z.B. Reaktionsfähigkeit, Gedächtnisleistung, Konzentration, Motorik, etc.) verschlechtern (Übersicht über die relevante Literatur bei Angerer und Nowak, 2003). Die Teilbereiche, die in den vorliegenden Studien durch Hypoxie beeinflussbar zu sein scheinen, sollten daher in der vorliegenden Arbeit durch entsprechend ausgewählte kognitive Leistungstests untersucht werden. Tabelle I.1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse zur kognitiven und psychomotorischen Leistungsfähigkeit unter vermindertem Sauerstoffpartialdruck.

Die psychomentale Leistungsfähigkeit beeinflusst sowohl die Güte als auch die Sicherheit der Arbeit. Somit ist die Frage der mentalen und psychomotorischen Leistungsfähigkeit für die Arbeitsmedizin im Rahmen zukünftiger Arbeitsschutzvorschriften unter den Bedingungen der normobaren Hypoxie relevant.

Art.	Test	Höhe/normo- /hypobar	n	Dauer	Zentrale Ergebnisse
15	Gedächtnis, Aufmerksamkeit	4200 m, hb	60	5 d	keine Veränderungen beim Gedächtnistest, logisches Denken auf 4200 m am ersten Tag leicht beeinträchtigt
19	Konzentration/Aufmerksamkeit, Motorik, Reaktion	21, 15, 14, 13%, nb	22	11-14 d	keine Verschlechterung der Leistungen
48	Konzentration, logisches Denken, Reaktion	500, 4200 und 4700 m, hb	23	4,5 h	Konzentration, logisches Denken und Reaktion waren beeinträchtigt
18	logisches Denken	305 - 3660 m, hb	150	7 min	Urteilsfähigkeit beeinträchtigt, sonst keine Veränderungen
24	Gedächtnis, Motorik, logisches Denken	bis 7630, hb	8	40 d	unter 5490 m: keine Beeinträchtigung
37	Konzentration, logisches Denken	0 – 3658 m, hb	144	30 min	Konzentration, log. Denken, Reaktion nicht beeinträchtigt
29	Konzentration, logisches Denken	0 – 7000 m, hb	4	8 h	keine Einschränkung
51	Gedächtnis, Motorik, log. Denken, Reaktion	3048 m, hb	7	6,5 h	Gedächtnis, log. Denken und Reaktionszeit eingeschränkt
47	Konzentration, logisches Denken, Reaktion	550, 4700 m, hb	20	5 – 7 h	logisches Denken und Konzentration korrelieren mit Befindlichkeit
33	Konzentration, Sorgfalt	2133,3658 m, hb	12	7,25 h	Urteilsfähigkeit vermindert
12	Konzentration/ Aufmerksamkeit, logisches Denken	4300 m, hb	13	2,5 h	Konzentration und logisches Denken beeinträchtigt
44	Gedächtnis, Reaktion	Hyperoxie, nb (100%)	32	12 min	Gedächtnis und Reaktion unter Hyperoxie verbessert
16	Motorik, Reaktion	SaO ₂ bei 67%, nb	14	60 min	Motorik und Reaktion verschlechtert
27	logisches Denken	0 – 6000 m, hb	20	90 min	logisches Denken bei 6000 m und nicht akklimatisierten Personen beeinträchtigt

Tab. IV.1: Zusammenfassung der wichtigsten Artikel zur Veränderung der kognitiven Leistung, Motorik und Reaktion unter Sauerstoffmangel

hb – hypobar
nb – normobar
d - Tage
h - Stunden
min - Minuten

5. Ziel und Fragestellung

Die Arbeit hatte zum Ziel, Auswirkungen eines verminderten Sauerstoffgehaltes auf die psychomotorische Leistungsfähigkeit unter den typischen Bedingungen des Brandschutzes (Sauerstoffgehalt zwischen 13 und 15%) zu charakterisieren. Die Probanden sollten repräsentativ für die Personen sein, die in brandgeschützten Räumen arbeiten; d.h. Personen zwischen 18 und 65 Jahren, die eine Vorsorgeuntersuchung wie unten beschrieben durchlaufen haben. Die verwendeten Tests sollten Auswirkungen auf kognitive und psychomotorische Fähigkeiten untersuchen, die sich in verschiedenen Arbeiten als sensibel für Sauerstoffmangel gezeigt hatten.

Im einzelnen zielte die hier vorliegende Arbeit darauf ab, zur Klärung folgender Fragen beizutragen:

1. Beeinflusst eine Verminderung des Sauerstoffanteils in der Atemluft durch Erhöhung des Stickstoffanteils (normobare Hypoxie) die geistige und psychomotorische Leistungsfähigkeit, insbesondere Gedächtnisleistung, Aufmerksamkeit/ Konzentration, logisches Denken und Reaktion?
2. Ist der Einfluss normobarer Hypoxie auf die geistige Leistungsfähigkeit unterschiedlich bei jungen und älteren Menschen?
3. Gibt es eine Beziehung zwischen der Stärke der Exposition (d.h. der Verminderung des Sauerstoffanteils in der Luft) und der Veränderung der Leistungsfähigkeit?
4. Gibt es eine Interaktion zwischen der Auswirkung körperlicher Belastung und Hypoxie auf die psychomotorische Leistungsfähigkeit?

II. Methode

1. Kollektiv

1.1. Ein - und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien waren ein Alter zwischen 18 und 30 oder zwischen 45 und 65 Jahren, die Bereitschaft, eine klinische Vorsorgeuntersuchung und den eigentlichen Versuch an drei aufeinanderfolgenden Werktagen mitzumachen sowie ein schriftliches Einverständnis nach umfassender Aufklärung. Die beiden Altersgruppen wurden gewählt, um möglichst große Kontraste zwischen jüngeren und älteren Probanden zu erhalten.

Ausschlusskriterien, die gleichzeitig Bedenken gegen eine Tätigkeit in sauerstoff-reduzierter Atmosphäre sind, waren: manifeste koronare Herzkrankheit sowie Herzerkrankungen mit zu erwartender Minderperfusion anderer Organe (z. B. bei Herzinsuffizienz), manifeste chronisch-obstruktive Lungenerkrankung mit Erniedrigung der peripheren Sauerstoffsättigung in Ruhe oder unzureichend therapiertes Asthma bronchiale, Anämien mit einem Hämoglobingehalt von unter 100 g/l. Verschiedene neurologische und psychiatrische Erkrankungen (z.B. Alkoholabusus) sowie Episoden von schwerer akuter Höhenkrankheit in der Vergangenheit (anamnestische Symptome wie z.B. leichte Kopfschmerzen führten nicht zum Ausschluss) waren zusätzliche, studienspezifische Ausschlusskriterien.

Ferner führte offensichtliche Unzuverlässigkeit zum Studienausschluss.

Eine bestehende Schwangerschaft, eine klinisch relevante Anämie (insbesondere Sichelzellanämie) oder Erkrankungen der Gefäße (z.B. periphere arterielle Verschlusskrankheit, Apoplexie, hochgradige Stenosen der Arteria carotis interna o.a.) waren weitere Ausschlusskriterien.

Das Studienprotokoll wurde von der Ethikkommission des Klinikums der Ludwig-Maximilians-Universität gebilligt.

1.2. Rekrutierung des Probandenkollektivs und Randomisierung

Die Probanden wurden über verschiedene Maßnahmen gewonnen. Die meisten Teilnehmer der jüngeren Gruppe konnten wir über Aushänge an Universität und in Bibliotheken rekrutieren, einige auch über eine Anzeige im Intranet der Universitätskliniken der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Die Probanden der älteren Gruppe kamen zum größten Teil über eine Briefaktion, zu welcher wir Daten von einer Adressagentur erworben hatten. Diese Personen (Kriterien bei der Auswahl der Adressen waren Alter, nahe topographische Lage der Wohnung zum Ort der Studie und ein Interessenschwerpunkt bei Reisen oder Gesundheit/Wissenschaft) wurden alle von uns persönlich angeschrieben und um Mithilfe gebeten. Deutlich weniger Probanden konnten wir in dieser Gruppe über Zeitungsinserate, Aushänge und das Intranet der Universitätsklinik gewinnen. Alle Probanden erhielten € 100 für ihre vollständige Teilnahme an der Untersuchung.

Insgesamt 96 Personen erfüllten in der Voruntersuchung die Einschlusskriterien und wurden einer der Versuchsgruppen zugeteilt. 48 davon waren zwischen 18 und 30, 48 zwischen 45 und 65 Jahre alt. Weitere 24 Personen wurden im Vorfeld nach telefonischer Kontaktaufnahme, 13 Personen aufgrund der Ausschlusskriterien nach der Voruntersuchung von der Teilnahme an den Versuchen ausgeschlossen (davon waren bei 5 Personen die Ausschlusskriterien der Vorsorgeuntersuchung ausschlaggebend, bei 8 Personen die studienspezifischen Ausschlusskriterien). 89 Personen erschienen schließlich zum ersten experimentellen Termin und nahmen an der Studie teil.

2. Versuche

2.1. Versuchsdesign

Es handelte sich um eine doppelblinde, randomisierte Studie mit Crossover-Design. Jeder Proband durchlief die Versuche 3 mal und diente als seine eigene Kontrolle. Die Untersuchungen erfolgten in einem Container mit den Maßen 220 x 180 x 250 cm, in dem man eine gewünschte Sauerstoffkonzentration generieren konnte. Hierzu blieb ein Kompressor, der Stickstoff aus der Außenluft mittels eines molekularen

Filters anreichern konnte, diesen Stickstoff in den Raum, bis die gewünschte Sauerstoffkonzentration von 15,9 % oder 13,8 % erreicht war. Die Sauerstoff-Partialdrücke bei 13,8 % bzw. 15,9 % auf einer Höhe von 530 m (Höhe des Versuchsortes München) entsprechend denen von 13 % und 15 % auf Meereshöhe. Diese Korrekturen wurden durchgeführt, da sich die überwiegende Anzahl der Anlagen, für die diese Aussagen gelten sollten, dem Meeresniveau wesentlich näher lagen.

Die Kohlendioxidkonzentration im Versuchsraum wurde permanent überwacht und überstieg nie den MAK-Wert von 5000 ppm.

Jeder der Teilnehmer durchlief an 3 aufeinanderfolgenden Werktagen die Versuche unter 13,8%, 15,9% und 20,9% Sauerstoffkonzentration in der Atemluft. Die Versuchsdurchführung war doppelt verblindet, um Placeboeffekte zu vermeiden. Die Tests, die wir durchführten, waren an allen Tagen die gleichen. Um Lerneffekte bei den kognitiven Leistungstests nicht berücksichtigen zu müssen, teilten wir allen möglichen Reihenfolgen der Exposition mit den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen (3 verschiedene Konzentrationen, daher $3 \times 2 \times 1 = 6$ verschiedene Möglichkeiten) gleich viele Probanden zu, so dass wir 6 verschiedene Expositionsgruppen bilden konnten (A bis F). Auf diese Weise ließen sich die Lerneffekte statistisch nivellieren.

Insgesamt bildeten wir, ausgerichtet an der Größe des Versuchsraumes, 24 Gruppen zu je 4 Personen, die jeweils gleichzeitig untersucht wurden. Somit untersuchten wir pro Expositionsreihenfolge (A bis F) 4 Gruppen zu je 4 Personen. Diese Gruppen wurden jeweils einer der 6 Expositionsreihenfolgen zugewiesen (randomisiert).

Wenn einer der Probanden aus dem Test ausschied, wurde er nicht durch einen anderen Probanden ersetzt.

Gruppe/ Exposition	20,9 Vol.% O ₂	15,9 Vol.% O ₂	13,8 Vol.% O ₂
A	1	2	3
B	1	3	2
C	2	3	1
D	2	1	3
E	3	1	2
F	3	2	1

Tab. II. 1: Zuteilung der Reihenfolge der Exposition mit verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen zu den verschiedenen Gruppen
 1 = chronologisch 1. Versuchstag
 2 = chronologisch 2. Versuchstag
 3 = chronologisch 3. Versuchstag

2.2. Versuchsaufbau

2.2.1. Vorsorgeuntersuchungen

Die Prüfung der Ein- und Ausschlusskriterien erfolgte durch den Verfasser dieser Arbeit, Facharzt für Allgemeinmedizin, im Rahmen einer klinischen Untersuchung in der Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Universität München. Untersuchungsumfang und Ausschlusskriterien waren identisch mit denen, die von Angerer und Nowak (Angerer und Nowak 2003) als arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung für entsprechende brandgeschützte Arbeitsplätze mit einer Sauerstoffkonzentration unter 17 Vol.% vorgeschlagen wurden. Sie beinhaltete eine Anamnese mit Schwerpunkten auf Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems, der Lunge, des Blutes (insbes. Anämien) und von Episoden von akuter Höhenkrankheit bei früheren Expositionen. Der körperliche Zustand wurde mittels einer körperlichen Untersuchung sowie die Messung von Herzfrequenz und Blutdruck und Laboruntersuchungen des Blutes (kleines Blutbild, sowie in der Gruppe der älteren Probanden die Gefäßrisikoindikatoren Blutzucker, Cholesterin, HDL/LDL und Triglyzeride sowie die Nierenfunktionsparameter Kreatinin und Harnstoff) festgestellt. Außerdem wurde bei jedem Probanden ein 12-Kanal-EKG abgeleitet. Zeigten sich im Lauf der Untersuchung suspekte anamnestische Daten oder Befunde, wurde die Voruntersuchung um Ergometrie, Spiroergometrie oder Lungenfunktionsanalyse mit Ganzkörperplethysmographie erweitert.

2.2.2. Versuchsablauf

Nach erfolgter Vorsorgeuntersuchung und schriftlicher Einverständniserklärung der Teilnehmer begann die eigentliche Testphase.

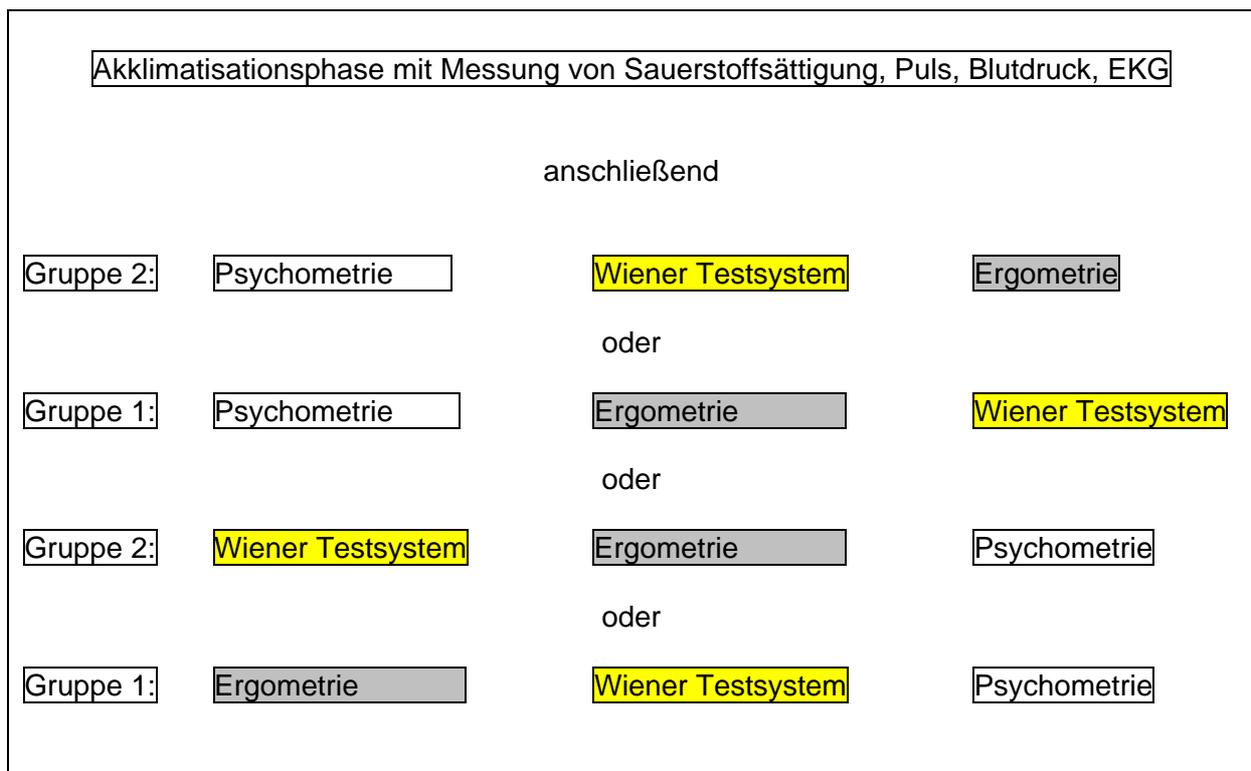
Die Reihenfolge der Sauerstoffkonzentration an den verschiedenen Tagen war doppelt verblindet.

Aus Platz- und Zeitgründen konnten die Versuchsteilnehmer nicht alle Versuche parallel bearbeiten. Es wurden zwei Gruppen zu je zwei Personen gebildet, von denen die eine Gruppe die psychologischen Tests mit Bleistift und Papier an einem Schreibtisch durchführte, während die anderen beiden Personen abwechselnd Versuche des Wiener Testsystems an einem Computer und den Belastungstest auf

dem Fahrradergometer durchführten. Nach der Hälfte der Zeit wechselten diese beiden Gruppen. Die Reihenfolge der durchgeführten Tests war an jedem Tag gleich. Vor Verlassen des Containers wurden die Befindlichkeitsfragebögen (Baseler-Befindlichkeits-Skala, Lake-Louise-Score, Skalierung Müdigkeit) von allen Teilnehmern gleichzeitig ausgefüllt.

Puls, Blutdruck und Sauerstoffsättigung wurden während des gesamten Aufenthalts im Testraum in regelmäßigen Intervallen bestimmt.

Der Versuchsablauf machte zwei unterschiedliche Reihenfolgen der Testabläufe notwendig: Die eine Hälfte (Gruppe 1) musste zuerst die körperliche Belastung von 1,0 W/kg über 6 Minuten durchführen. Daran schlossen sich zunächst der Reaktions- und direkt danach der Determinationstest an. Die andere Hälfte (Gruppe 2) führte die Tests des „Wiener Testsystems“ in umgekehrter Reihenfolge aus, d.h. nach der Akklimatisationsphase oder nach den Papier-und-Bleistift-Tests (Tab. II.2). Entscheidend dabei ist, dass die Probanden aus Gruppe 2 keine körperliche Belastung vor dem Test hatten, sondern körperlich ausgeruht waren.



Tab. II. 2.: Schema Versuchsdurchführung

3. Messmethoden

3.1. Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Herzfrequenz und Ergometrie

3.1.1. Blutdruck, Herzfrequenz und periphere Sauerstoffsättigung

Sauerstoffsättigung im peripheren Blut, Blutdruck und Puls wurden vor Betreten des Versuchsraumes sowie nach 1, 15, 60 und 120 Minuten sowie bei der Ergometrie gemessen. Die Messung erfolgte mittels eines SpiroPro-Geräts der Firma Jäger an immer dem gleichen Finger.

3.1.2. Ergometrie

Auf einem mechanisch gebremsten Fahrradergometer wurde ein Belastungstest über insgesamt 6 Minuten durchgeführt. Die Belastung entsprach mit 1,0 W/kg Körpergewicht den Anforderungen einer mäßigen körperlichen Belastung. Die Probanden wurden dabei permanent überwacht (Sauerstoffsättigung im peripheren Blut, Pulsfrequenz), der Blutdruck wurde 2 und 5 Minuten nach Beginn der Belastung gemessen.

3.2. Kognitive Leistungstests

3.2.1. Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar

Es wurde eine Modifikation des bestehenden Tests verwendet. Die Wortlisten des NAI umfassen normalerweise 8 Wörter, die laut vorgelesen werden. Diese müssen im Anschluss vom Probanden mündlich wiederholt und nach einer Distraktionsphase von mindestens 20 Minuten passiv auf einer Wortliste mit insgesamt 16 Wörtern wiedererkannt werden. Um die Trennschärfe zu erhöhen, erweiterten wir diesen Test um jeweils 4 auf 12 Wörter pro Tag und 24 Wörter auf der Wortliste. Dazu wurden Wörter von verschiedenen Versionen des NAI benutzt.

Um die nicht mit diesem Test beschäftigten Probanden nicht zu stören, boten wir die Wörter einzeln und schriftlich dar (Schriftgröße 96), wobei für jedes Wort eine Seite

benutzt wurde, die 2 Sekunden zu sehen war. Im Anschluss daran sollten die Probanden die erinnerten Worte niederschreiben.

Den zweiten Teil des Tests sollten die Probanden nach einer Distractionphase von 20 – 30 Minuten durchführen, in der der d2-Test, der Zahlenverbindungstest und der Matrizen-Test bearbeitet wurde. Anschließend sollten auf einer Wortliste, die die 12 zuvor gelesenen und 12 weitere Worte enthielt, die bekannten Worte angekreuzt werden.

Eine Schwäche bei unserem Versuchsaufbau sollte noch erwähnt werden: die Ergebnisse des von uns benutzten Gedächtnistests waren im zweiten Teil, bei dem die Wörter nach einer Distractionphase nur noch wiedererkannt werden mussten, nicht normalverteilt. Es bestand eine deutliche Rechtsverschiebung der Ergebnisse, was darauf schließen lässt, dass dieser Teil des Tests für unsere Probanden zu einfach gewesen sein könnte. Somit mangelt es diesem zweiten Teil, der das Langzeitgedächtnis prüft, wahrscheinlich an Trennschärfe. Ursächlich dafür ist, dass dieser Test normalerweise dazu dient, die geistige Leistungsfähigkeit von alten Menschen (z.B. in Altersheimen) zu überprüfen. Aus diesem Grund haben wir bei der Versuchsplanung die Anzahl der Worte um 50% erhöht. Dies scheint jedoch nicht ausreichend gewesen zu sein, um ihn für unser Kollektiv hinreichend schwierig und damit selektiv zu gestalten.

3.2.2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test

Der Aufmerksamkeits-Belastungs-Test (d2) misst Aufmerksamkeit und Konzentration und bietet die Möglichkeit der Kontrolle der Qualität und Schnelligkeit der Antworten (Brickenkamp, 2002).

Es sollen aus ähnlich aussehenden Buchstaben d und p mit jeweils null bis zwei darüber und darunter liegenden Strichen die „richtigen“ angekreuzt werden: alle „d“ mit insgesamt zwei Strichen, darunter, darüber oder darunter und darüber liegend.

Wichtigster Messparameter ist die sogenannte Konzentrationsleistung. Diese ist verfälschungsresistent und kann durch instruktionswidriges Verhalten nicht erhöht werden.

3.2.3 Zahlen-Verbindungs-Test

Der Zahlen-Verbindungs-Test erfasst die basale, kognitive Leitungsgeschwindigkeit, die allen Intelligenzleistungen zugrunde liegt, und die Konzentration. Er korreliert außerdem mit verschiedenen Konzentrations- und Leistungstests (Oswald und Roth, 1998).

Verstreute Zahlen auf einem Blatt Papier müssen ihrem aufsteigenden Wert nach mittels Linien so schnell wie möglich miteinander verbunden werden.

Versehentlich ausgelassene Ziffern wurden vom Endergebnis abgezogen.

3.2.4. Matrizen-Test

Der Matrizen-Test Test misst Intelligenz und die Fähigkeit zu logischem Denken. Hierbei müssen aus komplexen, logisch angeordneten Mustern fehlende Symbole aus 8 möglichen Antworten ausgesucht werden. Die Aufgaben werden dabei von Aufgabe zu Aufgabe schwieriger (Heller et al., 1998).

Wir verwendeten den Test in einer leicht abgewandelten Form. Aus Zeitgründen teilten wir den Test in 3 Teile, wobei jeder Teil aus gleich vielen Fragen mit dem gleichen, ansteigenden Schwierigkeitsgrad bestand.

3.3. Psychomotorische Leistungstests (Wiener Testsystem)

3.3.1. Wiener Reaktionstest

Der Wiener Reaktionstest dient der Messung von Reaktionszeit auf optische und akustische Signale, wobei zwischen motorischer und reaktiver Komponente unterschieden werden kann. Auch Aufmerksamkeitsstörungen können detektiert werden. Der Test wird am Computer durchgeführt.

Bei Darbietung einer bestimmten Reizkonfiguration – gelbem Licht und einem gleichzeitig über Kopfhörer dargebotenen Ton - muss durch möglichst schnelles Berühren der Reaktionstaste adäquat reagiert werden. Reize, auf die nicht reagiert werden soll, sind: Darbietung von Licht oder Ton alleine oder rotes Licht mit gleichzeitig dargebotenem Ton.

Hauptvariable des Tests war die Reaktionszeit, Nebenvariablen waren die Anzahl der richtigen Reaktionen (als Maß für die Korrektheit der Testdurchführung) sowie die Anzahl der falschen Reaktionen (als Maß für die Konzentration).

Außerdem wurde die isolierte motorische Komponente der Gesamtreaktionszeit gemessen. Diese repräsentiert die Zeit, die für den rein motorischen Teil (also ohne Erkennung und kognitive Umsetzung des Reizes) des Reaktionsvorgang steht. Sie stellt die Zeitspanne vom Verlassen der Ruheposition des Fingers bis zum Berühren der zu drückenden Taste dar.

3.3.2. Wiener Determinationstest

Der Wiener Determinationstest misst die Belastbarkeit und die Fähigkeit, auf anhaltende, schnell wechselnde Reize unter Stress adäquat und schnell zu reagieren (wir benutzten den adaptiven Modus, d.h. die Geschwindigkeit der Reizdarbietung passt sich dem Arbeitstempo des Probanden an). Verschiedene Reize (unterschiedliche Farben, Symbole und akustische Signale) werden auf einem Bildschirm rasch aufeinander folgend dargeboten (mit teilweiser, bewusster Überbeanspruchung des Probanden) und müssen durch Berührung unterschiedlicher Tasten auf einer speziellen Tastatur oder Pedalen für die Füße richtig beantwortet werden. Auch dieser Test wird am Computer durchgeführt.

Wichtigster Messparameter ist die Anzahl der richtigen Antworten.

4. Auswertung

4.1. Testauswertung

Alle Tests wurden so ausgewertet, wie dies in den jeweiligen Testanleitungen beschrieben ist.

4.1.1. Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar

Gewertet wurde die Anzahl der richtig erinnerten Worte. Die Reihenfolge spielte keine Rolle. Synonyme (z.B. Feier statt Fest) wurden als richtig gewertet.

Im zweiten Teil, bei dem sich die Probanden passiv erinnern mussten, wurde die Anzahl der richtigen Worte abzüglich der fälschlich als bekannt angekreuzten Worte gewertet.

4.1.2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test

Wir ermittelten die Konzentrationsleistung, die sich aus der Anzahl der richtigen angekreuzten Zeichen abzüglich der ausgelassenen anzustreichenden Zeichen und der falsch angekreuzten Zeichen errechnet (Brickenkamp, 2002).

Außerdem ermittelten wir die Fehlerquote, da verschiedene Untersuchungen unter Hypoxiebedingungen eine Verringerung der Sorgfalt bei der Bearbeitung verschiedener Aufgaben postuliert hatten. Dazu bildeten wir die Summe aus Auslassungs- und Verwechslungsfehlern und teilten sie durch die Anzahl der richtig markierten Zeichen. Das Ergebnis ist in Prozent angegeben und wird als Fehlerquote bezeichnet. Diese gibt die Anzahl der Fehler (in Prozent) pro richtig gelöstem Zeichen an.

4.1.3. Zahlen-Verbindungs-Test

Die erreichte Punktzahl entspricht dem Durchschnittswert der Anzahl der richtig verbundenen Ziffern. Dieser errechnet sich aus dem Punktwert von 4 Matrizen, die pro Tag zu bearbeiten waren.

4.1.4. Matrizen-Test

Die erreichte Punktzahl entspricht der Anzahl der richtigen Antworten.

4.1.5. Reaktionstest

Bewertet wurden die Reaktionszeit und die motorische Zeit (beide vom Computer gemessen, s. 3.3.1.). Nebenvariablen sind die Anzahl der richtigen und der falschen Reaktionen.

4.1.6. Determinationstest

Hier ist der entscheidende Wert (Hauptvariable) die Anzahl der richtigen Reaktionen (ausgewertet vom Computerprogramm) sowie als Nebenvariablen die Anzahl der falschen und der ausgelassenen Reize.

4.1.7. Reaktionstest vor/nach Belastung

Die Probanden wurden in zwei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe führte den Reaktionstest direkt nach der Akklimatisationsphase oder nach der Bearbeitung der kognitiven Leistungstests aus, also in körperlich ausgeruhtem Zustand. Die andere Gruppe absolvierte den Test direkt im Anschluss an die 6-minütigen Belastungsphase mit 1,0 W/kg Körpergewicht auf dem Fahrradergometer.

4.2. Aufbereitung der Daten und Statistik

Die aus den Versuchen gewonnenen Daten wurden von zwei verschiedenen Personen in eine Datenbank eingegeben, abgeglichen und auf ihre Plausibilität überprüft.

Anschließend wurden die Daten, wo sinnvoll, auf Normalverteilung geprüft (Kolmogorov-Smirnov-Test).

Eigenschaften des Kollektivs:

Da sich das Gesamtkollektiv aus zwei unterschiedlichen Teilkollektiven zusammensetzte, wurde die deskriptive Statistik von vorne herein für das jüngere und das ältere Kollektiv getrennt aufgeführt. Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Probanden in Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Puls und kognitiven sowie psychomotorischen Leistungen wurden mit Hilfe der entsprechenden Tests (T-Test, U-Test nach Mann-Whitney-White oder Chi-Quadrat-Test - je nach der Natur der Daten) überprüft.

Einfluss der verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen:

Die intraindividuellen Unterschiede in Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Puls, und kognitiven sowie psychomotorischen Leistungen unter den drei

Sauerstoffkonzentrationen wurde im Allgemeinen Linearen Model (ALM) getestet: Im ALM wurde der Messwert unter Einfluss der entsprechenden Sauerstoffkonzentration als Innersubjektvariable eingegeben. Der kombinierte Einfluss von Sauerstoffkonzentration und Alterskategorie (jung / alt) wurde untersucht, indem das Alter als Zwischensubjektfaktor in dem Modell mit getestet wurde. Der kombinierte Einfluss von Sauerstoffkonzentration und Geschlecht wurde untersucht, indem das Geschlecht als Zwischensubjektfaktor in dem Modell mit getestet wurde. Fand sich im diesem Modell ein signifikanter Unterschied zwischen den Innersubjektvariablen (Messwerte in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration), so wurde mittels Post-hoc Analyse unter Verwendung des T-Test für verbundene Stichproben getestet, zwischen welchen Sauerstoffkonzentrationen die Unterschiede bestanden.

Die tabellarische und graphische Darstellung erfolgt aus Gründen der Anschaulichkeit stets getrennt nach Alterskategorien (jung/alt). Auf die separate Darstellung nach Geschlecht wurde verzichtet.

Kombinierter Einfluss von Sauerstoffkonzentration und körperlicher Belastung: Gemäß dem oben beschriebenen Studiendesign wurden die einzelnen Testungen in der Kabine in 4 unterschiedlichen Reihenfolgen durchgeführt, wobei bei 2 Gruppen der Reaktionstest direkt im Anschluss an die Ergometrie erfolgte, bei den 2 anderen Gruppen jedoch nach einer körperliche Ruhephase. Mittels ALM wurde der kombinierte Einfluss der Sauerstoffkonzentration (unabhängige Variable) und der unmittelbar vorausgehenden Ergometrie (Zwischensubjektfaktor) auf das Ergebnis von Reaktionstest und Determinationstest verglichen.

Verbesserung der Testergebnisse durch Lerneffekte:

Hier wurden die Mittelwerte der Ergebnisse der Leistungstest an den verschiedenen Versuchstagen (chronologisch erster, zweiter und dritter Tag) mittels ALM miteinander verglichen.

Verblindung:

Der Effekt der Verblindung wurde getestet, indem die von den Probanden vermutete Sauerstoffkonzentration der tatsächlichen Sauerstoffkonzentration in einer 9-Feldertafel gegenübergestellt und mittels Chi-Quadrat-Test getestet wurde.

III. Ergebnisse

Im folgenden werden die Ausgangswerte in den Tabellen und Grafiken getrennt nach den Gruppen der beiden Alterskategorien „jung“ und „alt“ (d.h. 18-30 und 45-65 Jahre alt) dargestellt.

Unterschiede zwischen den beiden Kollektiven (alt und jung) sind unter „1. Kollektiv“ dargestellt, Unterschiede zwischen den Sauerstoffexpositionen unter „2. Auswirkungen der Sauerstoffkonzentration“.

1. Kollektiv

1.1. Rekrutierung, Randomisierung und vorzeitiger Studienabbruch

Die Rekrutierungsphase fand von Mitte bis Ende März 2003, die Versuchsphase von Anfang April bis Mitte Mai 2003 statt. Von 133 Anrufern waren 24 nicht an einer Teilnahme interessiert oder erfüllten aufgrund von Vorerkrankungen die Aufnahmekriterien nicht. Von 109 Personen, die zur Vorsorgeuntersuchung erschienen, wurden bei 5 ärztliche Bedenken geäußert, 8 weitere schieden wegen studienspezifischer Gründe aus. Von den 96 eingeschlossenen und randomisierten Probanden erschienen 89 zu den Versuchen, 7 sagten ihre Teilnahme vor dem ersten Versuchstag ab. Die Gruppe mit den Probanden zwischen 18 und 30 Jahren umfasste 45 Personen und war im Mittel 24,4 Jahre (Standardabweichung, SD 2,9 Jahre) alt und wird in den tabellarischen Darstellungen als „jung“ bezeichnet. Die Gruppe mit den Probanden zwischen 45 und 65 Jahren umfasste 44 Personen und war im Mittel 54,4 Jahre (SD: 5,7 Jahre) alt. Diese Gruppe wird in den tabellarischen Darstellungen als „alt“ bezeichnet. Die Daten eines Teilnehmers konnten aufgrund einiger offensichtlich missverständlicher Testanweisungen mit daraus folgenden, nicht plausiblen Ergebnissen nicht verwendet werden und fanden keine Berücksichtigung bei der Auswertung. Keiner der Probanden brach die Teilnahme nach Beginn der Versuche aus gesundheitlichen oder anderen Gründen ab. Somit liegen die kompletten Datensätze von 89 Probanden vor.

Die beiden Altersgruppen wurden auf Unterschiede der wichtigsten allgemeinen Daten überprüft.

Die Verteilung der Geschlechter wies keine signifikanten Unterschiede auf (III.1).

Geschlecht (Anzahl)	jung	alt
männlich	18 (40%)	24 (53,5%)
weiblich	27 (60%)	20 (46,5%)

Tab. III. 1.: Verteilung der Geschlechter innerhalb der Gruppen

Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen der jüngeren und der älteren Probanden waren bei folgenden Kriterien vorhanden (Tab. III.2):

Der Bildungsgrad unterschied sich signifikant ($p < 0,001$), wobei vor allem der hohe Anteil an Probanden mit Abitur in der Gruppe der jungen Probanden auffiel.

Ausbildung (Anzahl)	jung	alt
keine Ausbildung	1 (2,2%)	7 (13,6%)
abgeschlossene Berufsausbildung	5 (11,1%)	17 (38,6%)
Abitur	35 (77,8%)	9 (20,5%)
Universitätsabschluss	4 (8,9%)	12 (27,3%)

Tab. III. 2: Bildungsgrad der Probanden

Außerdem unterschieden sich die Gruppen bezüglich der Vorerkrankungen (hier waren 8 der älteren Probanden und einer der jüngeren Probanden betroffen; $p = 0,015$, Tab. III.3). Vorerkrankungen nahmen wir nur dann in die Statistik auf, wenn sie Lungen, Kreislauf, Gefäße, Herz oder das Gehirn betrafen.

Vorerkrankungen (Anzahl)	jung	alt
ja	1 (2,2%)	8 (18,2%)
nein	44 (97,8%)	36 (81,8%)

Tab. III. 3.: Verteilung von Vorerkrankungen

Ein weiterer Punkt, in dem sich die beiden Gruppen unterschieden, waren Symptome von akuter Höhenkrankheit in der Anamnese (Tab. III.4): auch hier waren verstärkt die älteren Probanden betroffen ($p = 0,025$).

akute Höhenkrankheit (Anzahl)	jung	alt
ja	0 (0%)	5 (11,6%)
nein	45 (100%)	38 (88,4%)

Tab. III. 4: Verdacht auf stattgehabte Symptome der akuten Höhenkrankheit

Weitere Charakteristika der Gruppen finden sich in Tab. III.5.

Bis auf das Gewicht, das bei der Gruppe der älteren höher war als bei der Gruppe der jüngeren ($p = 0,015$) - und natürlich das Kriterium Alter - fanden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen bei diesen Daten.

weitere Charakteristika	jung			alt		
	Anzahl	Mittelwert	Standard-abweichung	Anzahl	Mittelwert	Standard-abweichung
Größe (in cm)	45	174,9	9,1	44	171,2	9,2
Alter (in Jahren)	45	24,4	2,9	44	53,4	5,7
Gewicht (in kg)	45	67,4	11,1	44	73,9	13,4
Hb (in g/l)	42	14,1	1,3	43	14,3	1,2

Tab. III. 5: Daten zum Probandenkollektiv

1.2. Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck und Herzfrequenz

Hinsichtlich der peripheren Sauerstoffsättigung unterschieden sich die beiden Altersgruppen. Hierbei lag die periphere Sauerstoffsättigung der älteren Probanden etwas mehr als 1 Prozentpunkte unter der der jüngeren Probanden.

Die Blutdrücke der jungen Probanden waren signifikant niedriger ($p < 0,030$), im Mittel systolisch etwa 10 mm Hg, diastolisch um etwa 5 mm Hg als die der älteren Probanden (Tab. III.6).

Im Vergleich der Herzfrequenz der beiden Altersgruppen zeigten sich bei den Mittelwerten der in Ruhe gemessenen Herzfrequenzen keine signifikanten Unterschiede.

Physiologie bei Normoxie	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
Blutdruck systolisch (mm Hg)	114,5	11,2	122,3	13,3
Blutdruck diastolisch (mm Hg)	75,3	7,0	82,5	9,2
Herzfrequenz (min^{-1})	75,6	10,1	73,0	8,9
Sauerstoffsättigung (%)	97,4	0,8	96,2	1,2

Tab. III. 6: Physiologische Parameter bei alten und jungen Probanden
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

1.3. Vergleich mit Normstichproben

Gedächtnistest und logisches Denken waren wegen des modifizierten Testdesigns, das durch die Versuchsbedingungen notwendig war, nicht mit Normstichproben vergleichbar.

Bei einem Vergleich mit der Normstichprobe lag der Gruppendurchschnitt der jüngeren wie älteren Probanden beim Zahlenverbindungstest auf einem Prozentrang von 69. Allerdings wurden die Rohwerte für die Gruppenversuche auf Rohwerte für

Einzelversuche umgerechnet, weil es für Gruppenversuche kein Vergleichskollektiv gab, das dem unseren vom Alter wenigstens näherungsweise entsprochen hätte. Somit können diese Prozentränge nur eine Näherung an die Werte der Normtabellen darstellen.

Beide Altersgruppen erreichten bei der Konzentrationsleistung im d2-Test einen Prozentrang von 34.

Bei den am Computer durchgeführten Reaktions- und Determinationstests waren die Ergebnisse wie folgt: Reaktionstest: der Durchschnitt der jungen Probanden lag bei Prozentrang 58, der der älteren bei 46. Determinationstest: der Durchschnitt der jungen Probanden lag bei Prozentrang 66, der der älteren bei 47.

2. Einfluss der Sauerstoffkonzentration

2.1. Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Herzfrequenz und Ergometrie

Die angegebenen Daten stellen das arithmetische Mittel der Werte zu den verschiedenen Messzeitpunkten unter jeweils einer Sauerstoffkonzentration dar.

2.1.1. Periphere Sauerstoffsättigung

Beim Vergleich der Sauerstoffsättigungen unter den verschiedenen Expositionen ergeben sich zwischen allen Expositionen hochsignifikante Unterschiede ($p < 0,001$, Abb. III.1). Ein kombinierter Einfluss von Alter und Sauerstoffkonzentration (Interaktion) war nicht nachweisbar.

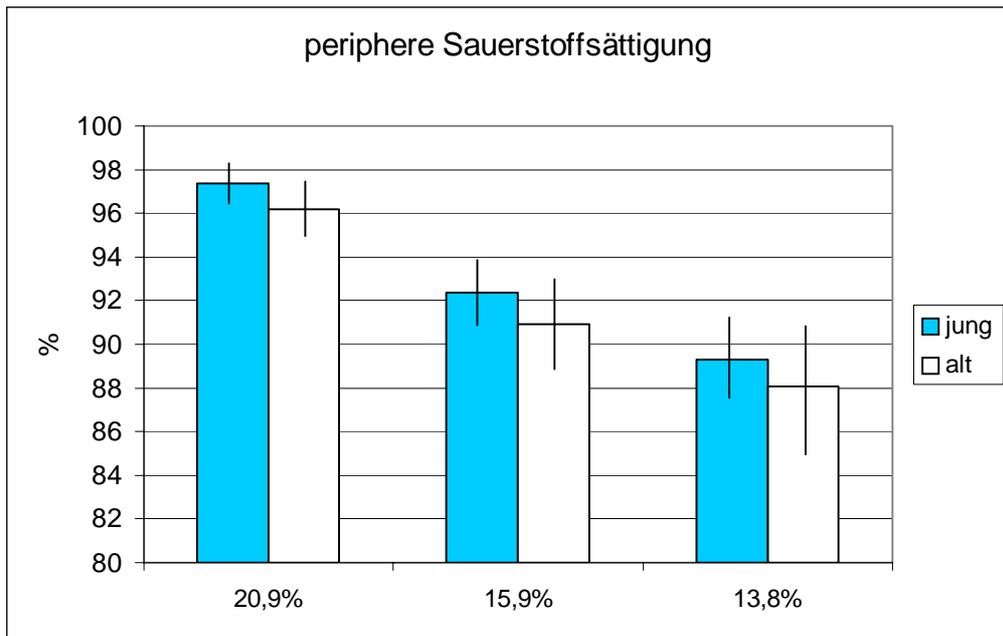


Abb. III.1: Mittelwert der peripheren Sauerstoffsättigung bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.1.2. Blutdruck

Die Daten an den einzelnen Versuchstagen ergaben für beide Gruppen keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Expositionen (Tab. III.7).

Unterschiede zeigten sich auch dann nicht, wenn das Alter zusätzlich als Zwischensubjektfaktor berücksichtigt wurde.

Blutdruck systolisch (in mm Hg)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	114,5	11,2	122,3	13,3
15,9%	113,7	9,5	121,9	12,8
13,8%	113,3	10,1	121,2	13,0

Blutdruck diastolisch (in mm Hg)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	75,3	7,0	82,5	9,2
15,9%	75,5	7,6	82,5	8,6
13,8%	75,2	5,6	81,7	9,4

Tab. III. 7: Mittelwerte des systolischen und diastolischen Blutdrucks bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

2.1.3. Herzfrequenz

Die Herzfrequenzen stiegen mit abnehmendem Sauerstoffgehalt kontinuierlich an. Die Unterschiede waren zwischen allen Sauerstoffkonzentrationen signifikant ($p < 0,001$, Abb. III.2).

Es zeigte sich kein Einfluss des Alters, wenn Sauerstoffkonzentration und Alter gleichzeitig im ALM berücksichtigt wurden.

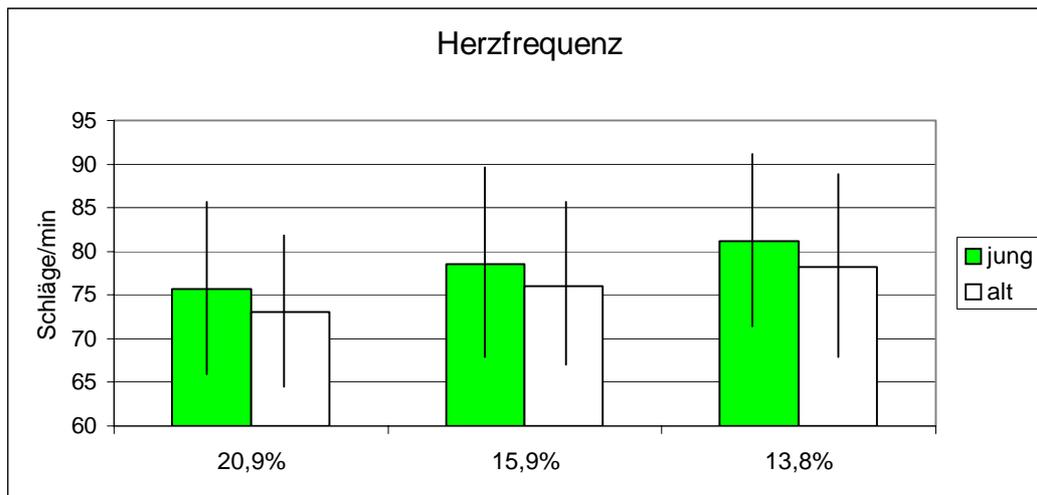


Abb. III.2: Mittelwerte der Herzfrequenz bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.1.4. Ergometrie

Der systolische Blutdruck während der Ergometrie war in der Gruppe der älteren Probanden unter 13,8% Sauerstoffgehalt gegenüber 20,9% und 15,9% signifikant erhöht ($p < 0,001$ bzw. $p = 0,001$). Er stieg beim Vergleich zwischen 20,9% und 13,8% um 11,1 mm Hg an. Bei den jungen Probanden gab es hier keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen (Tab. III.8, Abb. III.3).

Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und systolischem Blutdruck.

systolischer Blutdruck Ergometrie (mm Hg)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	136,1	15,4	152,6	22,9
15,9%	137,7	17,6	156,2	18,8
13,8%	138,9	20,1	163,7	19,6

Tab. III.8: Mittelwerte des systolischen Blutdrucks während der Ergometrie bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

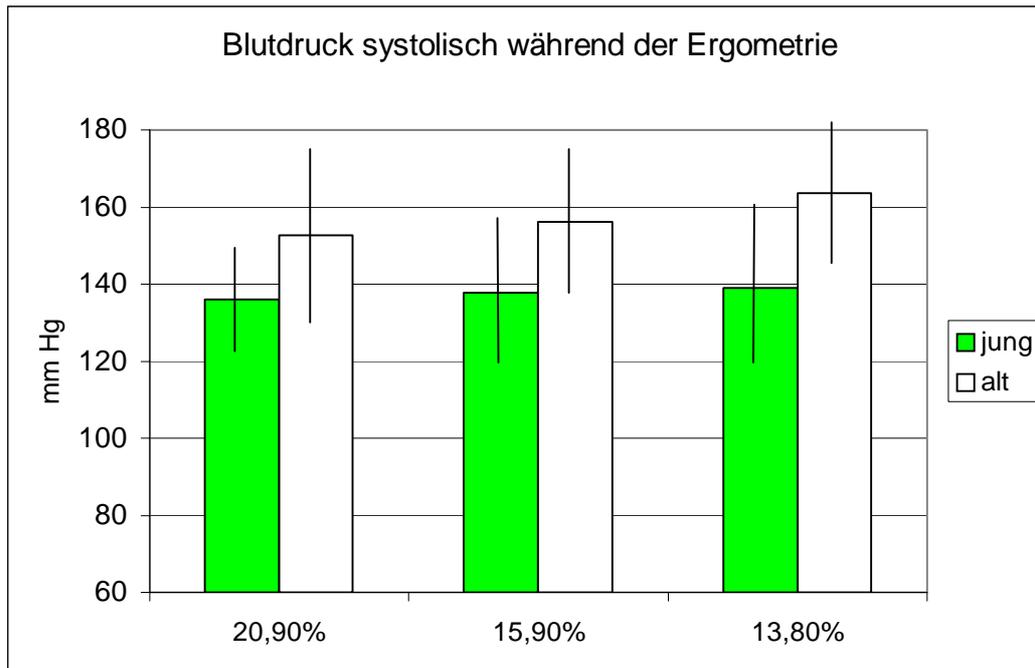


Abb. III.3: Mittelwerte des systolischen Blutdrucks während der Ergometrie bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

Beim diastolischen Mitteldruck waren keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedingungen zu beobachten. Bei den älteren Probanden war der diastolische Blutdruck signifikant durchschnittlich um 10,3 mm Hg niedriger ($p < 0,001$).

Die Herzfrequenz stieg auch im Rahmen der Ergometrie unter Hypoxie – wie schon in Ruhe – signifikant an ($p < 0,001$), durchschnittlich um 5 Schläge (entsprechend 4,4%) von 20,9% auf 15,9% und nochmals um 6 (entsprechend 4,9%) von 15,9 auf 13,8% Luftsauerstoffkonzentration (Tab. III.9).

Die älteren Probanden waren, wie auch unter Ausgangsbedingungen zu beobachten, bradykarder als die jüngeren (um 8 – 9 Schläge pro Minute) ($p < 0,015$).

Es zeigte sich kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Herzfrequenz.

Herzfrequenz Ergometrie (min ⁻¹)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	117,8	14,2	109,8	14,4
15,9%	123,1	16,3	114,9	14,7
13,8%	129,0	14,7	121,0	14,3

Tab. III.9: Mittelwerte der Herzfrequenz unter Belastung mit 1,0 W/kg Körpergewicht während der Ergometrie
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

Die Sauerstoffsättigung fiel nach der 6-minütigen Belastung mit 1,0 W/kg Körpergewicht um 8 bis 9 Prozentpunkte (Vergleich 20,9% mit 15,9%) und dann nochmals um ca. 4,5 Prozentpunkte (Vergleich 15,9 mit 13,8%), wie in Tab. III.10 und Abb. III.4 dargestellt.

Diese Unterschiede waren zwischen den verschiedenen Luftsauerstoffkonzentrationen signifikant ($p < 0,001$).

Sauerstoffsättigung Ergometrie (%)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	96,9	1,0	96,0	1,4
15,9%	88,8	3,0	86,8	3,9
13,8%	84,1	3,8	82,4	5,8

Tab. III.10: Mittelwerte der Sauerstoffsättigung während der Ergometrie bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

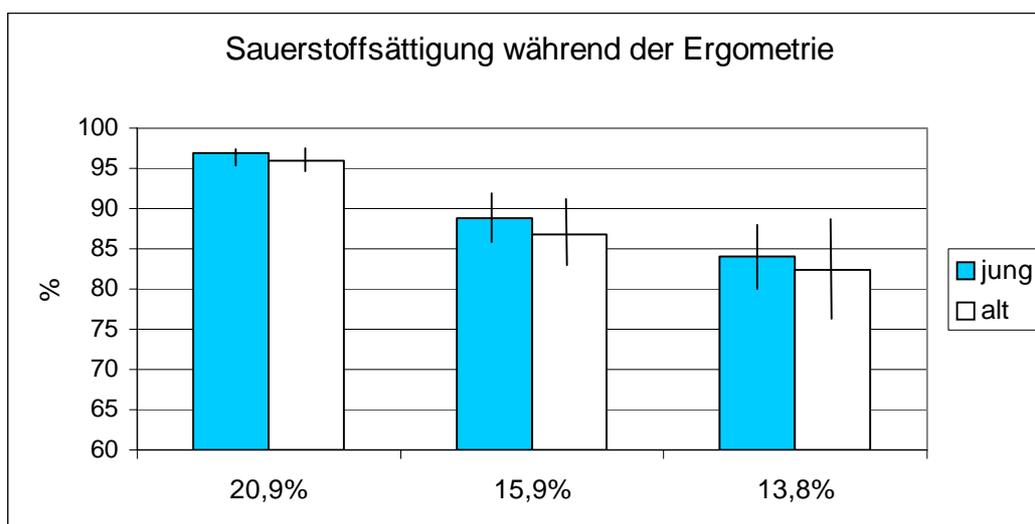


Abb. III.4: Mittelwerte der Sauerstoffsättigung bei Belastung mit 1,0 W/kg während der Ergometrie (bei verschiedenen O₂-Konzentrationen) und Standardabweichungen

Auch zwischen den Altersgruppen bestand in allen Fällen ein signifikanter Unterschied ($p < 0,029$).

2.2. Kognitive Leistungstests

2.2.1. Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar

Die aktive Merkfähigkeit unter den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen unterschied sich nicht voneinander ($p = 0,199$) (Tab. III.11, Abb. III.5). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und aktiver Gedächtnisleistung ($p = 0,911$).

Nürnberger Altersinventar, aktives Erinnern (erinnerte Worte)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	8,6	1,6	7,3	1,9
15,9%	8,8	1,9	7,1	1,8
13,8%	8,2	1,8	7,1	1,6

Tab. III.11: Gedächtnisleistung (aktiv) bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

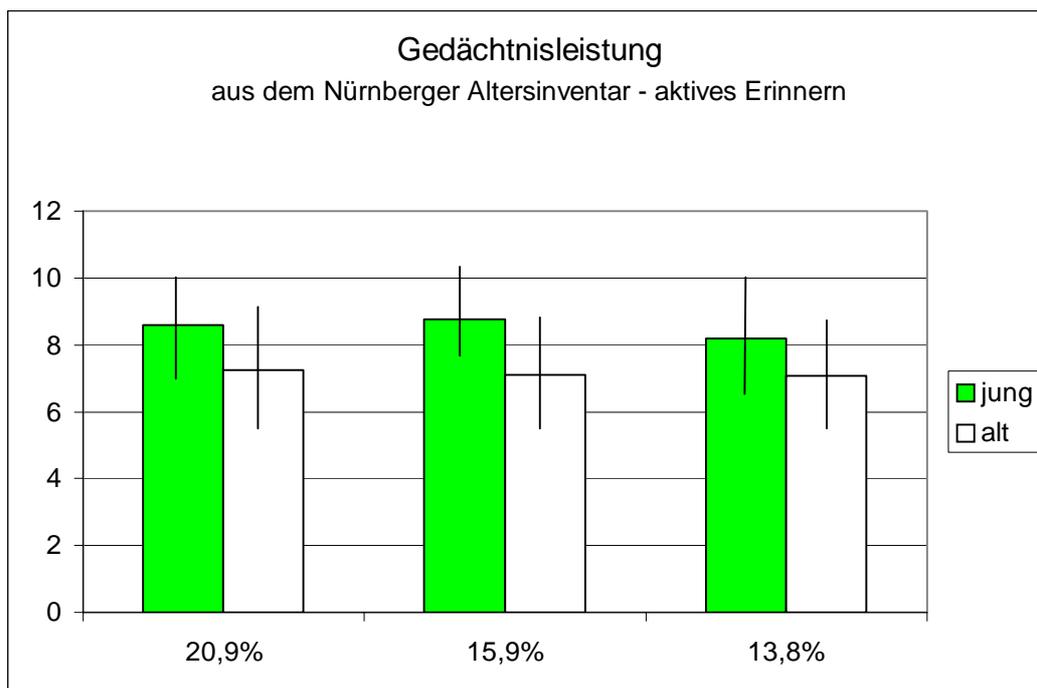


Abb. III.5: Aktiv erinnerte Worte (von maximal 12) im Nürnberger Altersinventar bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

Auch bei dem passiven Teil des Gedächtnistests, nach einer Distraktionsphase von 20 bis 30 Minuten, zeigten sich hinsichtlich der unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen in der Atemluft keine Effekte ($p = 0,771$, Tab. III.12, Abb. III.6). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den

Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und passiver Gedächtnisleistung
($p = 0,764$).

Nürnberger Altersinventar - passives Erinnern (erinnerte Worte)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	8,5	1,9	6,8	3,5
15,9%	8,5	1,7	6,2	3,5
13,8%	8,3	2,8	6,5	3,8

Tab. III.12: Gedächtnisleistung (Wiedererkennung) im Nürnberger Altersinventar bei verschiedenen O_2 -Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

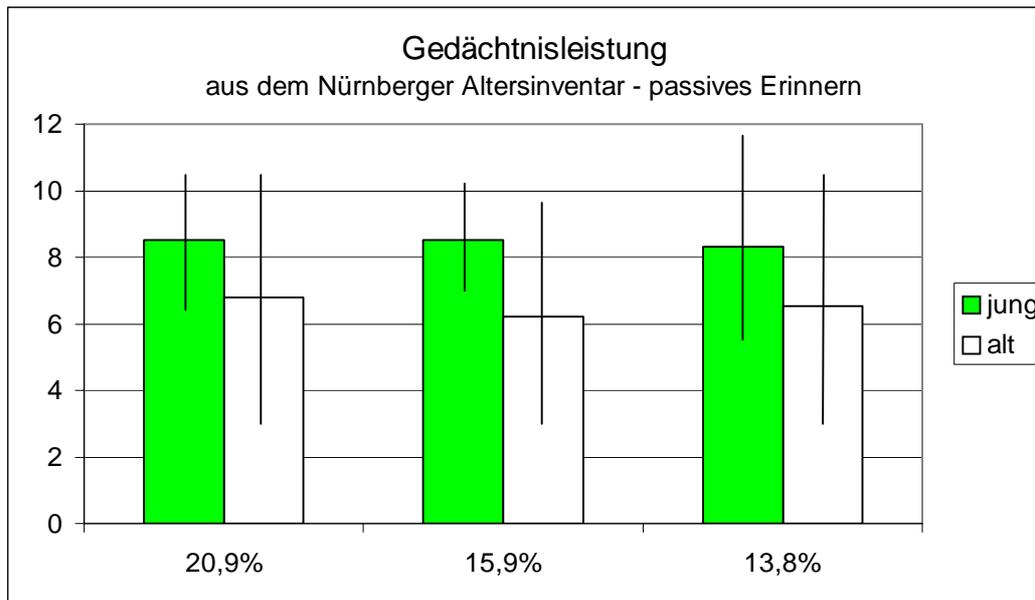


Abb. III.6: Passiv in einer Wortliste wiedererkannte Worte (von max. 12), bei verschiedenen O_2 -Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.2.2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test

Es gab auch hier weder für die Konzentrationsleistung noch die Sorgfalt, mit der die Aufgaben bearbeitet wurden, signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Expositionen ($p = 0,396$, Tab. III.13, Abb. III.7). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Konzentrationsleistung ($p = 0,911$).

d2-Test: Konzentrationsleistung (Punkte)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	187,9	39,4	148,6	46,7
15,9%	187,2	40,5	146,1	54,0
13,8%	192,0	41,0	149,9	50,7

Tab. III.13: Konzentrationsleistung im d2-Test bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

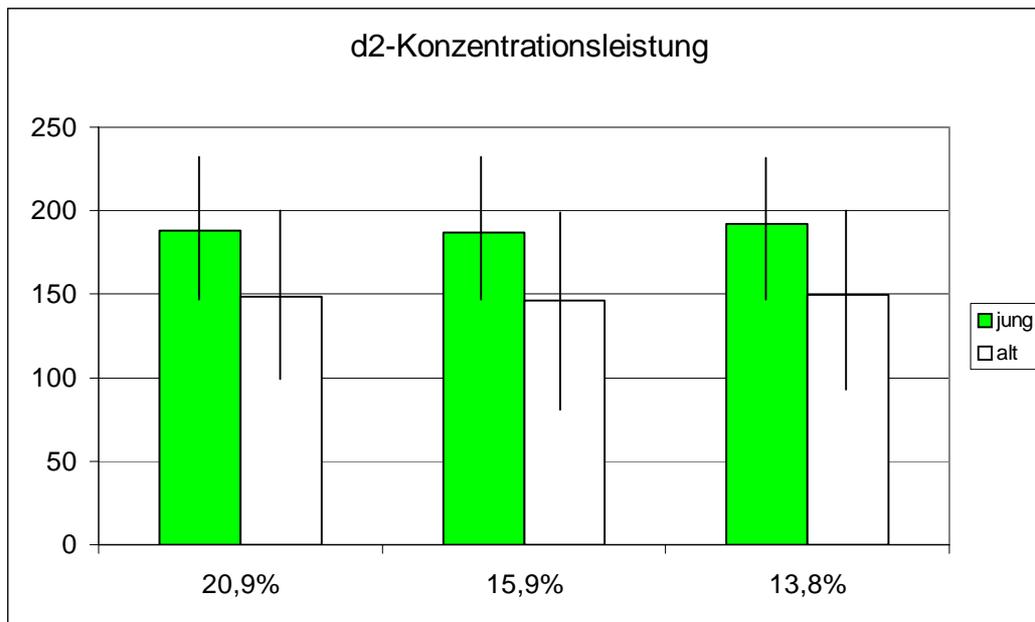


Abb. III.7: Konzentrationsleistung im d2-Test bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

Auch die Fehlerquote, die über die Sorgfalt bei der Lösung der gestellten Aufgabe Auskunft gibt, wurde ermittelt (Tab. III.14, Abb. III.8).

Allerdings gibt es auch hier keinen signifikanten Unterschied zwischen den unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen, so dass diese keinen Einfluss auf die Sorgfalt oder das Urteilsvermögen zu besitzen ($p = 0,689$) scheinen.

Fehlerquote (in %)	jung		alt	
	MW	SD	MW	SD
20,9%	2,1	1,9	3,8	3,4
15,8%	1,9	1,7	3,6	3,5
13,8%	2,4	2,8	3,8	3,3

Tab. III.14: Fehlerquote (als reziproke Maßzahl) für die Sorgfalt bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

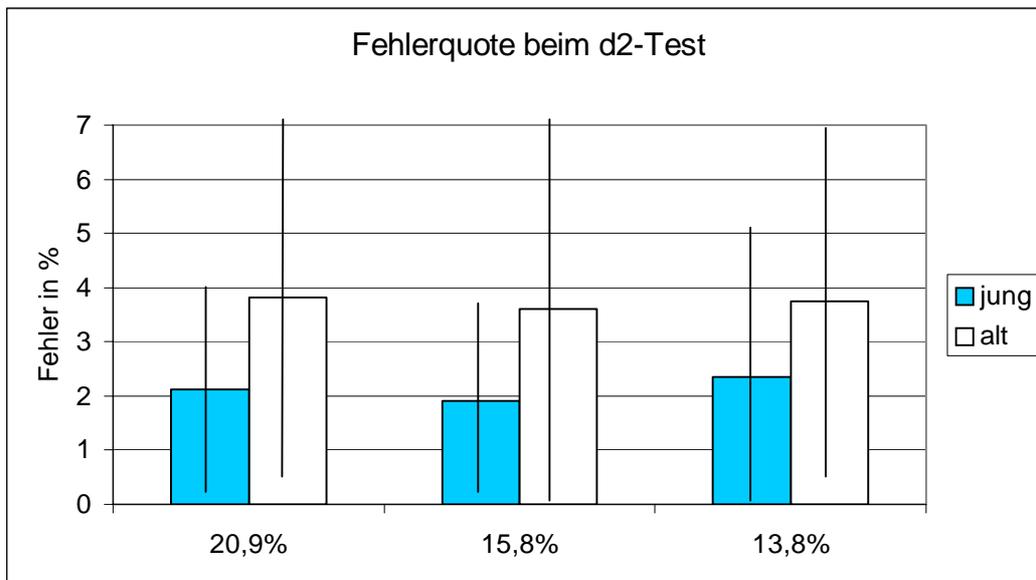


Abb. III.8: Fehlerquote (in Prozent) im d2-Test bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.2.3. Zahlenverbindungstest

Wiederum waren Unterschiede zwischen den einzelnen Expositionen nicht signifikant ($p = 0,382$, Tab. III.15, Abb. III.9). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Geschwindigkeit im Zahlenverbindungstest.

Zahlenverbindungstest (Punkte)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	50,2	8,0	41,8	9,7
15,9%	49,5	9,2	40,6	9,7
13,8%	50,1	8,1	41,0	9,4

Tab. III.15: Konzentration und motorische Geschwindigkeit im Zahlenverbindungstest bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

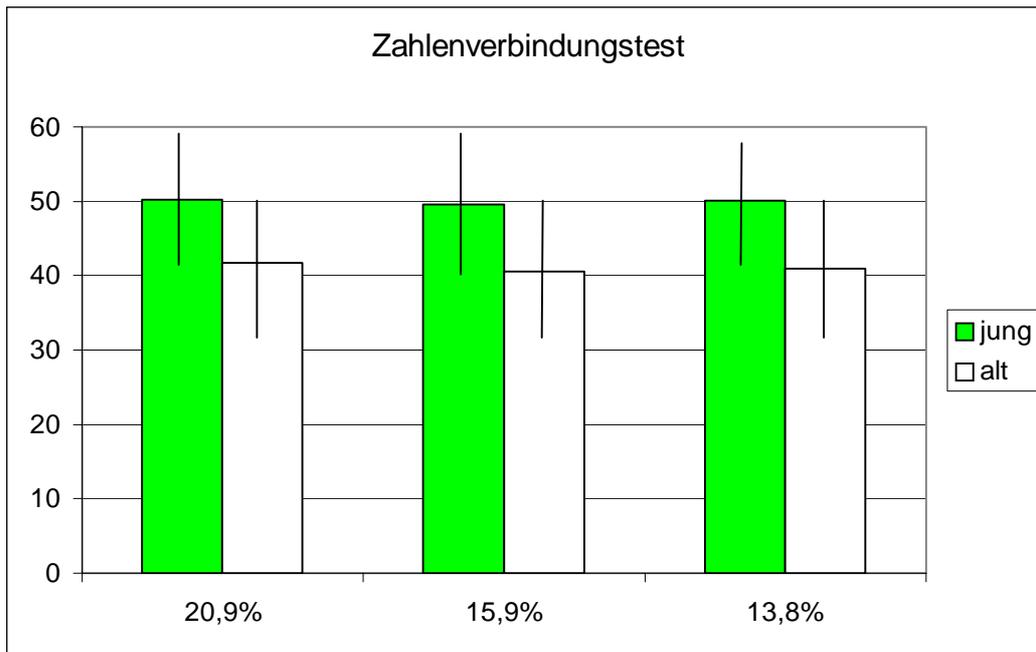


Abb. III.9: Zahlenverbindungstest bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.2.4. Matrizen-Test

Unterschiede zwischen den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen waren nicht gegeben ($p = 0,983$, Tab. III.16, Abb. III.10). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und logischem Denken ($p = 0,300$).

Matrizen-Test (Punkte)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	11,7	2,5	8,0	3,7
15,9%	12,1	2,2	7,6	3,3
13,8%	11,9	2,7	7,8	3,1

Tab. III.16: Logisches Denken im Matrizen-Test bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

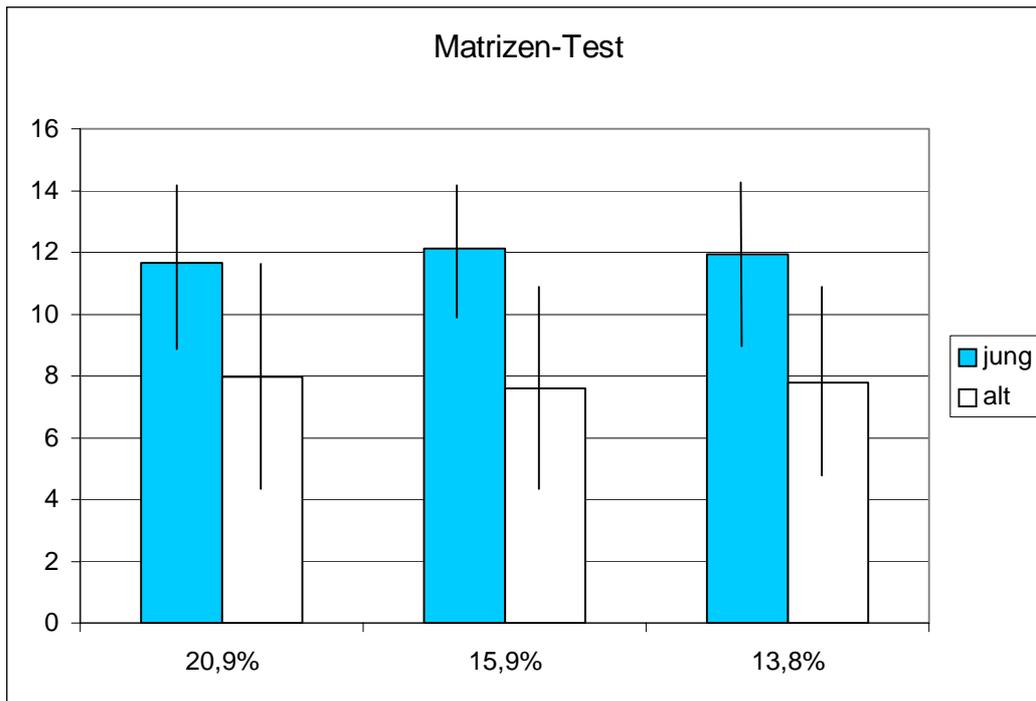


Abb. III.10: Matrizen-Test bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.2.5. Reaktionstest

Die mittlere Reaktionszeit ist die Hauptvariable des Reaktionstests.

Eine Veränderung der Reaktionszeiten unter den verschiedenen Bedingungen gab es nicht ($p = 0,265$, Tab. III.17, Abb. III.11). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Reaktionszeit ($p = 0,273$).

Reaktionszeit (in ms)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	393,2	76,4	420,9	70,3
15,9%	395,2	79,3	441,9	84,7
13,8%	401,6	77,9	427,4	79,7

Tab. III.17: Reaktionszeiten auf gleichzeitige akustische und optische Reize bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

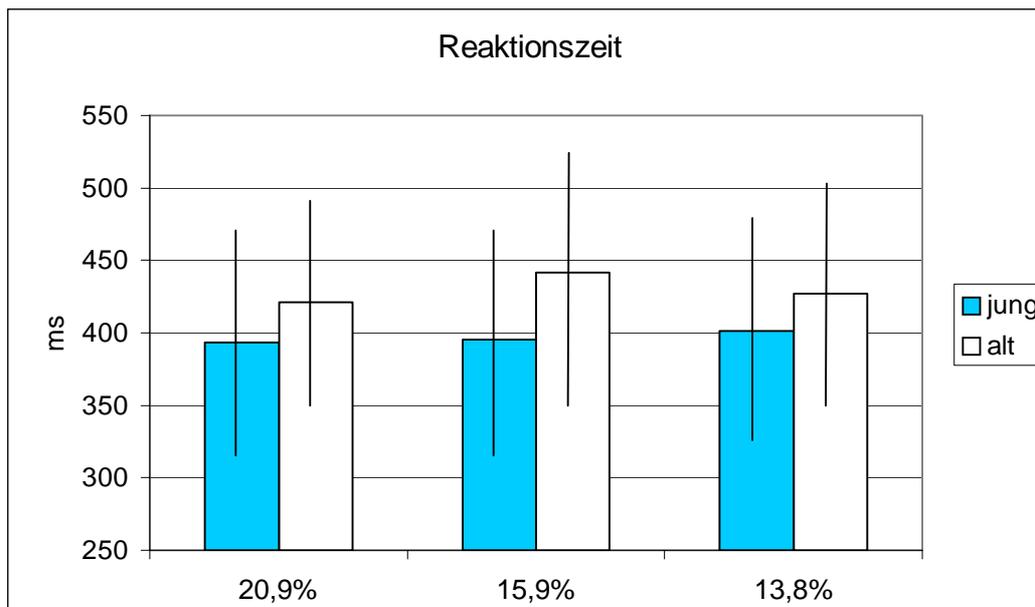


Abb. III.11: Reaktionszeit bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

Die graphisch auffällige Zunahme der Reaktionszeit bei der Gruppe der älteren Probanden von 421 ms auf 442 ms (von 20,9% auf 15,9% Sauerstoffgehalt) ist ebenso wenig signifikant wie die erneute Abnahme der Reaktionszeit von 15,9% auf 13,8% Sauerstoff.

Außerdem wurden noch zwei Hilfsvariablen untersucht: die Zahl der richtigen Reaktionen, die ein Maß für die Korrektheit der Testdurchführung darstellt, unterschied sich weder zwischen den Altersgruppen noch zwischen den Sauerstoffkonzentrationen ($p = 0,240$). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Anzahl der richtigen Reaktionen.

Auch die Anzahl der falschen Reaktionen, die ein Maß für die Konzentration darstellt, unterscheidet sich weder zwischen den Alterskategorien noch bei den unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen.

In einzelnen Studien wurde eine verlangsamte Reaktionszeit bei reduziertem Sauerstoffpartialdruck gemessen. Deshalb wird hier die Zeitdauer für die motorische Komponente (die Zeit, die der Finger vom Loslassen der Ruheposition bis zur Berührung der Erfolgstaste benötigt) dargestellt. Obwohl sich die Reaktionszeiten der älteren Probanden leicht verringern, lässt sich für die verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen kein Unterschied in der Reaktionszeit feststellen ($p = 0,689$, Tab. III.18, Abb. III.12). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie

(jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und motorischer Zeit ($p = 0,689$).

motorische Zeit (in ms)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	148,3	50,7	198,4	76,1
15,9%	141,7	43,4	192,1	76,1
13,8%	147,7	48,7	187,9	64,7

Tab. III.18: Motorische Komponente des Reaktionstests bei verschiedenen O₂-Konzentrationen

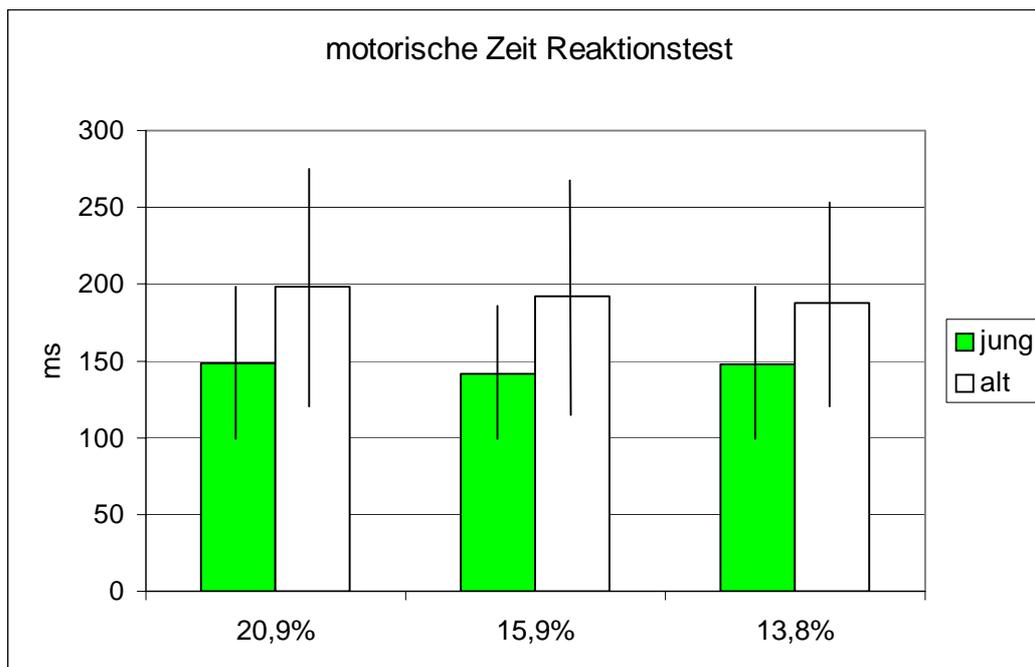


Abb. III.12: Motorische Komponente des Reaktionstests bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.2.6. Determinationstest

Die Hauptvariable des Tests ist die Anzahl der richtigen Reaktionen. Wiederum gab es keinen Unterschied hinsichtlich der 3 verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen ($p = 0,861,19$, Abb. III.13). Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und der Anzahl der richtigen Reaktionen ($p = 0,726$).

richtige Reaktionen im Reaktionstest	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	272,0	36,0	241,1	33,4
15,9%	271,9	38,6	238,7	32,8
13,8%	274,4	36,2	238,2	35,6

Tab. III.19: Maßzahlen der Hauptvariablen „richtig reagiert“ im Determinationstest bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

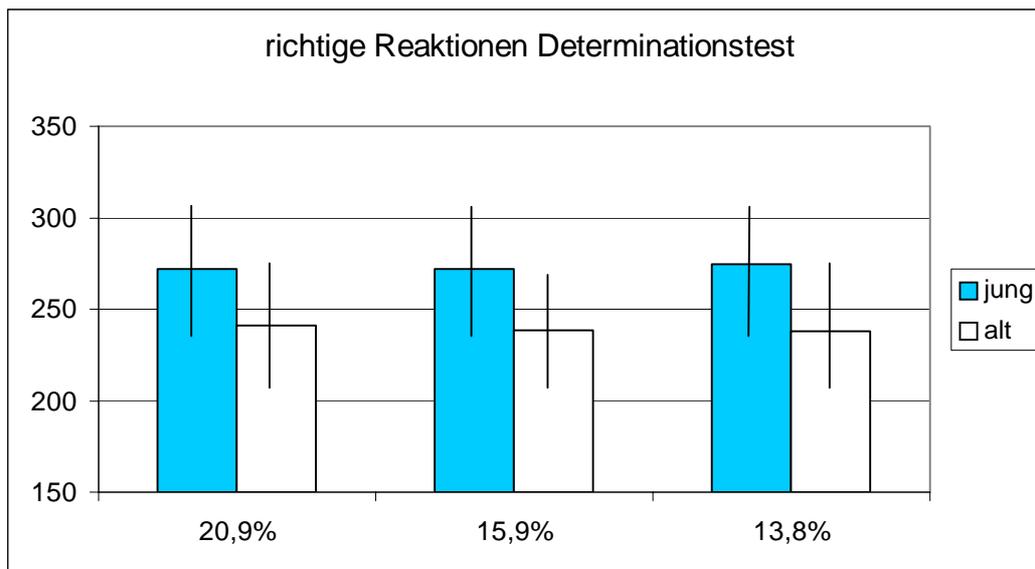


Abb. III.13: Determinationstest bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen

2.3. Auswirkungen von körperlicher Belastung unter normobarer Hypoxie

2.3.1. Reaktionszeit (gesamt) und Belastung

Beim Reaktionstest war ein Effekt der Luftsauerstoffkonzentration nur in Gruppe 1, d.h. bei psychomotorischer Testung unmittelbar nach körperlicher Belastung nachweisbar (im allgemeinen Linearen Modell war $p = 0,071$). Auch in der Posthoc-Analyse war die mediane Reaktionszeit der Gruppe unter 15,9% Luftsauerstoffkonzentration, die zuerst die Ergometrie durchführte, signifikant langsamer ($p = 0,039$) als unter 20,9%. Unter 13,8 % ist das Ergebnis ebenfalls langsamer, allerdings gerade eben nicht mehr signifikant ($p = 0,052$). Für das Ergebnis des Reaktionstests ist nach der Ergometrie bei Normoxie kein Unterschied zwischen vorher belasteten und ausgeruhten Probanden vorhanden (Tab. III.20, Abb. III.14).

Es zeigte sich ferner kein Einfluss der Alterskategorie (jung/alt) auf den Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Reaktionszeit vor und nach Belastung ($p = 0,133$).

Reaktionszeit nach Ergometrie / nach Ruhephase (in ms)	nach Ergometrie		nach Ruhephase	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	412,2	68,3	401,7	81,1
15,9%	436,1	83,0	398,9	83,8
13,8%	431,6	70,9	398,7	85,0

Tab. III.20: Reaktionszeiten nach Belastung und nach Ruhe bei verschiedenen O_2 -Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

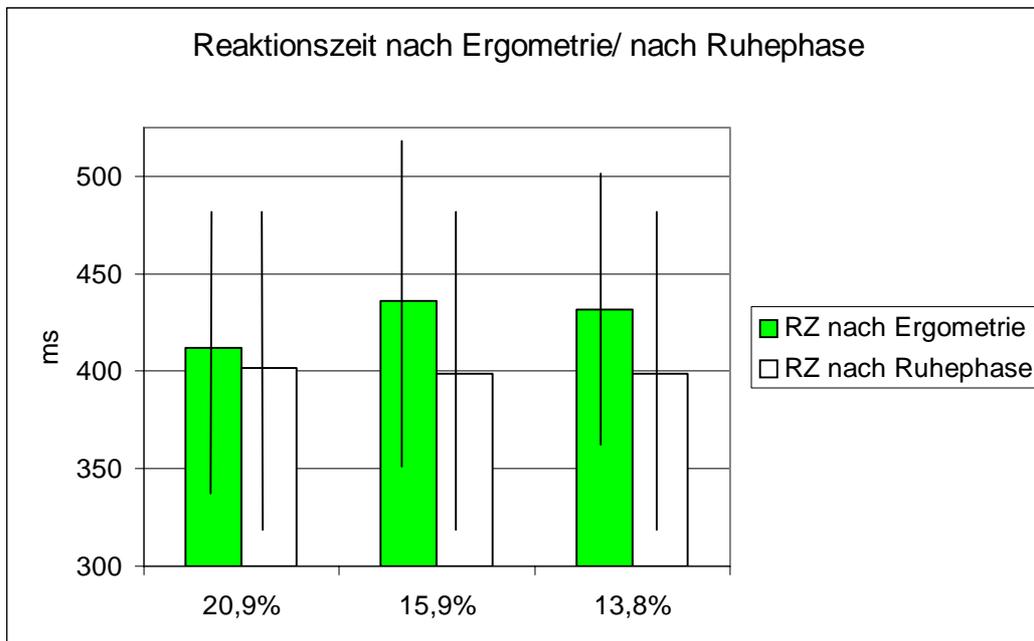


Abb. III.14: Reaktionszeiten nach körperlicher Belastung bzw. nach einer Ruhephase bei verschiedenen O_2 -Konzentrationen mit Standardabweichungen

Es bestand keine Korrelation zwischen peripherer Sauerstoffsättigung und dem Ergebnis des Reaktionstests bei belasteten und ausgeruhten Probanden. Ebenso wenig zeigte sich bei diesen Gruppen eine Korrelation zwischen der Änderung der Reaktionszeiten und der Änderung der Sauerstoffsättigungen im Vergleich von Normoxie und Hypoxie.

2.3.2. Motorische Komponente

Im Gegensatz zur Reaktionszeit (zusammengesetzt aus Zeit für die Wahrnehmung, Verarbeitung und Motorik) ist die motorische Komponente der Reaktionszeit nach Ergometerbelastung unter Hypoxie nicht signifikant verändert ($p > 0,390$ für alle Fälle). Vielmehr scheint die Reaktionszeit unter Hypoxie nach Belastung eher nach unten zu tendieren (Tab. III.21, Abb. III.15).

motorische Zeit nach Ruhephase / nach Ergometrie (in ms)	nach Ruhephase		nach Ergometrie	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
20,9%	175,1	78,6	171,2	59,4
15,9%	172,3	77,8	160,6	54,0
13,8%	172,8	68,5	161,7	51,6

Tab. III.21: Motorische Komponente nach Ruhephase bzw. nach Ergometrie bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

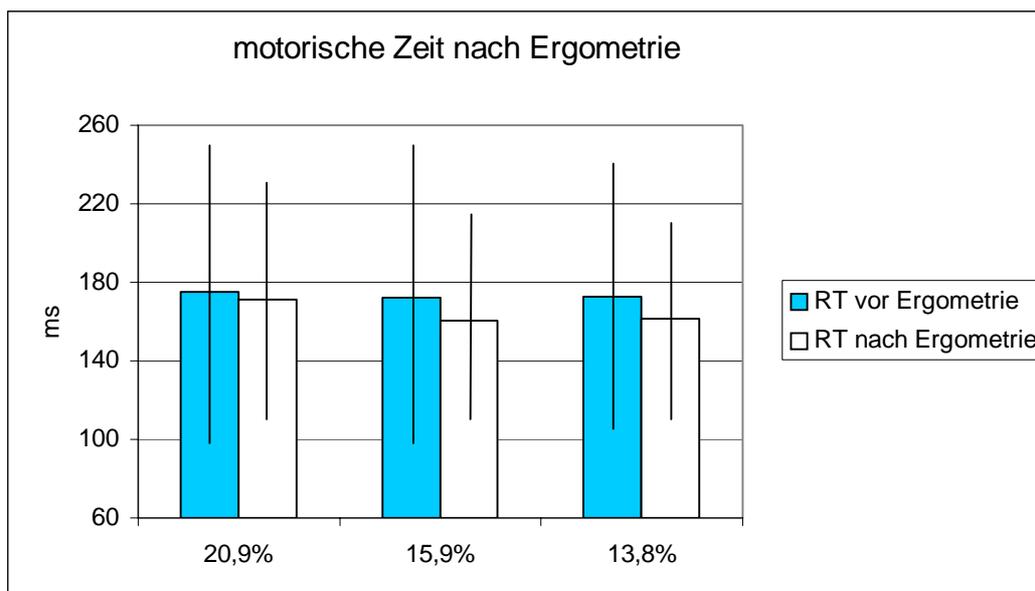


Abb.III.15: Motorische Komponente des Reaktionstests nach Belastung bzw. nach körperlicher Ruhe bei verschiedenen O₂-Konzentrationen mit Standardabweichungen
RT: Reaktionszeit

2.3.3. Determinationstest

Auswirkungen der körperlichen Belastung (1,0 W/kg über 6 Minuten) auf den Determinationstest, der ca. 7 Minuten nach dem Reaktionstest begonnen wurde, fanden sich nicht.

3. Kognitive und psychomotorische Leistung in Abhängigkeit vom Alter

Zwischen den beiden Altersgruppen zeigte sich im Gedächtnistest (aktiv) ein deutlich signifikanter Unterschied ($p < 0,001$). Während die älteren Probanden im Durchschnitt 7,3 Begriffe reproduzieren konnten, gelangen den jüngeren 8,6, also etwa 20% mehr.

Beim Konzentrationstest unterschieden sich die beiden Altersgruppen ebenfalls signifikant voneinander. Wie schon beim Gedächtnistest, waren die Konzentrationsleistungen – dem wichtigsten Messparameter, der auch die Anzahl der Fehler berücksichtigt - der jüngeren Probanden wieder deutlich besser ($p < 0,001$). Die von ihnen erreichten Punktzahlen lagen um ca. 20% über denen der älteren Probanden.

Auch hinsichtlich der Fehlerquote war der Unterschied alt versus jung zugunsten der jungen Probanden unter jeder Exposition signifikant ($p = 0,005$), wobei die Fehlerquote bei den älteren Probanden fast doppelt so hoch war (durchschnittlich 2,1% bei den jungen vs. 3,8% bei den alten Probanden).

Der Unterschied im Zahlenverbindungstest, der die Messung der kognitiven Leistungs- und Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie eine motorische Komponente enthält, war zwischen den Altersgruppen ebenfalls signifikant. Die Versuchsgruppe der jungen Probanden erreichte im Durchschnitt ein um ca. 20% höheres Ergebnis ($p < 0,001$).

Die Anzahl der gelösten Aufgaben beim Logiktest war für die Ergebnisse der jungen Probanden erneut signifikant besser. Sie lösten im Durchschnitt fast 4 Aufgaben, also etwa ein Drittel mehr ($p < 0,001$).

Auch beim passiven Teil des Gedächtnistests zeigte sich, dass die Ergebnisse bei der Gruppe der jüngeren Probanden signifikant besser waren ($p < 0,021$). Die jüngeren Probanden konnten sich im Durchschnitt an fast 2 Worte, also ca. 25%, mehr erinnern.

Die jüngeren Probanden reagierten beim Reaktionstest zwar schneller, das Ergebnis war jedoch nicht signifikant. Die motorische Komponente dieses Tests zeigte eine erhöhte Schnelligkeit bei den jungen Probanden: im Durchschnitt war die motorische Zeit fast um fast 50 ms (oder 25%) kürzer als die der älteren ($p < 0,002$).

Beim Determinationstest erzielten die jungen Probanden im Durchschnitt 272 richtige Reaktionen, die alten 241 (ca. 12,5% weniger). Dieser Unterschied war mit $p < 0,001$ signifikant (Tab. III.22).

Leistungstests bei Normoxie (erreichte Punktzahlen)	jung		alt		Signifikanz
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.	
Gedächtnis aktiv	8,6	1,6	7,3	1,9	p < 0,001
Konzentration (im d2)	187,9	39,4	148,6	46,7	p < 0,001
Fehlerquote (im d2)	2,1	1,9	3,8	3,4	p = 0,005
Aufmerksamkeit (im ZVT)	50,2	8	41,8	9,7	p < 0,001
logisches Denken (in APM)	11,7	2,5	8	3,7	p < 0,001
Reaktionszeit (im RT)	393,2	76,4	420,9	70,3	p = 0,079
Arbeiten unter Belastung (im DT)	272	36	241,1	33,4	p < 0,001

Tab. III. 23: Leistungstests bei jungen und alten Probanden unter Normoxie. Die angegebenen Werte wurden ermittelt, wie in Kap. II. 4.2. beschrieben
K.I.: Konfidenzintervall der Differenz
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

4. Lernverhalten

Eine Problematik der Messung von Leistungen mit wiederholten psychologischen Tests ist das Lernen und damit die Verbesserung von Leistungen unabhängig von den Umgebungsbedingungen. Dies haben wir durch die Randomisierung der Versuchsgruppen und die Zuordnung von genau gleich vielen Personen zu jeder möglichen Expositionsreihenfolge ausgeglichen.

Dennoch soll darauf hingewiesen werden, dass sich durch den Trainingseffekt bei allen Tests außer den Gedächtnistests, aber insbesondere im d2-Test die Ergebnisse an den 3 aufeinanderfolgenden Tagen signifikant voneinander unterschieden ($p < 0,001$). Der Wert für die Konzentrationsleistung verbesserte sich von Tag 1 auf Tag 2 um 13,5 % (jung) bzw. 12,5 % (alt) (Tab. III.23, Abb. II.16).

Lernverhalten am Beispiel der Konzentrationsleistung (verschiedene Tage)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
Tag 1	167,0	35,7	140,5	35,0
Tag 2	193,1	36,8	159,8	34,6
Tag 3	207,0	37,7	168,8	35,7

Tab. III.23: Übungsbedingte Verbesserungen der Konzentrationsleistung bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

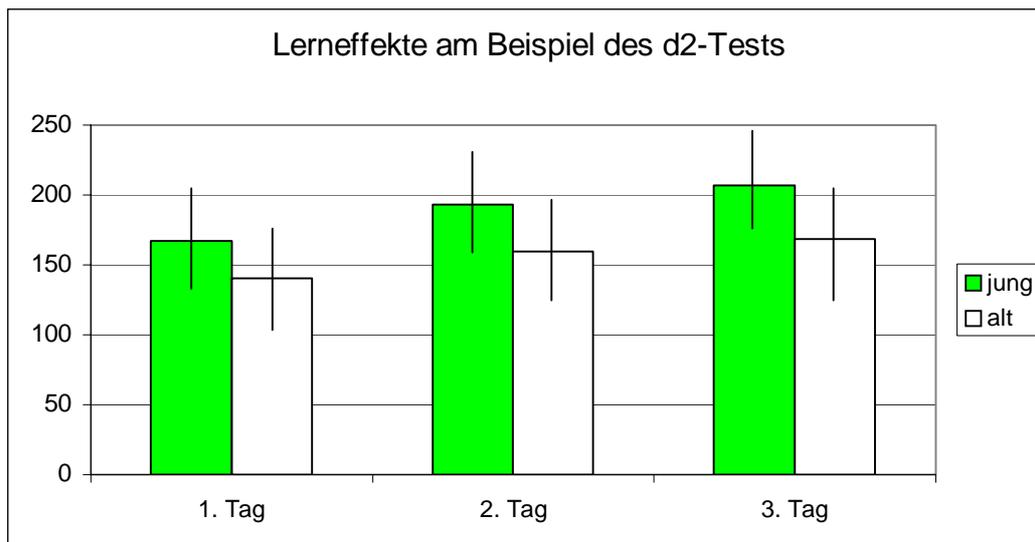


Abb. III.16: Auswirkungen von Testwiederholungen beim d2-Test auf das Ergebnis mit Standardabweichungen

Beim Gedächtnistest gab es zwar eine signifikante Verbesserung von Tag 2 auf 3 ($p < 0,001$), diese scheint aber zufällig zu sein, da der Vergleich von Tag 1 mit Tag 3 keine signifikante Verbesserung zeigt ($p = 0,106$), und es von Tag 1 zu Tag 2 sogar zu einer Verschlechterung der durchschnittlich erzielten Leistung kam.

Keinen Lerneffekt zeigte auch der zweite Teil des Gedächtnistests aus dem Nürnberger Altersinventar.

Beim Zahlenverbindungstest gab es von Tag zu Tag eine signifikante Verbesserung der durchschnittlichen Leistungen ($p < 0,001$). Diese fiel jedoch geringer aus als im d2-Test (Verbesserung der durchschnittlichen Leistung um 9% vom ersten auf den zweiten und um nochmals 5% vom zweiten auf den dritten Tag).

Beim logischen Denken gab es ebenfalls einen Lerneffekt von Tag zu Tag, jedoch fiel dieser noch geringer aus.

Auch für Reaktions- und Determinationstest waren signifikante Verbesserungen der Ergebnisse über die 3 Tage hinweg zu beobachten. Beim Reaktionstest verbesserten sich die jungen Probanden von einer Reaktionszeit von $407 \pm 69,0$ am ersten Tag auf $390 \pm 83,6$ Millisekunden, die alten Probanden von $444 \pm 96,0$ auf $421 \pm 71,3$ Millisekunden.

Noch deutlicher waren die Lerneffekte beim Determinationstest. Auch hier verbesserten sich beide Altersgruppen von Tag zu Tag signifikant ($p < 0,001$) (Tab. III.24, Abb. III.17).

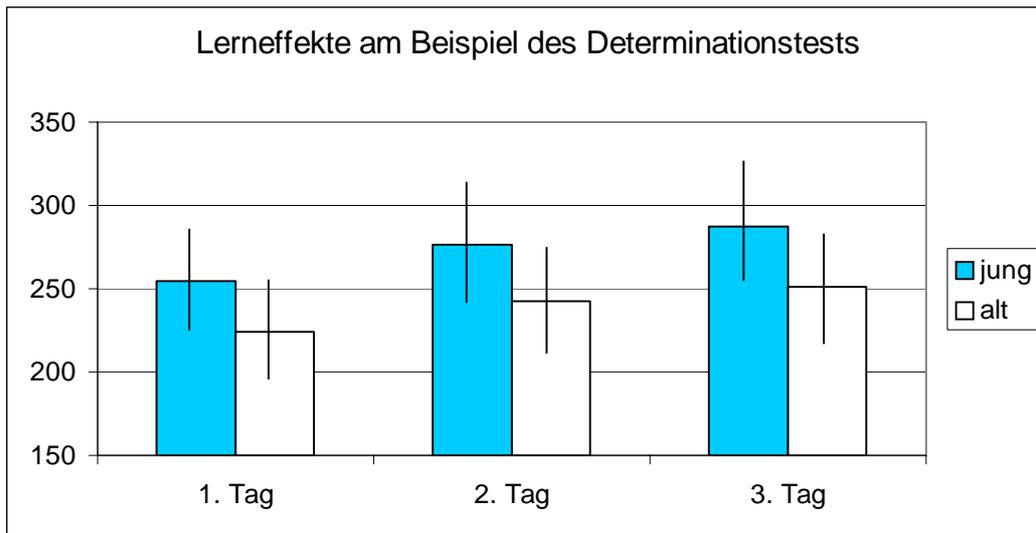


Abb. III.17: Auswirkungen von Testwiederholungen auf das Ergebnis mit Standardabweichungen

Determinationsstest (Punkte an verschiedenen Tagen)	jung		alt	
	M.W.	S.D.	M.W.	S.D.
Tag 1	254,3	29,8	224,3	31,2
Tag 2	276,4	36,3	242,8	31,1
Tag 3	287,6	36,2	251,2	33,8

Tab. III.24: Übungsbedingte Verbesserungen im Determinationstest bei verschiedenen O₂-Konzentrationen
M.W.: Mittelwert
S.D.: Standardabweichung

5. Verblindung

Über die Qualität der Verblindung gibt Tab. III.25 Auskunft. Verwendet wurden Daten über die Einschätzung der Probanden, welche Sauerstoffkonzentration in der Atemluft des Versuchsraums geherrscht habe. Knapp Hälfte der Probanden hat die Sauerstoffkonzentration richtig eingeschätzt. Bei den falschen Einschätzungen wurde sie doppelt so häufig fälschlich als zu hoch angegeben (nämlich in einem Drittel der Fälle), nur halb so häufig zu niedrig (in ca. jedem sechsten Fall).

tatsächliche Luftsauerstoffkonzentration	subjektive Einschätzung der Luftsauerstoffkonzentration		
	20,9%	15,9%	13,8%
20,9%	50 (58,2%)	23 (26,7%)	13 (15,1%)
15,9%	29 (33,0%)	45 (51,1%)	14 (15,9%)
13,8%	15 (17,0%)	41 (46,6%)	32 (36,4%)

Tab. III.25: Verblindungsqualität anhand der Schätzungen der Probanden über die O₂-Konzentrationen. Die unterlegten Felder geben die richtigen Einschätzungen der Probanden für die jeweilige Exposition wieder.

IV. Diskussion

Die in dieser experimentellen randomisierten doppelblinden Studie untersuchten Männer und Frauen (n=89) gehörten zu zwei Altersgruppen: einer Gruppe mit Probanden zwischen 18 und 30 Jahren und einer weiteren mit Probanden zwischen 45 und 65 Jahren. Die Auswahlkriterien inklusive einer Beurteilung nach Kriterien der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung hatten zum Ziel, ein für Beschäftigte in sauerstoffreduzierten Räumen repräsentatives Kollektiv zusammenzustellen. Jeder Proband hielt sich 3 mal für je 2 Stunden in dem Versuchsraum auf, in dem die Luft 20,9, 15,9 und 13,8 Vol.% Sauerstoff enthielt. Die wichtigste klinische Beobachtung bestand darin, dass keiner der 89 Probanden die Studie wegen Beschwerden vorzeitig abbrechen musste und von den ständig anwesenden Ärzten keine Zeichen beobachtet wurden, die auf eine Gefährdung durch die Sauerstoffreduktion schließen ließen.

Wie erwartet sank periphere Sauerstoffsättigung im Blut mit sinkender Sauerstoffkonzentration in der Atemluft ab, die Herzfrequenz stieg mit abnehmender Sauerstoffkonzentration an. Die für Sicherheit und Arbeitsqualität relevante mentale und psychomotorische Leistungsfähigkeit dagegen änderte sich in den von uns untersuchten Bereichen nicht. Dies galt sowohl für die jungen wie auch die alten Probanden. Lediglich bei der Kombination von Hypoxie und unmittelbar vorangehender körperlicher Belastung (1,0 W/kg) verlängerte sich die Reaktionszeit um ca. 5 %.

Bislang gibt es in der veröffentlichten Literatur nur sehr wenige Studien, die die Auswirkungen von Sauerstoffmangel auf kognitive und psychomotorische Leistungen bei normalem Luftdruck (101,3 kPa) untersuchen. Dieses Thema besaß bis vor kurzer Zeit wenig praktische Relevanz. Dafür gibt es einige Studien, die unter hypobaren Bedingungen durchgeführt wurden, wie sie in großen Höhen anzutreffen sind, also unter vermindertem Sauerstoffpartialdruck durch verminderten Luftdruck. Dieses Thema ist für Flugzeugpersonal, Bergsteiger, Soldaten in Bergregionen und andere von Bedeutung.

Ein Luftsauerstoffgehalt von 13% entspricht einem Sauerstoffpartialdruck von 13,2 kPa (oder 99,4 mm Hg), im Vergleich zu 21,2 kPa (oder 159 mm Hg) bei dem normalen Sauerstoffgehalt von 20,9%. Ein Sauerstoffpartialdruck wie bei 13 % Sauerstoffgehalt auf Meereshöhe ist in einer Höhe (bei einer Temperatur von 5°C) von 3832 m zu finden. Die Umrechnung erfolgt mit der barometrischen Höhenformel. Vereinfachend kann man sagen, dass der Luftdruck – und damit auch der Sauerstoffpartialdruck - alle 5500 m um die Hälfte abnimmt.

Eine vergleichende Studie über die Effekte von normo- und hypobarer Hypoxie auf die Blutgase kam zu dem Ergebnis, dass die Auswirkungen von hypobarer Hypoxie bezüglich Hypoxämie, Hypokapnie, Alkalose und verminderter Sauerstoffsättigung des Bluts größer sind als diejenigen von normobarer Hypoxie (Savourey et al., 2003). Konsistente Ergebnisse erbrachte dagegen die Messung der transdermalen Sauerstoffsättigung bei jungen, gesunden Männern. Diese sank bei beiden Formen der Hypoxie signifikant ab, und die Ergebnisse waren vergleichbar. Auf Meereshöhe lag sie durchschnittlich um 97 - 99%, in 2000 m um 97%, in 3700 m um 92%, in 6000 m um 70%, und auf Höhen ab 6500 m bei 60-65%. Sie korrelierte mit dem Sauerstoffpartialdruck (Gustafsson et al., 1997; Leiffen et al., 1997; McCarthy et al., 1995; Crowley et al., 1992). Ab 6500 m flacht die Abnahme der peripheren Sauerstoffsättigung deutlich ab. Dies geschieht durch eine ab dieser Höhe verursachte, verstärkte Hyperventilation.

Die Ergebnisse der Studien zur geistigen und psychomotorischen Leistungsfähigkeit in der Höhe variieren beträchtlich. Während einige Autoren bereits in 1600 m Höhe erste Symptome wie verstärkte Müdigkeit ausgemacht haben (Shukitt und Hale, 1988), konnten andere in 3600 m (Paul und Fraser, 1994) oder sogar bis zu Höhen von über 6000 m (Leiffen et al., 1997; Koller et al., 1991) keinen signifikanten Einfluss auf die zerebrale Leistungsfähigkeit nachweisen. Die Tabelle I.1 (Einleitung) gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten, bisher zu diesem Thema veröffentlichten Arbeiten. Es handelt sich um Studien unter hypo- und normobarem Sauerstoffmangel, wobei die Studien unter hypobarem Sauerstoffmangel teilweise im Gebirge und zum Teil in Klimakammern/ Dekompressionskammern durchgeführt wurden.

1. Auswirkungen von körperlicher Belastung unter normobarer Hypoxie auf die Reaktionszeit

Die Reaktionszeit veränderte sich unter den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen nicht signifikant. Zwar stieg sie sowohl bei der Gruppe der jungen wie auch der alten Probanden an, die Veränderungen waren jedoch nicht signifikant. Eine Tendenz zu höheren Reaktionszeiten lässt sich jedoch ablesen. Nicht konsistent erscheint die Tatsache, dass sich die Reaktionszeit bei den älteren Probanden zwischen 20,9% und 15,9% um 21 ms (oder 5%) verlängert, sie jedoch beim Vergleich von 15,9% und 13,8% wieder um 15 ms (oder 3,5%) abnimmt.

In der Gruppe der jüngeren Probanden war die Zunahme zwar stetig, aber gering (Zunahme um 2 ms oder 0,5% von 20,9% auf 15,9% und erneute Zunahme um 6,5 ms oder 1,3% von 15,9% auf 13,8%) und nicht signifikant.

Für die Vermutung, dass diese Tendenz nicht rein zufällig ist, spricht das Ergebnis, wenn man die Reaktionszeiten von einer anderen Seite betrachtet. Die Hälfte der Probanden führte den Reaktionstest in ausgerichteter Verfassung (nach der Akklimatisationsphase oder nach der Durchführung der Papier-und-Bleistift-Tests) durch, die andere Hälfte 3 bis 5 Minuten nach der 6-minütigen, körperlichen Belastung (1,0 W/kg KG). Bei Normoxie waren die ausgeruhten Probanden im Mittel um 10 ms schneller, der Unterschied war jedoch nicht signifikant. Während die Reaktionszeit bei den ausgeruhten Probanden annähernd gleich blieb (maximaler Unterschied: 3 ms), erhöhte sie sich bei den Probanden bei Belastung unter Hypoxie (um 24 bzw. 20 ms bei 15,9 und 13,8% Sauerstoffkonzentration). Für den Vergleich 20,9 % vs. 15,8 % war dieser Unterschied signifikant ($p = 0,039$), für den Vergleich 20,9 % vs. 13,8 % gerade nicht mehr ($p = 0,052$).

Fasst man die verschiedenen Ergebnisse des Reaktionstests zusammen, so fällt auf, dass sich die Tendenz zu höheren Reaktionszeiten unter Hypoxie bei den beiden genannten Bedingungen (also ohne und mit Berücksichtigung der vorher stattgehabten, körperlichen Belastung) ablesen lässt. Die langsamsten Reaktionszeiten werden im Anschluss an die körperliche Belastung unter Hypoxiebedingungen erzielt. Dies ist der Zustand, in dem die Hypoxie durch die verringerte Luftsauerstoffkonzentration und zusätzlich durch einen erhöhten

Sauerstoffverbrauch zu einer nochmals verstärkten Hypoxämie geführt hat. Die kürzesten Reaktionszeiten sind die unter Normoxie und ohne vorhergehende Belastung.

Eine Studie unter normobarer Hypoxie in einer Klimakammer, bei der 22 Probanden über 11 bis 14 Tage wechselnden Sauerstoffkonzentrationen von 21 %, 15 %, 14 % und 13 % ausgesetzt waren, zeigte bezüglich der Reaktionszeit keine Verschlechterung (Gustafsson et al., 1997). Vielmehr verkürzte sich diese sogar signifikant. Die Autoren vermuten jedoch, dass die Ursache dieser Verkürzung auf einen Lerneffekt zurückzuführen sein könnte. Diese Lerneffekte konnten auch wir beobachten.

Eine andere Studie untersuchte 144 junge Probanden zwischen 19 und 25 Jahren unter hypobarer Hypoxie in einer Kammer entsprechend Höhen von jeweils 0 m und einer der folgenden: 1525 m, 2440 m, 3050 m, 3660 m (Paul und Fraser, 1994).

Im Hinblick auf die Reaktionszeit ergaben sich zwar Unterschiede zwischen der Gruppe, die den Test in Ruhe und der, die diesen unter Belastung durchführte. Die Gruppe, die die Tests in Ruhe absolvierte, hatte signifikant niedrigere Reaktionszeiten als die, die ihn während körperlicher Belastung durchführte. Fraglich bleibt, ob dies auf die verminderte Sauerstoffkonzentration im peripheren Blut oder auf schlechtere Konzentrationsleistungen bei körperlicher Belastung zurückzuführen ist.

Wie in unseren Versuchen zeigte sich, dass die Probanden die Aufgaben mit zunehmender Übung besser absolvierten und somit ein Lerneffekt vorhanden war. Einen Zusammenhang zwischen Reaktionsfähigkeit und Höhe (und den korrespondierenden Sauerstoffsättigungen, für die sich ein eindeutiger Zusammenhang nachweisen ließ) konnten die Autoren jedoch nicht nachweisen, auch wenn die Reaktionszeiten in körperlicher Ruhe leicht anstiegen. Unter Belastung hingegen zeigte sich ein uneinheitlicher Verlauf mit unregelmäßigem Anstieg und Abfall der Reaktionszeiten auf unterschiedlichen Höhen.

In einer Studie mit 23 männlichen U.S.-Soldaten wurde die Reaktionszeit auf simulierten 550 m (710 torr), 4200 m (450 torr) und 4700 m (421 torr) in einer hypobaren Klimakammer getestet (Shukitt-Hale et al., 1997). Die Exposition auf jeder Höhe dauerte 4,5 Stunden. Es waren keine Unterschiede in den Reaktionszeiten

oder hinsichtlich der Sorgfalt der bearbeiteten Aufgaben festzustellen. Auf 4700 m (vs. 550 m) waren bei einem Signifikanzniveau von $p < 0,1$ die Reaktionszeit im einfachen Reaktionstest verlängert und die Fehlerquote in einem komplizierteren Reaktionstest erhöht. Die Autoren vermuten, dass bei 4200 m die Unterschiede weniger deutlich erkennbar sind, weil es gerade zwischen 4200 m und 4700 m einen großen Unterschied in der Auswirkung von Hypoxie auf die zerebrale Leistungsfähigkeit gebe. Sie schlussfolgern, dass es unterhalb einer Höhe von 4200 m weit weniger Einschränkungen der kognitiven Leistungsfähigkeit gibt. Sie ziehen auch in Erwägung, dass sich eventuell mit einer größeren Anzahl an Probanden auch schon auf 4200 m vermehrt Unterschiede zu 500 m ergeben hätten. Als Konsequenz leiten die Autoren ab, dass bei Höhen über 4200 m Vorsichtsmaßnahmen (wie medikamentöse Prophylaxe, Sauerstoffgabe, etc.) bei gefährlichen Tätigkeiten getroffen werden sollten.

In einer Studie mit 32 jungen Probanden (Durchschnittsalter: 21,1 Jahre) wurden die Auswirkungen von Hyperoxie auf die Reaktionszeit gemessen. Hierzu inhalierte die Hälfte der Probanden 70 Sekunden lang in einem verblindeten Versuchsaufbau mittels einer Gesichtsmaske reinen Sauerstoff oder normale Luft (Scholey et al., 1999 und 1998). In den folgenden Minuten wurde ein Merkfähigkeitstest und ein Reaktionstest durchgeführt. Die Reaktionszeit der Probanden, die reinen Sauerstoff inhaliert hatten, war signifikant ($p < 0,05$) kürzer als die der Probanden, die normale Luft geatmet hatten. Außerdem bestand eine Korrelation zwischen der Zunahme der Sauerstoffsättigung und der Abnahme der Reaktionszeit. Je niedriger die basale Sauerstoffsättigung und je größer der Unterschied zwischen Ausgangssättigung und Sättigung unter reinem Sauerstoff waren, desto stärker verkürzten sich die Reaktionszeiten.

Die Autoren schließen daraus, dass eine hohe Menge an zusätzlich gelöstem Sauerstoff die kognitive Leistungsfähigkeit verbessern kann. Der Grund hierfür ist unbekannt, könnte jedoch nach deren Hypothese zum Beispiel in einer verbesserten Glukosefreisetzung und einer erhöhten Synthese von Acetylcholin liegen. Zum Zeitpunkt des Reaktionstests war die erhöhte Sauerstoffsättigung im Blut jedoch schon fast wieder verschwunden, dennoch war die Reaktionszeit verkürzt. Den Autoren zufolge könnte dies für eine Art Depoteffekt des Sauerstoffs sprechen. Gegen einen solchen Depoteffekt sprechen neben physiologischen Mechanismen

unsere Ergebnisse aus dem Determinationstest nach Belastung. Während der Reaktionstest zwischen belasteter und nicht belasteter Gruppe noch verändert war, waren im ca. 5 bis 10 Minuten später durchgeführten Determinationstest die Ergebnisse für beide Gruppen gleich.

Eine andere Studie untersuchte bei 14 Studenten die Reaktionszeit unter normobarer Hypoxie (Fowler und Taylor, 1987). Das eingeatmete Gasgemisch wurde dabei so eingestellt, dass die periphere Sauerstoffsättigung bei 67 % lag, also bei Werten noch unterhalb denen, die in unserer Studie bei der niedrigsten Sauerstoffkonzentration und gleichzeitiger Belastung vorkamen. Unter diesen Bedingungen wurde eine Verlängerung der Reaktionszeit festgestellt.

In einer Studie mit einer großen Anzahl an Probanden und einem gut durchdachten Versuchsaufbau sind zwar keine signifikanten Ergebnisse zu sehen, jedoch ist tendenziell zu erkennen, dass auch hier bei der niedrigsten Höhe (1524 m) die kürzesten Reaktionszeiten bestehen (Paul und Fraser, 1994). Allerdings passt hier eines der Ergebnisse schlecht ins Bild: die Reaktionszeiten auf 2438 m sind länger als diejenigen auf 3048 m und auf 3658 m. Dieses Ergebnis wiederum passt zu denen von uns erhobenen Daten: auch bei uns wurden – nicht erklärbar – die längsten Reaktionszeiten bei der Gruppe der älteren Probanden unter 15,9 % Sauerstoffkonzentration erhoben, und nicht wie zu erwarten unter 13,8 %. Ob es sich hierbei um einen echten Effekt oder um eine zufällige Übereinstimmung handelt, kann hier nicht geklärt werden. Um dies festzustellen, müsste eine Untersuchung mit der Fragestellung durchgeführt werden, ob es in einer bestimmten Höhe – etwa zwischen 2300 m und 2700 m – zu einer überproportionalen Verlängerung der Reaktionszeit kommt. Eventuell wären auch bei einer längeren Versuchsdauer als 30 Minuten stabilere Ergebnisse erkennbar gewesen.

Die Ergebnisse der o.g. Studie mit 23 Soldaten wiederum ergab zwar weder für 4200 m noch für 4700 m Ergebnisse auf einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$, jedoch ist auch hier die Tendenz zu erkennen, dass Reaktionszeiten mit zunehmender Verringerung des Sauerstoffpartialdrucks länger werden (Shukitt-Hale et al., 1997). Wie die Autoren selbst mutmaßen, könnte dieser Effekt unter Umständen jedoch bei einer größeren Zahl an Probanden deutlicher zutage treten.

Bei peripheren Sauerstoffsättigungen von 67 % (die von uns gemessenen Werte lagen immer über diesen Werten) wurde in einer der Studien (Fowler und Taylor, 1987) eine Verlängerung der Reaktionszeit nachgewiesen. Es ist zu vermuten, dass sich dieser Effekt erst ab Sauerstoffkonzentrationen von unter 13 % (auf Meereshöhe) und entsprechenden peripheren Sauerstoffsättigungen bemerkbar macht.

Auch wenn die Verlängerung der Reaktionszeit unter Hypoxie von 13,8 und 15,9% Sauerstoffkonzentration nicht in allen Punkten eindeutige Ergebnisse liefert, ist die Tendenz aus den wenigen Studien dazu nachzuvollziehen. Der Effekt scheint allerdings erst ab einem Sauerstoffpartialdruck signifikant nachweisbar zu sein, der unter dem in unserem Versuchsaufbau liegt.

Für eine rasche Erholung der Reaktionsfähigkeit spricht, dass sich die Leistungen im Determinationstest, der dem Reaktionstest direkt nachfolgt (Beginn ca. 5 Minuten nach Ende des Reaktionstests), wieder erholt hatten.

Die Sauerstoffkonzentrationen unseres Versuchsaufbaus waren aufgrund der arbeitsmedizinischen Notwendigkeiten im modernen Brandschutz vorgegeben. Es ist in Erwägung zu ziehen, dass bei einer weiteren Erniedrigung des Sauerstoffpartialdrucks – oder der Sauerstoffsättigung durch körperliche Belastung – diese Verlängerung signifikant wird. Aus arbeitsmedizinischer Sicht bedeutet dies, dass bei körperlichen Arbeiten unter Hypoxie mit verlängerten Reaktionszeiten gerechnet und – sofern aus Sicherheitsgründen notwendig – mit einer entsprechenden Anpassung von Sicherheitsvorschriften reagiert werden muss.

Einen Hinweis darauf, dass die Motorik unter Hypoxie nach Belastung eingeschränkt gewesen wäre, fanden wir hingegen nicht. Die reine motorische Zeit für die Bewegung des Arms zum Ziel war nach stattgehabter Belastung sogar tendenziell kürzer als bei Durchführung des Reaktionstests in ausgeruhtem Zustand. Diese Verkürzung war allerdings nicht signifikant.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit einer Arbeit von Gustafsson et al. (1997) die ebenfalls unter normobarer Hypoxie bei 13% und 15% Luftsauerstoffkonzentration durchgeführt wurde. Sie stellten dabei eine leichte, wenn auch nicht signifikante Verbesserung der feinmotorischen Fähigkeiten fest. Die Autoren führten diese auf eine Verminderung der Inhibition von Neuronen für die Feinmotorik zurück.

Im Gegensatz dazu stellen Fowler und Taylor (1987) dar, dass die motorische Komponente der Reaktionszeit unter normobarer Hypoxie ansteigt. Dabei wurden den Probanden solange ein hypoxisches Luftgemisch aus Sauerstoff und Stickstoff zugeführt, bis eine periphere Sauerstoffsättigung von 67 % erreicht wurde. Die Vergleichbarkeit mit diesen Ergebnissen ist allerdings nur bedingt möglich, da in unserem Versuchsaufbau zu keinem Zeitpunkt ähnlich niedrige Sauerstoffsättigungen erreicht wurden.

Vaernes et al. (1984) finden unter hypobarer Hypoxie in 3048 m eine leichte, jedoch nicht signifikante Verminderung der motorischen Geschicklichkeit der Finger und keine Veränderung bei der Geschwindigkeit der Motorik der Unterarmmuskulatur.

Insgesamt weist die Datenlage einschließlich unserer Ergebnisse eher darauf hin, dass sich in den für den Arbeitsschutz relevanten Konzentrationsgrenzen für Hypoxie unter Brandschutzbedingungen keine Verschlechterung der motorischen Leistungen feststellen lässt. Die einzigen Daten, die dem widersprechen, wurden bei Sauerstoffsättigungen erhoben, wie sie in unserer Studie bei 89 Probanden kein einziges Mal auftraten. Somit erscheinen sie für den vorbeugenden Brandschutz, bei dem Sauerstoffkonzentrationen von unter 13% nicht benötigt werden, arbeitsmedizinisch nicht von Relevanz zu sein.

2. Periphere Sauerstoffsättigung, Blutdruck, Herzfrequenz und Ergometrie

2.1. Periphere Sauerstoffsättigung

Zwischen allen drei Expositionsarten bestanden hoch signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) bei der peripheren Sauerstoffsättigung. Lag die durchschnittliche Sauerstoffsättigung bei Normoxie insgesamt bei 97%, sank sie bei 15,9% Sauerstoffkonzentration auf durchschnittlich ca. 92%, bei 13,8% auf durchschnittlich 89%. Dieses Ergebnis entsprach den Erwartungen, da die Sauerstoffsättigung bei gleichbleibenden anderen Einflussgrößen (Hämoglobin etc.) von der Sauerstoffkonzentration in der Atemluft abhängt.

Die jungen und alten Probanden unterschieden sich ($p < 0,003$), der Unterschied lag zwischen 1 – 2 Prozentpunkten. Dieser Unterschied lässt sich auch an allen anderen Studien nachvollziehen und lag bei vergleichbaren Bedingungen in einem ähnlichen Bereich (Forster, 1985; Paul und Fraser 1994; McCarthy 1995 et al.; Crowley et al., 1992, Li et al., 2000).

2.2. Blutdruck

Unter den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen unterschieden sich weder systolische noch diastolische Blutdrücke voneinander. Sie lagen bei der Gruppe der jüngeren Probanden um 114 mm Hg systolisch und um 75 mm Hg diastolisch, bei den älteren Probanden um 122 mm Hg systolisch und 82 mm Hg diastolisch.

Systolische und diastolische Blutdrücke unterschieden sich bei den beiden Altersgruppen signifikant ($p < 0,030$ für alle Fälle). Dies erklärt sich auf Grund des Altersunterschieds.

Die Ergebnisse stimmen mit denen einer Untersuchung von 20 männlichen Probanden im Alter zwischen 23 und 52 Jahren in einer Klimakammer überein (10 davon akklimatisiert, 10 nicht akklimatisiert). Auch hier wurden unterhalb einer Höhe von 4000 m weder Veränderungen des systolischen noch des diastolischen Blutdrucks beobachtet (Koller et al., 1991).

In einer anderen Studie, in der 60 Schichtarbeiter untersucht wurden, die auf einer Höhe von 4200 m arbeiteten, war eine Erhöhung des systolischen Blutdrucks ab dem zweiten Tag des Aufenthaltes nachweisbar, eine Erhöhung des diastolischen Blutdrucks nach einem Aufenthalt über eine Nacht auf 3000 m (Hackett und Roach, 2001). Aufgrund der bei uns wesentlich kürzeren Versuchsdauer widersprechen sich diese Aussagen allerdings nicht.

In einer am Mount Everest in unterschiedlichen Höhen ab 5000 m an 8 Bergsteigern durchgeführten Untersuchung zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen systolischem und diastolischem Blutdruck auf Meereshöhe und 5000 m bis 8000 m (Boussuges et al., 2000).

Eine initiale Absenkung des Blutdrucks aufgrund Hypoxämie-induzierter Vasodilatation (Ward et al., 2000) zeigen unsere Daten nicht. Eventuell wird diese

allerdings durch eine Aktivierung des Sympathikus überdeckt, so dass sich die beiden Effekte gegenseitig neutralisieren. Für eine Aktivierung des Sympathikus spricht auch die Erhöhung der Herzfrequenz unter Hypoxie (s.u.).

Berücksichtigt man Aufenthaltsdauer und Sauerstoffkonzentration (oder die korrespondierende Höhe), so finden sich die von uns erhobenen Daten in Übereinstimmung mit den Aussagen der meisten vergleichbaren Untersuchungen. Hypoxie mit einer Luftsauerstoffkonzentration von 13,8 % oder höher scheinen den Blutdruck innerhalb der ersten beiden Stunden nicht zu beeinflussen.

2.3. Herzfrequenz

Die mittleren Herzfrequenzen in körperlicher Ruhe während des Aufenthaltes unter den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen unterschieden sich nicht zwischen den beiden Altersgruppen.

Im Hinblick auf die Sauerstoffkonzentration ist eine hoch signifikante Erhöhung der Herzfrequenz offensichtlich ($p < 0,001$ für alle Vergleiche). Sie beträgt im Mittel 5,4 Schläge pro Minute beim Vergleich von Normoxie mit 13,8% und 3,0 Schläge pro Minute beim Vergleich Normoxie mit 15,9%.

Dies deckt sich mit den Daten der in Kapitel 2.1. erwähnten Studien (Koller et al., 1991; Hackett und Roach, 2001; Boussuges et al., 2000; Ward et al., 2000). Eine Erklärung für diese Erhöhung der Herzfrequenz ist eine innerhalb weniger Minuten beginnende Stimulation der Paraganglien im Glomus caroticum und einer folgenden, noradrenergen Aktivierung des Sympathikus. Die dort liegenden Chemorezeptoren vermitteln durch den verminderten Sauerstoffpartialdruck im Blut eine Ausschüttung von Noradrenalin (Ward et al., 2000).

2.4. Ergometrie

Während der körperlichen Belastung mit 1,0 W/kg Körpergewicht war der systolische Blutdruck bei der Gruppe der älteren Probanden unter 13,8% Hypoxie im Vergleich zur Normoxie ($p < 0,001$) um 11,1% erhöht, ebenso beim Vergleich des systolischen

Blutdrucks zwischen 13,8 und 15,9% Hypoxie ($p = 0,001$). Bei der Gruppe der jüngeren Probanden zeigten sich keine Veränderungen zwischen den Expositionen. Der diastolische Blutdruck blieb wie in Ruhe bei den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen unverändert.

Während sich, kongruent mit den Ergebnissen in Ruhe, der diastolische Blutdruck bei allen und der systolische bei den jungen Probanden nicht veränderte, stieg der systolische Blutdruck im Mittel unter Hypoxie bei den älteren Probanden an. Dies könnte in einer erhöhten Adrenalin-/ Noradrenalinfreisetzung unter Hypoxie begründet liegen, die den vasodilatativen Effekt einer verminderten Sauerstoffsättigung (Ward et al., 2000) überwiegt. Jedoch lässt sich diese Aussage aufgrund fehlender Arbeiten zu diesem Thema nicht belegen und bleibt aus diesem Grunde spekulativ.

Konsequenterweise sollte jedoch überlegt werden, ältere Arbeitnehmer, die unter Hypoxie körperlich arbeiten müssen und einen bekanntermaßen erhöhten Blutdruck haben, zukünftig verstärkt zu überwachen. Idealerweise könnten Messungen unter Exposition erhoben werden und somit die Datenlage zu diesem Ergebnis verbessert werden.

Die Herzfrequenzen beider Altersgruppen stiegen unter Sauerstoffmangel im Vergleich zu den unter Normoxie erhobenen Werten wie schon in Ruhe signifikant an (in beiden Altersgruppen um ca. 11 Schläge pro Minute), während die periphere Sauerstoffsättigung unter Hypoxie in beiden Altersgruppen – auch hier analog zu den in Ruhe erhobenen Ergebnissen – absank.

Anscheinend kann der verminderte Sauerstoffpartialdruck nur begrenzt durch eine verstärkte Hyperventilation ausgeglichen werden, so dass bei erhöhtem Sauerstoffverbrauch unter körperlicher Aktivität die periphere Sauerstoffsättigung bei 13,8% Luftsauerstoffgehalt gegenüber dem Ruhezustand im Durchschnitt nochmals um 5 – 6 Prozentpunkte absinkt und im Gegenzug die Herzfrequenz über eine sympathische Aktivierung ansteigt.

Das Absinken der Sauerstoffsättigung bei körperlicher Arbeit unter Hypoxiebedingungen deckt sich mit den Aussagen von Tucker et al. (1984) sowie denen von Paul und Fraser (1994), die diese bereits unter der geringen Leistung von 27 W nachwiesen.

Somit muss bei exponierten Personen, die bei Hypoxie bereits in Ruhe eine deutlich verminderte, periphere Sauerstoffsättigung aufweisen, daran gedacht werden, dass diese Sättigungen im Falle einer körperlichen Belastung nochmals sinken werden. Dies kann im Grenzbereich zu arbeitsmedizinischen Konsequenzen führen.

3. Kognitive Leistungstests

3.1. Gedächtnistest aus dem Nürnberger Altersinventar

Während sich die jüngeren Probanden an durchschnittlich 1,4 mehr Worte (15%) erinnern konnten als die älteren ($p < 0,004$ in allen Fällen), unterschied sich die Gedächtnisleistung unter den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen nicht voneinander ($p = 0,199$).

Dieses Ergebnis war auch am zweiten Teil des Gedächtnistests erkennbar, bei dem sich die Probanden nach einer Distraktionsphase von 25 bis 30 Minuten anhand einer Wortliste an die zuvor gelernten Worte erinnern sollten. Auch hier waren die jungen Probanden signifikant besser als die älteren ($p < 0,022$ in allen Fällen), jedoch bestand keinerlei Unterschied zwischen den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen in der Atemluft ($p = 0,764$).

Zu einem gegensätzlichen Ergebnis kommt eine Untersuchung von 7 Probanden, die für 6,5 Stunden in einer Klimakammer mit simulierten 3048 m Höhe untersucht wurden (Vaernes et al., 1984). Dabei wurde nach kurzer Zeit mit den Tests begonnen und die gesamte Testbatterie (Gedächtnis, Motorik, logisches Denken, Reaktion) alle 2 Stunden wiederholt. Die Autoren sprechen von einem deutlichen Rückgang der Gedächtnisleistung, jedoch sind die Unterschiede nur auf einem Niveau von 66% (1 Standardabweichung), nicht aber auf einem Signifikanzniveau von 95% nachweisbar.

In einer bereits oben erwähnte Studie, in der zwei Gedächtnistests unter Hyperoxie von 7 Minuten Dauer (100% Sauerstoff über 70 Sekunden, appliziert über eine Maske) (Scholey et al., 1999) an 32 Probanden durchgeführt wurden, wurde ein signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) beobachtet. Der verwendete Test war dem in unserem Versuchsaufbau sehr ähnlich – die Präsentation der Worte erfolgte

allerdings auf einem Bildschirm. Die Gedächtnisleistung war unter reinem Sauerstoff besser als die des Vergleichskollektivs, das normale Luft eingeatmet hatte. Als Ursache dafür wurde auf eine erhöhte Verfügbarkeit von Sauerstoff für neurale Prozesse vermutet, die bei der Speicherung von Informationen im Gedächtnis behilflich sein könnte.

Dagegen konnte bis einschließlich 6250 m im Rahmen einer Untersuchung von 8 Probanden keine Verschlechterung der Leistung des Kurzzeitgedächtnisses nachgewiesen werden (Kennedy et al., 1989). Diese Probanden lebten für insgesamt 40 Tage in einer Dekompressionskammer, wobei die simulierte Höhe langsam bis auf 8845 m gesteigert wurde. Die Anzahl der korrekt erinnerten Zahlen unterschied sich auch auf 7630 m nicht signifikant von der auf Meereshöhe. Lediglich die Anzahl der korrekt wiedergegebenen Antworten pro Zeiteinheit war ab 7020 m signifikant vermindert. Das könnte auf eine Verlangsamung bestimmter kognitiver Prozesse hinweisen.

In einer weiteren Untersuchung wurden 41 Schichtarbeiter, die 44 Tage auf 4200 m arbeiteten mit 19 „Pendlern“ verglichen, die täglich von Meereshöhe für 6 Stunden auf dieser Höhe gebracht wurden (Forster, 1985). Als Gedächtnistest wurde ein Zahlen-Merktest („digit span forwards“) benutzt. Weder bei den akklimatisierten Schichtarbeitern noch bei den „Pendlern“ wurde ein Unterschied zwischen der Leistung auf Meereshöhe und der auf 4200 m beobachtet.

Wiederum ist die Studienlage zur Fragestellung, ob Hypoxie zu einer Einschränkung der Gedächtnisleistung führt, uneinheitlich. Die Studie, die dies bejaht, wurde mit einer niedrigen Probandenzahl von 7 Teilnehmern durchgeführt, und die Ergebnisse sind für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5% nicht signifikant (Vaernes et al., 1984).

Ob aus der Verbesserung der Gedächtnisleistung unter Hyperoxie (Scholey, 1999) bei 16 Probanden (die anderen 16 dienten als Kontrollgruppe) im interindividuellen Vergleich auf eine Verminderung dieser Leistung unter Hypoxiebedingungen geschlossen werden kann, erscheint fraglich. Dies gilt insbesondere, da die Mittelwerte zwischen den verschiedenen Bedingungen unserer Studie nur minimal differieren und somit konsistent erscheinen, zumal eine andere Arbeit, in der Gedächtnis und Aufmerksamkeit nach einer Inhalation von reinem Sauerstoff

getestet wurden, zu einem anderen Ergebnis kommt (Andersson et al., 2002). Hier zeigten sich keine Effekte der Sauerstoffgabe auf die kognitive Leistungsfähigkeit. Die Ergebnisse der Studie mit der größten Anzahl von Probanden (Forster, 1985) stimmen mit unseren bezüglich der Gedächtnisleistung überein. Allerdings zeigte ein Test, der die Leistungen von Gedächtnis, Konzentration, Aufmerksamkeit und logischem Denken („digit span backwards“) misst, einen Unterschied zwischen akklimatisierten und nicht akklimatisierten Probanden. Die nicht akklimatisierten Probanden zeigten dabei auf 4200 m schlechtere Leistungen als auf Meereshöhe ($p < 0,05$).

Insgesamt ergeben sich aus unseren Daten keinerlei Hinweise auf eine Verschlechterung des Gedächtnisses. Auch die Studienlage scheint eher in diese Richtungen zu tendieren, womit arbeitsmedizinisch relevante Einschränkungen unter diesem Aspekt nicht zu erwarten sind.

3.2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test und Zahlen-Verbindungs-Test

Die für Arbeitsanforderungen und Arbeitsmedizin enorm wichtigen Eigenschaften Konzentration, Aufmerksamkeit und Fehlerhäufigkeit haben wir mit dem d2-Test, einem Aufmerksamkeits-Belastungs-Test und dem Zahlenverbindungstest untersucht, einem Test zur Messung der Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung und der Konzentration. Da sich die gemessenen Eigenschaften in beiden Tests überschneiden, werden sie hier gemeinsam diskutiert.

Bei beiden Tests unterschieden sich die beiden Kollektive alt und jung noch deutlicher als in allen anderen Leistungstests. In beiden Tests waren die Unterschiede zwischen den Altersgruppen für alle Expositionsarten hoch signifikant ($p < 0,001$ in allen Fällen), der quantitative Unterschied lag in beiden Tests bei durchschnittlich 20%. Jedoch war auch hier kein Unterschied zwischen den Expositionen mit 20,9%, 15,9% und 13,8% Sauerstoffkonzentration zu sehen ($p = 0,396$ für d2-Test und $p = 0,382$ für Zahlenverbindungstest).

Da in einer Untersuchung auch Verminderungen der Urteilsfähigkeit vermutet wurden (McCarthy et al., 1995), untersuchten wir noch die Fehlerquoten der Probanden. Die Testteilnehmer in der betreffenden Studie hatten ihr Arbeitstempo unter Hypoxie

nicht verlangsamt, obwohl sie mehr Fehler machten. Daraus schlossen die Autoren auf eine verminderte Urteilsfähigkeit.

Deshalb bildeten wir den Quotienten aus der Gesamtzahl der Fehler beim d2-Test und teilten diesen durch die Anzahl der richtig gelösten Zeichen (Fehlerquote).

Wiederum ergab die Unterscheidung der Altersgruppen signifikante Unterschiede ($p < 0,037$ für alle Sauerstoffkonzentrationen): die älteren Probanden machten fast doppelt so viele Fehler pro Zeichen wie die jüngeren. Doch bei dem Vergleich der unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen trat unter Hypoxie erneut keine Verschlechterung der Leistungsfähigkeit, d.h. keine Erhöhung der Fehlerquote auf ($p = 0,689$).

Einige Untersuchungen zu Konzentrationsfähigkeit und Aufmerksamkeit kommen zu anderen Ergebnissen (Carson et al., 1969, McCarthy et al., 1995, Shukitt-Hale et al., 1991; Forster, 1985; Crowley et al., 1992).

So kommt eine Studie an 13 Soldaten, die 2,5 Tage auf 4300 m verbrachten, zu dem Ergebnis, dass die Konzentrationsleistung („stroop test“) am ersten Tag in der Höhe signifikant abgenommen hat (Crowley et al., 1992). In dieser Studie wurden außerdem die Auswirkungen der Befindlichkeit auf die kognitive Leistungsfähigkeit untersucht. Diese war in 7 von 9 Fällen mit dem Wohlbefinden korreliert. Die Autoren sprechen allerdings nur von einer mäßigen Verschlechterung der Leistungsfähigkeit.

Eine bereits oben erwähnte Studie an 23 männlichen Probanden in einer Klimakammer mit einer simulierten Höhe von 500 m, 4200 m und 4700 m (Shukitt-Hale et al., 1997) über 4,5 Stunden misst eine Verschlechterung der Konzentrationsleistung (Test: Zahlenvergleich) auf 4200 m ($p < 0,05$) und 4700 m ($p = 0,01$). Die Autoren sprechen hier von deutlichen negativen Auswirkungen.

Eine früher durchgeführte Studie der gleichen Autoren an 20 männlichen Soldaten (Shukitt-Hale et al., 1991), die die geistige Leistungsfähigkeit auf 550 m und 4700 m bei einer Aufenthaltsdauer von 5 bis 7 Stunden miteinander vergleicht, kommt bezüglich der Konzentration der Probanden (Test: Zahlenvergleich auf Papier) zu einem ähnlichen Ergebnis: dieses fällt allerdings weniger deutlich aus. So liegt das Signifikanzniveau für die Unterschiede zwischen 4700 und 550 m nur bei $p < 0,05$ (statt $p < 0,01$), ein ähnlicher Test (Zahlenvergleich) bleibt ohne signifikanten Unterschied.

Ein Versuch vergleicht die Ergebnisse von 12 Probanden auf Meereshöhe, auf 2133 m und auf 3658 m miteinander (McCarthy et al., 1995). Die Aufgaben wurden sowohl auf 2133 m als auch auf 3658 m langsamer beantwortet als auf Meereshöhe ($p < 0,017$). Zwischen 2133 m und 3658 m bestand kein Unterschied in der Geschwindigkeit, in der die Fragen beantwortet wurden. Dafür war die Anzahl der fehlerhaften Antworten auf 3658 m gegenüber 2133 m erhöht ($p < 0,017$). Weil die Sorgfalt der Antworten anscheinend gelitten hatte, ohne dass die Probanden deswegen ihr Arbeitstempo verringert hätten, schließen die Autoren auf eine Verschlechterung des Urteilsvermögens (siehe oben).

Andere Untersuchungen konnten keine Einschränkungen des Konzentrationsvermögens feststellen (Gustafsson et al., 1997, Paul und Fraser, 1994, Leiffen et al., 1997, Linde et al., 1997).

Eine davon untersuchte die Auswirkungen auf 4 Bergsteiger, wobei diese in einer Klimakammer über 5 Tage hinweg jeweils 8 Stunden täglich gegenüber steigenden Höhen zwischen 5000 und 7000 m exponiert wurden (Leiffen et al., 1994). Es wurden auf keiner Höhe Einschränkungen der Konzentrationsfähigkeit festgestellt („Manikin-Test“). Auch die Sorgfalt, mit der die Aufgaben beantwortet wurden, sank mit zunehmender Höhe nicht. Es muss aber erwähnt werden, dass sich die Versuchspersonen vor dem eigentlichen Versuch 5 Tage lang auf 4350 m akklimatisieren konnten.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen von Höhen zwischen 0 und 3658 m bei 144 Soldaten über einen Zeitraum von jeweils 30 Minuten (Paul et al., 1994) konnte keine höhenabhängige Veränderung der Konzentrationsfähigkeit der Probanden festgestellt werden.

Die Konzentrationsleistung wurde auch in einer Studie mit normobarer Hypoxie gemessen (Gustafsson et al., 1997). Hier wurden 22 Probanden über 11 bis 14 Tage wechselnden Sauerstoffkonzentrationen zwischen 21% und 13% ausgesetzt. Die Tests, die die Konzentrationsleistung maßen, wiesen lediglich einen signifikanten Lerneffekt auf. Eine Verschlechterung durch Hypoxiebedingungen war nicht erkennbar, obwohl die Autoren in ihrer Hypothese davon ausgegangen waren, dass dies der Fall sein würde.

Die Fehlerhäufigkeit unter Hypoxie nahm zwar zu, doch setzte sich dies auch in den folgenden Tests unter Normoxie fort. Deshalb gehen die Autoren davon aus, dass sich dies nicht durch die verminderte Sauerstoffkonzentration, sondern vielmehr

durch Langeweile aufgrund des langen Aufenthalts in einer abgeschlossenen Umgebung erklären ließ. Bestätigt wurde diese These durch Befragungen der Probanden, bei denen diese angaben, die Langeweile dadurch gemindert zu haben, dass sie die Tests als eine Art Wettkampf mit den anderen durchgeführt hätten.

Unter Umständen hat auch die Art des Sauerstoffmangels – also normo- statt hypobar – dazu beigetragen, dass sich kein Abfall des Leistungsvermögens nachweisen ließ. Weil die Auswirkungen von hypobarer Hypoxie bezüglich Hypoxämie, Hypokapnie, Alkalose und verminderter Sauerstoffsättigung des Bluts größer sind als diejenigen von normobarer Hypoxie (Savourey et al., 2003), ist dies ein möglicher Erklärungsansatz für die Widersprüche zwischen unseren Ergebnissen und denen einiger anderer Studien. Außerdem könnten auch die Auswirkung von Langeweile bei langen Versuchsdauern von mehreren Tagen oder Ablenkungen (z.B. in Form von Angst oder einem ungewohnten Aufenthaltsort in den Bergen) die Versuchsergebnisse verändert haben.

Eine Beeinträchtigung des Konzentrationsvermögens, der Aufmerksamkeit und der Sorgfalt durch reduzierten Sauerstoffgehalt in der Atemluft kann anhand unsere Daten nicht gesehen werden, so dass sich keine arbeitsmedizinischen Folgen ergeben. Einige Studien mit hoher Probandenzahl und gut durchdachtem Design, die dies untersucht haben, kommen zu dem gleichen Ergebnis.

3.3. Matrizen-Test

Auch beim logischen Denken, dem letzten hier diskutierten Bereich, den wir zur kognitiven Leistungsfähigkeit untersuchten, waren die Ergebnisse wie in den anderen von uns getesteten Fähigkeiten durch eine Verminderung des Sauerstoffpartialdrucks nicht beeinträchtigt ($p = 0,983$). Und wie in allen anderen Punkten erwies sich auch hier die Gruppe der jüngeren Probanden gegenüber der älteren als leistungsfähiger ($p < 0,001$ für alle Vergleiche), wobei sie durchschnittlich 11,9 statt 7,8 Aufgaben löste (35% mehr).

Auch der Blick in die Literatur zeigt wieder eine unterschiedliche Daten- und Beurteilungslage dieser Qualität der kognitiven Leistungsfähigkeit.

Bei 7 Probanden war die Fähigkeit zum logischen Denken bereits auf einer Höhe von 3048 m (Klimakammer, hypobare Hypoxie) eingeschränkt, wobei nur ein Signifikanzniveau von 66% (1 Standardabweichung) für diese Aussage erreicht wurde (Vaernes et al., 1984).

Auf 4200 m und 4700 m (Klimakammer) wurden 23 männliche Personen getestet: während mathematische Fähigkeiten wie die Addition auf 4200 m und 4700 m eingeschränkt waren, war die Fähigkeit zum logischen Denken (repräsentiert durch den Test „tower task“) nicht eingeschränkt (Shukitt-Hale et al., 1997). Insgesamt schienen die Leistungen in sauerstoffreduzierter Umgebung mit zunehmender Aufenthaltsdauer – ab einer Zeit von länger als 2 Stunden - abzunehmen.

Bei der Korrelation von kognitiver Leistung und Symptomen der akuten Höhenkrankheit auf 4700 m (20 Probanden) zeigte sich ein Zusammenhang zwischen einigen mathematischen Leistungen (Addition auf Papier) und dem Auftreten von Symptomen. Dieser Zusammenhang bestand jedoch nicht in allen Tests (kein Zusammenhang zwischen Symptomen und Addition im Kopf). Allerdings werden keine Aussagen über Zusammenhänge von oder Unterschiede zwischen verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen getroffen (Shukitt-Hale et al., 1991).

Die Fähigkeit zu logischem Denken war bei 13 Probanden auf 4300 m (Klimakammer) lediglich am ersten Tag nach Expositionsbeginn eingeschränkt (Crowley et al., 1992). Am zweiten und dritten Tag war dieser Unterschied nicht mehr nachzuweisen. Auf Grund der kurzen Aufenthaltsdauer von 2,5 h pro Tag in dieser Höhe kommen Akklimatisationseffekte als Erklärung nicht in Frage. Eher könnten Lerneffekte die Ursache dafür sein. Bei einem Vergleich der Personen, die Symptome der akuten Höhenkrankheit aufwiesen und denen ohne Beschwerden zeigte sich kein Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Symptomatik.

Im Gegensatz dazu konnten bei Höhen bis 6250 m bei 8, allerdings akklimatisierten Probanden, keine Veränderungen bei Leistungen des logischen Denkens festgestellt werden (Kennedy et al., 1989). Erst ab Höhen über 7000 m waren diese nachzuweisen.

144 Probanden wurden auf verschiedenen Höhen bis zu 3658 m getestet, wobei die Fähigkeit zu logischem Denken nicht signifikant vermindert war (Paul und Fraser, 1994). Zwar zeigte sich ein Leistungstief für die Tests, die auf 2438 m unter Belastung durchgeführt worden waren, jedoch stieg die Leistung demgegenüber auf 3048 und 3658 m wieder an.

Eine weitere Studie mit einer hohen Anzahl an Probanden ($n = 150$) zeigte bis 3660 m (hypobar, Klimakammer) außer einer erhöhten Fehlerhäufigkeit (siehe Kap.3.2.) bei 3660 m keine Verschlechterung der Leistung (Green and Morgan 1985), genauso wenig wie ein Vergleich von 10 akklimatisierten und 10 nicht-akklimatisierten Probanden. Hier waren die mathematischen Tests erst ab 6000 m bei den nicht akklimatisierten Probanden verändert, nicht jedoch bei Bedingungen, die den von uns simulierten entsprechen (Koller et al., 1991).

Auch in einer weiteren Studie unter normobarer Hypoxie von 17 und 13% Sauerstoffgehalt, die während eines mehrtägigen U-Boot-Aufenthalts der Probanden durchgeführt wurde, zeigten mathematische Scores keine Verschlechterung unter 13 und 17% Sauerstoffkonzentration (Knight et al., 1990).

Somit befindet sich die Mehrzahl der Studien in Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen, vor allem mit denen, deren Probandenzahl die Zahl von 5 Teilnehmern übersteigt. Außerdem weisen die Studien, die einen negativen Einfluss des verminderten Sauerstoffpartialdrucks postulieren, Widersprüche auf: zum Teil widersprechen sich Tests, die die gleichen Eigenschaften messen in ihren Aussagen (Addition auf Papier und im Kopf führt in einem Fall zu unterschiedlichen Ergebnissen, im anderen Fall nicht: Shukitt-Hale et al., 1991); teilweise sind die Ergebnisse nicht auf einem hinreichenden Niveau signifikant (Vaernes et al., 1984). Berücksichtigt man zudem, dass weder Aufmerksamkeit/Konzentration (d2-Test) noch neurale Leitungsgeschwindigkeit (repräsentiert im Zahlenverbindungstest), Reaktion oder Motorik nach unseren Ergebnissen beeinträchtigt waren, so erscheint es plausibel, dass auch die Fähigkeit zu logischem Denken nicht betroffen ist. Somit ergeben sich auch hier arbeitsmedizinisch für anspruchsvolle Arbeiten unter Hypoxiebedingungen keine Bedenken.

3.4. Reaktionstest und Determinationstest

Die Ergebnisse zur Reaktionszeit wurden bereits oben diskutiert (IV, 1.), daher soll hier auf die motorischen Teilaspekte dieser Tests eingegangen werden. Vereinzelt wurde in der vorhandenen Literatur von einer Verlangsamung der Motorik berichtet (Vaernes et al., 1984; Fowler und Taylor 1987).

Die motorische Zeit ist die Zeit, die beim Reaktionstest vom Verlassen der Ruheposition des ausführenden Fingers bis zur Berührung der Erfolgstaste vergeht. Diese war unter den verschiedenen Sauerstoffexpositionen jedoch nicht signifikant verlängert ($p = 0,689$). Auch nach körperlicher Belastung unter gleichzeitiger Hypoxie – also einem Zustand, bei dem die Reaktionszeit erhöht war - war die motorische Komponente nicht verändert. Vielmehr zeigte sich eine, wenn auch sehr geringe und nicht signifikante Verkürzung des motorischen Teils der Reaktion. Dies könnte aufgrund einer erhöhten Aktiviertheit und Vigilanz nach mittelschwerer körperlicher Belastung zurückzuführen sein.

Außerdem wurde die motorische Leistung noch beim Determinationstest miterfasst, bei dem die Probanden so viele schnell aufeinander folgende Reize wie möglich innerhalb einer festgelegten Zeitspanne beantworten müssen. Neben der motorischen Leistung ist hier für das Ergebnis auch die Fähigkeit entscheidend, auf Stress durch verschiedene, den Probanden überfordernde Reize, adäquat zu reagieren.

Ein Test, ob sich die Leistung wie beim Reaktionstest nach körperlicher Belastung verändert, zeigte keine Unterschiede zwischen ausgeruhten und vorher belasteten Personen. Allerdings muss bedacht werden, dass der Determinationstest immer ca. 10 Minuten nach dem Reaktionstest stattfand. Es besteht also die Möglichkeit, dass die von der Belastung abhängenden Leistungseinbußen durch eine zwischenzeitlich stattgefunde Erholung nicht mehr nachzuweisen waren.

Auch unter dem Aspekt der reinen motorischen Leistung (ohne die Belastung zu berücksichtigen), waren keine Unterschiede zwischen den Leistungen bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen festzustellen.

Vaernes et al. (1984) beschreiben bei einer Untersuchung an 7 Personen auf 3048 m (genauere Beschreibung: s. S. 54) eine deutliche Verlangsamung der motorischen Geschwindigkeit bei zwei der Versuchspersonen. Diese Unterschiede waren jedoch statistisch nicht signifikant. Die Autoren deuten dies als individuelle Empfindlichkeiten gegenüber Hypoxie. Unserer Meinung nach sind vom Mittelwert abweichende Reaktionszeiten jedoch eher auf eine unterschiedliche Motivation der verschiedenen Probanden im Hinblick auf die zu bewältigende Aufgabe zu betrachten. Einen Hinweis darauf bietet in unserer Studie der große Unterschied zwischen den minimalen und den maximalen Einzelzeiten innerhalb einer Gruppe (z.B. 85 vs. 426

ms oder 500% bei 15,9% Sauerstoffsättigung bei den älteren Probanden). Solche Unterschiede können durch physiologische Ursachen nicht erklärt werden.

Bei einer Studie unter normobarer Hypoxie, bei der 14 Probanden über eine oronasale Maske gerade so viel Sauerstoff zugeführt wurde, dass die Sauerstoffsättigung im Blut der auf 4700 m entsprach, verursachte der Sauerstoffmangel ebenfalls eine Verlangsamung der motorischen Antwort (Fowler und Taylor 1987).

Die Geschwindigkeit, mit der ein Knopf sowohl einhändig als auch beidhändig so schnell und oft wie möglich innerhalb einer bestimmten Zeit gedrückt werden sollte, unterschied sich bis zu einer Sauerstoffmenge, wie sie in der Höhe von 7630 m vorkommt, nicht voneinander. Dies wurde mit 8 Probanden auf verschiedenen Höhen festgestellt (Kennedy et al., 1989).

Unter normobarer Hypoxie von 13, 14 und 15% und einer Versuchsdauer zwischen 11 und 14 Tagen sollten 22 Probanden innerhalb 5 Sekunden eine Taste so oft wie möglich berühren (Gustafsson et al., 1997). Es konnte keine Verlängerung der motorischen Zeiten festgestellt werden. Im Gegenteil waren teilweise sogar Verbesserungen von Normoxie zu Hypoxie zu beobachten, was allerdings auf Lerneffekte zurückgeführt wurde.

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Entwicklung der motorischen Zeiten sind eventuell mit auf unterschiedliche Versuchsbedingungen und Bewertungen zurückzuführen. So stellen Einzelfallbeobachtungen innerhalb einer Probandengruppe eine Beschreibung dar, die jedoch nicht als Beweis für die These dienen kann, dass sich die Reaktionszeit unter Hypoxiebedingungen verlängert (Vaernes et al., 1984). Der Sauerstoffpartialdruck in 4700 m Höhe ist deutlich niedriger als der bei einer Sauerstoffkonzentration von 13,8% (Fowler und Taylor 1987). Aus diesem Grund sind die Ergebnisse dieser Studie nur bedingt mit unserer vergleichbar. Wie die Autoren einer anderen Studie vermuten, könnte es außerdem einen deutlicheren Hypoxieeffekt ab einer Höhe von 4200 m geben, wo der Sauerstoffpartialdruck ebenfalls deutlich unter dem im von uns benutzten Versuchsaufbau liegt (Shukitt-Hale et al., 1997). Andererseits ist auch nicht eindeutig belegt, dass es selbst bei einem Sauerstoffpartialdruck, wie er auf über 7000 m herrscht, einen messbaren Effekt auf die Motorik gibt (Kennedy et al., 1989). Selbst in dieser Höhe waren in einer weiteren Studie keine Hypoxieeffekte messbar.

Eine weitere Studie (Gustafsson et al., 1997) dagegen, durchgeführt unter normobarer Hypoxie, bestätigt unsere Ergebnisse, da auch hier keinerlei Beeinflussung der Motorik bis zu einem Sauerstoffgehalt von 13% (bei Normaldruck) festgestellt werden konnte. Das bedeutet, dass bei Arbeiten in Hypoxie, bei denen motorische Fähigkeiten notwendig sind (z.B. auf Leitern in brandgeschützten Lagern), bei gesunden Personen keine arbeitsmedizinischen Einschränkungen zu sehen sind.

4. Kognitive und psychomotorische Leistung in Abhängigkeit vom Alter

In ausnahmslos allen Tests schnitten die älteren Probanden im Durchschnitt schlechter ab als die jüngeren (s. Tab. III.22.). Dies liegt zum einen an der mit zunehmendem Alter abnehmenden Leistungsfähigkeit in den von uns verwendeten Tests, die man an deren Normtabellen ablesen kann. Zum anderen war bei unserem Kollektiv in der Gruppe der älteren Probanden der durchschnittliche Bildungsstand geringer, so dass sich der Effekt auch über diese Tatsache erklären lässt.

Entscheidend für die Frage, ob sich die Leistungsfähigkeit im Alter unter den Bedingungen der Hypoxie ändert, ist aber der Unterschied innerhalb der Gruppe der älteren Probanden bei den verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen. Hier gab es ebenso wenig Effekte wie in der Gruppe der jüngeren Probanden. Es zeigte sich, dass die älteren Probanden in sauerstoffreduzierter Atmosphäre genauso wenig an geistiger Leistungsfähigkeit einbüßen wie die jüngeren Probanden. Somit spielt das Alter bezüglich der mentalen Leistungen keine Rolle, wenn Menschen den Bedingungen der normobaren Hypoxie ausgesetzt werden. Dies bedeutet, dass das Alter alleine kein Kriterium ist, das in der Arbeitsmedizin über die Einsatzmöglichkeiten von Personen an Hypoxiearbeitsplätzen entscheiden würde.

5. Lernverhalten

Das Lernverhalten spielte in unserer Studie aufgrund der randomisierten Verteilung der Probanden auf die 6 möglichen Abfolgen der Sauerstoffkonzentration keine Rolle: Dennoch soll nochmals erwähnt sein, dass es bei einem Teil der Tests zu

signifikanten Verbesserungen von Tag zu Tag und damit von Test zu Test kam – mit Leistungssteigerungen von bis zu 13,5% von einem Tag auf den anderen.

Der gewählte Versuchsaufbau war also zwingend notwendig, um Effekte der Hypoxie detektieren und diese vom Lernverhalten differenzieren zu können.

6. Schwächen/Grenzen der Arbeit

Eine Schwäche der Studie war, dass die angestrebte Sauerstoffkonzentration nicht in zu jedem Zeitpunkt des Versuchs aufrecht erhalten werden konnte. Wenn zum Beispiel die Türe des Versuchsraums geöffnet werden musste, hatte dies immer einen kurzfristigen Anstieg der Sauerstoffkonzentration um bis zu 2% zur Folge. Die ursprüngliche Sauerstoffkonzentration wurde anschließend jedoch innerhalb weniger Minuten wieder erreicht, so dass der Einfluss dieser Konzentrationserhöhung unserer Meinung nach zu vernachlässigen sein dürfte.

Eine weiterer Schwachpunkt waren durch das Versuchsdesign bedingte, diskrete Hinweise auf die eingestellte Sauerstoffkonzentration im Versuchsraum. Obwohl es für die Probanden diskrete Hinweise darauf gegeben hat, ob sie die Versuche unter Norm- oder Hypoxie (v.a. die Häufigkeit des Geräuschs des einströmenden Stickstoffs), wurde die Sauerstoffkonzentration im Versuchsraum in weniger als der Hälfte der Fälle richtig eingeschätzt. Dies spricht dafür, dass die Verblindung zum einen trotz der Hinweise auf die Sauerstoffkonzentration effektiv war, zum anderen, dass die Auswirkungen im Allgemeinen als nicht allzu gravierend empfunden wurden; d.h. dass die Probanden in der Regel nicht in der Lage waren, anhand von körperlichen Empfindungen die Sauerstoffkonzentration richtig einzuschätzen.

Eine Grenze für die Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit liegt in den verwendeten Tests und ihrer Übertragbarkeit auf die Realität. Erstens haben wir zwar versucht, die relevanten potentiellen Veränderungen der geistigen Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Dennoch gibt es viele Eigenschaften, die die von uns verwendeten Tests nicht überprüfen (Kreativität, mathematisches Denken, etc.). Auch wenn es im Moment keine Hinweise dafür gibt, ist es doch nicht auszuschließen, dass es Bereiche gibt, die sich bei den verwendeten Sauerstoffkonzentrationen verändern. Zweitens ist nicht eindeutig zu belegen, inwiefern die verwendeten Tests (und

psychologische Tests im Allgemeinen) mit den tatsächlichen Leistungen am Arbeitsplatz korrelieren.

Für den gefundenen kombinierten Einfluss von vermindertem Sauerstoff und körperlicher Belastung auf die Reaktionszeit gilt, dass die hier unter Laborbedingungen und extremer Enge des Raumes durchgeführte Untersuchung auch deshalb für die Zukunft der kritischen Überprüfung in der Realität, d.h. an den realen Arbeitsplätzen bedarf, da sie unter schwierigen Randbedingungen durchgeführt wurde, die in der Arbeitswelt nur selten vorkommen. Möglicherweise wurde so ein Effekt der Sauerstoffreduktion eher überschätzt.

7. Stärken der Arbeit

Ein Einfluss von Erwartungshaltungen von Seiten der Probanden oder der Prüfärzte kann durch die doppelte Verblindung minimiert werden. Die statistische Bearbeitung der Daten erfolgte erst, nachdem alle Daten doppelt und nach Plausibilitätsprüfung in die Datenbank eingegeben worden waren. Eine spätere Veränderung der Daten fand nicht statt.

Die Verfälschung der Ergebnisse durch Lerneffekte war durch die Randomisierung der Probanden ausgeschlossen (s. Methoden). Damit sind die gemessenen Effekte tatsächlich Ausdruck der Umgebungsbedingungen und nicht der Redundanz der bearbeiteten Aufgaben.

Ein Nachteil der Studie – nämlich die beengten Untersuchungsbedingungen, die laute Umgebung und die Ablenkung der Probanden durch Mitprobanden – erweist sich bei anderer Betrachtungsweise als Vorteil. Diese Bedingungen können auch als eine Simulation von ungünstigen Bedingungen am Arbeitsplatz gesehen werden. Damit ist eine realitätsnah geprüfte Simulation der Arbeitsplätze und damit eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben.

Die relativ breite Streuung in der Gruppe der älteren Probanden über das gesamte Spektrum der arbeitenden Bevölkerung und das schmale Spektrum der jüngeren Probanden (zur überwiegenden Mehrzahl Studenten) legen in zusammenhängender Betrachtung mit den Ergebnissen einen weiteren Schluss nahe: anscheinend

verändert sich die geistige Leistungsfähigkeit auch nicht dadurch, dass ein unterschiedliches Bildungs- oder Intelligenzniveau vorherrscht.

8. Implikationen für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz

Es lässt sich zusammenfassen, dass es unter den Voraussetzungen von körperlicher Ruhe bis 13 % zu keinen Einschränkungen der geistigen Leistungsfähigkeit gekommen ist. Allerdings gab es Hinweise darauf, dass bei gleichzeitiger körperlicher Belastung, eventuell bedingt durch den Abfall der Sauerstoffkonzentration im Blut, die Reaktionsfähigkeit geringgradig eingeschränkt sein könnte (Zunahme der Reaktionszeit um ca. 5%). Hintergrund der hier beschriebenen Arbeit war die Fragestellung, ob sich durch normobare Hypoxie Einbußen in der kognitiven und psychomotorischen Leistungsfähigkeit und damit Auswirkungen auf die Sicherheit entsprechender Arbeitsplätze ergeben.

Bei Arbeiten ohne körperliche Belastungen kann davon ausgegangen werden, dass sich die geistige Leistungsfähigkeit zumindest für Sauerstoffkonzentrationen von 13 % (auf Meereshöhe) nicht verändert. In diesem Bereich sind somit für Aufenthalte von bis zu zwei Stunden keine Selbst- oder Fremdgefährdungen durch mentale Leistungseinbußen zu erwarten. Somit ist es auch nicht nötig, bestehende Sicherheitsvorschriften zu ändern. Voraussetzung ist allerdings, dass eine potentiell gefährdende Erkrankung der betreffenden Personen vorher durch eine ärztliche Untersuchung ausgeschlossen werden konnte.

Für Arbeiten in Hypoxie mit gleichzeitiger körperlicher Belastung können fehlende kognitive Leistungseinbußen nicht eindeutig angenommen werden. Die von uns dazu durchgeführten Untersuchungen sind mit Sicherheit nicht ausreichend, um über diesen Tatbestand eine endgültige Aussage zu treffen. Dennoch gab es in dem einen von uns untersuchten Bereich – der Reaktionsfähigkeit – Hinweise darauf, dass diese leicht eingeschränkt sein könnte. So gebietet es die Fürsorgepflicht, bei körperlich belastenden Tätigkeiten in Hypoxie besondere, den Umständen angepasste Vorsicht walten zu lassen und geeignete Maßnahmen zur Abwehr potentieller Gefahren für exponierte Personen zu treffen.

Abschließend bleibt zu sagen, dass sich die in dieser Arbeit ausgeführten Ergebnisse vornehmlich auf die kognitive Leistungsfähigkeit und in geringerem Maße auch auf physiologische Grunddaten beziehen. Die Aussage, dass es bei einer Sauerstoffkonzentration von 21 bis 13 % zu keiner Einschränkung der kognitiven Leistungsfähigkeit kommt, gilt für die ersten zwei Stunden des Aufenthaltes in diesen Atmosphären. Wir haben bei dieser Zeitspanne eine an die Arbeitswelt angepasste Verweildauer an nicht permanent besetzten Arbeitsplätzen zugrunde gelegt.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass sich die Ergebnisse auf gesunde oder zumindest asymptomatische Exponierte beziehen. Auf bestimmte Erkrankungen, die durch Vorsorgeuntersuchungen der zukünftig Exponierten im Vorfeld erkannt werden müssen, sind die Aussagen dieser Studie nicht übertragbar.

Auch auf Aussagen zu längeren Aufenthalten als zwei Stunden lassen sich die Ergebnisse also nicht ohne weiteres übertragen, zumal es in anderen Studien Hinweise darauf gibt, dass sich die Leistungen mit zunehmender Aufenthaltsdauer verschlechtern. Außerdem zeigen sich die Auswirkungen der Hypoxie auf die Befindlichkeit in der Regel erst nach einer Expositionsdauer von 6 bis 10 Stunden (Shukitt-Hale et al., 1997; Shukitt-Hale et al., 1991; Forster 2000; Angerer und Nowak 2003).

V. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu untersuchen, ob sich die psychomotorische Leistungsfähigkeit unter vermindertem Sauerstoffgehalt in der Atemluft verändert. Zum Zweck des vorbeugenden Brandschutzes wird in Räumen durch die Zufuhr von Stickstoff die Sauerstoffkonzentration bei unverändertem Luftdruck (normobarer Hypoxie) bis auf 13 Vol% abgesenkt. In den brandgeschützten Räumen arbeiten zeitweise Personen.

Wir untersuchten 89 Personen beiderlei Geschlechts, wovon die Hälfte jünger als 30 Jahre, die andere Hälfte älter als 45 Jahre war. Das Kollektiv sollte so die Extreme der Altersverteilung von beruflich Beschäftigten repräsentieren. Wesentliches Einschlusskriterium in die Studie war, dass in einer definierten Vorsorgeuntersuchung keine schweren kardialen oder pulmonalen Erkrankungen erkannt wurden. In einer Kabine, in der sich die gewünschte Luftsauerstoffkonzentration einstellen ließ, führten wir verschiedene, standardisierte Tests durch. Diese betrafen Gedächtnis, Konzentration, Aufmerksamkeit, Sorgfalt, logisches Denken und Reaktionsfähigkeit. Jeder Teilnehmer bearbeitete die Tests kontinuierlich während 2 Stunden unter drei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen an drei aufeinander folgenden Werktagen: 20,9%, 15,9% sowie 13,8% Sauerstoff. Die Expositionsreihenfolgen wurden so gewechselt, dass jede mögliche Reihenfolge bei gleich vielen Probanden vorkam, um Lerneffekte auszugleichen. Die Expositionen waren weder den Probanden noch den Testleitern bekannt, um Placeboeffekte zu vermeiden.

Zwischen jungen und alten Probanden zeigten sich bei allen untersuchten Parametern signifikante, zum Teil beträchtliche Unterschiede im Leistungsvermögen. Auswirkungen der von uns gewählten Sauerstoffkonzentrationen während körperlicher Ruhe auf Gedächtnis, Aufmerksamkeit, Konzentration, Sorgfalt, logisches Denken, Motorik und Reaktion wurden jedoch in keinem Fall nachgewiesen. Auch bei einer kombinierten Betrachtung der Einflüsse von Sauerstoff und Alter ließen sich keine Hinweise darauf finden, dass das kognitive und

psychomotorische Leistungsvermögen unter Hypoxie bei älteren Personen nachgelassen hätte.

Bei der Reaktionsfähigkeit zeigte sich für die Probanden, die unter Hypoxie von 15,9% direkt zuvor mit 1,0 W/kg KG ergometrisch belastet worden waren im Gegensatz zu Normoxie eine grenzwertig signifikante Verlängerung der Reaktionszeit (Posthoc-Analyse, $p = 0,039$), nicht aber für die Probanden, die den Reaktionstest ausgeruht durchgeführt hatten. Bei 13,8% war dieser Unterschied zu 20,9 Vol% gerade nicht mehr signifikant ($p = 0,052$). Dies lässt sich als ein Hinweis interpretieren, dass unter Hypoxie in Kombination mit körperlicher Anstrengung geringfügige (hier Verlängerung der Reaktionszeit maximal 5%) Auswirkungen auf die Reaktionsfähigkeit vorkommen können. Für eine rasche Erholung der Reaktionszeit spricht, dass die Leistungen im Determinationstest, der direkt auf den Reaktionstest folgte, nach Belastung nicht verändert waren. Für eine Beeinflussung der motorischen Teilleistungen finden sich keine Hinweise, da sich weder die reine motorische Zeit im Reaktionstest noch die Leistungen beim motorikabhängigen Determinationstest änderten. Ob sich auch andere Eigenschaften wie Konzentrationsfähigkeit, Gedächtnis, etc. nach körperlicher Belastung verändert hätten, lässt sich aus unseren Daten nicht beantworten.

Somit kann abschließend gesagt werden, dass normobare Hypoxie nach Beobachtung von klinischem Eindruck, Sauerstoffsättigung, Herzfrequenz und Blutdruck zwar eine deutliche kardiozirkulatorische Beanspruchung hervorruft, diese aber unter den o.g. Voraussetzungen einer ärztlichen Vorsorgeuntersuchung weder zu akuten gesundheitlichen Problemen noch zu einer relevanten Einschränkung der kognitiven und psychomotorischen Leistungsfähigkeit führt. Bei Arbeiten unter Hypoxie und gleichzeitiger körperlicher Belastung kann nach unseren Daten angenommen werden, dass es zu sehr geringfügigen Einschränkungen der Reaktionsfähigkeit kommen kann. Die Ergebnisse der Arbeit lassen den Schluss zu, dass bis zu einer Luftsauerstoffkonzentration von 13% (auf Meereshöhe) eine Beeinträchtigung von Gesundheit und Sicherheit an entsprechenden brandgeschützten Arbeitsplätzen bei Arbeiten bis zu 2 Stunden nicht zu erwarten ist.

VI. Literatur

1. Abraini JH, Bouquet C, Joulia F, Nicolas M, Kriem B (1998) Cognitive performance during a simulated climb of Mount Everest: implications for brain function and central adaptive process under chronic hypoxic stress. *Pflugers Arch* 436:553-559
2. Agostini P, Cattadori G, Guazzi M, Bussotti M, Conca C, Lomanto M, Marenzi G, Guazzi MD (2000) Effects of simulated altitude-induced hypoxia on exercise capacity in patients with chronic heart failure. *Am J Med* 109: 450-455
3. Allemann Y, Saner H, Meier B (1998) Höhenaufenthalte und Flüge bei koronarer Herzkrankheit. *Schweizer Medizinische Wochenschrift*, 128: 671-678
4. Andersson J, Berggren P, Gronkvist M, Magnusson S, Svensson E (2002) Oxygen saturation and cognitive performance. *Psychopharmacology*, 162: 119-128
5. Angerer P, Nowak D (2003) Working in permanent hypoxia for fire protection-impact on health. *Int Arch Occup Environ Health*. 76: 87-102.
6. Banderet LE (1977) Self-rated moods of humans at 4300 m pretreated with placebo or acetazolamid plus staging. *Aviat Space Environ Med* 48: 19-22
7. Banderet LE, Burse RL (1991) Effects of high terrestrial altitude on military performance. In Gal R , Mangelsdorff D, eds. *Handbook of military psychology*. New York, Wiley, 1991: 233-254
8. Boussuges A, Molenat F, Burnet H, Cauchy E, Gardette B, Sainty JM, Jammes Y, Richalet JP (2000) Operation Everest III (Comex '97): Modifications of cardiac functions secondary to altitude-induced hypoxia. *Am J Respir Crit Care Med* 161: 264-270
9. Brickenkamp R (2002) Test d2 Aufmerksamkeits-Belastungs-Test. Hofgreve Verlag. Göttingen: 15 - 60
10. Carson RP, Evans WO, Shields JL, Hennon JP (1969) Symptomatology, pathophysiology and treatment of acute mountain sickness. *Federation proceedings* 1969: 1085-1091

11. Christensen CC, Ryg M, Refvem OK (2000) Development of severe hypoxaemia in chronic obstructive pulmonary disease patients at 2,438 m (8,000 ft) altitude. *The European respiratory journal* 15: 635-63
12. Crowley JS, Wesensten N, Kamimori G, Devine J, Iwanyk E (1992) Effect of high terrestrial altitude and supplemental oxygen on human performance and mood. *Aviat Space Environ Med* 63: 696-701
13. Erdman J, Sun KT, Masar P, Niederhauser HU (1998) Effects of exposure to altitude on men with coronary artery disease and impaired left ventricular function *Am J Cardiol* 1998: 266-270
14. Fischer R, Nowak D, Huber RM (2000) Höhengaufenthalt bei Lungenkrankheiten. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 51: 412-417
15. Forster PJG (1985) Effect of different ascent profiles on performance at 4200 m elevation. *Aviat Space Environ Med* 1985: 758-764
16. Fowler B, Taylor M (1987) The effects of hypoxia on reaction time and movement time components of a perceptual motor task. *Ergonomics* 30: 1475-1485
17. Graham WG, Houston CS (1978) Short-term adaptation to moderate altitude. Patients with chronic obstructive pulmonary disease. *JAMA* 240:1491-1494
18. Green RG, Morgan DR (1985) The effects of mild hypoxia on a logical reasoning task. *Aviat Space Environ Med.* 56: 1004-1008
19. Gustafsson C, Gennser M, Örnhammar H, Derfeldt G (1997) Effects of normobaric hypoxic confinement on visual and motor performance. *Aviat Space Environ Med* 68: 985-992
20. Habler OP, Messmer KF (1997) The physiology of oxygen transport. *Transfus Sci* 18: 425-435
21. Hackett PH, Roach RC (2001) High altitude illness. *N Engl J Med* 2001: 107-114
22. Heller KA, Kratzmeier H, Lengfelder A (1998). *Matrizen-Test-Manual. Band 1.* Beltz-Test GmbH. Göttingen: 28 - 51
23. Herold G (2000) Hämoglobinopathien. In: Herold G, Hrsg. *Innere Medizin.* Köln 2000: 34-37
24. Kennedy RS, Dunlap WP, Banderet LE, Smith MG, Houston CS (1989) Cognitive performance deficit in a simulated climb of Mount Everest: Operation Everest II. *Aviat Space Environ Med.* 60: 99-104

25. Kleinman MT, Leaf DA, Kelly E (1998) Urban angina in the mountains: effects of carbon monoxide hypoxemia on subjects with chronic stable angina. *Arch Environ Health* 1998: 388-397
26. Knight DR, Schlichting CL, Fulco CS (1990) Mental performance during submaximal exercise in 13 and 17% oxygen. *Undersea Biomed Res* 17:223-230
27. Koller EA, Bischoff M, Bühner A, Felder L, Schopen M (1991) Respiratory, circulatory and neuropsychological responses to acute hypoxia in acclimatized and non-acclimatized subjects. *Eur J Appl Physiol* 62: 67-72
28. Lambertsen CJ (1994) Summary of relations, physiologic factors and fire protection and engineering design. Environmental Biochemical Research Data Center (EBRDC). Institute of environmental Medicine. Philadelphia, PA. University of Pennsylvania 1994, Report 4-14-92, 2nd ed.
29. Leifflen D, Poquin D, Savourey G, Barraud PA, Raphel C, Bittel J (1997) Cognitive performance during short acclimation to severe hypoxia. *Aviat Space Environ Med.* 68: 993-997
30. Levine BD, Zuckerman JH, de Filippi C (1997) Effect of high altitude exposure in the elderly. *Circulation* 96: 1224-1232
31. Li XY, Wu XY, Fu C, Shen XF, Yang CB, Wu YH (2000) Effects of acute exposure to mild or moderate hypoxia on human psychomotor performance and visual reaction-time. *Space Med Med Eng* 13: 235-239
32. Linde L, Gustafsson C, Ornhaugen H (1997) Effects of reduced oxygen partial pressure on cognitive performance in confined spaces. *Mil Psychol* 9: 151-168
33. McCarthy D, Corban R, Legg S, Faris J (1995) Effects of mild hypoxia on perceptual-motor performance: a signal-detection approach. *Ergonomics* 38: 1979-1992
34. Montgomery AB, Mills J, Luce JM (1989) Incidence of acute mountain sickness at intermediate altitude. *Jama* 261:732-734
35. Morgan BJ, Alexander JK, Nicoli SA (1990) The patient with coronary heart disease at altitude: observations during acute exposure to 3100 m. *J Wilderness Med* 1990: 147-153
36. Oswald WD, Roth E (1998) Der Zahlen-Verbindungs-Test – Ein sprachfreier Intelligenz-Test zur Messung der “kognitiven Leitungsgeschwindigkeit“. Hofgreve Verlag Göttingen. 43 - 55

37. Paul MA, Fraser WD (1994) Performance during mild acute hypoxia. *Aviat Space Environ Med.* 65: 891-899
38. Reeves JT, Moore LG, McCullough RG, Harrison G, Tranmer BI, Micco AJ, Tucker A, Weil JV (1985) Headache at high altitude is not related to internal carotid arterial blood velocity. *J Appl Physiol.* 1985: 909-915
39. Regard M, Oelz O, Brugger P, Landis T (1989) Persistent cognitive impairment in climbers after repeated exposure to extreme altitudes. *Neurology* 39: 210-223
40. Renzetti AD, Clement BD (1966) The veteran's administration cooperative study of pulmonary function. *Am J Med* 41: 115-139
41. Roach RC, Bärtsch P, Oelz O, Hackett PH (1993) Lake Louise AMS Scoring Consensus Committee. The Lake Louise acute mountain sickness scoring system. In: Sutton JR, Houston CS, Coates G, eds. *Hypoxia and molecular medicine*. Burlington, Vt.: Charles S. Houston, 1993: 272-274
42. Savourey G, Launay JC, Besnard Y, Guinet A, Travers S (2003) Normo- and hypobaric hypoxia: are there any physiological differences? *Eur J Appl Physiol* 89: 122-126
43. Schoene RB (1999) Lung disease at high altitude. In: Roach RC et al., eds. *Into the next millennium*. Kluwer Academic/Plenum Publishing, New York 1999: 47-55
44. Scholey AB, Moss MC, Wesnes K (1998) Oxygen and cognitive performance: the temporal relationship between hyperoxia and enhanced memory. *Psychopharmacology* 140: 123-126
45. Scholey AB, Moss MC, Neave N, Wesnes K (1999) Cognitive performance, hyperoxia, and heart rate following oxygen administration in healthy young adults. *Physiol Behav* 67: 783 – 789
46. Shukitt B, Banderet LE (1988) Mood states at 1600 and 4300 meters terrestrial altitude. *Aviat Space Environ Med* 59: 530-532
47. Shukitt-Hale B, Banderet LE, Lieberman HR (1991) Relationships between symptoms, moods, performance, and acute mountain sickness at 4700 meters. *Aviat Space Environ Med.* 1991: 865-869
48. Shukitt-Hale B, Banderet LE, Lieberman HR (1997) Elevation-dependent symptom, mood, and performance changes produced by exposure to hypobaric hypoxia. *Int J Aviat Psychol* 8: 319-334

49. Stamford BA (1988) Exercise and the elderly. *Exerc Sports Sci Rev* 16: 341-379
50. Tucker A, Stager JM, Cordain L (1984) Arterial O₂ Saturation and maximum O₂ consumption in moderate-altitude runners exposed to sea level and 3050 m. *JAMA* 252: 2867 – 2871
51. Vaernes RJ, Owe JO, Myking O (1984) Central nervous reactions to a 6.5-hour altitude exposure at 3048 m. *Aviat Space Environ Med* 55: 921-926
52. Ward PW, J.S. M, West JB (2000) High altitude medicine and physiology. Arnold. London.
53. Valentin H, Lehnert G, Petry H, Rutenfranz J, Stalder K, Wittgens H, Voitowitz HJ (1985) Arbeitspsychologie In: *Arbeitsmedizin. Band 1: Arbeitsphysiologie und Hygiene*. Georg Thieme Verlag Stuttgart 1985: 145-170

Danksagung

Meinen Dank möchte ich den beteiligten Personen ausdrücken, ohne die die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre:

Herrn PD Dr. Angerer für die zu jeder Zeit hervorragende Betreuung und das Engagement bei allen auftretenden Problemen sowie die aktive Unterstützung zu jeder Zeit.

Herrn Prof. Dr. Nowak für die vielen guten Ideen, die kritische Begleitung und die Großzügigkeit bei der Finanzierung der Unkosten.

Herrn Dr. Wittmann für die eingebrachten Erfahrungen in der Versuchsplanung, die kenntnisreichen Hinweise bei der statistischen Auswertung und die Hilfe bei der Bereitstellung von Informationsmaterial.

Frau Delamotte für die Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft bei der Untersuchung der Probanden und der Auswertung der Ergebnisse.

Herrn Gerhardinger und Frau Meyer für viele Unterbrechungen ihrer Arbeit, um bei den Voruntersuchungen der Probanden mitzuwirken.

Frau Jerkic für die freundliche Unterstützung bei organisatorischen Angelegenheiten.

Frau PD Dr. Radon, Herrn Prof. Dr. Engel und Herrn Wiseman für die Unterstützung mit ihrer Sachkenntnis bei für mich alleine nicht zu bewältigenden Problemen.

Der Fa. Wagner[®] für die kostenlose Bereitstellung der Untersuchungskabine und speziell Herrn Dupier für kurzfristige Hilfseinsätze.

Und nicht zuletzt meinen Eltern, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit immer unterstützt haben.

LEBENS LAUF

Angaben zur Person:

Name/Adresse: Andreas Prechtl
 Metzstr. 43 a
 81667 München

Geburtsdatum: 9.2.1970

Geburtsort: München

Schulbildung:

9/76 – 7/80: Grundschule Weßling

9/80 – 6/89: Gymnasium Gilching und Waiblingen (Baden-Württemberg)

24.6.89: Abitur (Gymnasium Gilching)

Zivildienst:

7/89 – 9/90 Rettungssanitäter beim Malteser Hilfsdienst München

Sonstiges:

10/90 – 3/91: Sprachreise nach Südamerika

Berufsausbildung:

3/91 – 3/97: Studium der Humanmedizin an der Justus-Liebig-Universität
 Gießen

4/97 – 4/98: Praktisches Jahr an der Ludwig-Maximilians-Universität
 München:

13.5.98: Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

10/98 – 3/99: Arzt im Praktikum in der Allgemein Chirurgie des
 Rotkreuzkrankenhauses München

4/99 – 9/00: Arzt im Praktikum und Assistenzarzt in der Kardiologie des
 Krankenhauses Freising

10/00 – 12/01: Assistenzarzt in der Allgemeinmedizinpraxis Drs. Minzlaff /
 Mayer-Voigt in Wolfratshausen

1/02 – 12/02: Beginn der Facharztausbildung Arbeitsmedizin bei D.I.B. in
 München/Ottobrunn

1/03 – 7/03: Praktischer Teil der Dissertation an der LMU München – Institut
 für Arbeits- und Umweltmedizin bei PD Dr. med. Peter Angerer

08.05.03 Facharztprüfung Allgemeinmedizin

Seit 8/03: Assistenzarzt Arbeitsmedizin AMD TÜV GmbH, München